

军用火工品设计技术

Design of Initiators and Pyrotechnics
for Weapon Systems

王凯民 温玉全 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

军用火工品设计技术/王凯民,温玉全编著. —北京:
国防工业出版社,2006.1

ISBN 7-118-04105-X

I. 军... II. ①王... ②温... III. 火工品—设计
IV. TJ450.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 091649 号

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 11 $\frac{7}{8}$ 300 千字

2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月北京第 1 次印刷

印数:1—1500 册 定价:38.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金
第五届评审委员会组成人员

主 任 委 员	刘成海				
副 主 任 委 员	王 峰	张涵信	张又栋		
秘 书 长	张又栋				
副 秘 书 长	彭华良	蔡 镭			
委 员	于景元	王小谟	甘茂治	刘世参	
(按姓名笔画排序)	杨星豪	李德毅	吴有生	何新贵	
	佟玉民	宋家树	张立同	张鸿元	
	陈冀胜	周一宇	赵凤起	侯正明	
	常显奇	崔尔杰	韩祖南	傅惠民	
	舒长胜				

前 言

火工品是一切爆炸装置中不可缺少的关键部件,其种类繁多,在常规武器弹药、战略导弹、核武器及航空航天系统等军事工程中广泛应用。作为小型化的敏感的爆炸能源,火工品既是武器和爆炸系统完成预定功能的“源”,同时往往又是这些系统可能发生意外爆炸、造成人身伤亡事故的“根”,因此,对火工品的安全性和可靠性有很高的要求,这就需要火工品从设计上能予以保证。

由于火工品内部装药的爆炸或燃烧反应速度极快,且处于非稳定状态,所以,尽管有基础理论的指导,但火工品的设计主要还是依靠经验或半经验进行,最终通过实验确定。这样,对过去设计经验的系统总结就显得极为重要了。近 20 年来,在各类武器发展的需求牵引下,火工品技术取得了长足的进步,各类新产品层出不穷,应用也更加广泛。所以,火工品的设计内容亟待充实,以适应火工品行业的新发展,满足科研人员对新产品设计信息的需求,推动使用人员对新火工品的了解。

与已经出版的一些火工品专著相比,本书的特色在于重点突出火工品的设计,并兼顾理论分析和实际应用。在编写过程中,除吸收作者十余年的研究成果外,还广泛收集了国内外火工品领域的文献资料,尤其是国内同行的工作,力求能反映出火工品的最新发展。但由于各种可以理解的原因,在公开的许多文献资料中有关设计的内容较少,从而给全书的完成带来诸多困难,作者的很多时间都花费在对资料信息的分析研究上。可以说,现在完成的内容已经最大可能地为火工品科研与教学人员提供了多种产品的设计信息,为弹药引信及各类武器设计者使用新火工品提供了一些

参考。

全书共分 8 章。第 1 章为火工品绪论,主要包括火工品在武器系统中的地位与作用、设计研制程序及火工品文献收集等;第 2 章为常用火工药剂及性能,主要介绍了常用火工药剂感度、输出及其他性能;第 3 章至第 7 章分别详细论述了针刺火工品、电火工品、航天火工品及爆炸序列等 4 类火工品的设计与应用;第 8 章则对最新发展的火工品系列技术进行了设计介绍。为便于读者进一步查阅原始资料,本书在相关位置均详细注明了出处,且已对原文中的符号及单位进行了统一,阅读时请予注意。

本书由王凯民、温玉全编著,参加审阅工作的有徐振相教授(第 1 章~第 8 章)、蔡瑞娇教授(第 1 章~第 4 章)和龚翔研究员(第 6 章),他们提出了许多宝贵的建议。为了使设计介绍不陷入空泛,本书参考和引用了国内外文献资料上的部分产品设计实例和试验数据,所以,本书是各火工品厂(所)同行们智慧和辛勤工作的结晶,在此向原作者及原编者表示衷心感谢,同时感谢炮研所各级首长的支持和鼓励。最后,限于作者水平,错误之处,望读者指正。

作 者

2005 年 5 月于北京

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 火工品在武器系统中的地位与作用	1
1.2 火工品的分类	2
1.3 武器系统用火工品新的技术使命	3
1.4 武器系统用火工品的设计与研制	5
1.4.1 设计原则	5
1.4.2 设计要求	6
1.4.3 研制程序	7
1.5 火工品文献的收集	8
参考文献	9
第 2 章 常用火工药剂及性能	10
2.1 火工药剂的感度与输出	10
2.1.1 火工药剂的分类	10
2.1.2 火工药剂的感度	11
2.1.3 火工药剂的爆炸作用与输出	14
2.2 常用火工药剂的使用性能	15
2.2.1 常用起爆药的性能	15
2.2.2 常用猛炸药的性能	18
2.2.3 常用混合药的性能	19
参考文献	25
第 3 章 针刺火工品设计技术	26
3.1 概述	26
3.1.1 针刺雷管基本结构与性能影响因素	26
3.1.2 针刺雷管一般设计原则	29

3.2	高感度针刺雷管设计	30
3.2.1	敏感针刺药设计	30
3.2.2	结构设计和装药工艺	33
3.2.3	高感度针刺雷管感度试验方法	36
3.3	针刺延期雷管设计与应用	38
3.3.1	针刺延期雷管基本结构及性能影响因素	39
3.3.2	复杂装药型针刺延期雷管设计	43
3.3.3	简单装药型针刺延期雷管设计	49
3.4	组合式针刺火工品设计与应用	54
3.4.1	一入一出组合点火管设计	54
3.4.2	一入二出双延期组合管设计	59
3.5	实际使用中的针刺火工品性能	61
3.5.1	击针动态能量对针刺雷管感度的影响	61
3.5.2	击针戳击能量和深度对雷管延期时间的影响	65
3.5.3	高过载对针刺火工品性能的影响	67
3.6	针刺雷管通用要求与系列化设计	68
3.6.1	针刺雷管尺寸系列	68
3.6.2	针刺雷管输入能量系列化设计	69
3.6.3	针刺雷管通用要求	70
	参考文献	71
第4章	桥丝式电火工品设计原理	73
4.1	桥丝式电火工品发火原理与基本要求	73
4.1.1	桥丝式电火工品发火原理	73
4.1.2	桥丝式电火工品基本要求	77
4.2	电火工品作用性能影响因素	77
4.2.1	桥丝对电火工品作用性能的影响研究	78
4.2.2	其他因素对电雷管作用性能的影响	82
4.3	静电对电火工品的危害	83
4.3.1	静电的产生及其对电火工品安全性的影响	83
4.3.2	静电对电火工品可靠性的影响	86
4.4	电火工品防静电技术	88
4.4.1	电火工品防静电设计技术	89

4.4.2 一些产品防静电技术举例	94
4.5 射频对电火工品的危害	98
4.5.1 射频的产生及对电火工品的危害机理	98
4.5.2 射频对电火工品可靠性的影响	102
4.5.3 射频对电火工品安全性的影响	104
4.5.4 电火工品电磁危害最坏情况分析	107
4.6 电火工品防射频技术	110
4.6.1 电火工品射频钝感化技术	111
4.6.2 低通滤波器衰减射频能量技术	114
参考文献	117
第5章 桥丝式电火工品设计技术	119
5.1 概述	119
5.1.1 桥丝式电火工品分类	119
5.1.2 桥丝式电火工品一般设计原则	119
5.2 敏感桥丝电雷管设计	120
5.2.1 桥丝选择与焊桥工艺	120
5.2.2 药剂选择和装药工艺	122
5.2.3 结构设计与防静电技术	124
5.3 导弹引信用电雷管设计	126
5.3.1 次钝感电雷管设计	126
5.3.2 延期电雷管设计	130
5.3.3 钝感电雷管设计	133
5.4 桥丝式电点火管(器)设计	136
5.4.1 桥丝式电点火管设计	136
5.4.2 次钝感电点火器设计	141
5.4.3 耐高温钝感电点火器设计	146
5.4.4 其他钝感电点火器设计	151
5.5 武器发射用电火工品设计	154
5.5.1 电点火具设计概述	154
5.5.2 典型电点火具设计	157
5.5.3 电底火设计	161
5.6 电火工品应用失效分析与重新设计	165

5.6.1	输入能量过大引起的电火工品作用失效	165
5.6.2	高温高湿环境引起的电火工品作用失效	168
5.7	电火工品通用要求与系列化设计	170
5.7.1	电雷管系列化设计	170
5.7.2	直流发火电火工品输入能量系列化设计	172
5.7.3	电火工品通用要求	173
	参考文献	175
第 6 章	航天火工品设计技术	177
6.1	概述	177
6.1.1	非电传爆系统组成及特点	178
6.1.2	航天火工装置分类	179
6.1.3	航天火工装置基本要求	180
6.2	火工系统首发元件设计	182
6.2.1	NASA 标准起爆器/雷管设计	182
6.2.2	爆炸桥丝起爆器设计	184
6.2.3	电爆管及压力药筒设计	187
6.3	火工传爆元件设计	189
6.3.1	限制性导爆索设计	189
6.3.2	延期索及延期雷管设计	195
6.4	隔板起爆器设计	199
6.4.1	隔板起爆器设计技术	199
6.4.2	无起爆药隔板点火器设计	205
6.4.3	隔板延期起爆(点火)器设计	210
6.5	点式分离类火工装置设计	214
6.5.1	爆炸螺栓及螺母设计	215
6.5.2	隔板式无污染爆炸螺栓设计	217
6.5.3	分离螺栓设计	220
6.6	线型分离类火工装置设计	225
6.6.1	聚能切割索设计	226
6.6.2	膨胀管分离装置设计	228
6.7	活塞式作动装置设计	233
6.7.1	活塞式推冲器设计	233

6.7.2 活塞式拔销器设计	236
6.8 非电传爆系统设计与应用	238
6.8.1 非电传爆系统连接设计	239
6.8.2 非电传爆系统应用介绍	242
参考文献	246
第7章 爆炸序列设计技术	249
7.1 概述	249
7.1.1 典型引信传爆序列设计分析	249
7.1.2 引信传爆序列设计要求与内容	253
7.2 雷管—雷管界面传爆设计	254
7.2.1 雷管—直通通道—雷管传爆设计	254
7.2.2 雷管—弯曲通道—延期雷管传爆设计	259
7.3 传爆序列扩爆元件设计	260
7.3.1 传爆药设计	261
7.3.2 传(导)爆管设计	263
7.4 传爆序列扩爆界面设计	266
7.4.1 输出破片能量传递设计	267
7.4.2 高效率爆轰传递的传爆药结构设计	274
7.5 传爆序列安全性设计	276
7.5.1 传爆序列隔爆计算	277
7.5.2 传爆序列隔爆工程设计	280
7.6 传爆序列界面传爆性能评估	282
7.6.1 变组分法评定传爆序列界面传爆性能	282
7.6.2 裕度法评估传爆序列界面传爆性能	285
7.7 传火序列安全性设计	287
7.7.1 火炮传火序列基本结构与要求	288
7.7.2 火炮装药中心点火管设计	289
7.7.3 火炮装药中心点火的新概念技术	293
7.7.4 导弹传火序列安全性设计	299
参考文献	300
第8章 新型火工品设计技术	303
8.1 半导体桥起爆点火技术	303

8.1.1	半导体桥火工品结构与特点	303
8.1.2	半导体桥火工品设计	305
8.1.3	半导体桥火工品应用	307
8.2	直列式爆炸箔起爆点火技术	311
8.2.1	直列式爆炸箔起爆系统组成	311
8.2.2	冲击片雷管设计	314
8.2.3	直列式点火技术与冲击片点火管设计	318
8.3	激光点火与起爆技术	321
8.3.1	激光点火技术及其系统组成	321
8.3.2	激光点火器设计	325
8.3.3	激光点火系统参数对点火特性的影响	329
8.3.4	激光起爆技术	332
8.4	爆炸网络设计技术	339
8.4.1	爆炸网络概述	339
8.4.2	爆炸逻辑网络设计技术基础	340
8.4.3	爆炸逻辑网络组网及模块化设计	344
8.4.4	面中心同步起爆网络设计	347
8.4.5	中心式直线同步起爆网络设计	350
8.5	MEMS 火工技术介绍	352
8.5.1	MEMS 火工技术概念及应用	352
8.5.2	MEMS 火工品在研产品介绍	352
	参考文献	354

Contents

Chapter 1	Introduction of Initiators & Pyrotechnics(IP)	1
1.1	Action and Status of IP in Weapon Systems	1
1.2	Classification of IP	2
1.3	New Roles of IP in Weapon Systems	3
1.4	Design and Development of IP	5
1.4.1	Design Principle of IP	5
1.4.2	Design Requirement of IP	6
1.4.3	Design Procedure of IP	7
1.5	Searching of Technical Papers on IP	8
	References	9
Chapter 2	Properties and Uses of Explosives in IP	10
2.1	Sensitivity and Output of Explosive in IP	10
2.1.1	Classification of Explosive in IP	10
2.1.2	Sensitivity of Explosive in IP	11
2.1.3	Explosion Output of Explosive in IP	14
2.2	Properties and Uses of Explosive in IP	15
2.2.1	Properties of Priming Materials	15
2.2.2	Properties of Secondary Explosives	18
2.2.3	Properties of Mix Composition	19
	References	25
Chapter 3	Designing Technology OF Stab Detonator(SD)	
	IN Fuzes	26
3.1	Introduction of SD	26

3.1.1	Structure and the Factors to Affect Input/Output of SD	...	26
3.1.2	Design Principle of SD	.....	29
3.2	Design of High Sensitivity SD	.....	30
3.2.1	Design of Sensitive Stab Powder	.....	30
3.2.2	Composition and Charge Technology	.....	33
3.2.3	Test Method for High Sensitivity SD	.....	36
3.3	Design of Time Delay SD	.....	38
3.3.1	Structure and Factors to Affect Input/Output of Time Delay SD	.....	39
3.3.2	Design of Time Delay SD with Complicated Charge	.....	43
3.3.3	Design of Time Delay SD with Simple Charge	.....	49
3.4	Design and Application of Flexible SD	.....	54
3.4.1	Design of One-input /One-output Flexible SD	.....	54
3.4.2	Design of One-input Two-output Flexible SD	.....	59
3.5	Input/Output of SD Uses in Real Fuzes	.....	61
3.5.1	Dynamic Energy of the Stab Firing Pin to Affect Sensitivity of SD	.....	61
3.5.2	Stab Energy and Depth of Firing Pin to Affect Time of Time Delay SD	.....	65
3.5.3	High Overload to Affect Input /Output of SD	.....	67
3.6	General Requirement and Serialize Design of SD	...	68
3.6.1	Size Serialize Design of SD	.....	68
3.6.2	Input Energy Serialize Design of SD	.....	69
3.6.3	General Technical Requirement of SD	.....	70
	References	.....	71
Chapter 4 Designing Principle of Electric Hot Wire			
	Initiating Devices(EHWID)	.....	73
4.1	Initiation Mechanism and General Requirement of EHWID	.....	73
4.1.1	Initiation Mechanism of EHWID	.....	73
4.1.2	General Requirement of EHWID	.....	77

4.2	The Analysis of the Factors to Affect Input/Output of EHWID	77
4.2.1	Effect of Hot Wire on Input/Output of EHWID	78
4.2.2	Effect of Others Factors on Input/Output of EHWID ...	82
4.3	Static Electricity Hazards of EHWID	83
4.3.1	Effect of Static Electricity on the Safety of EHWID	83
4.3.2	Effect of Static Electricity on the Reliability of EHWID ...	86
4.4	Electrostatic Protection Technology of EHWID	88
4.4.1	Design of Protecting Static Electricity	89
4.4.2	Application Example of Electrostatic Protection for Some Products	94
4.5	Radio-Frequency Hazards of EHWID	98
4.5.1	Radio-frequency Hazards Mechanism	98
4.5.2	Effect of Radio-frequency on the Safety of EHWID	102
4.5.3	Effect of Radio-frequency on the Reliability of EHWID	104
4.5.4	The Worse Case Electromagnetic Hazards Analysis of EHWID	107
4.6	Radio-frequency Protection Technology of EHWID	110
4.6.1	Design of Protecting Radio-frequency	111
4.6.2	Application of Radio-frequency Attenuator	114
	References	117
Chapter 5	Designing Technology of EHWID	119
5.1	Introduction of EHWID	119
5.1.1	Classification of EHWID	119
5.1.2	Design Principle of EHWID	119
5.2	Design of High Sensitivity Electric Detonator	120
5.2.1	Design of Hot Bridge Wire and Welding Technique	120
5.2.2	Composition and Charge Technology	122
5.2.3	Design of Structure and Electrostatic Protection	124

5.3	Design of Electric Detonator Uses in Missile	
	Fuzes	126
5.3.1	Design of Non-insensitivity Electric Detonator	126
5.3.2	Design of Time Delay Electric Detonator	130
5.3.3	Design of Insensitivity Electric Detonator	133
5.4	Design of Electric Hot Wire Igniter/Initiator	136
5.4.1	Design of Electric Hot Wire Igniter	136
5.4.2	Design of Non-insensitivity Electric Hot Wire Initiator	141
5.4.3	Design of Insensitivity Electric Hot Wire Initiator with Heat-resisting	146
5.4.4	Design of Others Insensitivity Electric Hot Wire Initiator	151
5.5	Design of Electric Initiator/Primer for Launch	154
5.5.1	Summery of Designing Electric Initiator	154
5.5.2	Design of Some Typical Electric Initiator	157
5.5.3	Design of Electric Primer	161
5.6	Failure Analysis and Redesign of EHWID	165
5.6.1	Failure Induced by Overlarge Input Energy of EHWID	165
5.6.2	Failure Induced by High Temperature-humidity Environments	168
5.7	General Requirement and Serialize Design of EHWID	170
5.7.1	Serialize Design of Electric Detonator	170
5.7.2	Input Energy Serialize Design of EHWID Fired by Direct Current	172
5.7.3	General Technical Requirement of EHWID	173
	References	175
Chapter 6	Designing Technology of Pyrotechnics for Aerospace	177
6.1	Introduction of Pyrotechnics for Aerospace	

Systems	177
6.1.1 Structure and Properties of Non-electric Pyrotechnics System (NEPS)for Aerospace	178
6.1.2 Classification of Pyrotechnics for Space Systems	179
6.1.3 Basic Requirement of Pyrotechnics for Space Systems	180
6.2 Design of First Fired EHWID for Non-electric Pyrotechnics System	182
6.2.1 Design of NASA Standard Initiator and Detonator	182
6.2.2 Design of Electric Exploding Bridgewire Initiator	184
6.2.3 Design of Electric Squib and Cartridge	187
6.3 Design of Transferring Detonation Devices for Non- electric Pyrotechnics System	189
6.3.1 Design of Confined Detonating Fuse(CDF)	189
6.3.2 Design of Time Delay Fuse and Detonator	195
6.4 Design of Through-bulkhead Initiator(TBI)	199
6.4.1 Design Technology of TBI	199
6.4.2 Design of Through-bulkhead Igniter with Non-primary Explosive	205
6.4.3 Design of Through-bulkhead Igniter with Time Delay	210
6.5 Design of Pyrotechnics for Point Separation	214
6.5.1 Design of Explosive Bolt and Nut	215
6.5.2 Design of Through-bulkhead Explosive Bolt	217
6.5.3 Design of Separation Explosive Bolt	220
6.6 Design of Pyrotechnics for Linear Separation	225
6.6.1 Design of Flexible Linear Shaped Charge(FLSC)	226
6.6.2 Design of Expansion Tube Separating Device	228
6.7 Design of Actuated Devices with Piston	233
6.7.1 Design of the Thruster	233
6.7.2 Design of the Pin Puller	236
6.8 Design and Application of Non-electric Pyrotechnics	

- System (NEPS)for Aerospace 238
- 6. 8. 1 Link Design in NEPS 239
- 6. 8. 2 Application of NEPS 242
- References 246
- Chapter 7 Designing Technology of the Explosive Train**
- and Ignite Train 249**
- 7. 1 Introduction of the Explosive Train 249
- 7. 1. 1 The Design of Explosive Train in Typical Fuzes 249

7.1.2	The Main Content of Designing Explosive Train in Fuzes	253
7.2	The Interface Design of Detonation Transfer between Detonator and Detonator	254
7.2.1	The Interface Design of Detonation Transfer with a Straight Tube	254
7.2.2	The Interface Design of Detonation Transfer with a Non-straight Tube	259
7.3	Design of Booster Component in Fuzes	260
7.3.1	General Requirement of Booster Explosives	261
7.3.2	Design of Booster and Lead in Fuzes	263
7.4	The Interface Design of Detonation Transfer between Detonator and Booster	266
7.4.1	Design of Covered Explosive by Flyer Plate Impact across an Air Gap	267
7.4.2	Structural Design of Booster to Effective Transfer Detonation	274
7.5	Design of Safety in Explosive Train and Ignite Train	276
7.5.1	Analysis and Computing of Interrupter in Explosive Train	277
7.5.2	Engineering Design of Interrupting Angle in Explosive Train	280
7.6	Methods for Determining Detonation Transfer Probability of Interfaces	282
7.6.1	Varicomp to Determine of Detonation Transfer Probability in Explosive Trains	282
7.6.2	Margin Method to Determine of Detonation Transfer Probability in Explosive Trains	285
7.7	Design of Safety in Ignite Train	287
7.7.1	Classification and Requirement of Ignite Train for Guns ...	288

7.7.2	Design of Center-core Igniter for Guns	289
7.7.3	Design of New Concept Ignition Systems for Guns	293
7.7.4	Design of Safety in Ignite Train for Missiles	299
	References	300
Chapter 8	Designing of New Initiating Technology	303
8.1	Design of Semiconductor Bridge Initiator (SCI) ...	303
8.1.1	Structure and Features of SCI	303
8.1.2	Design of SCI	305
8.1.3	Application of SCI	307
8.2	Design of Exploding Foil Initiating and Igniting System	311
8.2.1	Structural Design of Exploding Foil Initiating System	311
8.2.2	Design of Exploding Foil Initiator	314
8.2.3	Design of Exploding Foil Igniting System and Slapper Igniter	318
8.3	Design of Laser Igniting and Initiating System	321
8.3.1	Structural Design of Laser Igniting System	321
8.3.2	Design of Laser Igniter	325
8.3.3	Effect of Parameters of Laser System on the Reliability of Igniting	329
8.3.4	Design of Laser Detonator	332
8.4	Design of Explosive Network	339
8.4.1	Summery of Explosive Network	339
8.4.2	Technology Bases of Designing Explosive Logic Network	340
8.4.3	Modularize Design of Explosive Logic Network	344
8.4.4	Design of Synchronous Explosive Circuits with a Input Point in Planar Center	347
8.4.5	Design of Synchronous Explosive Circuits with a Input Point in Linear Center	350
8.5	Instruction of Micro-electromechanical Initiating	

System	352
8.5.1 Concept and Application of Micro-electromechanical Initiating System	352
8.5.2 Instruction of Some Micro-electromechanical Initiating Products	352
References	354

第 1 章 绪 论

1.1 火工品在武器系统中的地位与作用

火工品是装有火药或炸药,受外界较小能量刺激后产生燃烧或爆炸,用以引燃火药、引爆炸药、做机械功等预定功能的一次性使用的元件或装置的总称。其中,“较小”的含义表示了火工品的初始启动特点,而“预定”的含义则表示火工品的作用目的。军用火工品是指用于通用弹药、战略战术导弹、核武器及航空航天器等武器系统的火工品,其基本要求是:第一,安全性,即保证武器系统在储存、装卸、运输及发射或布设时的安全;第二,可靠性,即在实际使用中使武器系统可靠作用,完成预定功能。上述基本要求是火工品适配武器系统的保证。从武器发射、飞行姿态调整到对目标的毁伤作用都离不开火工品的作用。具体来说,火工品在武器系统中的功能主要有^[1]:

(1)用于武器系统的点火、传火、延期及其控制系统,保证武器的发射、运载等系统安全、可靠地运行。

(2)用于武器系统的起爆、传爆及其控制系统,以控制战斗部的作用,实现对敌目标的毁伤。

(3)用于武器系统的推、拉、切割、分离、抛撒和姿态控制等做功序列及其控制系统,使武器系统实现自身调整或状态转换与安全控制。

以上功能对武器系统的最终效能均构成决定性的影响,同时也决定了火工品的特征为:

(1)功能首发性。以武器系统的爆轰、燃烧为例,爆轰的产生

是依靠雷管爆炸为始发能源,而燃烧的产生则依靠点火器的点火为始发能源。

(2)作用敏感性。火工药剂是武器系统所用药剂感度最高者,如在爆炸序列中以感度从高到低排序是起爆药、传爆药、主装药,而在点、传火序列中感度从高到低依次为点火药、延期药、发射药或推进剂。

(3)使用广泛性。按照用途划分,火工品有:航空航天系统用火工品、常规武器弹药系统用火工品、特种用途用火工品等。

火工品是起爆与点火的最敏感的始发能源,其功能首发性和作用敏感性决定了它在武器系统中的地位和作用。由于火工品是武器系统中的最敏感部分,因此它的安全性、可靠性直接影响武器系统的安全性、可靠性。由于火工品质量问题而导致弹药成批报废的现象屡见不鲜。另外,据统计,从 1964 年到 1987 年,美国仅在航天方面由于火工品失效引起的事故就达 84 起,其中最为典型的是 1964 年 Delta(德尔塔)固体火箭发动机电点火具被数千伏静电击穿发生意外爆炸,损失惨重^[2]。我国也曾发生许多因火工品意外发火造成的重大事故。如某型号火箭弹曾因静电导致火工品意外作用而造成发射事故;某型号导弹曾因运输过程中受到雷达照射而发生意外点火事故;某型号航弹也曾发生膛炸,并造成机毁人亡的重大事故。因此,火工品在武器系统中具有重要的地位和作用。

1.2 火工品的分类

火工品种类繁多,功能不一,可按输入、输出、结构、用途等多种方式进行分类,这些分类相互交错,各有其适用范围。按输入的性质可分为:针刺、撞击、火焰、电能、光能、冲击波等类别;按输出的性质可分为:引燃火工品(火帽、底火、引火头、点火具、导火索)、引爆火工品(雷管、导爆管、传爆管)、时间类火工品(延期管、时间药盘)和其他火工品(曳光管、抛放弹、气体发生器)等 4 大类;按用

途可分为弹箭用、导弹用、航天器用、工程爆破用、特殊用途等^[3]。

在国家军用标准(GJB347—87)中,按输出特性和用途相结合的原则,将火工品具体细分为 14 类:火帽、点火头、点火管、底火、点火具、传火具、索类、延期件、雷管、传爆管、曳光管、作动器、压力药筒、爆炸螺栓^[4]。为叙述方便,根据应用与输入特性相结合的原则,本文从引信用针刺火工品、桥丝式电火工品、航天火工品、爆炸序列及新型火工品技术等 5 个方面重点介绍军用火工品的设计技术。

1.3 武器系统用火工品新的技术使命

武器从发射到毁伤整个作用过程均是从火工品首发作用开始,几乎所有的弹药都要配备一种或多种火工品。除常规的点火、起爆作用外,随着作战需求的强力牵引和火工品技术发展的大力推动,火工品的作用又有了新的拓展。为有效打击各种目标,适应未来战争和作战环境,武器弹药所配用的火工品需着重增强的作战能力有:战场生存能力、准确作用能力、高效摧毁能力、持久作战的综合保障能力等。这些作战能力将火工品从“起爆”、“点火”等基本作用拓展到实现“定向起爆”、“可控起爆”等更高要求,使火工品的技术使命不仅仅是体现在初始点火起爆这一个环节上,而是全面地体现在表征武器体系对抗的战场生存、初始点火起爆、运载过程修正、毁伤等多个技术环节中,使火工品开始成为推动弹药、引信乃至武器系统发展的动力,使火工品成为弹药以及武器系统作战效能的“量级”倍增器。火工品新的技术使命具体如下。

1. 战场生存能力

战场生存能力(安全性要求)不仅包括部队人员和装备的生存能力,而且还包括弹药飞抵目标前的生存能力。通过火工品提高部队人员和装备的生存能力的措施就是提高火工品的安全性。提

高火工品的抗干扰能力是提高弹药飞抵目标前生存能力的一个重要措施。如新型冲击片雷管和正在发展中的激光飞片雷管都具有防静电、防射频和耐冲击的性能,这将使武器系统更“安全”和更“钝感”。同时,低易损型爆炸序列也在积极研究中,这些都将使弹药钝感化^[5]。

2. 准确作用能力

准确作用能力(可靠性要求)既体现在命中目标时的可靠作用,又包括飞行中实现精确命中过程的准确作用。精确命中是实现精确打击的前提。通过火工品实现精确命中的途径是通过阵列脉冲推冲器逻辑点火技术对弹药实施弹道或姿态控制,通过二维(距离、空间)修正,可获得对固定目标较高的命中精度。美国在反战术导弹系统中就应用了姿态修正技术。1987年,美国增程拦截弹的末制导段就由环状配置的180个推冲器实现稳定和控制作用。俄罗斯的弹道修正弹药已形成系列产品,如152mm、155mm弹道修正榴弹,240mm弹道修正迫弹等,其中240mm迫弹装有4排24个推冲器,单个或数个推冲器点火产生脉冲推力,或推动平衡体飞出弹体做功,用于修正飞行速度的大小及飞行方向。这种应用要求火工品能快速响应点火,且要满足高钝感的安全要求。具有低能量的半导体桥火工品可以满足这一要求^[1]。

3. 高效摧毁能力(起爆可选择性)

高效摧毁所追求的是“命中即摧毁”。在火工品环节上实现高效摧毁的途径是:

(1) 根据引信对目标的识别,火工系统对弹药战斗部的起爆位置具有可选择性。如空空导弹、地空导弹、航空炸弹采用爆炸逻辑网络达到起爆点精确控制,实施定向起爆,改变了现役战斗部破片沿战斗部径向分散的局面,使战斗部的杀伤破片向目标方向集中,从而大幅度提高毁伤概率,使弹药具有“高效毁伤”能力,成为防空反导中的一项重要技术。

(2) 在终点弹道环境中的火工品的抗冲击能力,如硬目标侵

彻弹药中,火工品能否抗高过载与弹药的侵彻效果直接相关。

4. 连续持久作战的综合保障能力

随着未来战场上前后方界限的模糊化和部队分布的离散化,连续持久作战的综合保障能力的重要性日趋重要,特别是战时大量消耗的火工品,实现通用化和系列化设计,简化品种,降低成本,简化战时弹药用火工品的管理与供应。所以,今后发展的火工品均将按照“三化”原则进行研制。

1.4 武器系统用火工品的设计与研制

1.4.1 设计原则^[6]

火工品设计和其他工程设计一样,应贯彻先进可行与经济合理的通用设计原则。具体来说,火工品设计原则概括如下。

1. 安全性原则

火工品是武器系统中的最敏感部分,其意外作用将可能引起整个武器弹药的作用而带来重大损失,设计时必须满足各类火工品的安全性要求。安全涉及使用、运输、储存和生产多方面,在这些情况下,火工品都不应发生任何意外的点火、爆炸等事故。

2. 可靠性原则

火工品是武器系统中的激发系统,若其作用失效将造成整个武器弹药的失效,所以作用可靠性均要求较高。航天系统使用火工品时,往往通过冗余设计来提高系统的作用可靠性。单个火工品的可靠性是通过产品的输入感度和输出威力来考核,但可靠性不仅指单个火工品元件的高可靠性,更为重要的是组成传爆序列后火工品之间的匹配和界面能量传递的高可靠性。另外,可靠性设计应考虑人因工程,从设计上有效降低人员生产和装配过程中出现差错的概率。

3. 经济性原则

火工品的经济性要从设计制造的经济性和其产生的军事效果来衡量。首先,由于大多数火工品的定货属小批量定货,设计成本成为影响产品经济性的重要部分,所以设计时应贯彻多采用成熟技术(如标准化的制式产品技术)与少数新技术相结合的低成本原则。其次,可采用来源广泛的国产原材料降低制造成本。最后,其经济性要与其产生的军事效果相结合。例如,导弹用雷管的价格远高于炮弹用雷管价格,这既是军事效果的体现,也是承担风险责任的要求。

1.4.2 设计要求^[3]

尽管火工品的种类很多,技术指标也各不相同,但火工品作为一种装有爆炸材料的危险品,设计时有如下共性要求。

1. 合适的感度

火工品对外界输入能量响应的敏感程度称为火工品的感度。要求合适的感度是为了保证使用安全和可靠,如果火工品感度过高,就难以保证火工品在制造、运输、储存及勤务处理过程中的安全,而感度过低,则难以保证在武器弹药中的可靠作用。

2. 适当的威力

火工品输出能量的大小称为火工品的威力。火工品的威力是根据使用要求提出的,威力过大过小都不利于使用。威力过大会对使用系统造成安全性下降,威力过小则会降低使用系统的作用可靠性。

3. 环境适应性

火工品的环境适应性包括短期耐环境能力和长期耐环境能力两类。短期环境主要包括使用过程中的自然环境、电磁环境、机械环境等。火工品的短期耐环境能力主要与火工品的设计有关。长期环境主要指长期储存过程中的自然环境。火工品的长期耐环境能力主要与药剂安定性、与其他接触物的相容性及生产过程中温湿度控制等有关。

4. 尺寸小型化

火工品是功能相对独立的元器件,但又是武器系统的配套件,其尺寸的小型化将会给使用系统留出更大的设计空间,也是武器系统大量使用火工品这一特殊能源的最大优势所在。所以,火工品结构的尺寸设计应始终贯彻小型化原则。

1.4.3 研制程序^[7]

作为武器系统的一个组成部分,火工品的研制程序一般应按常规武器装备研制程序的5个阶段,即论证阶段、方案阶段、工程研制阶段、设计定型阶段和生产定型阶段进行研制。由于火工品属武器系统的配套件,所以其研制一般不经过论证阶段。

1. 方案论证阶段

根据总体或论证部门提出的初步技术指标,依据功能和结构要求,设计数种方案,并进行方案论证和功能摸底试验。为确定产品结构的可靠性,方案论证阶段应对药剂及其接触材料进行相容性试验。方案评审时,不仅要对其承研方的设计方案进行评审,同时也应结合国内火工品实际水平及专业特点,对总体所提的技术要求进行评审,使之完善。

2. 工程研制阶段

工程研制阶段一般分为初样机、正样机设计两个阶段。首先,根据方案论证与功能摸底试验确定设计方案,制定试验大纲与试验计划,制造产品初样机,进行功能试验和系统适配试验;其次,根据初样机试验结果,按总体或论证部门确定的技术指标,进行正样机工艺通关试验和设计可靠性增长试验,对正样机产品进一步进行系统飞行试验。有时初样机、正样机设计两个阶段合并执行为一个工程研制阶段。

3. 设计定型阶段和生产定型阶段

产品设计定型是对产品性能进行全面考核的主要阶段,军方应依据技术指标及相关火工品标准,制定设计定型大纲,组织完成设计定型试验,以确认其达到全部技术指标要求和系统使用要求。产品生产定型是产品批量生产条件进行全面考核的主要阶段,以

确认其符合批量生产的标准。

1.5 火工品文献的收集

开展产品开发研制首先要有技术信息的支持,公开的文献资料是技术信息的主要来源。火工品作为一种特殊产品,具有一定的技术保密性,所以,充分利用公开的文献资料对科技开发活动至关重要。

1. 火工品文献来源及检索

火工品的国外文献主要来源是美国政府报告索引(GRA&I)、美国化学文摘(CA)和英国德温特公司的中心专利索引(CPI)^[8]。美国政府报告索引中,火工品文献主要集中在 19A(弹药、火炸药和烟火药)和 19D(爆炸、弹道和装甲)两类内。它包括:第一,美国国防部所属部门和合同单位完成的报告,简称 AD 报告;第二,美国能源部所属部门和合同单位完成的报告,简称 DE 报告;第三,美国航空航天局所属部门和合同单位完成的报告,简称 NASA 报告。值得注意的是,美国政府报告索引中除主要收集美国国内的报告外,也还收录其他国家的部分报告。而美国化学文摘中,火工品文献主要集中在 50 类(推进剂与炸药类)。它主要收录期刊论文、会议文献、书籍、专利等。中心专利索引中,火工品文献主要集中在 K 辑中 K3(炸药装药)和 K4(炸药、火柴)两部分中,主要报道涉及炸药装药的火工品专利。另外,世界专利索引(WPI)的 Q79 部分(武器)中主要报道武器系统用火工品专利。与火工品有关的国际会议有:炸药与烟火剂会议、国际烟火会议、国际爆轰会议、德国 ICT 会议等。

对以上来源的火工品文献的检索通常采用普查法检索,即直接从对应的类别中逐条查阅。但由于一些特种火工品的文献未在其中(如航天系统用火工装置的文献多收录在航天类别内),所以采用主题索引进行补充检索。重要的主题词有:火工装置(Pyrotechnics)、雷管(Detonator)、起爆器(Initiator)、爆炸序列(Explo-

sive Train)等。另外,这些主题词也常用于计算机联网检索。

火工品的国内文献主要来源是部分期刊和会议论文。主要期刊包括《火工品》、《导弹火工技术》、《含能材料》及《爆破器材》,其他期刊如《爆炸与冲击》、《兵工学报》、《探测与控制学报》也有所报道。两年一次的火工烟火学术会议则集中介绍了国内火工品技术的研究进展。

2. 火工品产品信息来源

直接介绍产品信息的资料有“美国情报处理服务公司(HIS)”收集的“美国公司产品样本集(VPD)”,它以文字、图形、数据的形式介绍了美国几十家火工品公司最新的产品设计、外形、尺寸及技术条件,对火工品设计有重要的借鉴作用。另外,美国 MIL—HDBK—777《引信用火工品》军用手册中包括研制类和采购标准类引信的火工品^[9]。它包括火工品的外形、尺寸、技术条件、应用和装药介绍。这些产品材料不仅对火工品元件的设计有重要的参考价值,而且能全面了解火工品与使用系统的匹配与要求。

参 考 文 献

- 1 徐衍海. 火工系统新技术的发展动向. 火工品, 2001(1):37
- 2 Bement C J, Pyrotechnic System Failure: Cause and Prevention. NASA TM100633, 1988
- 3 蔡瑞娇. 火工品设计原理. 北京: 北京理工大学出版社, 1999. 6~7
- 4 GJB347—87. 火工品分类及命名原则. 1987
- 5 王凯民. 引信爆炸序列钝感化发展研究. 现代引信, 1995(3):33~37
- 6 陈福梅. 弹药爆炸序列的原理与设计. 北京: 国防工业出版社, 1979
- 7 曹柏桢等. 飞航导弹战斗部与引信. 北京: 宇航出版社, 1995. 294~297
- 8 张丙辰. 1982 年国外火工品文献分析. 火工品, 1983(4):52
- 9 MIL—HDBK—777. 引信用火工品手册. 1987

第 2 章 常用火工药剂及性能

火工品作为一种特殊能源应用于各类武器弹药,其能量来自于内部所装火工药剂在爆炸变化时所释放的能量。火工品作用的可靠性和使用的安全性均与所装火工药剂的类别及其性能相关。

2.1 火工药剂的感度与输出

2.1.1 火工药剂的分类^[1]

火工品用的炸药品种很多,根据其用途不同,可以分为起爆药、猛炸药(含传爆药)、针刺药、击发药、点火药和延期药等。点火药和延期药通常是由氧化物和可燃物为主体的烟火剂混合药,而针刺药和击发药主要由起爆药、氧化剂和可燃剂等混合而成。

1. 起爆药

起爆药是火工药剂中最敏感的一种,受外界较小能量作用就能发生爆炸变化,而且在很短时间内其变化速度可增至最大,即爆轰成长期极短。但其威力较小,在许多情况下不能单独使用,只是用作火工品的始发装药或其中的一个组分,以引燃火药或引爆猛炸药。

常用的起爆药主要是单体炸药,如氮化铅 $[\text{Pb}(\text{N}_3)_2]$ 、雷汞 $[\text{Hg}(\text{ONC})_2]$ 、斯蒂芬酸铅 $[\text{C}_6\text{H}(\text{NO}_2)_3\text{O}_2\text{Pb}]$,又称三硝基间苯二酚铅,缩写为 LTNR]、四氮烯 $[\text{C}_2\text{H}_8\text{ON}_{10}]$,又称特屈拉辛],以及以这些药为主所组成的共沉淀药剂。其中由于雷汞有毒,已基本被淘汰,不再使用。其他的起爆药还有二硝基重氮酚(DDNP)、二

硝基苯并氧化呋咱钾(KDNBF)、苦味酸盐等。

2. 猛炸药

猛炸药具有较低的感受度和较大的做功能力。它需要较大的外界能量作用后才能激起化学变化,一般通过起爆药起爆。其典型的爆炸形式是爆轰,常用于雷管的输出装药、导引传爆药及战斗部主装药。

常用的猛炸药有梯恩梯(TNT)、太安(PETN)、黑索今(RDX)、奥克托今(HMX)、特屈儿(Tetryl)等。其中特屈儿毒性大、价格贵,已基本被淘汰,不再使用;太安、黑索今、奥克托今可作为雷管的输出装药使用,以它们为主体,加入粘合剂进行造粒改性后的混合炸药可作传爆药使用;梯恩梯主要作为战斗部主装药使用。

3. 烟火药或火药

烟火药是一种以氧化物和可燃物为主体的混合药,其典型的爆炸形式是燃烧。它是针刺药(击发药)、点火药和延期药等火工药剂的重要组份,也可利用其特定的烟火效应,起照明、信号、烟幕遮蔽等作用。

火药主要用作枪、炮弹的发射药,在火工品的点火及做功装置中也有所应用。常用的火药有黑火药、单基药(以硝化棉为主体的火药)和双基药(以硝化甘油和硝化棉为主体的火药)。

2.1.2 火工药剂的感度

火工药剂是一种相对不够稳定的物质,在外界作用下能容易地发生爆炸变化。把火工药剂受外界激励作用而发生爆炸变化的难易程度称之为感度。引起火工药剂爆炸的外界激励可以有机械作用(针刺、撞击摩擦等)、热作用(加热、火焰、电火花等)、爆炸作用(冲击波、破片等)等多种形式,其对应的感度就有机械感度、热感度、冲击波感度等。

1. 热感度^[1]

在实际生产和使用过程中,经常会遇到热源整体加热的情況。

例如,炸药的烘干、熔化及高温储存等。热感度主要包括加热感度和火焰感度 2 种,其中加热感度通常用爆发点来表示。

1) 爆发点

爆发点是指在一定试验条件下,加热炸药周围介质到炸药爆炸所需的最低温度。它是将装有炸药试样的铜管壳放入一个伍德合金浴中,然后以等速加热合金浴,直到爆炸,此时的合金浴温度即为爆发点。为比较各种药剂的爆发点,必须固定一个延滞期。一般采用 5s 或 5min 延滞期的爆发点。爆发点越高,表明热感度越低。部分起爆药的爆发点见表 2.1 所列。

表 2.1 一些起爆药的爆发点

炸 药 名 称	雷汞	氮化铅	LTNR	四氮烯	黑索今	太安
5s 延滞期时爆发点/℃	175	330	275	135	220	210
5min 延滞期时爆发点/℃	210	345	265	154	260	225

2) 火焰感度

炸药在火焰的直接作用下发生爆炸变化的难易程度称之为火焰感度。它通常以在标准黑药柱产生的火焰作用下,炸药发生 100% 发火的最大距离表示,距离越大,表明火焰感度越小。部分起爆药的火焰感度见表 2.2 所列。

表 2.2 部分起爆药的火焰感度

炸 药 名 称	雷汞	氮化铅	LTNR	四氮烯	DDNP
100% 发火的最大距离/cm	20	<8	54	15	17

2. 机械感度

火工药剂在生产、运输、使用时,不可避免地要发生一些机械撞击、摩擦、挤压等作用。火工药剂在机械作用下发生爆炸变化的难易程度称之为机械感度,它主要包括撞击感度和摩擦感度两种。

1) 撞击感度^[2]

由于起爆药的撞击感度要比猛炸药高得多,所以试验仪器有所不同。起爆药的撞击感度试验是在弧形落锤仪上进行的。将 20mg 的起爆药装入 7.62mm 枪弹火帽内,盖上锡箔,用 29.4MPa

压力压制,然后将此火帽放在落锤仪的击座上。击针通过击针孔放入火帽的锡箔上,落锤沿弧形调整高度并下落,撞击击针。感度大小用上、下限表示。100%爆炸的最小落高 H_{100} 称为上限,100%不爆炸的最大落高 H_0 称为下限。几种起爆药的撞击感度见表 2.3 所列。

表 2.3 几种起爆药的撞击感度

炸药名称	雷汞	四氮烯	氮化铅	LTNR	DDNP
落锤质量/kg	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
H_{100}/cm	9.5	6.0	33.0	36.0	
H_0/cm	3.5	3.0	10.0	11.5	17.5

测定猛炸药的撞击感度是在立式落锤仪进行。将 50mg 炸药放入由导向套、击柱和底座组成的标准撞击装置内,使用 10kg 的锤进行落高 25cm 的发火试验 25 次,得到炸药爆炸的发火率。几种猛炸药的撞击感度见表 2.4 所列。

表 2.4 几种猛炸药的撞击感度

炸药名称	梯恩梯	太安	黑索今	特屈儿	无烟药
爆炸率/%	4~8	100	70~80	50~60	70~80

2) 摩擦感度^[1]

从安全观点看,研究火工药剂的摩擦感度是极为重要的。通常采用摩擦摆测定药剂的摩擦感度。将 20mg 药剂试样放入击套中的 2 个击柱之间,并通过油压的作用对药剂施加一定的压力,利用摆锤在 $80^\circ \sim 90^\circ$ 方向上打击杆,测试爆炸的百分数。一些火工药剂的摩擦感度见表 2.5 所列。

表 2.5 部分火工药剂摩擦感度

	摆角 90° , 表压 4.9MPa, 药量 0.02g			摆角 80° , 表压 0.59MPa, 药量 0.01g		
炸药名称	梯恩梯	太安	黑索今	雷汞	氮化铅	LTNR
爆炸率/%	0	48~52	92~96	100	70	70

3. 冲击波感度^[3]

冲击波感度是指炸药在冲击波作用下发生爆炸变化的难易程度,它通常采用小隔板试验测定。小隔板试验是在由标准施主装药爆轰输出一定强度的冲击波下,以有机玻璃衰减片为试验变量,测出以间隙分贝表征的受主炸药 50% 起爆的感度(即施主炸药通过衰减片后的冲击强度)。当实测间隙厚度 H 以密耳表示时,对应的间隙分贝 $X(\text{DBg})$ 为

$$X(\text{DBg}) = 30 - 10 \lg H \quad (2.1.1)$$

常用火工药剂的冲击波感度见表 2.6 所列^[6]。

表 2.6 常用火工药剂的冲击波感度

	PETN			A-5	CH-6	HNS-I	DATB	
密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	1.44	1.58	1.71	1.66	1.66	1.62	1.52	1.66
冲击波感度/DBg	2.47	2.63	3.55	4.14	4.26	5.32	7.37	8.03

4. 静电感度^[4]

火工药剂的静电感度是指在摩擦时产生静电的难易程度或在静电放电火花作用下爆炸的难易程度。一些起爆药的静电感度见表 2.7 所列。

表 2.7 一些起爆药的静电感度

	静电发火 最小能量/J	直流电火花感度		倒药产生的静电	
		放电时间/s	发火情况	相对湿度/%	静电电压/V
氮化铅	7×10^{-3}	30	不发火	40	-100
LTNR	9×10^{-4}	1	发火,有响声	33	-1140
四氮烯	1×10^{-2}	30	发火,有爆燃	36	-109.6

2.1.3 火工药剂的爆炸作用与输出^[5]

火工药剂的爆炸作用是指药剂爆炸时对周围物体的各种机械作用,常以其猛度和破片驱动能力来表示。

1. 猛度

炸药的猛度是指炸药在爆炸瞬间对与之接触的周围介质的粉

碎或破坏的能力。它是爆轰产物猛烈冲击炸药周围介质的结果。当炸药装药直接接触并垂直于爆轰波传播方向的介质时,猛度效应表现最大。猛度大小与爆轰产物的压力大小及作用时间长短有关。炸药的猛度常用铅柱压缩法测试。在一钢板上放置一个铅柱,铅柱上放置一块钢片,钢片上放置装有炸药的纸筒。装药爆炸后,铅柱被压缩成蘑菇形。铅柱的压缩值即为炸药的猛度。一些炸药的猛度如表 2.8 所列。

表 2.8 一些猛炸药的猛度

炸 药 名 称	梯恩梯	太安	黑索今	特屈儿	苦味酸
猛度/mm	13	24	24	19~22	16

2. 破片驱动能力^[6]

作为炸药输出的指标之一的破片作用是以破片速度衡量的。R. W. Gerney 在实验基础上提出了炸药驱动破片的最大初速度的估算方法,简称格尼公式。例如,对于轴对称膨胀情况,有

$$V_F = \sqrt{2E} \left(\frac{M_F}{C_E} + \frac{1}{3} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2.1.2)$$

式中 M_F ——破片质量;

C_E ——炸药质量;

$\sqrt{2E}$ ——格尼系数,它反映炸药的破片驱动能力。

不同炸药的格尼系数如表 2.9 所列。

表 2.9 不同炸药的格尼系数

炸 药 名 称	梯恩梯	太安	黑索今	特屈儿	奥克托今
密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	1.63	1.76	1.77	1.62	1.89
格尼系数/ $\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$	2.37	2.93	2.93	2.50	2.97

2.2 常用火工药剂的使用性能

2.2.1 常用起爆药的性能

起爆药区别于猛炸药的特点是：感度高和爆轰成长期极短。由于它接受较小的激发冲能就能引爆，且只需少量药就可以达到稳定爆轰，所以在火工品中常作为首发装药来起爆猛炸药。常用的起爆药有氮化铅、斯蒂芬酸铅、四氮烯 3 种。

1. 常用起爆药物理化学性质^[4]

常用起爆药的物理化学性质见表 2.10 所列，感度见表 2.1～表 2.8 所列。

表 2.10 起爆药的物理化学性质

项 目	相对分子质量	假密度 /g · cm ⁻³	密度 /g · cm ⁻³	与金属 作用	安定 性	流散 性	耐压 性	使用压力 /kg · cm ⁻²
氮化铅	291	1.30	4.80	铜	安定	好	很好	500～700
斯蒂芬酸铅	468	1.0～1.6	3.08	无	安定	好	好	1000～1200
四氮烯	188	0.45	1.46	无	安定	不好	不好	<500

2. 常用起爆药爆炸性能^[4]

常用起爆药的爆炸性能见表 2.11 所列。

表 2.11 几种起爆药的爆炸性能及用途

	爆速/ m · s ⁻¹	极限药量/g (对特屈儿)	威力 /ml	砂试法猛度/g		用 途
				药量	碎砂量	
氮化铅	5123	0.03	26.5	1	36	雷管装药、混制新起爆药
斯蒂芬酸铅	5200	不能单独用	29.0	0.4	10.5	增加火焰感度、针刺敏感剂
四氮烯	5700	不能单独用		0.4	9.2	针刺敏化剂

3. 不同氮化铅种类性能比较^[9]

氮化铅又称叠氮化铅，根据种类又可细分为糊精氮化铅、粉末氮化铅和羧甲基纤维素氮化铅[CMC—Pb(N₃)₂]等多种。粉末氮化铅流散性不好，而糊精氮化铅流散性好。糊精氮化铅火焰感和针刺感度低，所以曾主要用于火焰雷管和针刺雷管的中间装药。羧甲基纤维素氮化铅比糊精氮化铅起爆感度好，纯度高，威力大。

两种氮化铅性能比较见表 2.12 所列。

表 2.12 两种氮化铅性能比较

	纯度/%	极限药量/g	粒度/ μm	撞击感度(发火落高)/cm	
糊精氮化铅	92.7	0.090	24.5	锤重 0.5kg	30
羧甲基纤维素氮化铅	98.7	0.025	34.5	锤重 0.5kg	38
注:起爆 60mg 黑索今的极限药量					

4. 不同斯蒂芬酸铅种类性能比较^[10]

斯蒂芬酸铅主要包括中性(正式)斯蒂芬酸铅和碱式斯蒂芬酸铅Ⅰ型、Ⅱ型等。3 种斯蒂芬酸铅性能比较见表 2.13 所列。

表 2.13 3 种斯蒂芬酸铅性能比较

项 目	50%发火感度	Ⅰ 型	Ⅱ 型	中性	试验方法
撞击感度	发火高度/mm	237.0	146.20	84.36	WJ1870—89, 锤质量 0.5kg
针刺感度	发火高度/mm		178.90	148.70	WJ1873—89, 落球质量 55g
摩擦感度		40%	70%		WJ1871—89
火焰感度	点火距离/cm	55.08		49.10	WJ1872—89
静电火花 感度	负极发火电压/V	1.06	1.00	1.06	WJ1869—89
	正极发火电压/V	1.13	1.06	1.08	WJ1869—89
静电积累	铝滑槽/ $\mu\text{c} \cdot \text{kg}^{-1}$	-0.53	-1.42	-22.5	
	不锈钢/ $\mu\text{c} \cdot \text{kg}^{-1}$	-0.60	-0.41	-22.6	
	纸/ $\mu\text{c} \cdot \text{kg}^{-1}$	-0.45	-0.55	-22.6	
热丝感度	发火电流/mA	39.2		85.0	WJ1874—89, 桥丝 0.009mm
真空安定性	分解气体量/ $\text{ml} \cdot \text{s}^{-1}$	0.37	0.26	0.31	GJB737—1
热失重	75℃时/%	0.015	0.051	0.200	WJ1627—89
吸湿性	吸湿量/%	0.14	0.08	0.03	WJ1865—89
爆发点	5s 延滞期时/℃	301.6	272.0		WJ/2—109
相对密度		3.74	4.06	3.08	WJ1625—89

假密度	假密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	0.4	1.5		
-----	--------------------------------------	-----	-----	--	--

从表 2.13 中可以看出,碱式斯蒂芬酸铅的火焰感度明显优于中性斯蒂芬酸铅,其机械感度与中性斯蒂芬酸铅无明显差异,但其针刺感度和撞击感度的精度较高,静电火花感度相近,但碱式斯蒂芬酸铅的静电积累值明显低于中性斯蒂芬酸铅,大大改善了中性斯蒂芬酸铅因静电积累过高而引起的质量和安全问题。国外火工产品中,广泛使用了碱式斯蒂芬酸铅。以 II 型碱式斯蒂芬酸铅为主要组分混制成的针刺药多用于针刺或撞击火工品,而 I 型碱式斯蒂芬酸铅多用于火焰和电火工品。

2.2.2 常用猛炸药的性能

猛炸药与起爆药相比,其特点是感度较低而威力较大,其爆速和单位质量所放出的化学能要比起爆药大得多。它通常要用起爆药来起爆。火工品装药中,常用黑索今、奥克托今、太安作输出装药。以猛炸药为基础的传爆药的性能将在第 7 章中详细介绍。

1. 常用猛炸药物理化学性质^[4]

常用猛炸药的物理化学性质见表 2.14 所列。

表 2.14 常用猛炸药的物理化学性质

项 目	相对分子质量	实测密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	熔点/ $^{\circ}\text{C}$	5s 时爆发点/ $^{\circ}\text{C}$	吸湿性	相容性	安定性	压缩性
黑索今	222	1.799	205	230	不吸湿	好	好	易压
太安	316	1.760	142	225	不吸湿	好	好	易压
奥克托今	296	1.890	278	327	不吸湿	好	好	易压

2. 常用猛炸药的爆炸性能^[4,5]

常用猛炸药的爆炸性能如表 2.15 所列。

表 2.15 常用猛炸药的爆炸性能及用途

项 目	爆速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	爆压/GPa	摩擦感度/%	撞击感度/%	威力/ ml	猛度/mm	用 途
黑索今	8700	33.8	76	80	480	24	雷管装药、导传爆药

太安	8600	31.0	92~100	88	500	24	雷管装药、导爆索装药
奥克托今	9110	39.5	100	90~100	486		雷管装药、传爆药

2.2.3 常用混合药的性能

常用混合药有击发针刺药、点火药和延期药三类。

1. 击发针刺药^[9]

击发药是一类在撞击、针刺、摩擦等外界能量作用下,能够快速爆燃,输出灼热粒子、高温气体等产物用于点燃下一级装药的混合物。目前主要有无汞击发药和无腐蚀击发药 2 类。其中无汞击发药由氮化铅、高氯酸钾、硫氰酸铅、硫化锑等组成,如 PA100;而无腐蚀击发药主要由斯蒂芬酸铅、四氮烯、硝酸钡、硫化锑、金属粉(铝)等组成,如 PA101。而针刺药是一种以针刺为主要输入能源引起爆燃或爆炸的混合药剂,如美国的 NOL130 和国内的 2 号针刺药。典型配方见表 2.16 所列。某厂已研制出一种新的四组份无腐蚀击发药,其配方为斯蒂芬酸铅 40%、四氮烯 4%、硝酸钡 20%和硫化锑 36%,在底-6 丙式底火中得到试用,已证明它是一种性能优良的无腐蚀击发药^[11]。

表 2.16 击发针刺药典型配方

代号	氮化铅 /%	斯蒂芬酸铅 /%	四氮烯 /%	硫氰酸铅 /%	高氯酸钾 /%	硝酸钡 /%	硫化锑 /%	铝粉 /%
PA100	5			25	53		17	
PA101		53	5			22	10	10
NOL130	20	40	5			20	15	
NOL60		60	5			25	10	
2 号		50	5			20	25	

2. 点火药

点火药通常是指用以点燃延期药、烟火药、推进剂、发射药或起爆药的药剂,分单质点火药和混合点火药两类。单质点火药斯

蒂芬酸铅多作为火焰雷管的首层装药用于点燃起爆药,它是一种具有强点火能力的弱起爆药。混合点火药主要由氧化剂、可燃剂和粘合剂组成,又细分为有气体点火药、微气体点火药和无气体点火药三类。

1) 有气体点火药

有气体点火药是燃烧时生成大量气体的点火药,黑火药是这类药剂的典型代表。它较易点燃,点火能力较强,广泛用于各种点火具。其主要组成为硝酸钾 74%、木炭 15.6%和硫磺 10.4%。按黑火药的颗粒大小分为 8 个等级,见表 2.17^[12]所列。

表 2.17 黑火药类别

代 号	HY-1	HY-2	HY-3	HY-4	HY-5	HY-6	HY-7	HY-8
上筛孔径/mm	10.0	5.60	4.00	2.24	1.18	0.85	0.50	0.25
下筛孔径/mm	5.00	2.80	2.00	1.00	0.63	0.40	0.26	

2) 微气体点火药^[9]

微气体点火药是燃烧时生成气体量很少的点火药,可燃剂是燃烧后能生成高熔点氧化物的材料,如镁、硼、硅、锰等,氧化剂为高氯酸钾、铅丹、铬酸钡等。这类点火药的燃烧温度较高,燃烧后生成灼热固体产物颗粒冲击待燃装药并将其引燃,它适用于点燃端面燃烧的装药和不允许产生高压气体的点火具。

点火能力较强的有硅系点火药、硼系点火药、镁系点火药及硫氰酸铅点火药等,可用于点燃发火点较高的推进剂。硅系点火药主要有硅/四氧化三铅、硅/硝酸钡等,硼系点火药主要有硼/硝酸钾/酚醛树脂(23.6/70.7/5.7)、硼/铬酸钡/二氧化铅(15.5/70/14.5)等,镁系点火药主要有镁/聚四氟乙烯(50/50)、镁/硝酸钡/过氧化钡/虫胶(21/22/48/9)等。

点火能力较低的有锰系点火药(锰/铬酸铅/硅化钙/粘合剂、锰/铬酸铅/硅粉/硼粉),可用来点燃点火具中的延期药。由于锰系点火药能量低,应用受到限制,多利用其燃烧缓慢、燃烧性能稳定的特点作延期药使用。

锆系点火药发火点低,耐水性好,广泛用作火焰点火或电点火的点火药或引燃药,由锆/三氧化二铅组成的点火药称之为强耐水药^[13]。而低氢化钛/高氯酸钾点火药则是一种对静电、射频、雷电等钝感的点火药,可用热桥丝点火,具有热桥丝点火可靠性高、长贮性能好的特点,适用于航空航天运载装置和武器发射装置。

3) 无气体点火药^[13]

无气体点火药是燃烧后不生成气体的点火药,其燃烧反应是在固—固相中进行。主要种类有铅/硒类、铅/碲类、锆/氧化铁/硅藻土(65/25/10)类等。它们具有耐高温、低温发火性好、燃烧温度高、防静电、防射频、点火能力强、使用安全等特点,用于要求不产生气体的特殊点火器中,如点燃液体能源、延期和保险元件、电路闭合装置的药剂等。

3. 延期药

延期药是控制爆炸序列或传火序列延期时间的药剂,主要用于时间引信、自毁装置、解脱机构、毫秒或秒级延期雷管、点火具等火工元件中。按燃烧时有无气体可分为有气体、微气体和无气体延期药三类。一般将黑火药称为有气体延期药,而将以金属为主要可燃剂的延期药称为无气体或微气体延期药,或统称为微烟药。延期时间为毫秒级的延期药称为短延期药;延期时间为秒级的延期药称为长延期药。

1) 硅系延期药

硅系延期药的基本组分为硅和铅丹(Pb_3O_4),其中硅为可燃剂,铅丹为氧化剂,通常外加硫化锑作为燃速调节剂,属燃速较高的一类延期药,多用于毫秒级延期雷管中。在上述3种组分基础上,当外加硅藻土时,燃速减慢,但精度略有提高,而外加硒时,延期精度会更好些。通常要求硅纯度要高于99%,粒度小于 $3\mu\text{m}$;铅丹纯度高于98%,粒度小于 $15\mu\text{m}$;硫化锑纯度高于87%,粒度小于 $25\mu\text{m}$ 。硅系延期药有关配比见表2.18所列^[14]。某厂已研制出一种新的低燃速硅铁延期药,其组成为硅铁、铬酸钡、铅丹、煤焦油沥青,适用于秒级延期^[15]。为克服硅延期药长贮性能不好、

易瞎火的问题,某厂研制出新的毫秒级硅系延期药,其基本组成为Si、 PbO_2 、 CuO 、煤焦油沥青等^[16]。

表 2.18 硅系延期药有关配比

配 比	1	2	3	4	5	6
硅/%	10	10	10	10	13	13
铅丹/%	90	90	90	90	87	87
Sb_2S_3 /%	6	6	35	35	25	25
硅藻土(外加)/%		4	0	4		
Se(外加)/%					0	4
平均秒量/ms	55.4	86.7	315.6	696.8	122	180
极差/ms	25	30	44	89	13	11

2) 硼系延期药^[17]

硼系延期药属高燃速延期药,有硼/铅丹、硼/铬酸钡两种基本配比。它是一种燃速较快的延期药,通常用于毫秒级延期雷管中。硼系延期药有关配比见表 2.19 和表 2.20 所列。

表 2.19 硼系延期药硼/铅丹有关配比

配 比	1	2	3	4
B(无定性)/%	0.5~3	0.5~3	5	10
铅丹/%	99.5~97	99.5~97	95	90
虫胶漆/%	1.0(外加)		1.0(外加)	1.0(外加)
燃速/ $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	0.4~0.9		3.0	5.0

表 2.20 硼系延期药硼/铬酸钡有关配比

配 比	1	2	3	4	5	6
B(无定性)/%	5	10	13	15	14	13
BaCrO_4 /%	95	90		44	44	44
PbCrO_4 /%			87			
Cr_2O_3 /%				41	42	43
燃速/ $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	1.6	3.3	2.21	0.56	0.38	0.30

经验表明,硼的纯度和粒度会严重影响延期精度。此外,由于不同生产厂家生产的铬酸钡的结晶状态不同,所以它对含铬酸钡延期药的燃烧状况稳定性也有重要影响^[17]。

3) 钨系延期药^[9]

钨系延期药一般由钨、铬酸钡、高氯酸钾、硅藻土等组成,是一种燃速较低的延期药。要求钨粉粒度为 $7\mu\text{m} \sim 10\mu\text{m}$,纯度为 99.9%。由于高氯酸钾具有一定的催化作用,所以,其比例一般以 10%~15%为宜。钨系延期药有关配比见表 2.21 所列。

表 2.21 钨系延期药有关配比

配 比	1	2	3	4	5	6	7	8
钨/%	27	30	33	34	49	63	80	58 ^①
铬酸钡/%	58	56	52	52	41	22	12	32
高氯酸钾/%	10	9	10	9	5	5	5	5
硅藻土/%	5	5	5	5	5	10	3	5
燃速/ $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	0.06	0.08	0.09	0.14	0.25	0.71	1.66	2.54
注:①钨粉粒度为 $12\mu\text{m}$								

4) 锰系延期药^[18]

锰系延期药一般由锰、铬酸钡、铬酸铅等组成,是一种燃速较低的延期药。要求锰粉粒度为 $10\mu\text{m} \sim 14\mu\text{m}$ 。锰系延期药有关配比见表 2.22 所列。

表 2.22 锰系延期药有关配比

配 比	1	2	3	4	5	6
锰/%	55	44	39	37	33	33
铬酸钡/%		3	14	20	31	37
铬酸铅/%	45	53	47	43	36	30
燃速/ $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	1.17	0.67	0.43	0.29	0.19	0.15

5) 镁系延期药^[9]

镁系延期药一般由镁、铬酸钡、铬酸铅等组成,是一种毫秒级延期药。镁系延期药有关配比见表 2.23 所列。

表 2.23 镁系延期药有关配比

配 比	1	2	3	4
镁/%	44	39	37	33
铬酸钡/%	3	14	20	31
铬酸铅/%	53	47	43	36
燃速/ $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	0.37	0.58	0.88	1.43

6) 钼系延期药^[19]

钼系延期药是以钼粉为可燃剂,高氯酸钾为氧化剂,铬酸钡为燃速调整剂的一种微气体延期药。具有火焰感度适中,延时精度高,燃速可调范围广等优点。另外,钼在我国出产较多,资源丰富。要求钼粉粒度为 $3\mu\text{m}$,纯度 99.9%;高氯酸钾为化学纯,400 目筛下物;铬酸钡为化学纯,360 目筛下物。钼系延期药有关配比及燃速见表 2.24 所列。

表 2.24 钼系延期药有关配比

配 比	1	2	3	4	5	6	7 ^①	8 ^②
钼/%	50	50	40	60	40	40	40	40
高氯酸钾/%	9	13	10	10	10	10	10	10
铬酸钡/%	41	37	50	30	50	50	50	50
硅藻土(外加)/%					3	5		
燃速/ $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	0.89	1.39	0.57	2.38	0.47	0.4	2.72	0.39
注:①钼粉粒度为 $1\mu\text{m}$;②钼粉粒度为 $4\mu\text{m}$								

值得注意的是,当钼系延期药组分出现下列情况时会出现断火现象:第一,高氯酸钾含量低于 5%;第二,钼粉粒度高于 $5\mu\text{m}$ 或钼粉含量低于 30%;第三,外加硅藻土含量高于 7%。

7) 其他类延期药^[14]

其他类延期药有关配比见表 2.25 所列。

表 2.25 其他类延期药有关配比

配 比	1	2	3	4	5	6	7	8
Cr/%	80	70	62	50	40			
Zr—Ni(70/30)/%						26	9.7	3.0
Zr—Ni(30/70)/%							17	23.0
KClO ₄ /%	10	20	25	25	50	14	14	14
BaCrO ₄ /%	10	10	13	25	10	60	60	60
燃速/cm·s ⁻¹	1.7	1.0	0.67	0.36	0.33	1.3	0.5	2.3

参 考 文 献

- 戴实之. 火工技术. 北京: 兵器工业部教材编审室, 1987. 1~2
- 张宝坪等. 爆轰物理学. 北京: 兵器工业出版社, 2001. 185~186
- Ayres J N. Small Scale Gap Test (SSGT) Data Complication. AD773743, 1973
- 刘伟钦. 火工品制造. 北京: 国防工业出版社, 1981
- 王泽山等. 火炸药科学技术. 北京: 北京理工大学出版社, 2002. 75~78
- 陈福梅. 弹药爆炸序列的原理与设计. 北京: 国防工业出版社, 1979. 83
- GJB736. 3—89. 火工品试验方法: 轴向输出测定钢块凹痕法. 1989
- GJB736. 5—89. 火工品试验方法: 轴向输出测定铅板法. 1989
- 艾鲁群. 国外火工品手册. 北京: 国家机械工业委员会兵器标准化研究所, 1988. 11~66
- 郭铭科. 碱式斯蒂芬酸铅介绍. 火工品, 1994(2): 8
- 刘先林. 无腐蚀击发药研制及应用. 火工品, 1994(4): 7~10
- GJB1056—90. 黑火药. 1991
- 兵器工业科学技术词典编委会. 火工品与烟火技术. 北京: 国防工业出版社, 1995
- 刘自汤. 工业用火工品. 北京: 兵器工业出版社, 2003. 254~256
- 陈红俊. 低燃速硅铁延期药. 火工品, 2000(1): 31~34
- 赵文虎. 毫秒级 Si—CuO—PbO₂ 延期药. 火工品, 2001(1): 25~28
- 杨文. 枪榴弹发火件装药延期管的工艺探讨. 火工品, 1999(2): 1~5
- 史山群. 国外火工品. 北京: 国防工业出版社, 1977
- 杨政委. 钼系延期药的研究与应用. 火工品, 2001(3): 38~39

第3章 针刺火工品设计技术

3.1 概 述

针刺火工品是靠击针刺刺激能量激发的火工品,通常分针刺火帽、针刺雷管和针刺组合点火管三类,它们均可作为机械引信传爆序列中的首发火工元件使用。针刺火帽受激发后发生爆燃,并输出火焰冲能,常作为点火元件点燃火焰雷管或延期药等下一级火工品。由于针刺火帽—火焰雷管序列是利用火焰热来起爆作用,整个过程作用时间较长(达毫秒级),从而使引信瞬发度降低,所以在新研制的引信中已很少采用。而针刺雷管是爆轰输出,可作为引信首发元件和次发元件使用,当组成针刺雷管—针刺雷管序列时,由于靠冲击波传递能量,所以作用时间显著降低,适应了引信高瞬发度的作战要求。目前,针刺雷管已经成为弹药引信使用最多的火工品。针刺组合点火管作为一种密封型组合火工件,能同时完成发火、点火、延期、起爆等系列作用,并已在部分小口径弹药引信中使用^[1]。所以针刺雷管和针刺组合点火管是针刺火工品的重点。

3.1.1 针刺雷管基本结构与性能影响因素

1. 针刺雷管基本结构与作用过程

典型针刺雷管结构如图 3.1 所示。它主要由针刺药、起爆药、输出药、管壳及输出盖片(或底帽)等组成,其作用过程分 3 个阶段:第一,当击针刺入雷管时,首先是针刺药由燃烧转爆燃,这一段的变化基本上属快速爆燃变化形式,以弱冲击波或热能的形式起

爆下层装药(即起爆药)。第二,起爆药起爆后,由于其爆炸变化的加速度很大,在经历很短时间的爆轰成长阶段后,就达到了其自身的稳定爆速,并以强冲击波的能量方式引爆下层的输出装药。第三,输出装药的冲击波感度较低、威力较大,当被起爆药起爆后,其输出以冲击波形式或驱动输出破片起爆下一级火工品^[2]。作为火工品的一种,针刺雷管应该具有合适的感度、足够的起爆能力和必要的安全性。

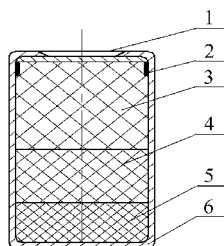


图 3.1 典型针刺雷管示意图

—底帽；3—炸药；4—起爆药；5—针刺药；6—管壳。

2. 针刺雷管性能影响因素^[3]

针刺雷管性能主要包括针刺感度、作用时间、输出能力三方面。根据不同的使用要求,针刺雷管有不同的针刺感度。针刺感度通常用发火能量表示,即落在标准击针上的落球高度与落球质量之积,单位为 $\text{g} \cdot \text{cm}$ 。作用时间决定引信瞬发度的高低,对针刺延期雷管而言,则直接与作战目的相关;输出能力又称起爆能力,通常是指冲击波、破片、热爆炸气体 3 个参数的起爆作用。与下一级火工品的结合界面不同,其输出有效作用参数也不同。

1) 针刺感度影响因素

针刺雷管发生爆炸变化必须有外界和内在的因素。外界因素是击针刺入的条件(如击针的硬度、刺入速度和深度)和针刺端盖片厚度;内在因素主要是针刺药的性质,如药剂的机械感度等。

针刺雷管的作用首先从击针刺入开始。在击针刺入过程中,首先遇到针刺端盖片的阻碍,击针的一部分能量将消耗于针刺端

盖片的变形和穿透上。所以针刺端盖片越厚,击针能量消耗越多,就表现为针刺感度越低。另外,击针的形状、材料、速度对针刺感度都有影响。软击针或过细击针在刺入雷管时,易发生变形,消耗能量较大,表现为针刺感度降低。击针的尖头形状多为圆锥形。我国标准击针锥角为 $23^{\circ}30'$, 尖端部有小平台,平台直径为 0.25mm。此平台面积影响针刺感度,药剂感度越低,发火所需的最小尖端部平台直径越大,所以,用平头击针作用时,针刺雷管的感度更高些。另外,当击针速度增大时,一方面击针尖端平头附着的药剂颗粒与被挤压药剂颗粒的摩擦增大,同时热点及初始反应热在短时间内散热较少,所以针刺雷管的感度将明显提高,作用时间也将缩短。

药剂发生针刺爆炸的机理是摩擦产生的热点,而热点的产生、化学反应直至引起整个药剂爆炸都与药剂本身有关。在这一过程中,首先是高感度起爆药的分解反应,因此针刺药剂的感度就与针刺药剂中起爆药化学反应的难易直接相关,而后者又与药剂的机械感度有关。在起爆药中,机械感度较高的有雷汞和四氮烯,但由于雷汞有毒且与氯化铅不相容,所以在针刺雷管中一般不考虑其应用。只有四氮烯适合做针刺药的敏化剂。增加针刺药中四氮烯含量有利于提高针刺感度。

当针刺药组分、配比确定后,针刺感度将与针刺药制造工艺和装配工艺有关。首先,针刺感度与原材料的粒度和硬度有很大关系,当针刺药选用原材料的粒度和硬度较大时,易形成应力集中,容易产生热点,针刺感度较高。在针刺药组分中,可燃物硫化锑熔点高、硬度大,又有尖锐棱角,所以硫化锑含量的增高对提高药剂的针刺感度非常明显。其次,针刺感度与针刺药药量及压药压力有一定关系。一般而言,针刺药药量对感度没有影响,只要针刺药药量能保证针刺药厚度大于 0.5mm 时就能达到要求的感度。但药量过少,则感度下降;而压药压力影响装药密度。针刺发火时,当压药压力小于一定值时,由于密度小而药粒间隙大,受击针刺激时几乎不起作用,所以密度增加时有利于针刺发火。但当密度超

过一定值后,感度则会降低。一般情况下,在不会产生压死现象的装药中,存在着针刺感度随装药压力增大而增高的关系。

2)作用时间影响因素

针刺雷管作用时间是指从激发能量输入开始到雷管爆轰输出所经历的时间。该时间既包括击针从刺入雷管输入面开始行进到起爆点的时间,也包括针刺药、起爆药和猛炸药之间的爆轰成长时间。所以影响针刺雷管作用时间的主要因素有输入能量和针刺药能量。

实验表明,在一定范围内,作用时间随输入能量(即落高)的增大而缩短,主要原因是击针行进到起爆位置的时间和爆轰成长的时间都较短,但当落高大于一定值时,作用时间将趋于定值。而药剂变化对作用时间的影响更为明显,凡能提高猛炸药完成爆燃转爆轰速度的一、二层装药均能缩短作用时间。因此可以说,基本上能增加感度的因素都能使作用时间缩短。

3)输出及影响因素

通常雷管的爆炸输出简化为冲击波(含热爆炸气体)和破片两个要素。根据下一级作用对象的不同,各要素的作用不同。当下一级作用对象为导爆管时,由于导爆管起爆所需能量较大,所以必须用雷管输出的冲击波作用(雷管与导爆管直接接触时),或用雷管输出破片撞击导爆管形成的冲击波作用(雷管与导爆管间有短尺寸直空气通道时)。而当下一级作用对象为雷管时,雷管与雷管之间往往有直的或弯曲的空气通道,这时起爆被发雷管所需能量较小,则多采用雷管输出的衰减冲击波作用。

3.1.2 针刺雷管一般设计原则

针刺雷管一般设计原则是:第一,依据感度要求,选择针刺药类型和输入端面壳体厚度,针刺药面厚度一般要大于 0.5mm;第二,依据输出要求,选择输出药类型和输出端面壳体材料及厚度;第三,依据输出药类型,选择中间段起爆药类型,通过实验得出起爆输出药的极限装药量,再以一定的裕度确定起爆药装药量。另

外,要保证壳体材料与药剂、药剂与药剂之间的相容性,壳体材料还要兼顾环境性能和使用性能的要求。

3.2 高感度针刺雷管设计

小口径弹药全保险型引信的发展对针刺火工品提出了雷管小型化的要求。雷管小型化是引信结构小型化的关键,雷管直径每减小 1mm,将使隔爆机构径向缩小 4mm~6mm。而引信越小,其惯性发火机构质量也就越轻,保证其发火可靠性的难度也就越大^[4]。在碰击目标松软、位置不正等情况下,都可能引起引信瞎火。因此,引信对针刺火工品又提出了高敏感的要求。在中大口径榴弹机械引信的针刺雷管—针刺雷管发火序列中,核心元件是敏感小型化的继发针刺雷管,它能敏感地接受来自直孔或弯曲通道的爆炸气体压力或飞片而起爆,同时,为隔爆装置小型化提供了条件。目前以美国 M55 针刺雷管为代表的小型化高敏感针刺火工品,已广泛用于各类小口径、中大口径和子弹引信中。这类针刺雷管的典型技术参数为:发火能量为 $56\text{g} \cdot \text{cm}$,尺寸为 $\phi 3.73\text{mm} \times 3.64\text{mm}$,耐过载 50000g。其设计主要包括敏感针刺药设计、耐过载结构设计及高输出设计。

3.2.1 敏感针刺药设计

M55 小型雷管的结构和组成与图 2.1 所示类似。这类雷管主要由针刺药、起爆药、输出药、输出盖片、管壳等组成。影响感度的主要因素是针刺药的选择^[5]。

针刺药的高敏感性是提高雷管针刺感度的首要条件。针刺药是以机械针刺作用激发而产生爆燃的混合药剂。它一般由起爆药、可燃剂、氧化剂组成,有时加敏感剂或钝感剂,其中起爆药常用氯化铅和斯蒂芬酸铅,而可燃剂常用硫化锑、硅粉等,氧化剂常用硝酸钡、氯酸钾等,敏感剂一般为四氮烯。针刺药要求具有一定的感度和足够的猛度。美国 M55 雷管采用了 NOL130 针刺药,它具

有较好的感度。以此为基础,为考察药剂不同组分对针刺感度的影响,进行的试验结果见表 3.1^[6]所列。

表 3.1 针刺药对针刺感度的影响

组 分	斯蒂芬 酸铅 / %	四氮烯 / %	硝酸钡 / %	硫化锑 / %	氮化铅 粉末 / %	氮化铅 (D. S) / %	氮化铅 RD1333 / %	发火 率 / %
NOL130	40.0	5.0	20.0	15.0	20.0			53
药剂 1		5.0	25.0	20.0		50.0		21
药剂 2	40.0	5.0	20.0	15.0			20.0	33
药剂 3	33.0	5.5	24.5	15.0	22.0			86
药剂 4		6.0	30.0	24.0		40.0		60

对针刺药而言,当组分的颗粒较大时,受到针刺作用时易形成热点,药剂的发火感度高,但精度较差;而小颗粒药剂组分虽不利于热点的形成,但由于组分颗粒较小,相互间接触紧密,有利于能量传递,反而导致了药剂的感度升高。同时,由于颗粒小而比表面积大,反应时形成的活化中心数目多,也有利于药剂感度的提高。所以各组分间的粒度匹配极为重要。大颗粒组分适宜于热点形成,小颗粒组分适宜于能量传递。

1. NOL130 通用型击发针刺药

NOL130 针刺药是一种广泛使用的药剂,既可作为击发药用于类似 M97、M104 等多种针刺火帽,又可作为高敏感针刺药用于 M55、M61、PA502 等几十种针刺雷管,兼有点火输出和爆燃输出性能,是一种高敏感的通用型击发针刺药。为保证针刺火帽有足够的点火能力,所以 NOL130 使用了斯蒂芬酸铅、硝酸钡和硫化锑等点火敏感组分。其中使用碱式斯蒂芬酸铅配制的针刺药具有感度高、发火能量散布范围小和发火可靠性高等特点。

M55 雷管装不同类型的斯蒂芬酸铅的 NOL130 的感度试验结果见表 3.2^[7]所列。试验结果表明,含碱式斯蒂芬酸铅的针刺感度较高,其主要原因不是中式斯蒂芬酸铅的针刺感度和撞击感

度低于碱式斯蒂芬酸铅,而是中式和碱式斯蒂芬酸铅的结晶尺寸和晶形差别较大。中式斯蒂芬酸铅和碱式斯蒂芬酸铅的结晶尺寸分别为 $0\mu\text{m}\sim 5\mu\text{m}$ 和 $20\mu\text{m}\sim 75\mu\text{m}$ 。而选用大颗粒碱式斯蒂芬酸铅与小颗粒粉末氮化铅($3\mu\text{m}\sim 10\mu\text{m}$)匹配,会改善混合针刺药各组分间的结合状态,使热点形成后极易转变成爆燃或爆轰,从而使药剂感度高、发火能量散布小。形成对比的是,当采用 RD1333 氮化铅($100\mu\text{m}\sim 200\mu\text{m}$)时(药剂 2),感度就下降很多。

表 3.2 含中式斯蒂芬酸铅和碱式斯蒂芬酸铅感度试验结果

药 剂	发火高度(升降法试验结果)			验证发火率		
	50%时/mm	99.99%时/mm	偏差/mm	落高/mm	发火率	瞎火数
碱式 斯蒂芬酸铅	27.1	48.6	0.58	76	315/315	0
	28.6	43.1	0.39	65	730/730	0
				55	108/108	0
				55	312/315	3
中式 斯蒂芬酸铅	30.7	51.9	0.57	76	313/315	2
	35.0	61.0	0.67	76	315/315	0
	32.3	56.5	0.65	76	314/315	1
				76	315/315	0
注:落球质量为 7.04g						

2. 专用于针刺雷管的敏感针刺药

实际上,对专用于针刺雷管的针刺药而言,仅要求一定的感度和足够的猛度,而对点火能力并不做要求。由于斯蒂芬酸铅的机械感度和威力都低于氮化铅,所以,针刺药可以直接使用氮化铅与四氮烯组分混合就能达到这一要求。例如,瑞士双 35 高炮用火工品的针刺药组分为羧甲基纤维素氮化铅/四氮烯,其中羧甲基纤维素氮化铅纯度高,粒度分布严格,范围窄(长 $40\mu\text{m}\sim 50\mu\text{m}$,宽 $20\mu\text{m}\sim 30\mu\text{m}$),最大晶体不允许超过 $100\mu\text{m}$,而四氮烯采用细颗粒状,粒度分布也严格, $20\mu\text{m}\sim 30\mu\text{m}$ 的颗粒要大于 60%,大于 $50\mu\text{m}$ 的极少^[8]。当要求高敏感时,可通过提高四氮烯含量达到

高敏感性。但单纯依靠通过提高四氮烯含量来提高敏感性的方法会使发火能量散布范围变大,装配工艺安全性差,同时,这种配比的针刺药的瞬发度也较低。由于硫化锑具有熔点高、硬度大的特点,作为另一种极其有效的针刺药敏感剂,它也能显著提高一些起爆药的针刺感度,见表 3.3^[3]所列。所以除 NOL130 高感度针刺药外,还有四氮烯、羧甲基纤维素氮化铅、硫化锑等组成的针刺药,可供高敏感针刺雷管选用。

表 3.3 硫化锑对一些起爆药针刺感度的影响

硫化锑含量/%	0	5	25	50	75
斯蒂芬酸铅针刺起爆能/mJ	490	32	20	14	11
KDNBF 针刺起爆能/mJ	490	17	11	10	8

3.2.2 结构设计和装药工艺

1. 结构设计^[6]

结构设计包括管壳材料选择、针刺部位厚度设计和输出盖片选择三部分。

1) 管壳材料选择

材料的相容性是选择针刺雷管管壳的首要要求。除铜带存在相容性问题而不予考虑外,一般而言,铝、铝合金、不锈钢材料均可选用。考虑到冲压性能,因此通常采用 3 号铝带做管壳材料。较高的管壳强度能提高雷管输出威力,但由于实际使用时,小型雷管都装在一个强度比管壳大很多的雷管座中,所以管壳强度对输出威力的影响属于次要地位。

2) 针刺部位厚度设计

除针刺药影响雷管感度外,针刺部位厚度也是影响雷管感度最重要的因素。针刺雷管起爆所需能量近似与击针刺入部位的金属片厚度成正比。针刺端盖片越厚,击针消耗于穿透盖片的能量就越多,表现为针刺感度越低。有关试验见表 3.4 所列。高敏感雷管的针刺部位厚度一般约为 0.025 mm~0.050mm。

表 3.4 针刺部位厚度对雷管感度的影响

雷管尺寸/mm	$\phi 3.85 \times 3.70$		$\phi 3.85 \times 4.50$			
刺入部位厚度/mm	0.035	0.055	0.105	0.145	0.15~0.18	0.20~0.23
50%发火距离/mm	37.0	48.3	16.7	21.7	24.8	28.4

3) 输出盖片材料及厚度设计

小型针刺雷管输出盖片应在保证其强度和良好密封性能条件下,根据其输出要求,选择其材料和厚度。当使用输出冲击波来起爆下一级火工品时,应使输出冲击波的衰减最小,则要求输出盖片的厚度尽量薄,典型厚度一般为 0.075mm。当使用其输出破片撞击起爆下一级火工品时,则应选择具有较高抗拉强度的不锈钢或钛合金片作输出盖片,从而保证爆炸后破片具有一定的有效面积和速度,这样才能形成对下一级火工品的撞击起爆。用 M55 雷管装药结构使用三种输出底盖片对导爆管进行空气间隙传爆试验,结果见表 3.5^[9]所列。三种输出底盖片分别是 0.076mm 铝(M55 雷管实际使用的盖片)、0.10 mm 钢、0.10 mm 钛合金,实验用导爆管输入端盖片为 0.076mm 铝薄,装药为 A5 传爆药。

表 3.5 三种破片的起爆性能比较

雷管盖片—阶梯孔—导爆管(输入端盖片)	破片单位面积质量/g·cm ⁻²	约束材料	50%起爆距离/mm	起爆机理
铝 0.076mm—铝 0.076mm	1.96	硬铝	4.00	冲击波起爆
钛 0.10mm—铝 0.076mm	4.75	硬铝	16.50	破片起爆
钢 0.10mm—铝 0.076mm	7.89	硬铝	10.00	破片起爆

从表 3.5 可知,若以 50%起爆距离作为破片的输出性能标志量,三种破片的输出性能从高到低依次为钛(0.10mm)、钢(0.10mm)和铝(0.076mm)。除制式雷管使用的 0.076 mm 的软铝输出盖片没有破片效应外,其余两种破片的性能排序与其单位面积质量顺序相反。这说明破片质量影响其速度。用这两种飞片材料代替目前的 0.076mm 软铝材料作 M55 等小型雷管的输出盖片,形成的破片能可靠起爆一定距离处的导爆管。

4) 结构密封性设计

针刺雷管在浸水后,可能出现密封失效并导致雷管半爆。可通过以下措施予以解决:第一,在密封口使用硝基胶密封^[10];第二,对盖片、壳体等半成品进行透光检查,防止沙眼;第三,对雷管收口冲形状和尺寸优化,改进收口工艺。经过这些措施后,能达到浸水 48 小时不失效的要求。

5) 耐高过载结构设计

首先针刺雷管应采用收口结构,这样在弹丸发射过程中,它能在腔内承受 $30000g \sim 40000g$ 的惯性作用而雷管零件不破坏及药剂层相互间不松动。对于耐超高过载的火工品的设计,一方面采用提高管壳强度和厚度,如管壳用车制零件;另一方面将输入端面压制成交凹形状,当遇到超高过载时,防止针刺面直接受力,提高抗过载能力^[11]。

2. 装药工艺

由于小型针刺雷管的尺寸是给定的,因此,装药量实际上是各种装药的比例分配。装药比例的确定原则是必须保证输出装药能可靠爆炸。在直径固定情况下,装药量实际上就是装药高度的确定。

1) 针刺药药量及压药压力

一般针刺药药量只要能保证针刺药厚度大于 0.5mm 时就能达到要求的感度。但药量过小,则感度下降。针刺药的压药压力直接影响到装药的感度、爆轰成长。从承受过载冲击的要求看,压药压力应偏大些。一般压药压力在 $500\text{MPa} \sim 700\text{MPa}$ 之间。

2) 起爆药药量及压药压力

中间层起爆药装药对小型雷管的爆轰成长起着重要的作用。根据闪光 X 射线条式照相观察,其起爆点一般在起爆药中心位置。一般中间层装药选用 RD1333 氮化铅,它是以羧甲基纤维素(CMC)为结晶控制剂的起爆药。与糊精氮化铅相比,起爆极限药量较小(起爆黑索今的极限药量为 25mg)。为确保起爆药能可靠起爆输出装药,实际使用的起爆药量可按 1 倍量(即 50mg)装配。

在 M55 雷管尺寸下,起爆药的装药高度约为 1.6mm,对应的压药压力约为 100 MPa~200 MPa。

3)输出装药及压药工艺

小型针刺雷管输出装药药剂一般采用黑索今。为增加黑索今的压制成型和降低摩擦感度,一般需添加硬脂酸钙和石墨进行造粒处理,具体配比为黑索今/硬脂酸钙/石墨=98.5/1.0/0.5。先将药剂压成密度为 $1.67\text{g}/\text{cm}^3$ 的药柱,然后再以一定压力压入管壳,最后定压收口。这种装配工艺有如下优点:第一,压药时,管壳承受力小;第二,有利于控制量,实现装配自动化;第三,装药密度均匀,有利于输出一致性。但由于黑索今造粒处理后感度下降,通常需要的起爆药量多,且威力散布大,所以当要求小型针刺雷管具有大威力输出时,输出装药选用太安和奥克托今更合适些。以 M55 为例,其装配程序为:在雷管壳内首先装压针刺药,再装压起爆药,然后装压炸药柱,最后装入盖片、收口。M55 针刺雷管的有关装药参数见表 3.6^[6] 所列。

表 3.6 M55 针刺雷管的有关装药参数

针刺药(NOL130)		RD1333 氮化铅		黑索今药柱	
药量/g	压药压力/MPa	药量/g	压药压力/MPa	药量/g	压药压力/MPa
0.025	650	0.056	150	0.019	150

3.2.3 高感度针刺雷管感度试验方法^[12]

目前,我国广泛使用的落球式针刺雷管试验器应用于高敏感产品时,有如下不足:第一,击针太重,质量约为 5g,与高敏感产品要求的落球质量接近;第二,试验的定位板定位不可靠,操作中常出现雷管翻倒或击针刺偏问题。这些都直接影响产品的感度验收。

1. 击针质量对感度的影响

用落球击发事先放在雷管之上的击针末端,使击针迅速刺入雷管而发火。在这一过程中,其能量变化是由落球的位能变成球

与击针的动能。假设落球碰撞击针后,与击针一起刺入雷管,则有

$$\frac{1}{2}m_qV_q^2=\frac{1}{2}(m_q+m_z)V_z^2 \quad (3.2.1)$$

$$V_q^2=2gh \quad (3.2.2)$$

式中 m_q ——落球质量;

V_q ——落球从 h 高度下落到击针末端瞬间的速度;

h ——落球的落高;

m_z ——击针质量;

V_z ——击针和落球一起刺入雷管的平均速度。

显然, V_z 越大,雷管越易发火。由式(3.2.1)得

$$V_z=\sqrt{\frac{m_q}{m_q+m_z}}V_q \quad (3.2.3)$$

从式(3.2.3)可以看出,落球与击针的质量比越大,击针刺入到雷管的速度就越大,克服击针从静止到运动时所消耗的功的能量损失也越小。所以,试验时,应尽量使落球与击针的质量比增大,否则,将造成整个落球—击针—雷管系统发火过程的能量损失过大,从而使雷管表现为“钝感”。美国验收 M55 针刺雷管的击针直径为 1.5mm,长度为 17mm,其质量不足 0.2g。这样,落球能量的损失就减少到了最小程度。用几种不同质量的击针对 M55 针刺雷管感度的测试结果见表 3.7 所列。

表 3.7 不同质量的击针下 M55 针刺雷管的感度对比

击针长/mm	击针质量/g	击发能量/g·cm	发火率
115	5.15	7×6	6/10
44.5	1.96	7×6	9/10
44.5	1.96	7×7	10/10

2. 定位方法对感度的影响

尽管标准试验起爆器上的击针导向套管内径与击针的配合公差较大,但多次试验后,雷管爆炸后的破片仍有粘结在导向套末端

的情况,它影响着击针的正常运动,需要经常清理。击针放入导向套管后,由于只在击针上部定位,所以,击针尖端对雷管针刺面部位的定位就很不可靠,放好击针后需要再开门检查。同时,雷管在铅板上放好后,定位板立即取走,然后关上防护门后,雷管是否会发生某些位移,也无法确认。因此实际击发时,很难保证每次试验都刺在针刺面的中心,稍有不正时,就会发生雷管翻倒或击针刺偏现象,甚至有时会因刺偏而导致“瞎火”。这些都不能代表产品的真实感度。美国在针刺雷管试验时,采用将击针、雷管、铅板放置在一个塑料压装的定位套中进行定位,如图 3.2 所示,较好地解决了试验中能量损失及雷管翻倒问题。

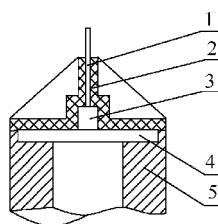


图 3.2 针刺雷管试验定位套

; 2—定位套; 3—雷管; 4—铅板; 5—铅板座。

3.3 针刺延期雷管设计与应用

在一些弹药中,为使弹丸达到最佳做功效果,往往要求能延滞起爆,这种延滞起爆常通过配用引信的延期传爆序列来实现。传统的延期传爆序列由击针—火帽—延期件—火焰雷管—导爆管组成。它存在着作用过程复杂、元件数量多、长贮性能差等问题,且延期作用具有不稳定性,所以很快被新发展的击针—针刺延期雷管—导爆管序列所代替,这种以针刺延期雷管为核心元件的传爆序列不仅简化了引信的设计,使之小型化成为可能,而且彻底解决了火工品元件的防潮密封问题。另外,这种序列还为小型引信实现延期、瞬发等多种用途创造了条件。所以针刺延期雷管在机械

触发引信中具有重要的作用^[13]。

3.3.1 针刺延期雷管基本结构及性能影响因素

1. 针刺延期雷管基本结构及作用机理

1) 基本结构

在机械触发延期引信中,依靠引信击针戳击发火至延期爆炸的元件称为针刺延期雷管。其装药结构一般分为两种:一种为针刺延期药—起爆药—猛炸药,称之为简单装药型针刺延期雷管;另一种装药结构为针刺药—延期药(或装点火药)—起爆药—猛炸药,称之为复杂装药型针刺延期雷管,有时在针刺药—延期药界面还装有衰减片。这种衰减片通常是用金属或非金属材料制成一定的几何形状的零件,用来衰减针刺药输出能量。

针刺延期雷管的外径一般在 2.5mm~6.0mm 之间,高度尺寸依据延期作用时间不同而不同。延期作用时间较短时,外形尺寸相应较小,毫秒级延期作用时间的高度一般在 6mm~11mm 之间。针刺延期雷管的针刺感度较高,装配工艺、半成品制造都较为简单,同时又具有较好的防水和密封性。它不仅能用击针刺刺激起爆,而且还可以用弱冲击波引爆。在代替火焰雷管时,也可以用火焰输出的火焰点燃,其应用比较灵活。

2) 作用机理

针刺延期雷管的典型装药结构为针刺药—延期药(或装点火药)—起爆药—猛炸药。作用时,针刺药的反应为爆燃型,延期药的反应为燃烧型,起爆药、猛炸药的反应为爆轰型,所以针刺延期雷管的反应机理是一种爆燃—燃烧—爆轰的爆炸反应机理,如图 3.3 所示。

在针刺延期雷管中,由于燃烧反应处于爆燃之后,并趋近于爆轰反应区的阶段,因此,爆燃转燃烧的反应过程是一种不容易进行的逆反应过程。但为了获得稳定的延时和精度,必须要得到爆燃转稳定燃烧的第 4 反应区,这样,必然将出现一个从高能到低能转换的第 3 反应区。由于第 3 反应区的反应比较复杂,它涉及针刺

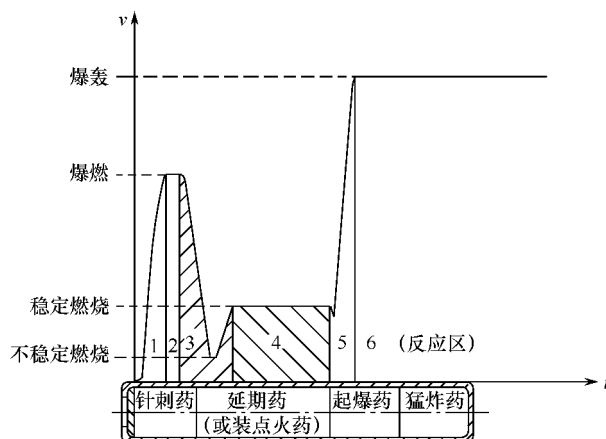


图 3.3 针刺延期雷管的反应机理

- 1——针刺药受冲击发后的反应区；2——针刺药的稳定反应区；
 3——针刺药爆燃反应产物点燃延期药的不稳定反应区（叫点火区）；
 4——延期药的稳定反应区；5——延期药反应产物引燃起爆药的爆
 轰成长反应区；6——稳定爆轰反应区。

药爆燃反应后的压力、温度、持续作用时间及延期药的热感度等影响因素，特别是含一定起爆药的针刺药都会形成一定强度的冲击能。这种冲击能不但不能点燃延期药，而且还破坏延期药装药结构，直接引发起爆药爆轰，严重影响延时与精度。因此，在第 3 反应区中，从针刺药爆燃转换到延期药的稳定燃烧及引发起爆药爆轰则是针刺延期雷管结构设计所必须研究的关键技术。从雷管结构看，可通过有效控制针刺药爆燃形成的冲击能，使第 3 反应区的影响最小，达到提高延时精度之目的。

2. 针刺延期雷管性能影响因素^[14]

延时及其精度是针刺延期雷管的最重要技术指标。影响这一指标的因素很多，如延期药的原材料粒度、延期药压药压力、引燃延期药的点火能量、雷管输入的针刺能量等都会对延时及其精度构成影响。

1) 延期药的影响

延期药影响延时及其精度的因素包括原材料粒度、粉末含量及压药压力等因素。首先,当原材料粒度小时,表面积增加,延期药燃速快,同时由于粒度小,混药均匀性较好,药剂一致性好。反之,粗粒度成分一致性差,延时精度差。因此原材料粒度越小,对提高燃速和延时精度均有较好的效果。其次,延期药造粒后,由于部分药剂未粘合成粒状而存在一定的粉末含量,虽然这些粉末含量对平均燃速无明显影响,但对延期精度却有显著的影响。实验表明,粉末含量低时,延期精度高。当粉末含量高时,流散性差,致使装配过程中药量损失相对较大,在定压压药时,就会出现延期药柱高度不一,同时由于流散性差,混药不均匀,使压药压力传递不好,压药密度也不一致。药柱高度和压药密度的不一致是延期精度差的主要原因,而粉末含量低的延期药则克服了这些不足,延期精度就好一些。

延期药压药压力对延期精度的影响,也就是装填密度对延期精度的影响。压药压力大,密度增加,药柱一致性好,燃烧热量不易向药剂深处渗入,从而使燃速降低,精度提高。当压药压力增大到一定程度时,压药密度基本不再增加,因此燃速及精度也无明显变化。

2)延期药引燃方式的影响

在针刺延期雷管中,引燃延期药的方式有两种:第一,用针刺药直接引燃;第二,用点火药引燃。在我国小型针刺延期雷管设计中,多采用针刺药直接引燃方式。国外一些针刺延期雷管如M76、F/MK420引信雷管等多采用点火药引燃方式。

实验表明,两种引燃方式的延时精度大不一样。用针刺药直接引燃延期药时,由于针刺药作用时有一定的猛度,延期药层受到一定的破坏,导致引燃延期药时其瞬间燃烧不稳定,延时精度较差。若针刺药药量过大,则会穿透延期药层,使延期时间缩短甚至引起瞬发。因此,在保证雷管感度及可靠引燃延期药情况下,针刺药药量越小越好。而通过点火药引燃延期药时,由于点火药作用属燃烧反应,所以对延期药层破坏很小,燃速相对稳定,但点火药

过多或过少也会使延期药出现燃烧不稳定现象,所以点火药存在一个最佳药量。

3) 针刺药与延期药之间加衰减器的影响^[15]

在针刺药与延期药之间加衰减装置同样能提高延时精度。衰减装置是一种金属或非金属惰性介质隔板,本身不参加反应,只是有效控制针刺药爆炸反应输出能量对下层装药反应的影响。它利用定向通道进行可靠点火,同时保证延期药按设计要求进行燃烧反应。这种要求实质上是使用最小的点火能量来减小延期药反应时的影响,成为缩短不稳定反应延滞期(如图 3.3 中第 3 反应区),提高延期精度的一种技术途径。

目前,已出现在延期雷管中的衰减装置有:圆片带孔型(两孔、多孔)、圆片缺一边、两边以及扇型等。其共同特点是具有避开中心部位的偏心小孔传火通道,并装配在针刺药的下端,而不同点是根据使用要求的不同,衰减片厚度和传火孔面积不同,以及形状和材料不同。一般而言,传火孔面积小,延期时间长;传火孔面积大,延期时间短。衰减装置的设计要按照使用条件进行匹配确定,而它们的主要影响因素是材料的强度和对应的厚度。用雷管进行有无衰减片时的对比试验,结果见表 3.8 所列。

表 3.8 有无衰减片时的对比试验

延 期 药	无衰减片时/ms			有衰减片时/ms		
	延时范围	均值	偏差	延时范围	均值	偏差
硼系	0.7~10.4	4.9	4.0	7~15.5	10.1	2.9
硼/斯蒂芬酸钡共沉淀	0.28~0.84	0.55	0.23	0.42~0.8	0.61	0.10
注: $\phi 3.85\text{mm} \times 7.2\text{mm}$, 延期药装药为硼系, 输入能为 30mJ; $\phi 2.5\text{mm} \times 7.2\text{mm}$, 延期药装药为硼/斯蒂芬酸钡共沉淀, 输入能为 120mJ						

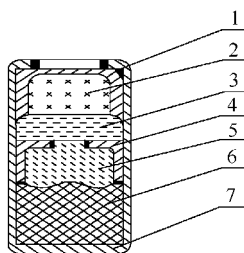
从表 3.8 中可知,不论是微秒级延期还是毫秒级延期,当使用衰减片时,延时精度都提高 1 倍多,因此,用衰减片能有效控制针刺药的输出能量,缩短爆燃转燃烧的不稳定反应区的影响,从而达到了提高延期精度的目的。

4) 雷管输入能量

输入能量大,延期时间短。实际使用时,由于弹丸着速大,动能大,雷管延期时间将变短。

3.3.2 复杂装药型针刺延期雷管设计^[16]

复杂装药型针刺延期雷管的基本装药为针刺药—延期药(或装点火药)—起爆药—猛炸药,典型结构如图 3.4 所示。有时,在针刺药与延期药之间还加衰减装置,结构比较复杂,是常用的针刺延期雷管结构。



3.4 复杂装药型针刺延期雷管结构

刺帽壳; 2—针刺药; 3—延期药; 4—加强帽;

5—起爆药; 6—炸药; 7—管壳。

1. 无衰减片的短延期针刺雷管设计

用于某迫击炮机械触发引信的短延期针刺雷管结构如图 3.4 所示,其主要技术指标为:尺寸为 $\phi 4.09\text{mm} \times 10\text{mm}$,发火能量为 $400\text{g} \cdot \text{cm}$,延期时间为 $7\text{ms} \sim 23\text{ms}$ 。设计的主要关键是发火可靠性设计和延期精度设计。结构上要保证针刺药热量散失小,药剂设计要保证针刺药的热量大、延期药的快燃速和高的压药压力。

1) 针刺药配方及装药设计

与瞬发针刺雷管用针刺药不同,延期针刺雷管对针刺药的输入输出要求较高,既要具有相当的敏感性和足够的输出热量,又同时要求输出猛度较小。针刺药直接关系着雷管的发火可靠性。几种针刺药的发火率见表 3.9 所列。

表 3.9 几种针刺药的发火率

配比	斯蒂芬酸铅 /%	四氮烯 /%	氮化铅 /%	硫化锑 /%	硝酸钡 /%	氯酸钾 /%	铝粉 /%	发火率 /%
1	27	5	9	41	18			15
2	20	5		35		40		40
3	50	2		28	20			50
4	25	2		39	35			80
5	37	3		20	37		3	100

配方 1 的发火率最低,主要原因是配方中含有起爆药氮化铅,其产生的冲击波没有衰减成热量,而是将热量冲散,使雷管中内腔的热量不集中,不能点燃延期药,造成瞎火。配方 2~配方 4 有一定的发火率,但还有瞎火现象,主要原因是针刺药发火后热量不够,不能点燃延期药,同样造成瞎火。配方 5 中加入了 3% 的铝粉,提高了药剂的放热量,达到了发火要求。所以针刺药要有足够的输出热量才能可靠点燃延期药。

针刺药的装填密度直接关系着产品的发火率。当装填密度较小时,反应后药剂所产生的热量不易集中,不能可靠点燃延期药。针刺药压药压力对产品的发火率的影响见表 3.10 所列。当压力达到 165MPa 时,发火率达到 100%。但当压力达 230MPa 时,含有四氮烯的针刺药将会出现压死现象。所以,最佳压药压力为 165MPa~180MPa。

表 3.10 针刺药压药压力对产品的发火率的影响

压药压力/MPa	109	135	165
发火率/%	96	98	100
试验数/发	50	50	50

2) 延期药燃速及装药设计

延期药燃速越慢,火焰感度越低,吸收热量越多,放热越少,产品瞎火率越高。延期药燃速应调整到能被针刺药可靠点燃,又能可靠点燃起爆药。实验确定延期药最佳燃速范围为 0.18 ms/mg~0.40ms/mg。延期药的压药压力对延期精度有重要影响。当压

药压力增大时,延期精度提高。其原因是压药压力大时,装药耐震动,锤击试验时不会松散,保证了装药密度。实验确定延期药压药压力为 120MPa~150MPa。延期药装药量误差对延期精度也有较大影响,药量误差应控制在 2mg 内。

3) 产品结构

为保证延期药可靠点燃起爆药,在延期药与起爆药之间使用了带孔加强帽。加强帽孔径越大,延期精度越差。加强帽孔径对延期精度的影响见表 3.11 所列。

表 3.11 加强帽孔径对延期精度的影响

孔径/mm	试验数/发	标准差/ms	极差/ms	备注
2.0	20	10.0	23.0	5 发速爆
1.5	20	4.0	23.0	1 发速爆
1.0	20	2.0	7.0	

从表 3.11 中可以看出,加强帽孔径较大时,延期精度较差,甚至出现了速爆现象。加强帽孔径较大而延期药装药量很小时,延期药层很薄,甚至有一部分未完全覆盖住传火孔,经震动、锤击试验后,延期药层被破坏,针刺火帽的火焰将直接传递到传火孔内的起爆药,造成速爆或延期精度差。实验表明,当加强帽孔径与雷管内径为 1:3 时,可起到延时和提高延期精度的作用。

由于配制的针刺药产气量多、爆压大,使药剂的热量朝着反向散失,即热量冲破针刺面散失,这将影响热量向延期药传递。所以,从设计角度看,应加强针刺面的厚度(针刺感度应主要通过药剂的敏感性保证),同时减小卷边直径。卷边直径越小,产品发火率就越高。卷边量增加,相当于增加了针刺面厚度,有利于包住针刺药热量而不散失,增加了向延期药传递的热量。实验表明,卷边直径应小于 2.5mm。

2. 带衰减片的短延期针刺雷管设计^[15]

带衰减片的短延期针刺雷管结构如图 3.4 所示。不同之处在于针刺药与延期药间装有衰减片。其主要设计为衰减片设计。以

应用于某迫弹引信的短延期针刺雷管为例,说明这类雷管的设计过程。主要技术指标为:尺寸 $\phi 5.12\text{mm} \times 10.5\text{mm}$;发火能量为 $180\text{g} \cdot \text{cm}$;延期时间为 $5\text{ms} \sim 40\text{ms}$ 。

1) 针刺药设计

针刺药是针刺延期雷管爆炸反应的发火源,同时又是点燃延期药燃烧的点火源,兼有发火感度、点火能力的双重作用。针刺延期雷管要求针刺药具有相当的敏感性、足够的输出热量和较小的猛度。由于针刺药与延期药间装有衰减片,所以针刺药的猛度可以比无衰减片的针刺延期雷管用药量稍大些。

为解决点火能力的不足,选用 LDL 针刺药,它主要由 $\text{Pb}(\text{CNS})_2$ (简称 L)、 $\text{CMC}-\text{Pb}(\text{N}_3)_2$ (简称 D)、 Sb_2S_3 (简称 L) 和 KClO_3 等 4 组部分组成。由于 LDL 针刺药中的 KClO_3 含量较高,反应后生成大量的 KCl 并残留在管壳内,增加了对下层药剂的点火时间,提高了点火能力,而 $\text{CMC}-\text{Pb}(\text{N}_3)_2$ 粒子能迅速分解扩散,缩短了氧化剂、可燃物分解反应的延滞期,从而加快了针刺药整体的反应速度。另外, $\text{Pb}(\text{CNS})_2$ 分解温度(190°C)较低,能够很快吸收击针冲击、摩擦、剪切产生的热量达到其分解温度,促成了起爆药、氧化剂、可燃物的分解反应,所以它又具有较好的针刺感度,使用 $90\text{g} \cdot \text{cm}$ 的能量就能使它可靠发火。实际装药量为 60mg ,压药压力为 $120\text{MPa} \sim 140\text{MPa}$ 。

2) 延期药设计

延期雷管的延期时间,主要取决于延期药。延期药用材料的熔点、发火点、反应热、生成热、生成物以及材料的纯度等和配方决定了延期药的性能。提高延期雷管的延期时间精度,主要取决于制造与使用过程的控制。这里选用硼—铬酸钡“共沉积”延期药($\text{B}-\text{BaCrO}_4$ 延期药)。 $\text{B}-\text{BaCrO}_4$ “共沉积”延期药可以通过硼含量变化调整延期时间(见表 3.12)。硼含量为 8% 时,就可以制造出百毫秒级延期雷管;硼含量低于 3% 时,流散性较好,利于装药,可以制造秒量级的延期雷管,但这种含量的硼延期药需要增加点火药点燃;硼含量在 19% 时,延期药燃烧速度约为 $10\text{ms}/\text{mm}$ 。

表 3.12 B—BaCrO₄ 共沉淀延期药硼含量对延期时间的影响

B 含量/%	装药量/mg	数量/发	测出时间/ms		
			T 范围	\bar{T}	σ
5	45	10	369~457	391.6	43.2
12	45	20	28.5~48.5	37.0	4.5
15	45	20	22.5~36.5	27.5	3.5
19	45	20	10.7~33.7	26.3	5.1

B—BaCrO₄ 延期药的制造也可用机械混合制造方法,其制造工艺与其他延期药机械混合工艺基本相同,根据需要加入粘合剂进行造粒。但是硼的纯度及配方中杂质的含量均影响延期时间,必须严格控制。一般机械混合的 B—BaCrO₄ 延期药适宜于 20ms 级以上延期时间的雷管。

延期药装药量不能太大或太小,应按照产品延期时间指标实验确定。当装药量太小时,药层太薄,针刺药反应的输出能量易穿透延期药装药层,损坏装药结构,造成没有延期时间;装药量太大,会带来增大产品高度尺寸以及热积累加速热传导等一系列的问题。装药量对延期时间的影响见表 3.13 所列。从中可以看出延期药装药量 40mg~50mg(压药压力为 120MPa)时,延期时间比较接近延期时间为 5ms~40ms 的中值 22.5ms,且精度较高。

表 3.13 装药量对延期时间的影响

B 含量/%	装药量/mg	数量/发	测出时间/ms		
			T 范围	\bar{T}	σ
19	5	9	4.5~24.2	12.9	5.6
19	10	10	4.5~12.9	12.9	4.3
19	15	10	9.0~33.0	18.0	7.5
19	20	10	10~21	15.5	3.5
19	30	10	11~37	20.0	8.4
19	40	50	17~29	20.5	4.4
19	50	20	19~33	24.0	4.5

3) 衰减片设计

位于针刺药与延期药之间的衰减片起衰减针刺药输出能量的作用。目前在延期雷管中使用的衰减片多是具有避开中心部位的偏心小面积传火孔。衰减片材质的影响主要是针对增大药剂初始击发能量而言的。由于药剂初始能量增大,反应速度急剧变化,输出猛度增大。在实际使用中,由于引信碰击目标时,引信击针产生较大的动能并激发药剂剧烈反应,从而使强度较差的衰减片材料组织出现结构破坏,造成对下端装药结构有影响。因此,衰减片不同材质及厚度对延期时间与精度有明显影响(见表 3. 14)。装有衰减装置的针刺延期雷管的结构客观上将击针戳击深度控制在一定高度,从而有效地消除来自于击针能量增加对延期作用时间的影响。例如,冲击功可以达到 $3600\text{g} \cdot \text{cm}$ 时也不影响产品的延期时间。有无衰减片时的影响对比见表 3. 15 所列。

表 3. 14 衰减片材料、厚度及戳击能量对延期时间的影响

材 料	厚 度 /mm	击针戳击能量 /g · cm	测出时间/ms			备 注
			<i>T</i> 范围	\overline{T}	σ	
聚乙烯	0. 68	416	18. 6~35. 3	26	4. 5	
		2900	0. 02~31. 6	12. 6	13. 6	有显著影响
酚 醛 层 压 布 板	0. 45	416	20. 2~34. 9	28. 7	4. 1	
		2900	2. 3~32. 5	15. 3	12. 1	有显著影响
	0. 60	416	32. 2~28. 5	25. 3	1. 65	
		3600	23. 1~33. 7	25. 3	3. 2	
	0. 8	416	21. 1~35. 1	25. 5	4. 8	
		2900	18. 0~31. 6	23. 5	4. 1	
纯 铝	0. 5	416	12. 1~36. 1	24. 6	5. 05	
		2900	19. 8~26. 3	23. 3	1. 83	
紫 铜	0. 3	416	23. 7~39. 6	31. 9	4. 2	
		2900	22. 9~39. 3	29. 3	3. 6	
锡	0. 6	416	12. 8~29. 2	23. 5	5. 6	
		2900	2. 3~23. 6	8. 9	8. 6	有显著影响

表 3. 15 有无衰减片时对延期时间的影响对比

衰减片	锤重/g	落高/cm	击针戳击能量 /g · cm	测出时间/ms		
				T 范围	\overline{T}	σ
无衰减片	52	8	416	0.3~34.0	15.2	8.9
有衰减片	52	8	416	23.2~28.5	25.3	1.7
无衰减片	200	18	3600	0.2~3.0	0.5	0.3
有衰减片	200	18	3600	23.1~33.7	25.3	3.2

3.3.3 简单装药型针刺延期雷管设计

简单装药型针刺延期雷管的基本装药为针刺延期药一起爆药—输出药。它无需衰减器,具有结构简单、装配工序简化等特点,可实现针刺延期雷管的小型化、微型化和高精度。微秒级和毫秒级延期均可采用这一结构实现。

1. 微秒级延期针刺雷管设计^[17]

对付空中目标的小口径弹丸,要求在浸入机体一定距离后爆炸,因此要求引信序列的延时为 $300\mu\text{s}\sim 800\mu\text{s}$ 。通常延期雷管的作用时间都是通过延期药层的稳定燃烧来获得的。对于微秒级小型针刺延期雷管而言,总高度受到限制,装延期药较为困难,但可以通过一种低爆速针刺药达到短延期要求。其基本装药为低爆速针刺药一起爆药—输出药,属简单装药型针刺延期雷管。从设计角度来说,微秒级针刺延期雷管的设计主要是低爆速针刺药的设计。

1) 低爆速针刺药选择

低爆速针刺药又称微秒级针刺延期药。在起爆药中,斯蒂芬酸铅是一种低爆速起爆药,可用此作为针刺延期药的起爆药组分。该针刺药基本组分为斯蒂芬酸铅、四氮烯、硝酸钡、硫化锑等。将斯蒂芬酸铅含量为 38% 的针刺延期药装填到 $\phi 3.85\text{mm}\times 4.5\text{mm}$ 的雷管中,测得作用时间为 $550\mu\text{s}$ 。本小节主要以该药剂为基础,进行装药条件讨论。

另一种微秒级针刺延期药是斯蒂芬酸铅和斯蒂芬酸钡的共晶

混合物,即(Pb, Ba)TNR,它具有斯蒂芬酸铅和斯蒂芬酸钡的某些特点,其性质介于起爆药与延期药之间。当斯蒂芬酸铅含量小于45%时,具有针刺延期药的燃烧性质,否则,具有起爆药性质。(Pb, Ba)TNR 填加2%的石墨后组成的延期药具有稳定的延期时间和较高的延时精度。这种微秒级针刺延期药的燃速和延时可通过控制共晶药剂中的斯蒂芬酸铅含量来调节,并精确分段,延期时间调节范围为 $100\mu\text{s}\sim 2000\mu\text{s}^{[18]}$ 。

2)装药量选择

在某些装药条件下,高速反应传播所经历的时间随着药层厚度的增加而延长(见表 3.16)。因此,可通过调整针刺药的装药量(药层高度)控制雷管作用时间。

表 3.16 装药量对雷管作用时间的影响

装药量/mg			作用时间/ μs	
针刺药	氮化铅	黑索今	平均值	标准偏差
25	32	28	354.0	135.4
26	36	22	433.6	191.8
28	33	20	630.2	283.0
30	32	18	695.6	229.0

3)压药压力影响

压药压力引起的装药密度变化也将影响爆轰成长过程。压药压力对雷管作用时间的影响见表 3.17 所列。

表 3.17 压药压力对雷管作用时间的影响

针 刺 药		中底层药	作用时间/ μs	
压药压力/MPa	密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	压药压力/ MPa	平均值	标准偏差
150	2.98	150	421.7	136.2
175	3.03	125	564.7	156.0
175	3.03	150	550.6	187.9
175	3.03	175	547.5	205.6
200	3.06	150	717.2	220.0

从表 3.17 可以看出,随着压药压力增加,针刺药的爆轰成长速

度变慢,因此,针刺药装药密度增加,雷管作用时间明显增大。在针刺药装药密度一定时,作用时间随第二层、第三层装药的压药压力增大而缩短,但由于爆轰反应经历的时间短,所以影响不显著。

4) 雷管输入能量对作用时间的影响

雷管输入能量对作用时间的影响见表 3.18 所列。从表 3.18 中可以看出,落锤不变时,落高增大,作用时间缩短。针刺药反应速度的快慢取决于单位时间内接受的能量。所以,戳击速度比落锤质量对作用时间影响更大。雷管作用时间随输入能量变化的特性,限制了直接用雷管作用时间来控制弹丸炸点的可能,而只有控制击针戳击能量和速度时(可通过引信设计控制),才能取得延期雷管的明显作用效果。

表 3.18 雷管输入能量对作用时间的影响

输入能/ $\text{g} \cdot \text{cm}$		52×5	52×12	56×16	52×20	200×5.2	200×8	200×20
作用时间 $/\mu\text{s}$	均值	722.2	505.0	392.6	321.3	555.7	586.6	253.0
	偏差	169.7	170.0	118.3	96.0	183.6	222.6	108.1

2. 毫秒级延期针刺雷管设计^[19,20]

简单装药型针刺延期雷管的结构同样能完成毫秒级延期的目的。设计的关键仍是针刺延期药的选择。以某产品为例,对其设计作如下介绍。某小型针刺毫秒级延期雷管是为某引信设计的首发起爆元件,在惯性力作用下被针刺激发,经过一定时间延期后,在不损坏引信回转体(尤其是轴向)的前提下,通过其径向输出可靠起爆下一级火工品(针刺雷管)。其主要技术指标为:尺寸 $\phi 3.68 \times 9.4\text{mm}$;发火能量 $156\text{g} \cdot \text{cm}$;延期时间: $2\text{ms} \sim 17\text{ms}$ 。

1) 针刺延期药配方设计

针刺延期药的基本要求是有较高的发火感度、合适的猛度和热量,且具有一定的延期时间。其基本设计思想是在常用 2 号针刺药基础上,通过填加第二可燃剂获得延期功能。可燃剂选择硅粉或硼粉,初步实验测得含硼针刺延期药作用时间约为 1.6ms ;而含硅针刺延期药作用时间约为 7.0ms 。因此,确定硅粉为第二可

燃剂。当硅粉含量为 15% 时,延期时间约为 9.0ms,位于 3ms~17ms 的中点。具体配方见表 3.19 所列。斯蒂芬酸铅的主要作用是增强火焰长度和点火能力,当含量增加时,针刺药猛度增大,延期精度变差;硫化锑在针刺药中是一种可燃剂,因其熔点高、硬度大,能影响药剂感度,同时又影响作用时间,其粉末度对药剂感度和作用时间的影响见表 3.20 所列;四氮烯是针刺药的敏化剂,能提高药剂感度;硝酸钡是氧化剂。影响延期时间和精度的主要因素是硅粉,粒度越小,混药的均匀性越好,影响延期时间和精度的结果见表 3.21 所列。一般而言,针刺延期药压药压力较大时,针刺感度也较高。试验证明,针刺延期药药量控制在 60mg,压药压力设计为 150MPa 时,能同时满足感度和延期时间等要求。

表 3.19 毫秒级针刺延期药配比

组分	配比/%	材料技术要求
硝酸钡	25	CQ39—CQ59 筛间物,粉末度 7%~10%
硫化锑	29	CQ39—CQ59 筛间物,粉末度 7%~12%
硅粉	15	纯度大于 99%,300 目筛下物
斯蒂芬酸铅	25	假密度 1.20 g/cm ³ ~1.25g/cm ³ ,CQ19—CQ54 筛间物
四氮烯	6	CQ15 筛下物

表 3.20 硫化锑粉末度对药剂感度和作用时间的影响

粉末度(CQ39—CQ59 筛间物)	发火率	延期时间/ms			
		均值	最大值	最小值	标准偏差
16%~20%	98/100	7.6	16.8	3.5	3.3
7%~12%	100/100	8.0	15.3	5.2	2.8

表 3.21 硅粉粒度对延期时间和精度的影响

硅粉粒度	延期时间/ms				试验数/发
	均值	最大值	最小值	标准偏差	
200 目筛下	10.7	16.1	3.4	2.3	50
300 目筛下	10.2	15.3	4.9	2.1	50

2) 针刺延期药混制工艺

由于硅粉粒度很小,粘性大,在纸鼓内混制既粘鼓又不均匀,所以应先将其中三组分分别称量后进行预混,然后加入其他组分,开机混制。考虑到因硅粉粒度很小易粘鼓造成的损失,所以应按16%投料,这样混制的针刺延期药各组分含量合格且均匀。

3) 产品结构设计

根据产品的使用要求,雷管应设计成厚底壳和薄管壳。为了降低轴向输出,在输出主装药内部使用了复式衰减垫。雷管示意图如图3.5所示。管壳材料选用L3M铝带,厚度为0.19 mm~0.24 mm。加强帽长度由径向输出部位和引信活击体的传爆通道确定,为可靠起爆,加强帽针刺部位厚度控制在0.04 mm~0.06 mm。增加底壳厚度及附加不同介质的衰减垫是为了减小雷管轴向输出的冲击波强度。衰减垫的金属材料采用L3M铝带,非金属材料采用强度高、易于冲压加工的绝缘纸板。为减小雷管轴向输出,输出装药选用糊精氮化铅起爆药,装药量为80 mg,压药压力设计为60 MPa,有利于保证回转体隔离可靠。

4) 雷管径向威力检验方法^[21]

当利用雷管径向威力起爆下一级火工品时,通常采用如图3.6所示的装置对其径向威力进行检验和质量控制。雷管径向产

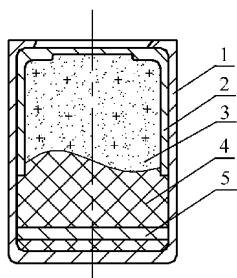


图 3.5 毫秒级延期针刺雷管示意图

- 1—雷管壳；2—延期管壳；
3—针刺延期药；4—输出装药；
5—复式衰减垫。

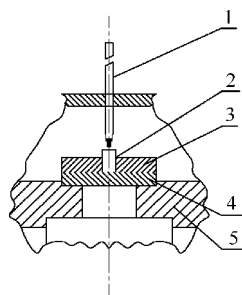


图 3.6 雷管径向威力检验装置

- 1—击针；2—雷管；3—上金属板；
4—铅板；5—雷管针刺试验器。

生的冲击波、爆炸产物作用于雷管放置的上金属板的孔内时,金属

板孔产生扩张变形,以其板孔前后变形的直径变化作为衡量雷管径向威力的依据。上金属板可采用塑性较好的铝板、黄铜板加工,但实验后发现这些材料变形量小,变形后形状不规则,特征值不显著,不宜作为检验手段。而采用铅板试验后,其变形后炸孔形状规则,便于测量,可以较好地用于检验和质量控制。所以,雷管轴向威力可采用铅板炸孔测定。

3.4 组合式针刺火工品设计与应用

小口径弹多用于防空作战,这类引信一般都要求具有自毁作用,因此,其传爆序列除设置主发火序列外,还需考虑一套点燃远解延期件和起自毁作用的药盘的自毁传爆序列。原则上,这种远距离解除保险和自毁功能既可以用机械机构也可以通过火工品作用来完成。由于传统的药盘和远解延期用黑药不防潮,长贮性能差,元件数量多,工艺结构复杂,失效率高,所以曾试图用机械延期取代。然而,机械延期需要的机械零件多,精度高,造价昂贵,另外还易受弹道变化的影响。为此,需要将成熟的单一火工件组合成具有多用途、多功能、可弯曲的密封式组合火工品,即用一个密封的组合火工件完成发火、点火、延期、起爆等序列的功能,这既解决了火工品密封问题,又简化了引信的设计。到目前为止,完成自炸作用的一端输入、一端输出的一入一出组合点火管已用于机械 1B 型子弹引信中,完成自炸作用和远解作用的一端输入、二端输出的双延期组合点火管也在 DST-1 型引信中得到了应用^[22]。

3.4.1 一入一出组合点火管设计

1. 一入一出组合点火管设计^[23]

某子弹引信的原自毁传爆序列是由 2 号火帽、延期药盘(槽内装压初点火药、主点火药、主延期药、扩焰药)、两个黑药柱和 36 号火焰雷管等 4 种独立的元件组成的。其主要缺陷有:第一,所用火工品不密封,长贮吸潮,不能满足长贮性能要求;第二,火工品元件

多,对引信和装配存在不安全隐患;第三,药盘为敞开式结构,存在蹿火殉爆的可能;第四,药盘中所用火药品种类多,对装药的准确性不易控制,容易影响延时精度。因此,根据引信要求,提出了用径向发火技术,制造径向 360° 任意击发发火并能点火的针刺点火管,用长延期药制造可弯曲的柔性延期索,用起爆药制造具有一定威力和能量的接力管,将三者组合成一个密闭的,具有径向 360° 任意击发发火并且点火、延期、传爆的多功能的柔性组合点火管,在原引信结构不变的条件下,卧装在引信药盘中,达到完成自毁的延时功能。其作用序列如图 3.7 所示。

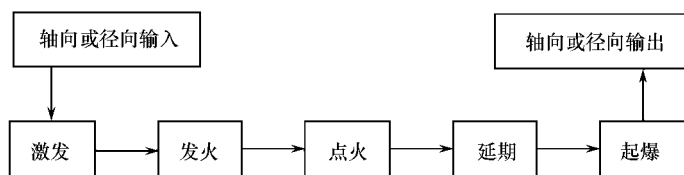


图 3.7 一入一出组合点火管作用序列

1) 总体结构

一入一出组合点火管是由点火管、延期索、接力管等三部分密封连接的延期元件(见图 3.8)。点火管是输入端,其发火形式为针刺型或火焰型;延期索是延期件,由金属管内装延期药拉制而成,具有一定的柔性,能弯曲盘绕;接力管是输出端,能输出火焰或爆轰波。

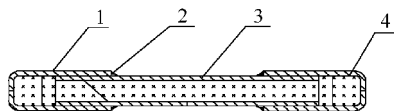


图 3.8 一入一出组合点火管结构

1—点火管; 2—密封漆; 3—延期索; 4—接力管。

针刺型组合点火管就是将针刺火帽、金属延期索和火焰接力管等三件火工品密封连接而成,它实际上是一个具有针刺发火、点火、延期和起爆多项功能的传爆序列。轴向和径向均可实现针刺

发火,组合点火管的延期索部分在 $R \geq 3\text{mm}$ 条件下任意弯曲后,仍能可靠传爆。点火管与输出管之间的距离可调。用柔性发火延期组合点火管取代引信中的自毁传爆序列,除可完全替代其功能以外,还实现了传爆序列的一体化设计,密封性得到提高,同时传爆更可靠,结构更简单。针刺型组合点火管可看作是对传统的刚性针刺延期雷管的技术延伸和创新设计。

2) 点火管设计

点火管应具有合适的感度和足够的点火能力,在外界能量的作用下,能可靠发火并点燃延期索。它通常有针刺型和火焰型两种形式。

针刺型点火管由管壳内装击发药、过渡药压制而成(见图 3.9(a))。过渡药由 20mg 的 $\text{B}-\text{Pb}_3\text{O}_4$ 延期药及 40mg 的 $\text{B}-\text{BaCrO}_4$ 组成,其稳定反应期分别为 10ms 和 20ms。由于针刺药直接点燃直径小于 1.5mm 的延期索药芯较为困难,所以,点火管中的针刺药先点燃过渡药 $\text{B}-\text{Pb}_3\text{O}_4$ 和 $\text{B}-\text{BaCrO}_4$,再由过渡药点燃延期索药芯。针刺型延期组合点火管兼有火帽功能,能接受击针从轴向或径向 360° 任意方向的戳击,发火能量为 $200\text{g} \cdot \text{cm}$,故在装入延期机构中可省去上一级针刺火帽。为了实现径向的可靠发火,首先要将壁厚控制在 0.09mm 以下,且击针尖要有 0.05mm ~ 0.20mm 的小平面。击针越尖,对发火越不利^[24]。

火焰型点火管则由管壳内装涂硝棉漆的稠垫、点火药、过渡药压制而成,结构示意图如图 3.9(b)所示。火焰型延期组合点火管适应于多种方式点火,如配以针刺火帽、撞击火帽、电点火头(管)就可形成针刺发火延期机构、撞击发火延期机构、电发火延期机构等。

3) 延期索设计

延期索是组合点火管的核心元件。它应具有均匀的燃速和一定的柔性。延期索由金属管(如银、铅锡合金管)内装入延期药,经多次过模拉细而成,能够保证装药密度的一致性和外表的密封性。燃速快的延期索可拉制成多个药芯,以提高延时精度;燃速慢的延期索可拉制成单芯,以防止断火。延期索的燃速主要由延期药的性质决定,并且与装药密度、金属管的材料和尺寸有关。

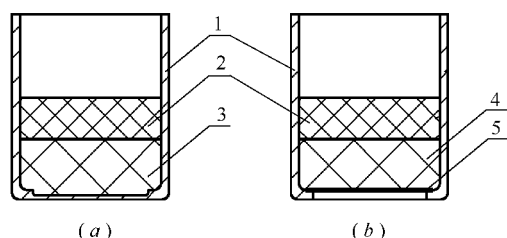


图 3.9 点火管结构示意图

1—管壳；2—过渡药；3—击发药；4—点火药；5—绸垫。

常用的延期药是微气体延期药，它由金属和金属氧化物组成，其特点是产生的气体少，受环境压力影响不大。其燃速由药剂成分、粒度、掺合物决定。三种常用微气体延期药的燃速和延时精度见表 3.22 所列。

表 3.22 三种常用微气体延期药的燃速和延时精度

延 期 药	硼系延期药	硅系延期药	钨系延期药
燃速/ $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	7~14	0.4~28	0.15~0.5
延时精度/%	5~6	2.5~10	2.5~4

延期药的粒度与燃速成反比；装药密度与燃速成反比；掺入不反应的情性物质如硅藻土、二氧化硅等可降低燃速；掺入在低温下反应的物质如金属、金属氧化物可提高燃速。由于微气体延期药的发火温度较高，点火比较困难，一般需要借助点火管内的过渡药来点燃。微气体延期药燃烧后产生高温残渣，输出为接触点火。

4) 接力管设计

接力管实际上为火焰雷管，它应能被延期索可靠点燃，并输出适合下一级火工品点火或起爆的能量。通常在管壳内装入点火药、起爆药或猛炸药，用于点燃火焰雷管、耐水药柱、传火管或起爆针刺雷管、炸药柱等。

5) 延期索与接力管联接工艺^[25]

在组合点火管批生产时，曾出现过接力管失效的情况，经分析认为主要原因是延期索与接力管的联接工艺有问题。由于延期索

与接力管为密封接口,所以微气体延期药燃烧产生的气体传到联接处时,会形成一定压力的气流,当其压力大于延期索可承受的强度时,延期索将被击穿,能量外泄,从而导致接力管不能正常作用;另一方面,当气流压力超过延期索与接力管的联接强度时,延期索在联接处被拉离,延期索端面与接力管药面之间产生间隙,从而使延期索燃烧面不能接触接力管的点火药,造成接力管作用失效。将延期索与接力管的联接工艺由滚压式不间断联接工艺改为点铆式联接后,由于延期索与接力管铝壳热膨胀系数不同,且两铆点间延期索与接力管内壁是圆柱面接触,因此,当其受热膨胀时,会产生微小间隙,气体将及时泄出,不会形成过压,延期索不会被击穿或在联接处被拉断,从而保证了延期索的全部能量全部传到接力管,使之可靠引爆。

组合点火管使用时,往往装入金属药盘内,由于金属药盘吸热较强,会影响延期药的燃烧稳定性,从而造成组合点火管出现个别断火现象。这个问题可通过两种方法解决,一是将延期索采用绝缘热缩管包覆,增加隔热功能;二是将金属药盘改为硬塑料药盘。

2. 单延期组合点火管性能特点

组合点火管首先具有延期精度高和作用可靠的特点,其结构设计改变了传统的药盘延期方式。采用金属管内装延期药,既保证了装药密度的一致性,又起到了密封作用,同时增设的点火管和接力管分别具有点火过渡和输出放大功能,有效地提高了延期精度和作用可靠性;其次,可方便地形成系列化产品,既能接受针刺或火焰输入,并能输出火焰或爆轰波,其长度、外径以及燃烧时间等可以根据引信的使用环境和具体要求进行调整;最后,组合点火管适宜装配和各种环境要求。由于具有较好的柔性结构,能方便地进行装配,而密封结构又保证了不蹿火和耐各种自然环境的要求。延期组合点火管有极强的防潮性能,解决了非密封引信用不密封火工品在长贮中因自然吸潮而造成的性能降低、使用寿命缩短的问题。

3.4.2 一入二出双延期组合管设计^[26]

双延期序列组合火工品是两个单延时期序列组合火工品的合成,即一端输入,两端延期并各自爆炸输出。其功能是利用一端的短延时爆炸,完成引信的远解保险,而当引信主发火机构失效时,则利用另一端的长延时完成引信的自毁。由于双延期组合管具有一入二出功能,且结构简单,从而简化了引信发火机构和传爆序列的结构设计。作用过程如图 3.10 所示。这种类型的组合火工品可应用于要求具有远解和自毁功能的小口径引信中。

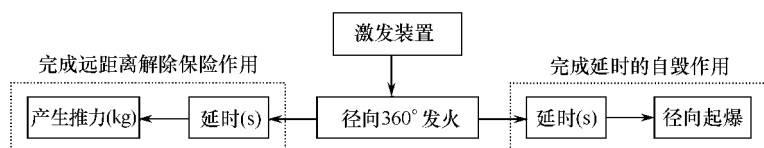


图 3.10 一入二出组合管作用过程

由于一入二出组合管的发火过程是从中间发火,向两端点火,所以,设计的主要关键在于解决点火源能量分散、点火不集中的问题,设计的主要内容是发火区药剂和点火区药剂的选择。发火区药剂主要是击发药,要求具有较高的发火感度、较低的反应猛度和较强的点火能力。点火区药剂由扩焰药和点火药两部分组成。扩焰药主要是接发火药的药剂,点火药是接扩焰药,放大点火能量。几种发火药和扩焰药配比分别见表 3.23 和表 3.24 所列。

表 3.23 几种发火药配比

编号	四氮烯 /%	铅钡共晶 /%	苦味酸铅 /%	BaNO ₃ /%	Sb ₂ S ₃ /%	BaCrO ₃ /%	Pb ₂ O ₅ /%
316	7	27		26	40		
317	4	27		26	40	3	
318	4	35		26	32	3	
324	7		15	33	40		5

表 3.24 几种扩焰药配比(粘合剂 0.1%混合造粒)

编号	Zr. Al/%	PbO ₂ /%	Pb ₃ O ₄ /%	KClO ₃ /%	B/%
15	46	30		24	
16	40	20	10	24	6
17	46	20	10	24	
18	46	10	20	24	
19	40	10	20	24	6

点火药选用 Zr/Al/BaCrO₃, 远解端延期药选用 Zr/Al/W/BaCO₃ 百毫秒级延期药, 自毁端延期药选用 W/BaCrO₃ 秒级延期药, 输出药剂均选用羧甲基纤维素氮化铅。不同发火药和扩焰药的试验结果见表 3.25 所列。

表 3.25 不同发火药和扩焰药的试验结果

	组合 1	组合 2	组合 3	组合 4	组合 5	组合 6	组合 7
发火药编号	316	317	317	317	317	318	324
扩焰药编号	15	15	17	18	19	18	18
远解端时间精度	可	差	差	可	差	可	可
远解端引爆率	10/10	10/10	7/8	28/28	28/28	15/15	20/20
自毁端引爆率	9/10	9/10				13/15	20/20

从表 3.25 中可以看出, 发火药猛度过大会使点火能力降低。发火药是组合火工品的初始装药, 发火后的稳定输出是点火的关键技术, 猛度高、热能量低都不利于点燃下一级装药。可靠点燃下一级装药的针刺发火药必须要有一定的点火能量和合适的能量释放速率。释放的能量过猛, 就会造成很高的点火压力峰, 且由于点火热流对下一级装药的作用时间短, 不能建立足够的预热层, 因此会出现瞎火现象; 反之, 如果释放能量过长, 单位时间内释放出的能量不够大或过于分散, 也容易造成瞎火的现象。能量释放方式主要由针刺药本身决定。因此, 需要一种感度适合、激发发火后能进行稳态燃烧反应的药剂, 来满足组合火工品的要求。碱式苦味酸铅属于弱起爆药, 其起爆能力低于斯蒂芬酸铅, 而点火能力略高

于斯蒂芬酸铅。碱式苦味酸铅自身延期时间为 $500\mu\text{s} \sim 650\mu\text{s}$, 比斯蒂芬酸铅和铅钡共晶的自身延期时间 ($350\mu\text{s} \sim 450\mu\text{s}$) 均长。所以, 以含碱式苦味酸铅配比的混合击发药具有发火感度高、反应猛度低和点火能力强的特点, 适合于双向点火。实际使用的碱式苦味酸铅型针刺药的配比为: 碱式苦味酸铅 $16\% \sim 18\%$ 、四氮烯 $5\% \sim 6\%$ 、 BaNO_3 $34\% \sim 36\%$ 、 Sb_2S_3 $39\% \sim 41\%$ 、 $\text{PbO}_2 \leq 2\%$ [27]。

当发火药猛度较低时, 扩焰药的反应速度起重要的作用。在选择高热材料的同时, 应考虑选用反应较为缓和的扩焰药, 适当延长其反应的时间, 使点火充分反应, 以增加热效应产物, 提高传递点火的能量。扩焰药选择以 $\text{Zr}-\text{Al}$ 为主体配方的药剂较为合适。

3.5 实际使用中的针刺火工品性能

针刺火工品的感度和作用时间大多数是在静态条件下测到的结果, 但实际使用过程中, 击针戳击针刺火工品都是在动态条件下完成的, 所以击针戳击深度、击针动态能量和高过载是影响针刺火工品实际使用性能的主要因素。

3.5.1 击针动态能量对针刺雷管感度的影响 [28, 29]

针刺火工品静态感度性能测试通常是在落锤仪或落球仪上进行的, 即击针放在针刺火工品表面不动, 而是通过位于一定高度的锤或球落到击针上对火工品进行作用, 这种作用过程与引信发火机构中的发火环境相差很大。实际发火过程可能有: 第一, 膛内点火, 在膛内惯性力作用下针刺点火; 第二, 弹道点火, 在离心力或弹簧位能作用下针刺点火; 第三, 着发点火, 在高速撞击目标作用下针刺点火。它们的共同特点是击针以一定的速度刺激火工品。理论分析认为, 击针以高速刺击火工品可提高针刺火工品的针刺感度并缩短作用时间。而火工品的感度和作用时间直接关系着引信的安全性和可靠性。

1. 火帽针刺感度动态试验

一般说来,火工品静态感度测试值要比动态值低,其原因之一是静态测试有落球与击针碰撞时的变形能和弹性波能的损失而使有效能量降低;另一原因是击针的戳击速度不同。火工品动态感度测试可采用运动雷管式针刺感度仪进行(见图 3.11)。它是将雷管或火帽放置在转轮边缘上的一个固定的雷管座中,待转轮转速达到试验要求值时,由控制仪给控制击针载体运动的电磁阀一个触发信号,击针载体适时地将击针送到雷管运动轨迹上等待击发。当火工品与击针碰撞时,击针刺入火工品使其发火。此时的击针与火工品的碰撞等同于击针以一定速度下落撞击火工品。对 HZ-2 火帽进行了动态测试,并将结果与静态试验结果进行了对比,见表 3.26 所列。

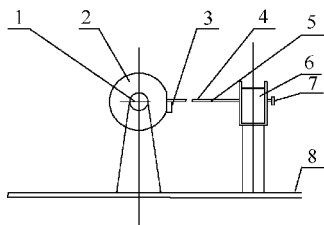


图 3.11 运动雷管式针刺感度仪

1—测速孔; 2—圆盘; 3—雷管座; 4—击针; 5—击针载体;
6—电磁阀; 7—击针载体拉手; 8—测速仪底座。

表 3.26 HZ-2 火帽动静态试验结果对比

试验条件	动态试验		落球式静态试验			
	1.2g 击针		96.4g 落球		196.4g 落球	
发火率	0	100	0	100	0	100
能量/mJ	3.75	15.00	9.35	56.10	9.62	67.036
击针/落球速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	2.50	5.00	0.44	1.08	0.31	0.83

从表 3.26 中可以看出,在相同发火率时,动、静态试验的能量和击针速度均有很大的不同,静态试验所需的动能是动态的 3

倍 ~ 4 倍,而动态试验的击针速度是静态落球速度的 5 倍 ~ 8 倍。

2. 针刺火帽动静态感度试验关系

为了考察动静态试验的关系,需要使动态试验的击针质量和速度与静态试验落球的质量和速度尽量一致。使用如图 3.12 所示的低速动态模拟测试装置对 HZ-2 火帽进行了击针低速发火试验,并使用大质量的标准击针(10g)以降低戳击速度,而静态试验采用固定落球(10g)逐步降低击针质量,这样动静态试验的速度与能量逐步逼近。试验结果见表 3.27 所列。

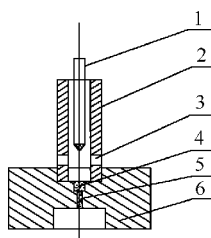


图 3.12 低速动态模拟测试装置

1—击针；2—导管；3—排气孔；4—底座；5—火工品；6—泄爆孔。

表 3.27 HZ-2 火帽动静态逼近试验结果

试 验 条 件	击 针 质 量 /g	撞 击 速 度 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$		
		$V_{0.1}$	V_{50}	$V_{99.9}$
动 态 试 验	10.0	0.65	0.99	1.51
静 态 试 验 (落 球 10.0g)	0.6	0.62	0.96	1.48
	1.2	0.65	1.03	1.64
	2.5	0.69	1.09	1.72
	5.0	0.75	1.15	1.79
	10.0	0.84	1.30	2.02
注:动态试验的撞击速度以自由落体的击针末速度计算;静态试验的撞击速度以自由落体的落球末速度计算				

从表 3.27 中可以看出,对于静态试验而言,随着击针质量的下降,其发火速度逐渐降低,即火工品的感度测试值增大,而且其

速度在下降过程中逐渐逼近动态试验结果。可以说,动态试验是静态试验的极限情况。理论上认为,当把静态试验的击针质量降到无限小时,则落球与击针碰撞过程中的能量损失也趋近于无限小,其试验结果就与具有相同能量的动态试验结果完全一致。表 3.27 中击针质量 0.6g 的静态试验结果小于动态试验结果,其主要原因是在动态试验中,由击针与导管壁之间的摩擦作用所引起的误差所致。

3. 针刺雷管感度的动态试验

为解决因落球回跳及偏心撞击击针而出现能量损失问题,以便更准确地测量针刺感度,韩国 Jun—Sik Hwang 设计出一种空气炮驱动击针装置,并使用了美国标准击针(长 16.25mm,直径 1.46mm,锥角 26°),采用动态击针测量了 M55 针刺雷管的感度,感度结果如表 3.28 所列^[30]。

表 3.28 M55 雷管动静态试验结果对比

试验方法	发火概率/%	99	90	50	5
空气炮	能量/ $10^{-4}\text{N}\cdot\text{m}$	17	15	12	7
空气炮	能量/ $10^{-4}\text{N}\cdot\text{m}$	18	15	11	3
落球仪	高度/mm	55	47.6	38.5	20.2
	能量/ $10^{-4}\text{N}\cdot\text{m}$	39	34	27	14

从表 3.28 中可以看出,真实的针刺能量约为落球仪所测能量的一半。

4. 动静态针刺起爆过程比较及意义

动静态针刺起爆都属于热点起爆。根据热点理论,热点的形成要有一定的温度、半径和能量要求,同时还有作用时间要求。在动态试验中,由于击针速度快,摩擦形成的热量来不及散发出去,易于形成热点。而静态试验除落球与击针碰撞能量损失外,落球速度及击针刺入速度慢,热量散失较多,热点不易形成,因此感度低。也就是说,在相同的初始能量下,速度大的击针具有较高的温升,表现为感度较高。针刺火工品在实际使用中的作用过程与动

态试验过程一致,所以,用静态感度测试值表征的火工品发火能量,在实际使用时表现为火工品易于发火,作用可靠性提高。而火工品装配过程中的作用过程与静态试验过程有类似之处,所以,用静态感度测试值表征的火工品不发火能量,表现为装配过程中的安全性。

3.5.2 击针戳击能量和深度对雷管延期时间的影响^[31]

随着弹丸口径、着地速度及侵彻地面条件的不同,机械触发引信中的击针作用到雷管的能量也不同。当弹丸越重、着地速度越高、地面介质系数越大时,弹丸侵彻所受的阻力也越大,弹头的引信及引信中的击针等所承受的侵彻作用也越大。所以,为适应这一情况,引信设计者提出了在 $15000\text{g} \cdot \text{cm}$ 大戳击能量下考查针刺延期雷管的延时可靠性的要求。

1. 戳击能量对针刺延期雷管延时可靠性的影响

戳击能量对针刺延期雷管延时的影响主要表现在击针戳击深度的影响。以 41 号针刺毫秒延期雷管为例,其试验结果见表 3.29 所列。

表 3.29 戳击能量和深度对 41 号雷管延期时间的影响

戳击能量 / $\text{g} \cdot \text{cm}$	戳击深度 / mm	延期时间/ ms			试验数量 /发
		时间范围	平均时间	标准偏差	
400	自由高度	12.43~30.59	24.9	5.51	10
3000	3.0	16.46~28.54	25.0	4.96	5
	4.0	14.02~25.35	20.1	4.80	5
6000	3.0	14.24~27.61	21.0	5.32	5
	3.7	22.2~28.03	24.7	3.01	3
	5.0	2.76~2.97	2.9	0.11	3
9000	3.0	27.25~30.80	26.7	4.89	4
	3.7	1.98~13.17	5.9	6.76	3
	5.0	2.19~2.46	2.3	0.13	3

(续)

戳击能量 /g · cm	戳击深度 /mm	延期时间/ms			试验数量 /发
		时间范围	平均时间	标准偏差	
12000	3.0	20.33~29.81	24.3	4.05	4
	3.7	1.96~2.06	2.0	0.05	3
	5.0	1.99~2.30	2.0	0.02	3
15000	3.0	17.48~26.39	23.3	3.50	5
	3.7	1.83~23.20	15.6	11.95	3
	5.0	1.74~1.91	1.86	0.06	3

从表 3.29 中可以看出对 41 号针刺毫秒延期雷管而言,有如下特征:第一,当击针戳击深度控制在 3.0mm~3.5mm 时,戳击能量为 15000g · cm 时都不会对雷管的延时有影响;第二,当击针戳击深度控制在 3.5mm~4.0mm 时,戳击能量从 6000g · cm 时才会对雷管的延时有明显影响;第三,当击针戳击深度控制在 5.0mm 时,戳击能量从 3000g · cm 时,雷管的延时有明显的缩短。这表明雷管的延期时间必须在一定戳击深度条件下,才能保证延期作用的可靠性。

2. 戳击深度影响因素分析

影响击针戳击深度的主要因素是雷管的装药结构,特别是雷管中延期药的结构。例如 41 号针刺毫秒雷管从针刺药到延期药装药高度的最小距离是 3.9mm,成品高度为 10.4mm,能承受击针戳击深度最大值为 3.0mm。66 号针刺延期雷管从针刺药到延期药装药高度的最小距离是 5.2mm,成品高度为 10.0mm,能承受击针戳击深度最大值为 4.5mm。所以,雷管装药结构中针刺药—延期药的装药高度越高,能承受击针戳击的深度就越深。所以,在高戳击能量下,当击针戳击深度超过装药的极限高度时,延期药的装药结构被破坏,导致延期药不能按照设计要求进行分层燃烧反应,这可能造成针刺药的反应产物随击针穿透延期药层而直接引爆下层装药,从而使雷管延时功能失效。因此,引信使用

时,要从设计上确保击针戳击深度小于某一定值,才能适应大戳击能量的使用要求。

3.5.3 高过载对针刺火工品性能的影响^[32]

利用火工品动态着靶模拟装置可以进行高过载对针刺火工品的作用影响研究。作用影响分两方面:其一是针刺火工品经高过载(如发射膛内)后,产品性能(感度、作用时间、输出)的变化;其二是针刺火工品经高过载(如发射膛内)后,在侵彻着靶过程(速度 100 m/s~300m/s)中作用时间的变化。

1. 高过载对针刺火工品性能的影响

某小型短延期针刺雷管经 80000g、1ms 高过载后的性能变化见表 3.30 所列;41 号针刺延期雷管经 100000g、1.17ms 高过载后的性能变化见表 3.31 所列。

表 3.30 某短延期针刺雷管经高过载后的性能变化(锤重 10g)

性能参数	发火感度/ $\text{g} \cdot \text{cm}$		100g·cm 下作用时间/ms		输出/mm	
	50%发火	偏差	作用时间	偏差	炸孔	偏差
未经高过载	53.1	10.0	2.93	2.17	4.07	0.36
经 80000g、1ms 后	69.2	14.6	3.93	6.30	3.92	0.44

表 3.31 41 号针刺延期雷管经高过载后的性能变化(锤重 52g)

性能参数	发火感度/ $\text{g} \cdot \text{cm}$		520g·cm 下作用时间/ms		输出/mm	
	50%发火	偏差	作用时间	偏差	炸孔	偏差
未经高过载	4.29	2.04	33.20	8.17	8.93	0.10
经 100000g、1ms 后	3.95	0.76	27.64	4.04	8.96	0.05

从表 3.30 和表 3.31 中可以看出:第一,产品经高过载后,发火感和作用时间均有变化,而输出性能变化基本不变;第二,不同雷管经高过载后的影响不同。某小型短延期针刺雷管经高过载后,发火感度降低,作用时间变长,而 41 号针刺延期雷管经高过载后则发火感度略有提高,作用时间变小。这主要与产品的装药结

构、装药密度有关。

2. 高过载后动态着靶对作用时间的影响

实际使用中,击针与雷管的戳击速度和着靶速度密切相关。41 号针刺延期雷管经 100000g、1.17ms 高过载后,在着靶速度为 100m/s~300m/s 的作用时间变化见表 3.32 所列。

表 3.32 高过载后动态着靶对作用时间的影响

	未经高过载的作用时间/ms			经 100000g、1ms 高过载后的作用时间/ms		
	平均值	偏差	试验数	平均值	偏差	试验数
静态 520g·cm	33.20	8.17	14	27.64	4.04	
静态 2000g·cm	25.29	3.36	6	26.08	3.14	
动态				25.74	6.75	21

从表 3.32 中可以看出,在静态测试条件、低戳击能量下,未经高过载的作用时间大于高过载后的作用时间,但在静态高戳击能量下的作用时间、静态低戳击能量高过载后的作用时间和动态高过载后的作用时间等基本相同。这说明可以在静态研制中,用高戳击能量下的作用时间来评估、考核实际使用环境(动态、高过载后)的作用时间是可行的。

3.6 针刺雷管通用要求与系列化设计

火工品的系列化设计对实现通用化、简化品种、降低成本,简化战时弹药火工品管理与供应至关重要。所以,今后发展的火工品应按照“三化”原则进行研制。针刺雷管系列化设计主要包括尺寸系列化、输入能量系列化和通用要求三方面。

3.6.1 针刺雷管尺寸系列

尺寸由直径和高度组成。1975 年,美国军标 MIL—STD—320A《引信用爆炸元件的术语尺寸和材料》较为明确地提出了要

求。1990 年,在参考美国军标的基础上,我国制定了相应的军标。结合国内外针刺雷管的产品尺寸和使用情况,强调继承性和可发展性,确定了以后针刺雷管设计的尺寸系列,如表 3.33 所列。

表 3.33 针刺雷管设计的尺寸系列(单位:mm)

直径	2.22	2.84	3.17	3.73	3.85	4.09	4.89	6.12	6.98			
高度	2.54	3.17	3.63	3.81	4.44	5.33	6.35	7.36	8.00	8.68	9.40	10.00

针刺雷管所用直径(ϕ)共九个系列,除增加了 2.22mm、3.85mm 两个尺寸外,其余尺寸完全等同于美国军标。1981 年,美国出现了用于中口径加农炮弹药引信的 M758、M759 雷管(直径均为 2.22mm),并列入 1985 年的 MIL-HDBK-777《美国引信火工品手册》,该尺寸可以看成是对 1975 年 MIL-STD-320A 形成后的一个补充,而增加 3.85mm 尺寸则完全是考虑到现役产品的实际情况。在现役针刺雷管中,该尺寸占的比例较高,装备量也较大,且该尺寸的生产模具、工艺、生产线布局相当完善。基型直径尺寸确定为 3.73、3.85、4.89、6.12(mm)。

针刺雷管高度(h)一般在 10mm 之内,否则将会引起隔爆安全性问题。高度系列完全采用美国军标。基型高度尺寸确定为 3.63、4.44、6.35、9.40(mm)。基型针刺雷管尺寸为 $\phi 3.73\text{mm} \times 3.63\text{mm}$ 、 $\phi 4.89\text{mm} \times 4.44\text{mm}$ 、 $\phi 3.85\text{mm} \times 6.35\text{mm}$ 、 $\phi 4.09\text{mm} \times 9.40\text{mm}$ 、 $\phi 6.12\text{mm} \times 9.40\text{mm}$ 。

3.6.2 针刺雷管输入能量系列化设计

针刺雷管的发火刺激主要是以落在标准击针上的落球高度与落球质量之积来表征的,即通常所说的单位为 $\text{g} \cdot \text{cm}$ 。国外发火能量有 56、72、90、112、290、355、425、433、740、880($\text{g} \cdot \text{cm}$)等 22 种;国内发火能量有 56、72、80、112、120、156、180、200、300、312、364、400、416、420($\text{g} \cdot \text{cm}$)等多种。

以 $200\text{g} \cdot \text{cm}$ 为感度增量,将发火能量划分为三个区域。具体如下。

(1)第一能量区域为 $[0, 200]$ 。先假设第一能量区域为 $[0, X]$,其中: $X=0+200\times 1=200$,即 $[0, 200]$ 为第一能量区域。将这一能量区域的产品称为敏感针刺雷管,以 $56\text{g}\cdot\text{cm}$ 、 $112\text{g}\cdot\text{cm}$ 等两种能量为典型代表。

(2)第二区域为 $[200, 600]$ 。先假设第二能量区域为 $[200, Y]$ 其中: $Y=200+200\times 2=600$,即 $[200, 600]$ 为第二能量区域,将该能量区域的产品称为非敏感针刺雷管,以 $200\text{g}\cdot\text{cm}$ 、 $300\text{g}\cdot\text{cm}$ 、 $400\text{g}\cdot\text{cm}$ 等三种能量为典型代表。

(3)第三能量区域为 $[600, 1200]$ 。同样先假设第三能量区域为 $[600, Z]$ 。其中 $Z=600+200\times 3=1200$,即 $[600, 1200]$ 为第三能量区域,将该能量区域的产品称为钝感针刺雷管。

目前国内外所有针刺雷管的发火能量都集中在第一、第二能量区域,所以,主要考虑这一能量区域的能量系列化。根据现役国内外产品实际情况,确定 56 、 112 、 200 、 300 、 $400(\text{g}\cdot\text{cm})$ 五档作为针刺雷管基型输入能量系列,其对应的不发火能量系列为 8 、 20 、 20 、 26 、 $26(\text{g}\cdot\text{cm})$ 。针刺雷管输入能量系列见表 3.34 所列。

表 3.34 针刺雷管输入能量系列

能量系列/ $\text{g}\cdot\text{cm}$	56	112	200	300	400
安全能量/ $\text{g}\cdot\text{cm}$	8	20	20	26	26

3.6.3 针刺雷管通用要求

依据 GJB2003—94《针刺雷管通用规范》,并参考电火工品环境性能,重点将电雷管和针刺雷管的自然考核环境要求一致起来,归纳出针刺雷管的通用要求。具体如下。

1) 尺寸与结构要求

尺寸应符合针刺雷管直径和高度系列;结构为全密封型。

2) 输入输出要求

(1)发火及输出:在满足使用要求且符合针刺能量系列的某一能量下,产品应可靠发火,且能满足输出要求;

(2)不发火:在与发火能量系列对应的某一不发火能量下,产品应不发火。

3)作用可靠性要求

当置信水平为 0.90 时,发火作用可靠度置信下限不低于 0.995。

4)环境适应性要求

雷管在下列环境试验中不应发火和产生结构损坏,在经受下列环境试验后,还应符合 2)条的相关要求:

(1)持续 24h 的相对湿度不小于 95%的常温湿热试验;

(2)71℃保温 6h、50℃保温 4h 的高温试验;

(3)-54℃保温 6h、-40℃保温 4h 的低温试验;

(4)在-54℃的低温箱中保温 4h,1min 内转入 71℃的高温箱中保温 4h,重复周期为 3 次的温度冲击试验;

(5)常温下,在 75mm±5mm 深的水中存放 48h 的浸水试验;

(6)落高 150mm、频率 1Hz、持续 2h 的震动试验;

(7)23 齿锤击试验;

(8)1.5m 跌落试验;

(9)运输振动试验。

5)外观质量要求

产品表面不应有浮药、脏污、皱褶、毛刺、气孔、裂纹、收口不严、涂漆不全或较重的机械伤痕。

6)长期储存性要求

正常储存条件下,储存寿命不少于 20 年。

7)针刺药

符合 GJB737《火工品药剂试验方法》系列标准的相关要求。

参 考 文 献

- 1 王凯民. 传爆序列界面能量传递技术研究. 北京理工大学博士学位论文,2002

- 2 戴实之. 火工技术. 北京:兵器工业部教材编审室,1987.71
- 3 蔡瑞娇. 火工品设计原理. 北京:北京理工大学出版社,1999.51~162
- 4 王斌. 小型针刺雷管在引信中的应用. 火工品,1998(3):32
- 5 陈福梅. M55 小型雷管研究进展. 战斗部通讯,1977(1):93
- 6 赵风歧. M55 小型雷管的研制. 火工品,1994(4)
- 7 钱华生. 碱性斯蒂芬酸铅对针刺雷管感度的影响. 火工品,1996(3):29
- 8 丁本盛. 瑞士双 35 高炮用火工品及其药剂分析. 火工品,1994(1):21
- 9 王凯民. 小型雷管输出能力增强技术研究. 第 11 届火工年会,2001
- 10 刘迎梅. 浅谈针刺雷管. 2002 年火工品及相关药剂发展研讨会,2002
- 11 朱延年. 引进火工品的分析. 火工品,1990(4):30
- 12 吴学易. 新一代针刺雷管感度试验装置设计思路. 火工品,1994(4):28
- 13 陈继业. 延期雷管分析. 火工品,1996(3):36
- 14 刘火保. 用于小型针刺雷管礮系延期药延时及精度的研究. 火工品,1992(1):10
- 15 陈继业. 提高针刺延期雷管精度的研究. 火工品,1993(1):1
- 16 李利村. 针刺延期雷管性能影响因素讨论. 火工品,1998(4):22
- 17 钱华生. 短延期小型针刺雷管及其调整引信作用时间的可能性. 火工品,1982(1):1
- 18 王可. 微秒针刺延期药的研制. 火工品,1997(3):12
- 19 袁有根. 某小型针刺延期雷管的研究. 火工品,2002(2):12
- 20 袁有根. 一种新型针刺延期药的研制与应用. 火工品,2002(3):12
- 21 金卫平. 一种雷管威力检验方法的研究. 第 11 届火工年会,2001:376
- 22 陈继业. 对组合火工品的展望. 火工品,1997(4):38
- 23 李发安. 延期组合件的设计与应用. 火工品,2000(4):27
- 24 陈继业. 柔性发火延期雷管研究. 火工品,1995(3):12
- 25 杨福东. 组合 2 号管可靠性的提高. 火工品,2002(3):39
- 26 陈继业. 对组合火工品双向点火的研究. 第 11 届火工年会,2001:33
- 27 王文杰等. 碱式苦味酸针刺药的应用研究. 火工品,2002(2)
- 28 严楠. 动态针刺起爆实验与理论研究的新进展. 火工品,1994(1)
- 29 单利亚. 针刺火工品动静态逼近试验研究. 火工品,1998(2):20
- 30 Jun-Sik Hwang. Proceedings of the 16th International Pyrotechnics Seminar. Jonkoping, Sweden. 1991
- 31 陈继业. 击针戳击深度对雷管延期时间的影响研究. 火工品,1998(4):14
- 32 李锦荣. 41 号针刺延期雷管腔内过载模拟实验. 火工品,1996(1):5

第4章 桥丝式电火工品设计原理

电火工品统称为电起爆器,凡是通过电流的输入使装药发火,并以热、压力及冲击波等形式转化为化学能或动能的元件都称为电起爆器,它是传爆序列、传火序列及火工装置、火工系统中的主要起爆点火元件。根据电能引燃药剂方式的不同可分为桥丝式、火花式和间隙式电火工品等多种,但最为常用的是桥丝式电火工品。桥丝式电火工品具有发火能量小、作用迅速、性能容易控制等特点,因此,它不仅普遍用于各类通用弹药,而且还作为一种特殊能源的、一次作用的动力源器件广泛应用于导弹、核武器等尖端武器中。

4.1 桥丝式电火工品发火原理与基本要求

各种桥丝式电火工品的结构基本相似,以灼热桥丝电雷管为例,它通常由雷管壳、电极塞、电极脚线、桥丝、起爆药和输出装药等组成,如图4.1所示。靠近电极一端多为起爆药,常用氮化铅;输出端为猛炸药,常用太安或黑索今。电极可由两根引线构成(双脚式),或由芯杆与雷管外壳组成两极(独脚式)。当通过电极脚线向桥丝通电后,桥丝电能将变为热能并加热周围的起爆药剂,使药剂发生爆炸变化^[1]。

4.1.1 桥丝式电火工品发火原理

电火工品的激发电源可以是恒定直流电源或贮能电容器,其区别在于前者通入桥丝的是恒定的电流,后者则是电容放电过程

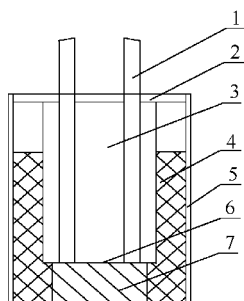


图 4.1 桥丝式电火工品结构示意图

1—脚线；2—盖；3—绝缘塞；4—塑料圈；

5—外壳；6—桥丝；7—火工药剂。

中的变化的电流。当电流通入桥丝式火工品后，在桥丝上按焦耳—楞次定律产生热能，桥丝升温，热量传给药剂，使其发生化学反应。炸药化学反应释放的热量使药剂继续升温，加速反应直至自动发火。从能量的变化看，这一发火过程应包括 4 项内容：桥丝加热所需的能量、桥丝向外散失的能量、通入的电能和化学反应释放的能量。根据能量守恒定律，将存在^[1]

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = -\lambda_0 \nabla^2 T + P(t) + \rho q Z e^{-e/RT} \omega \quad (4.1.1)$$

式中 c_p ——桥丝材料热容(J/g·°C)；

ρ ——桥丝材料密度(g/cm³)；

T ——桥丝温度(°C)；

t ——时间(s)；

λ_0 ——桥丝材料的导热系数(J/°C·cm²)；

$P(t)$ ——输入电功率(J/s)；

I ——通入电流(A)；

R_0 ——环境温度下桥丝电阻(Ω)；

α ——桥丝温度系数(°C⁻¹)；

q ——单位药剂反应热(J/g)；

R ——气体常数(J/mol);

Z ——频率因子;

e ——活化能(J/mol);

∇ ω ——药剂的反应分数;

Δ ——拉普拉斯算子。

直接求解该方程较为复杂,可以对其作一些简化求出电火工品的主要参数。

1. 恒定电流时桥温和安全电流的简化计算^[2]

当电火工品通入恒定电流 I 时,输入电功率 $P(t)$ 为

$$P(t) = I^2 R_0 (1 + \alpha T) \quad (4.1.2)$$

在桥丝加热的最初阶段,药剂反应速度很小,放出热量也少,故假设在炸药爆炸前,可以忽略化学反应释放的热量,桥丝温度主要由输入电流决定,同时也假设热传导损失与温差成正比。这时方程式(4.1.1)可简化为

$$c_p \frac{\partial T}{\partial t} = -\lambda_0 \theta + P(t) \quad (4.1.3)$$

式中 θ ——温差($\theta = T - T_0$)。

当对电火工品快速通电时,桥温上升时间将比冷却时间小得多,此时可忽略热损失(即假设输入能量只用于加热桥丝),求出桥温 T :

$$T = \frac{I^2 R_0 t}{c_p - I^2 R_0 \alpha t} \quad (4.1.4)$$

当输入功率很低,输入的能量仅足以抵消散失于周围的能量时,就构成稳态条件 $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$ 。这时桥丝温度不变,可求出最大安全电流 I 为

$$I = \sqrt{\frac{\lambda_0 \theta}{R_0 (1 + \alpha \theta)}} \quad (4.1.5)$$

2. 电容放电时的桥丝温度和发火能量

弹药引信中的电火工品一般都是通过贮能电容器放电起爆。当电容器放电时,电流随时间而变化,随着放电时间增长而电流逐渐减小。假设电源电容器电容为 C ,充电电压为 U_0 ,电火工品的桥丝电阻为 R_0 , t_f 为发火时间,则充电过程中的电流 $I(t)$ 、电压 $U(t)$ 、输入桥丝功率 $P(t)$ 为

$$U(t) = U_0 e^{-\frac{t}{R_0 C}} \quad (4.1.6)$$

$$I(t) = \frac{U(t)}{R_0} e^{-\frac{t}{R_0 C}} \quad (4.1.7)$$

$$P(t) = I(t)^2 R_0 \quad (4.1.8)$$

与直流电源相比,电容供电的功率要大得多,发火时间也短得多,因此在能量方程式(4.1.3)中的热散失项可以忽略不计,则有

$$c_p \frac{\partial T}{\partial t} = P(t) \quad (4.1.9)$$

则发火温度 T 和输入桥丝电能 E_1 分别为

$$T = \frac{1}{c_p} \int_0^{t_f} P(t) dt = \frac{CU_0^2}{2c_p} (1 - e^{-\frac{2t_f}{R_0 C}}) \quad (4.1.10)$$

$$E_1 = \int_0^{t_f} I(t)^2 R_0 dt = \frac{CU_0^2}{2} (1 - e^{-\frac{2t_f}{R_0 C}}) \quad (4.1.11)$$

留在电容器的能量 E_2 为

$$E_2 = E_0 - E_1 = \frac{1}{2} CE_0^2 e^{-\frac{2t_f}{R_0 C}} \quad (4.1.12)$$

从式(4.1.10)~式(4.1.12)中可以看出如下 3 个特点:第一,电容器贮能并没有全部用于电火工品的发火;第二,当电容量较小而电压值大时,加载到桥丝上的能量较大,能量利用率高;第三,电容不变而充电电压较大时,电火工品的发火时间较短,也就是说,对桥丝加载较大的电能会使发火时间变短。

4.1.2 桥丝式电火工品基本要求

作为武器系统用桥丝式电火工品而言,一般应具有如下基本

要求:

1. 适当的感度

根据不同的使用要求,电火工品有不同的感度范围。表示感度的性能参数是发火临界能量和最小发火能量。发火临界能量是指产品 50%发火时的能量。而最小发火能量又称 100%发火所需的最小能量,是指保证电火工品确实发火的能量。

2. 瞬发性高、同步性好

对付某些目标时,要求引信的瞬发性高,即要求电雷管的作用时间越短越好。在使用多发电雷管的武器系统中也同时要求作用时间一致性好。表征瞬发性高、同步性好的性能参数是作用时间及其偏差。作用时间又称发火时间,它是从通电到电雷管爆炸输出所需的时间。作用时间除了与雷管本身性能有关外,也与电源条件有很大关系。作用时间偏差又称作用时间散布范围,一定程度上反映了雷管生产过程中的质量控制水平。

3. 具有一定的环境适应性

在电火工品的生产、运输和使用中,常遇到各种环境,这些环境包括自然环境如高温、低温、震动、振动、吸湿、长期储存性等,同时也包括电磁环境如静电、射频等。电火工品除必须满足自然环境外,还应当具有足够的抗电磁干扰能力,即要有足够的电安全性。表征安全性的主要性能参数是静电感度和最大不发火电流。最大不发火电流又称安全电流,它是保证电雷管对一些射频感应电流及杂散电流确实安全的性能参数。静电感度是保证电火工品在静电环境下的安全程度。

4.2 电火工品作用性能影响因素

电火工品作用性能主要包括发火感度、作用时间和输出性能。发火感度高意味着所需的发火能量小,反之亦然。发火感度和作用时间是相互关联的 2 个参数,其大小主要与桥丝材料及尺寸、起爆药或点火药的热感度及密度、电源功率和制造工艺等有关。输

出性能主要与输出装药的威力及爆轰成长程度有关。

4.2.1 桥丝对电火工品作用性能的影响研究

1. 理论研究

分电容放电发火和直流发火两种情况,讨论桥丝材料及尺寸对电火工品感度和作用时间的影响。

1) 电容放电发火时

桥丝温度上升到 T_1 时桥丝应吸收的热量为^[3]

$$Q = \frac{\pi}{4} D_0^2 L_0 \rho c_p (T_1 - T_0) \quad (4.2.1)$$

式中 L_0 ——桥丝的长度;

D_0 ——直径;

ρ ——密度。

假设在发火过程中热散失项可以忽略不计,桥丝吸收热量全部来自于电源输入给桥丝的电能量 E ,则有

$$\frac{\pi}{4} D_0^2 L_0 \rho c_p (T_1 - T_0) = \frac{CU_0^2}{2} (1 - e^{-\frac{2t_f}{R_0 C}}) \quad (4.2.2)$$

当桥丝初始温度 T_0 忽略不计时,有

$$T_1 = \frac{2CU_0^2}{\pi D_0^2 L_0 \rho c_p} (1 - e^{-\frac{2t_f}{R_0 C}}) \quad (4.2.3)$$

而桥丝电阻 R_0 又与其长度 L_0 、直径 D_0 、电阻率 k_1 有关,即

$$R_0 = k_1 \frac{4L_0}{D_0^2} \quad (4.2.4)$$

并分别利用幂函数的展开式:

$$e^{-x} = 1 - x + x^2 - \dots \quad (4.2.5)$$

将式(4.2.5)的一阶展开式和式(4.2.4)代入式(4.2.3)得

$$T_1 = \frac{2CU_0^2}{\pi D_0^2 L_0 \rho c_p} \times \frac{t_f D_0^2}{2Ck_1 L_0} = \frac{U_0^2 t_f}{\pi L_0^2 \rho c_p k_1} \quad (4.2.6)$$

将式(4.2.5)的二阶展开式和式(4.2.4)代入式(4.2.3)同样求得

$$T_1 = \frac{U_0^2 t_f}{\pi L_0^2 \rho c_p k_1} - \frac{U_0^2 t_f^2 D_0^2}{2\pi \rho c_p k_1^2 C L_0^3} \quad (4.2.7)$$

从式(4.2.6)可知:第一,当桥丝长度增加而发火能量不变时,发火时间将增大,或者说,当桥丝长度增加而发火时间不变时,发火能量将需提高;第二,桥丝电压发热特征系数 K_c (桥丝的热容、密度的乘积称之为桥丝电压发热特征系数 K_c) 增大时,作用时间将增大,或者说,感度将下降。而从式(4.2.7)可知,当桥丝直径增加而桥丝长度、发火时间电压和作用时间不变时,电源的电容需提高,或者说,当桥丝长度、发火电容、作用时间等不变时,直径增大将要求电源的充电电压提高。因此,桥丝直径或长度的增大均会使作用时间变大(发火能量不变时)或者要求提高发火能量(作用时间一定时),同时从以上讨论中也可以看出发火感度与作用时间是一对相互之间有重要关联的性能参数。

2) 直流发火时

当直流发火时,电源输入到桥丝的电能量 E 为

$$E = I^2 R_0 t_f \quad (4.2.8)$$

假设在发火过程中热散失项可以忽略不计,桥丝吸收热量全部来自于电源输入给桥丝的电能量 E ,即存在

$$\frac{\pi}{4} D_0^2 L_0 \rho c_p (T_1 - T_0) = I^2 R_0 t_f \quad (4.2.9)$$

当桥丝初始温度 T_0 忽略不计时,将式(4.2.4)代入式(4.2.9),并

令 $K_i = \frac{\rho c_p}{k}$, 得

$$T = \frac{16 I^2 t_f}{\pi K_i D_0^4} \quad (4.2.10)$$

式中 K_i ——桥丝材料的电流发热特征系数。

从式(4.2.10)可以看出,桥丝的直径和电流发热特征系数 K_i 都对电雷管作用性能有影响,桥丝直径减小时将大大降低发火能

量。而桥丝电流发热特征系数 K_i 值较小时也能有效降低发火能量。

2. 实验研究

1) 桥丝尺寸影响

从(4.2.7)式可看出:减小桥丝直径或长度都能提高产品的感度,试验结果也是如此。例如,桥丝材料为 $\text{PtW}_{8.5}$ 丝时,不同桥丝直径与电压发火感度的关系见表 4.1^[4] 所列。试验结果表明:在桥丝材料选定后,随着桥丝直径增加,产品的电阻将下降,而产品的电压发火感度值将提高。因此,减小桥丝直径能提高产品的感度。

表 4.1 桥丝直径与发火感度的关系

桥丝直径 / μm	发火电容 / μF	起爆药	电压发火 感度 U_{50}/V	偏差 σ/V	备 注
9.5	22	$\text{Pb}(\text{N}_3)_2$	4.75	0.35	独脚,贮能焊
10.2	22	$\text{Pb}(\text{N}_3)_2$	5.12	0.31	独脚,贮能焊
11.2	22	$\text{Pb}(\text{N}_3)_2$	5.20	0.74	独脚,贮能焊
13.8	22	$\text{Pb}(\text{N}_3)_2$	7.02	0.82	独脚,贮能焊

作用时间的长短是衡量桥丝升温快慢的重要指标。所以,感度不仅表现在电压发火感度值的大小,还表现在作用时间的长短。有关试验数据表明:当其他条件相同时,桥丝长度的增加将会降低发火感度,而在同一发火条件下,随着桥丝长度的增加,其作用时间也会增长。总之,凡是增加感度的因素都会使发火时间缩短。

2) 桥丝材料影响

作为主要发火件的桥丝材料直接影响着感度。对不同发火电源而言,影响感度的桥丝材料参数也不同。电容放电发火和直流发火下的常用桥丝实验结果见表 4.2 和表 4.3^[5,6] 所列。

表 4.2 电容放电发火时桥丝材料对作用时间的影响

桥丝材料	发火条件	桥丝直径 / μm	桥丝长度 / mm	平均作用 时间 $\bar{t}/\mu\text{s}$	K_c
钨丝	$30\mu\text{F}$ 、27.4V	8	0.5	3.52	0.646

镍铬丝	30 μ F、27.4V	8	0.5	6.52	0.898
钨钨丝	30 μ F、27.4V	8	0.5	3.5	
铂钨丝	30 μ F、27.4V	8	0.5	5.2	

表 4.3 直流发火时桥丝材料对作用时间的影响

桥丝材料	起爆药	桥丝直径/ μ m	直流感度 I_{50} /mA	K_i
钨丝	Pb(N ₃) ₂	7.4	225.8	8.06
镍铬丝 6J20	Pb(N ₃) ₂	9	112.8	0.97

对比表 4.2 和表 4.3 可知:电容放电发火时,钨丝的发火感度高于镍铬丝,而直流发火时,其结果恰恰相反。其原因是:电容放电发火时,桥丝发火感度与桥丝的电压发热特征系数 K_c 有关, K_c 越大,发火感度越低,对应的作用时间越长;而直流发火时,桥丝的发火感度与桥丝的电流发热特征系数 K_i 有关, K_i 越大,发火感度越低。所以,直流发火时,应选择电流发热特征系数 K_i 较小的桥丝;电容放电发火时,应选择电压发热特征系数 K_c 较小的桥丝。常用桥丝材料的物理性能参数见表 4.4 所列。

表 4.4 常用桥丝材料的物理性能参数

材 料	电阻率 k / $\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$	热容 c_p /Cal $\cdot \text{g}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	密度 ρ /g $\cdot \text{cm}^{-3}$	K_i ($=c_p \rho / k$)	K_c ($=c_p \rho$)
W	0.08	0.034	19	8.06	0.646
Ni—Cr(6J20)	0.93	0.109	8.3	0.97	0.898
Pt	0.144	0.033	21.2	4.86	0.699
Pt—Ir(85 : 15)	0.355	0.032	21.4	1.93	0.685
Cu—Ni(60 : 40)	0.485	0.098	8.9	1.79	0.872

4.2.2 其他因素对电雷管作用性能的影响

1. 起爆药对电雷管作用性能的影响^[5]

雷管中起爆药的种类及其密度对产品的感度都有影响,其中起爆药种类的影响最大。一般说来,热感度低的起爆药爆发点较

高,所要求的发火能量也高。几种常用起爆药的爆发点和发火能量见表 4.5 所列。

表 4.5 常用起爆药的爆发点和发火能量

起爆药	爆发点/℃	发火能量/ $\times 10^{-8}$ J	
		桥径 $2.5\mu\text{m}$	桥径 $7.5\mu\text{m}$
四氮烯	135~140	11.5	46
斯蒂芬酸铅	270~280	13.8	93
$\text{Pb}(\text{N}_3)_2$	315~330	34	134

起爆药装填密度反映了药剂和桥丝的接触程度,对产品作用性能的影响比较复杂。一方面,提高药剂密度会增加桥丝与药剂接触面积,一定程度上能改善两者之间的传热性能,导致发火能量下降或缩短发火时间;另一方面,密度增大将会增加散热,导致发火时间增加。提高起爆药密度是缩短还是增加发火时间,这主要取决于发火能量的输入速度。当输入速度大(如电容放电发火)时,热散失(随时间增加)占总输入能量的小部分,而这时的密度增加使药桥间接触好,发火时间下降;而当用恒定电流作能源时,由于热散失大,接触良好反而使传导散热速度加快,桥温上升更慢,结果使发火时间增加了。

2. 电源功率对电雷管作用性能的影响^[6]

电源对发火感和发火时间的影响主要在于它的功率。利用电容起爆时,能量以脉冲形式输入桥丝,其功率远远大于直流电源,所以用电容器作起爆电源时,发火能量和发火时间都比用直流电源时要小得多。但在同样能量条件下,电容和电压的不同选配也会对发火能量和发火时间有直接影响^[5]。有关实验表明,电压高、电容小的组合比电压低、电容大的组合更为有效。出现上述现象的原因在于电容的放电特征。在充电能量相同时,电容越大,充电电压越低, RC 放电常数越大,雷管的作用时间越长,反之亦然。但电容过小时,放电时间极短,药剂未达到爆发点时放电已结束,桥丝开始冷却或熔断,造成起爆药冲能降低,继而使输出装药的爆

燃转爆轰过程延长,造成产品整个作用时间增大。所以,只有当桥丝加热到药剂的爆发点时的时间与电容放电时间相当时,能量才被充分利用,雷管的作用时间才最短。因此,最佳匹配的电压电容的放电时间应略高于爆燃转爆轰(DDT)段所需时间。

3. 制造工艺质量对产品感度影响^[7]

桥丝式电雷管的感度和工艺过程的质量关系很大,如焊接桥丝时出现沾有锡珠、焊点大或桥丝留有尾丝又折回搭在桥丝上等现象,这些均会导致桥丝电阻明显减小,从而导致雷管瞎火或发火时间过长。此外,电极塞的绝缘强度不高,就会产生漏电现象,增大了热损失,甚至电压加不到产品上,引起产品感度严重下降。

4.3 静电对电火工品的危害

在电火工品的生产、使用和储存中,往往会遇到许多意外的能量,如静电、感应电流、杂散电流、射频电流等,它们都可能引起电火工品的发火,都是使用中存在的不安全隐患,其中由于静电的普遍存在,因其引发的爆炸事故也最多,对人员和财产造成了巨大损失。可以说,静电已成为影响电火工品安全性的首要因素。

4.3.1 静电的产生及其对电火工品安全性的影响

1. 静电的产生及其对电火工品安全性的影响^[8]

顾名思义,静电就是静止不动的电荷。物体内具有数量相等而电性相反的正负电荷,这样构成的物体在通常条件下呈中性。然而,当由于某种原因使物体的电荷间失去平衡时,该物体将呈带电状态,即积累了静电荷。这种带有静电荷的物体一旦与电火工品接触,就会出现静电泄放,形成高压电火花,从而导致电火工品意外发火。产生静电的途径较多,重点分以下2种情况进行阐述。

1) 物体相互摩擦产生静电。

任何两个物体特别是非导电物体接触时,总有电荷传递,反复接触或颗粒对表面的碰撞都会大大加强这种电荷的传递,例如导

弹牵引车辆行进中的橡胶轮胎与地面间的摩擦及飞机在雨中飞行时等。其中直升机产生静电的危险性最大,旋转的浆叶是一种理想的静电发生器,飞行中的直升机产生的电位可高达 1MV ,与此电位相应的能量约为 1mJ 。因此直升机上的点火具及其附近地面上的弹药内的火工品必须有抗这种危害的能力。另外,从武器上揭下塑料护罩也可在武器系统中产生静电,如:1964年,美国曾发生过因从导弹上除去塑料护罩产生静电导致导弹火工品意外发火的严重事故,造成3人死亡、8人受伤。

2) 感应产生静电

一个带电体接近另一个非带电体时,就会使第二个物体的电荷重新分布,如果此时提供某些通道(如瞬时接地),导出感应带电体一端的电荷,但仍保留着剩余电荷。以停放在充电云下的导弹为例,由于云层电荷的感应作用,使导弹两端集中了极性相反的电荷,如果反射架接地,导弹一端的电子将流入地面,使导弹带有正电荷。如果此时去掉接地,导弹上的正电荷将使其内的火工品处于一种静电意外点火的危险中。

2. 人体静电对火工品的危害

除在武器系统中的火工品具有潜在的静电危害外,大量直接的静电威胁发生在火工品的生产、运输、装配等过程。这些过程几乎都与人的活动有关,人体静电也就成为引起电火工品发生意外爆炸的最主要和最经常的因素,所以国外对电火工品的一般要求都是以抗人体静电为主要目标。

人体本身具有一定的电阻、电感和电容。计算和试验结果证明人体电容约为 500pF ,其中由身高决定的电容约 120pF ,而由鞋的绝缘状态决定的电容约 350pF 。在潮湿条件下,人体的手腕到地面的电阻约 6000Ω ,而干燥条件下约为几百欧。因此,一般假定人体电阻为 5000Ω 。人体动作时各层衣服的相互摩擦产生静电是人体带电最常见的原因。此外,电场对人体的感应及人体与带电体的接触也会使人体带电。试验证明,在正常情况下,脚穿绝缘性良好的鞋的人体可充电至 20kV 或更高电压而不放电。因此一个

穿着几层衣服带有静电的人,可以看成是一个放电源。当人体与火工品接近时,如间隙足够小时,静电电压足以击穿间隙间的介质,储存在人体上的静电能量就会通过被击穿的介质产生火花放电。

美国从 20 世纪 60 年代中期开始规定以 500pF、充电 25kV、串联 5000 Ω 电阻作为标准人体放电参数。在军用标准和规范中也把这种状态下的不发火作为电火工品静电安全的基本要求^[9]。但许多研究人员认为,500pF 和 5000 Ω 是人体电容和电阻的平均值,而对火工品抗静电要求而言,应以最危险的情况,即以电容 600pF,电压 25kV,串联电阻 500 Ω 代替平均值更为合理。有关标准或文献提出的人体静电放电参数有一定差别(见表 4.6)。

表 4.6 有关标准或文献提出的人体静电放电参数^[10~14]

标准或文献	发火电路参数	发火连接方式	年代
MIL—STD—322	500pF、5000 Ω 、25kV	脚—脚;脚—壳	1975
MIL—I—23659C	500pF、5000 Ω 、25kV	脚—脚;脚—壳	1987
MIL—STD—1512	500pF、5000 Ω 、25kV	脚—脚;脚—壳	1972
美国陆军导弹系统	250pF、500 Ω 、25kV	脚—脚;脚—壳	1990
MIL—STD—1576	500pF、5000 Ω 、25kV	脚—脚	1984
MIL—STD—1576	500pF、0 Ω 、25kV	脚—壳	1984
MIL—STD—331	500pF、500 Ω 、25kV	脚—壳	1989
MIL—STD—331	500pF、5000 Ω 、25kV	脚—脚	1989
美国 Sandia 实验室	600pF、500 Ω 、20kV	脚—脚;脚—壳	1974

3. 静电对电火工品的作用形式^[15]

静电对电火工品的作用形式主要有 2 种:第一,脚线—脚线。静电荷从一个脚线输入,经过桥丝从另一脚线输出,这种形式的起爆与正常起爆相同,如图 4.2(a)所示。第二,脚线—管壳。静电放电通过脚线与外壳间的药剂从管壳输出,如图 4.2(b)所示。

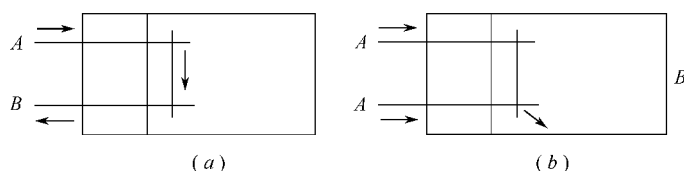


图 4.2 静电对电火工品的作用形式

(a)脚线—脚线;(b)脚线—壳。

由于人体静电能量 E_J 为

$$E_J = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} \times 500 \times 10^{-12} \times 25000^2 = 0.156 \text{ J}$$

如果一个人带有这样的静电能量和电火工品脚线相接触,设桥丝电阻为 8Ω ,则通入电桥的能量 E_1 为

$$E_1 = 0.156 \times \frac{8}{5000} = 0.2 \text{ mJ}$$

此能量是不足以引起目前最敏感的桥丝式电雷管(碳桥除外)发火的,所以,通常静电引发电火工品的位置不在脚线与脚线之间。但是,当静电高压作用于电火工品脚线与壳体之间时,将会产生击穿,形成电火花,由电火花引爆装药。电火工品脚线与壳体之间的静电高压击穿需要的起爆能量很小,所以它是最经常和最危险的意外发火形式。因此,桥丝式电火工品的静电安全试验的测试也主要在脚壳之间进行。

4.3.2 静电对电火工品可靠性的影响^[15]

随着对武器系统总体作用可靠性要求的提高,要求电火工品不仅要进行安全性实验,而且要进行作用可靠性实验。一般说来,不可能出现因静电放电刺激而导致每个电火工品都意外发火,但随着弹药在储存、运输、勤务处理、检测和使用等过程中要经过多次装卸、包装和维修等,每个电火工品都会经历多次的静电放电冲击。多次的静电放电冲击可能导致电火工品出现某种程度的钝

感,进而影响产品的作用可靠性。

从 20 世纪 90 年代起,国外进行了电火工品经历多次静电放电冲击影响产品作用可靠性的研究,美国 Sandia 实验室的研究采用了两种模拟人体放电电路:一是简单 RC 电路,电路参数为 600pF、500Ω、20kV,简称 SMESD(Standard Man Model)模型。二是双 RC 电路(见图 4.3),它由最坏情况下人体静电放电参数组成,简称 SSES D(Sandia Severe HBESD Model)模型。SSES D 模型主要包括两部分,一部分是模拟通过手的快速放电,它决定放电电流的上升前沿;另一部分模拟通过人体的慢速放电,大部分能量集中在这一过程。这个模拟电路所输出的波形与测得的极限人体静电放电电流很好地符合,它代表了人体静电放电实验的最坏应力水平。用 SMESD 模型和 SSES D 模型对系列产品进行静电放电后的作用结果见表 4.7 所列。

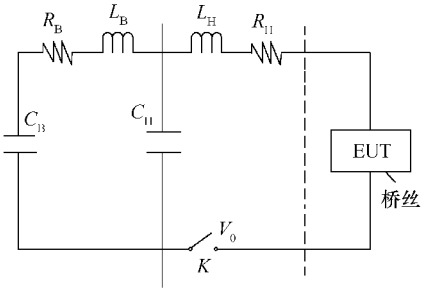


图 4.3 SSES D 模型电路图

C_B —400pF; C_H —10pF; V_0 —25kV; L_B —0.5μH;
 L_H —0.1μH; R_B —250Ω; R_H —110Ω。

表 4.7 人体静电放电后的作用性能结果

产 品	产品装药或特征	模型/次数	作用性能结果
双桥热桥 丝起爆器	TiH _{1.65} /KClO ₃ ; 火花 间隙防静电	SSES D/ 40 次	合格,但热导率提高,可 能是药剂融化所致

高能热桥丝起爆器(4种)	Ti/KClO ₃	SSES/1次	一种未通过,全发火和不发火水平超出
爆炸桥丝雷管Ⅰ型(40发)	直径7.62mm,金桥直径0.038mm,塑料电极塞,低密度装药	SMESD/1次	2发未正常发火,其余作用时间和爆炸电流超出
爆炸桥丝雷管Ⅱ型(10发)	直径12.7mm,塑料电极塞,Au—Pt桥丝直径0.027mm,低密度装药	SMESD/1次	5发未正常发火,其余作用时间和爆炸电流超出
爆炸桥丝雷管Ⅲ型(20发)	扁平铝桥丝沉积在陶瓷塞,高密度装药	SMESD/1次	4发未正常发火,其余作用时间和爆炸电流超出

以上结果表明:人体静电放电对电火工品作用性能有影响。虽然高能热桥丝起爆器和爆炸桥丝雷管的安全性很高,但受到人体静电放电(仅1次)后,作用可靠性就不能满足要求。因此,应重视对高能型钝感电火工品人体静电放电后的作用可靠性研究^[16]。

4.4 电火工品防静电技术

从以上的讨论可知,静电对电火工品的安全性和可靠性都有影响。解决桥丝式电火工品静电干扰的最好方法是使电火工品设计要具有防静电功能^[17]。从设计途径分析,一般有3种:第一,设计火工品内部绝缘系统,增加脚—壳间的绝缘强度,以保证在所要求的静电放电电压下不会被击穿,俗称“堵”静电方式;第二,采用保护性静电泄放装置或材料,构成静电的泄放通道,俗称“泄放”静电方式,是目前采用最广泛的一种保护形式;第三,使用对静电放电钝感的起爆药或点火药剂。

4.4.1 电火工品防静电设计技术^[18]

1. “堵”静电系列设计技术

1) 易击穿位置设置绝缘环

由于火工品桥丝或脚线的边缘离管壳最近,且又是装起爆药或点火药的位置,因而是最危险的通道。增加脚—壳间的绝缘强度的目的在于提高这一通道的绝缘能力。通常是在桥丝周围增加一个绝缘强度较高的圆环或套筒,其绝缘材料通常是聚四氟乙烯、有机玻璃、酚醛塑料、聚氯乙烯等。例如美国“响尾蛇”导弹触发引信用桥丝电雷管及苏联“萨姆”-7 防空导弹引信用电雷管均采用了这一技术。

2) 药剂外表面涂绝缘膜

在点火药表面涂上绝缘强度高的硝基漆、有机硅漆及环氧树脂等绝缘体,或在点火药头外加聚氯乙烯绝缘套管,以增加药面与壳体之间的绝缘强度,继而提高产品的抗静电能力。

3) 使用绝缘材料管壳

产品的外壳直接由绝缘材料加工而成,使脚线间具有一定的绝缘强度。

2. 使用对静电钝感的药剂

改善起爆药抗静电性能也是减少静电危害的一个途径。例如,糊精氮化铅的静电感度较其他类型的氮化铅要钝感得多,其绝缘电阻也比其他类型的氮化铅高,因此,采用糊精氮化铅对提高脚壳间的防静电能力极为有利^[19]。另外,在斯蒂酚酸铅或其他点火药中加入适量的硼以及在氮化铅等起爆药中掺入多元醇多硝酸脂,均可提高药剂的防静电能力。而以氢化钛和高氯酸钾组成的点火药可耐 600 pF、25kV 的静电冲击,而且热安定性高达 520℃,是一种性能良好的抗静电耐热点火药。这是增加脚—脚之间抗静电能力的重要方法。

3. “泄放”静电系列设计技术

1) 设置静电泄放通道^[20]

如图 4.4 所示,如果在结构中能设计出一条保护通道,使脚壳间的静电能量早于危险通道优先泄放,那么将能起到保护作用。一般认为,危险通道与保护通道击穿电压之比应大于 4,而且保护通道的击穿电压不应大于 3kV,这样才能保证在静电火花作用下,静电能量通过保护通道可靠泄放。危险通道与保护通道的击穿电压之比愈高,则在危险通道击穿之前,保护通道愈早完成击穿。由于空气具有良好的击穿重复性,所以保护性火花隙通常采用空气火花隙。

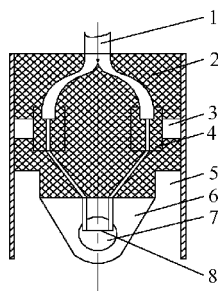


图 4.4 火花隙防静电结构

- 1—脚线;2—绝缘树脂;3—空气隙;4—导电性树脂;
5—空腔;6—点火药的增强膜;7—点火药;8—桥丝。

保护性火花隙最简单的一种结构是在脚线与金属外壳间留很小的间隙,使静电火花发生在外表面,而不在装药处。如美国“麻雀”Ⅲ导弹涡轮发动机燃气发生器,在插塞的外表面电极脚线与外壳间约有 0.2mm 的保护间隙。这种结构虽利用了周围空气介质的放电作用作为保护电路,但易受湿度、灰尘等污染而使作用不可靠。改进的方法是将保护性火花隙置于插塞内部。如“阿波罗”飞船用起爆器在插塞内的脚线与壳内壁间开数个小孔,构成空气击穿通道,把空气火花隙密封在插塞内部,可抗 25kV 的静电。另外,还可以将插塞中导线的裸露部分先压成有突出尖端或弯曲的形状,在脚线的尖端或弯曲部分与壳体间构成保护性泄放通道。

2) 点火药头脚线附近涂导电膜

在点火药头外表面涂一层绝缘膜,然后在点火药头脚线附近涂导电性树脂,使导电性树脂与管壳间形成小空气隙,构成静电泄放通道,如图 4.5 所示。这样静电释放不会通过点火药,而与导电膜接触的药剂层又对静电火花钝感。另外,也可以在点火药头外表面涂一层导电物质,达到防静电目的,如美国 M3 电爆管在发火药头外涂一层导电物质,而发火药头本身绝缘性能良好,并且比较钝感,这样可以使静电火花能量均匀分布在整個发火药头外面的导电层上,从而降低了静电火花的能量密度^[20]。

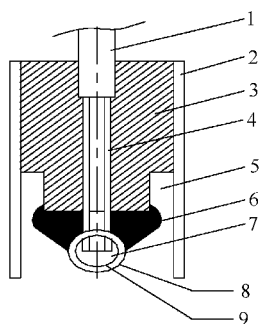


图 4.5 涂导电膜的防静电结构

1—脚线外皮;2—管体;3—绝缘塞;4—脚线;5—空气隙;
6—导电性树脂;7—点火药;8—点火头;9—桥丝。

3) 采用静电泄放元件

通过在电火工品每个脚线与壳之间并联一元件,使之在静电泄放过程中能有效地分压及分流能量,从而极大地减少脚—壳间危险通道得到的能量,以致于不被静电击穿。这类元件统称静电泄放元件,如微型电阻和非线性电阻(微型二极管、碳化硅压敏电阻、氧化锌压敏电阻等)。

若在脚与壳之间并联适当阻值的微型电阻,当高压静电脉冲通过产品的脚壳间放电时,则可通过泄放电阻放电。泄放电阻阻值一般选为 100Ω ,若过大,达不到抗静电目的;若过小,又影响产品的发火感度。法国“马特拉”R440 空空导弹用电雷管就在脚—

壳之间并联了一对 100Ω 的微型电阻,如图 4.6 所示。但这种方法也有其局限性。当产品脚—脚间短路时,用并联微型电阻的方法可以满足脚—壳间的防静电要求,而当产品脚—脚间开路时,只有并联较小阻值的微型电阻才能使脚—壳间满足防静电要求,这将极大地影响产品的正常发火。

非线性电阻具有低压绝缘、高压击穿的特性,是理想的静电泄放元件。微型二极管的伏安特性为非对称型,虽然其非线性特性明显,但工作电压范围窄、耐压低、价格高且难以装配。碳化硅和氧化锌压敏电阻的伏安特性均属于对称型,工作电压范围宽,但碳化硅压敏电阻的非线性特性相对较差,所以,氧化锌压敏电阻更适合做静电泄放元件之用。

当脚—壳间具有静电高压时,氧化锌压敏电阻会在 50ns 内由高阻态变为低阻态,静电能量几乎全部由压敏电阻泄放掉,从而使产品脚—壳间的电压远低于其击穿电压,起到分流和过压保护作用;当产品脚—脚间处于开路态时,在任一脚—壳间加压,虽然电流也流过桥丝,但只要压敏电阻的参数选择适当,保证压敏电阻的瞬态电阻小于脚—脚间的电阻值,就能起到足够的分压分流作用,同样能满足脚—壳间防静电的要求。另外,由于桥丝火工品多为低压发火,当选择的压敏电阻的工作电压大于或等于发火电压时,即使发火电压施加到压敏电阻的两端,因未达到压敏电阻的工作电压,它仍处于高阻态(兆欧级),分能很小,不会影响火工品的正常感度和作用时间。

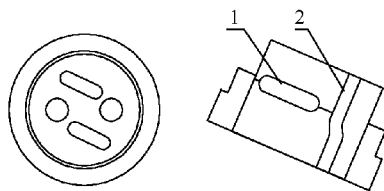


图 4.6 和脚线相连的碳膜电阻

1—碳膜电阻;2—脚线。

4) 采用抗静电电极塞

当脚—壳间的电极塞具有高压低阻、低压高阻的特性时,电极塞本身就具有了既能泄放静电又能正常发火的功能。具有这种特征的材料称为非线性电阻材料,主要表现在该材料的电流与电压的关系不服从欧姆定律,即:

$$I = \left(\frac{V}{C} \right)^{\alpha} \quad (4.4.1)$$

式中 I ——通过材料的电流;

V ——施加到材料上的电压;

C ——与线性材料电阻值相应的一个系数;

α ——材料电阻随电压增高而下降的程度系数。

抗静电电极塞有非线性材料和半导体材料两类。非线性材料抗静电电极塞由高电阻的可塑性粘合剂(橡胶、环氧树脂等)、二次电子发射体材料(碘化钾、氧化铝等)和非线性电阻材料(碳化硅、氧化锌等)配制而成。美国阿特拉斯化学公司采用碳化硅非线性电阻制成塞子压制成电雷管,当加上 $10\text{V} \sim 800\text{V}$ 的正常发火电压时,插塞呈高阻态,电流通过桥丝正常作用,而在静电高压作用下呈低阻态,可很好地泄放静电。半导体材料电极塞是由细金属粉(铝粉、黄铜等)或碳黑等导电微粒混入某种绝缘介质中压制而成,在静电脉冲作用下,插塞内部被击穿,泄放掉静电能量,在低压下呈高阻态,不影响正常发火。两类电极塞中,非线性材料抗静电电极塞的使用更广泛些。

5) 采用半导体涂料泄放静电

用含有铝粉、银粉、碳黑等导电材料的化合导电胶作为半导体涂料,涂在插塞外表面脚线与壳体之间,形成静电泄放通道。如我国某导弹用点火具和从国外引进的某导弹用雷管就采用了铝粉防静电涂料。该涂料的防静电性能和绝缘性能主要取决于铝粉含量的多少和铝粉与粘合剂混合的均匀程度。这是一种简单、有效、成本低廉的方法。

4.4.2 一些产品防静电技术举例

1. 某导弹用电点火具防静电技术设计^[20]

为保证电火工品具有在一定电压长时间作用下的安全可靠性能,很多电火工品在提出抗静电要求的同时也提出了脚—壳间有一定绝缘阻值的要求。典型指标是在 500V 直流电压下,脚—壳间的绝缘电阻要大于 $100\text{M}\Omega$,同时脚壳间要能经受 500pF、5000 Ω 、25kV 的静电冲击。这时单独采用“堵”或“泄”的防静电方法,很难同时满足这两个要求。为此,在使电火工品达到绝缘阻值要求的同时,还要建立一定的静电泄放通道,该通道必须具有低电压(500V~750V)绝缘、高压时击穿导通的特性。因此,从结构上采取“堵泄结合”方式,可保证同时满足防静电和绝缘性能要求。以某导弹用电点火具为例,说明这种设计方法。

1) 设计思路

首先在点火药表面涂一层绝缘漆膜,其次在点火药与壳体之间设计厚度为 0.6mm 的绝缘材料保护环,最后在电极塞内采用了静电泄放通道。

2) 设计准则

第一,保护通道击穿电压小于 3kV;第二,危险通道与保护通道的击穿电压之比要大于 4;第三,静电泄放通道设计位置应远离点火药;第四,保护通道击穿电压应大于产品绝缘电阻测试电压。

3) 确定泄放通道位置和间隙

将泄放通道设计在电极塞中间,远离点火药的地方,以保证泄放通道既能可靠地泄放静电,又不影响产品的正常发火。由于空气的击穿强度为 3kV/mm,所以泄放通道极与金属壳体间的间隙应小于 1mm,在此设计为 0.25mm~0.35mm。

4) 泄放通道理论计算

发火件见图 4.7。图中,A 点为电极,C 点为电极塞泄放极的外侧,B 点为管壁内侧,D 点为导线外侧。当有静电能量作用于脚—壳时,可能击穿的通道有:A—B,电极经药剂、绝缘漆膜、绝

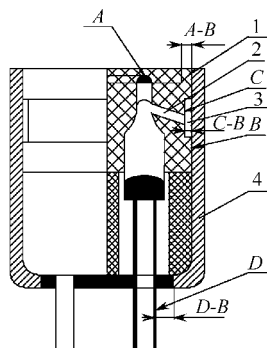


图 4.7 某导弹用电点火具防静电技术

1—保护环；2—泄放电极；3—空气隙；4—外壳。

缘材料保护环后对管壳内壁进行击穿，属危险通道；C—B，泄放电极外侧经内部空气隙对管壳内壁进行击穿，属保护通道；D—B，导线经电极塞表面空气和固化胶对管壳内壁进行击穿。绝缘材料保护环的介电强度为 13kV/mm ，空气介电强度为 4.0 kV/mm ，可计算各通道击穿电压为

$$V_{A-B} = 0.6 \times 13 = 7800\text{V} \quad (\text{只计算了保护环})$$

$$V_{C-B} = 0.3 \times 4.0 = 1200\text{V}$$

$$V_{D-B} = \infty$$

由此可知，危险通道 A—B 的击穿电压小于静电击穿电压（ 25kV ）。当有静电能量作用于脚—壳时，首先击穿保护通道 C—B，其击穿电压远小于 3kV 。危险通道与保护通道的击穿电压之比为 6.5，符合大于 4 的要求。

在某导弹用小尺寸电起爆器的静电设计中，在药剂与壳体之间使用有机玻璃绝缘环，而在脚—壳之间留有空气间隙，使危险通道与保护通道的击穿电压之比为 12，达到了在直流电压 100V 时，绝缘阻值大于 $10\text{M}\Omega$ ，且满足防静电的要求^[21]。

2. 某反坦克导弹用点火具防静电技术设计^[22]

用于反坦克导弹的点火具要求脚—脚和脚—壳都防静电且在 100V 直流电压下，脚—壳间绝缘电阻达到 $1\text{M}\Omega$ 。

1. 脚—脚间防静电技术设计

桥丝式电火工品脚线—脚线间的静电感度主要决定于桥丝材料、直径和装药。首先通过对不同装药静电感度的对比,选择静电感度低的药剂为其装药。桥丝材料为 6J20、桥径 $9\mu\text{m}$ 、桥长 1.0mm 下的不同装药的静电感度见表 4.8 所列。

表 4.8 不同装药静电感度对比

	$\text{Pb}_3\text{O}_4-\text{Si}$	$\text{KClO}_3-\text{Pb}(\text{CNS})_2$	$\text{Pb}(\text{N}_3)_2$
50% 静电感度/kV	15.7	16.0	13.9
0.01% 静电感度/kV	13.6	13.0	
99.99% 静电感度/kV	17.8	19.0	

在确定药剂后,桥丝材料和桥径是保证脚—脚间静电安全的主要参数。实验表明,随着桥丝直径的增加,产品抗静电能力将提高。当桥丝材料确定后,要保证静电感度安全,必须使桥径高于一定值。桥丝为 6J20、桥距 1.0mm 时,不同桥径下的静电感度见表 4.9 所列。

表 4.9 不同桥径下的 25kV 时的爆炸率

桥径/ μm	12	15	20	25
$\text{Pb}_3\text{O}_4-\text{Si}$	2/20	0/20	0/20	0/20
$\text{KClO}_3-\text{Pb}(\text{CNS})_2$	1/20	0/20	0/20	0/20

从表 4.9 可知,脚—脚间静电安全的桥径需要大于 $20\mu\text{m}$ 。为保证发火可靠,多采用冗余式双桥结构,但桥—桥之间会成为危险的静电放电通道。为此,将图 4.8(a) 结构改为图 4.8(b) 形式, A 为公共电极。这样实际上 3 个焊点不存在桥—桥型,仍是脚—脚型。

2. 脚—壳间防静电技术设计

在脚—壳间使用防静电涂料以达到防静电和脚—壳间绝缘电阻达到 $1\text{M}\Omega$ (100V 直流电压下)的要求。防静电涂料主要由 618 环氧树脂 1g、501 环氧丙烷醛醚 0.2g、651 聚酰胺树脂 0.4g 和一定含量的银粉或铝粉配制而成,其配比及性能见表 4.10 所列。

表 4.10 防静电涂料配比及性能

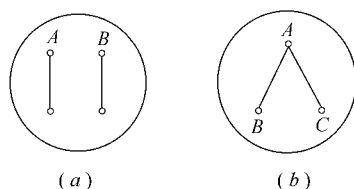


图 4.8 具有公共电极的冗余式双桥结构

金属粉量/g	脚—壳电阻/ Ω		防静电性能
	最大值	最小值	
银粉 0.5	$>100\text{M}$	$>100\text{M}$	15kV 发火 2 发(共 10 发)
银粉 1.0	$>100\text{M}$	189	25kV, 全通过
银粉 1.2	95	38	25kV, 全通过
铝粉 1.0	$>100\text{M}$	7M	25kV, 全通过
铝粉 1.5	$>100\text{M}$	5M	25kV, 全通过

从中可以看出,铝粉涂料防静电性能较好。铝粉是一种易氧化的金属,氧化后会在金属粉外表面形成一层氧化膜,使脚—壳间的电阻呈高阻态,但当加有直流电压时,脚—壳间电阻在放电瞬间是动态的、随机的,具有压敏性,故表现出低阻态,所以也能保证点火具正常作用的可靠性。该防静电涂料的性能稳定性主要取决于铝粉含量的多少和铝粉与粘合剂混合的均匀程度。

涂有铝粉防静电涂料的产品在静电冲击以后,脚—壳间电阻有下降的趋势,但产品放置一段时间后,电阻仍可恢复。脚—壳间电阻静电冲击前后的变化见表 4.11 所列。

表 4.11 脚—壳间电阻静电冲击前后的变化

产品装药	静电冲击前电阻/ $\text{M}\Omega$	静电冲击电压及次数	静电冲击后电阻/ $\text{M}\Omega$	静电冲击后放置 24h 电阻/ $\text{M}\Omega$
$\text{KClO}_3 - \text{Pb}(\text{CNS})_2$	>50	25kV, 1 次	35~75	>50
$\text{KClO}_3 - \text{Pb}(\text{CNS})_2$	>50	25kV, 10 次	0.5~5	>30
$\text{Pb}_3\text{O}_4 - \text{Si}$	>10	25kV, 1 次	3~5	>5
$\text{Pb}_3\text{O}_4 - \text{Si}$	>10	25kV, 10 次	0.5~1.5	>5

4.5 射频对电火工品的危害

电火工品在现代武器系统中的应用越来越广泛,它们都处于无处不在的、越来越严酷的电磁环境中。电火工品在制造、储存和使用过程中,其本身及其相连的有关线路和部件都可能成为接受天线,把周围电磁场的射频能量引入电火工品。在一般情况下,引入的能量很小,不足以使电火工品发火,但是在适当的条件下,射频能量也可能引起电火工品意外起爆,从而出现安全事故。但在更多情况下,由于电火工品长期受到低于发火能量的射频作用,可能会使其性能恶化,从而失去正常工作的可靠性。显然,这种电火工品的意外发火或性能恶化对武器系统所产生的后果都将是毁灭性的。所以,除静电外,射频是影响电火工品安全性、可靠性的最重要因素。

4.5.1 射频的产生及对电火工品的危害机理

1. 射频产生^[8]

发射到空间的电磁波的频率简称为射频。武器遇到的射频环境主要来源于3种射频源:第一,民用射频源。主要指电视发射机、调频调幅电台、移动式发射台及各类通讯设备,通常频率都在千赫到千兆赫范围,是武器运输过程重点考虑的射频环境;第二,军用射频源。军事设施附近的高功率密度的发射体(无线电、雷达等大功率电子设备)成倍增加,已成为武器使用中最危险的电磁环境,已出现过多起因射频导致武器弹药意外爆炸的事故;第三,武器系统射频源。大多数武器系统都有若干类型的通讯设备和监视设备,这些设备通常是最接近武器系统的射频源。

2. 射频对电火工品的危害机理

桥丝式电火工品的脚线为金属线,用来连接发火、控制线路等。当电火工品脚线处于电磁场中时,能起到天线作用,并从中接收电磁能量。对双脚线电火工品而言,未短路的电火工品脚线起

偶极天线的作用,短路电火工品脚线起环形天线的作用。一般来说,射频能量是通过电压与电流两个作用形式而使电火工品发火或瞎火的。而连续波和脉冲波又有不同的作用机理。

1) 脚—脚间电流作用机理^[15]

射频波分为连续射频波和脉冲射频波两种,前者以通讯无线电波为典型代表,后者以雷达波为典型代表。图 4.9 所示为桥丝电火工品对连续射频波的典型响应曲线。当连续射频波频率低于 1000MHz 时,射频引起的发火能量随频率的增加而增加,这时射频感度比直流电感度要低,可以用直流电感度评定该产品的射频感度。因此,对直流钝感的电火工品,一般对射频也是钝感的。此时起爆机理主要是射频电流使桥丝加热,产生热积累。当连续射频波频率大于 1000MHz 时,除桥丝加热外,还可能出现电弧起爆等现象,具有不可预测性。而脉冲射频波是以一种短的重复脉冲来发出它的射频能量的,这种射频能量以热积累的方式加热桥丝,即每个脉冲都将加热桥丝,在下一个电脉冲到来之前,前一个电脉冲作用到桥丝上,桥丝所产生的热量未被散去,而一连串的重复电脉冲就有可能使桥丝温度不断升高,直到引起电火工品以正常(脚—脚发火)方式意外起爆发火,加热过程如图 4.10 所示。

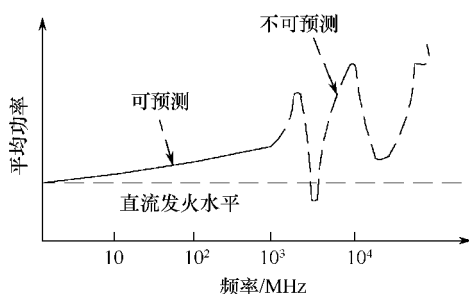


图 4.9 桥丝电火工品对连续射频波的典型响应曲线

但如果连续射频波引起的电流较小或者脉冲射频波的每个脉冲提供的能量较小,则桥温也可在达到一定值后保持稳定。这种小于不发火水平的射频电流也会通过桥丝时使其发热。如果由此

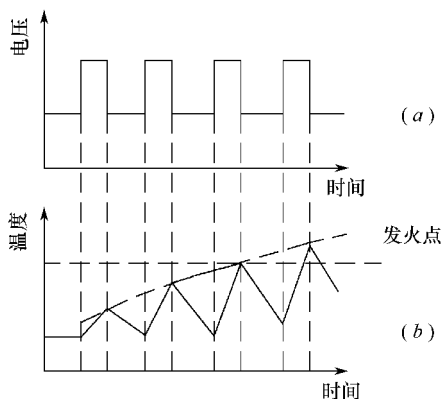


图 4.10 桥丝电火工品对脉冲射频波的典型响应曲线

产生的温升达不到自动发火温度,则桥丝周围的炸药可能缓慢分解或桥丝本身发生变化(如氧化),以后再通入正常发火刺激时,已分解的药剂或性能变化的桥丝就成为热障而妨碍起爆。例如,对已通入过遥测信号的电火工品再进行发火时,可能会出现瞎火^[8]。

2) 脚—壳间电压作用机理

连续或脉冲射频波产生的场强对电火工品的作用和静电的作用相似,也主要发生在脚—壳间,所以,如果电火工品脚—壳对静电敏感,那么它很可能对射频能量也比较敏感。当连续射频波作用于电火工品脚—壳之间时,将在电火工品脚—壳之间产生电压梯度。如果电场强度足够高,时间足够长,则可能在电火工品脚—壳间产生击穿并使火工品发火。在射频能源下,最后的击穿是多次冲击的结果,此时的击穿电压也较低。以电火工品经常遇到的频率 1.5MHz 为例,此时典型电火工品的脚—壳阻抗为 $Z=500+j1000(\Omega)$,脚—壳阻抗具有低电阻、高电抗特征。若射频功率(P)为 500mW 的入射波加到脚—壳阻抗上,则阻抗电导 G 和阻抗上电压 V 为

$$G = \frac{R}{R^2 + X^2} = \frac{500}{500^2 + 1000^2} = 5\mu\Omega$$

$$V = \sqrt{\frac{P}{G}} = \sqrt{\frac{500}{0.005}} = 316 \text{ V}$$

这个电压值足以使多种火工品起爆。

当脉冲射频波作用于电火工品脚—亮间时,由于波峰幅度比连续波更高,多次加载将使电火工品击穿场强显著下降,所以射频敏感度最高。虽然前一次加载不足以使电火工品起爆,却留下了一定的痕迹,减弱了对下次加载的承受力,最后一次的击穿是多次加载积累的结果,而这种关系和加载频率直接相关。实验证明当频率在 1.5MHz 时,电火工品的发火能量最低。

3. 电火工品危险场强和危险功率感度

MIL—STD—1385(B)规定了军械必须满足的电磁环境水平^[23],要求评估电磁辐射对武器系统(含电火工品)的危害程度时按这一标准进行。图 4.11 和图 4.12 所示是军械危险场强与频率的关系曲线,它是根据“恒定天线长度试验法”得到的实验曲线,按照某些原则绘制出的人工规定的安全范围曲线^[24]。它表示电火工品在最危险耦合状态下所要求电磁环境的水平。换句话说,电磁环境必须处于无危害区内时,才能保证电火工品不受电磁辐射的危害^[25,26]。

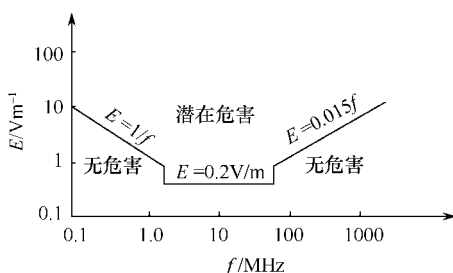


图 4.11 通讯频率最危险耦合对军械的潜在危害

最危险耦合状态是指:第一,电火工品作为单独组装、拆卸和测试时;第二,军械进行维修、保养或更换零件、部件时的拆除;第三,使用连接器连接到军械部件上连续检验电阻值的测试;第四,

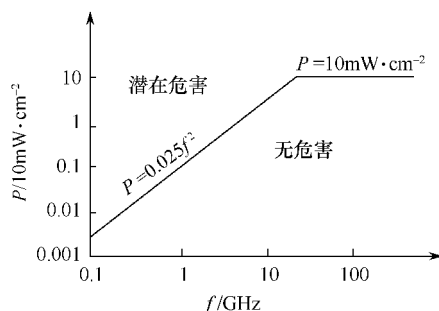


图 4.12 雷达频率最危险耦合对军械的潜在危害

暴露的非屏蔽或未经滤波器的电火工品导线；第五，暴露的非屏蔽军械部件、火箭发动机、弹头或引线。

4.5.2 射频对电火工品可靠性的影响^[26]

如上所述，灼热桥丝火工品在射频能量作用下，桥丝上耦合的射频能量将产生焦耳热，而脉冲射频波则会产生热积累效应。焦耳热和热积累效应使桥丝温度升高并传递给周围药剂，当药剂达到发火点时，将引起电火工品意外发火，成为安全隐患；而射频能量较小时，药剂只会发生热分解，从而引起性能改变。这里所说的性能改变包括发火感度、作用时间的改变和产品瞎火两方面。

1. 射频对电火工品发火感度和作用时间的影响

研究射频对桥丝电火工品可靠性的影响时，其步骤如下：第一，用第一组试样进行射频敏感频率探测试验，得到敏感频率（如 $f=400\text{MHz}$ ）。第二，在敏感频率下，按感度实验升降法用第二组试样得出 50% 发火的射频功率及偏差，继而推算 5% 发火的射频功率。6 种电火工品参数及 5% 射频发火能量见表 4.12 所列。第三，在敏感频率下，对第三组试样按 5% 射频发火能量逐发施加射频能量，再得出 50% 发火感度或作用时间；第四，得出未施加 5% 射频发火能量的样品组的 50% 发火感度或作用时间，并进行比较。施加与未施加射频能量的两组试样的发火感度、作用时间分别见表 4.13 和表 4.14 所列。某敏感电雷管施加 5% 射频能量不

同时间后作用时间变化见表 4.15 所列。

表 4.12 6 种电火工品参数及 5% 射频发火能量

药 剂	桥丝/ μs	桥长/mm	装药工艺	5% 射频发火能量/W
斯蒂芬酸铅	PtW/ $\phi 10$	0.40~0.50	涂药头	0.20
3 号点火药	6J20/ $\phi 9$	0.45~0.55	压装	0.10
$\text{Pb}(\text{N}_3)_2$	6J20/ $\phi 15$	0.85~0.95	压装	0.30
$\text{Si}/\text{Pb}_3\text{O}_4$	6J20/ $\phi 15$	0.85~0.95	压装	
$\text{Zr}/\text{Pb}_3\text{O}_4$	6J20/ $\phi 30$	0.85~0.95	压装	3.00
B/ KNO_3	6J20/ $\phi 50$	0.85~0.95	压装	9.00

表 4.13 施加与未施加射频能量的两组试样的发火感度

药 剂	发火条件	未施加射频能量试样的 发火感度	施加射频能量后试样的 发火感度
斯蒂芬酸铅	直流	127mA	154mA
3 号点火药	$14\mu\text{F}$	10.5V	11.3V
$\text{Zr}/\text{Pb}_3\text{O}_4$	直流	940mA	1050mA
B/ KNO_3	直流	1600mA	2220mA

表 4.14 施加与未施加射频能量的两组试样的作用时间

药 剂	发火能量	未施加射频能量试样 作用时间及偏差		施加射频能量后试样的 作用时间及偏差	
		$t/\mu\text{s}$	$\sigma/\mu\text{s}$	$t/\mu\text{s}$	$\sigma/\mu\text{s}$
斯蒂芬酸铅	$4.7\mu\text{F}$ 、14V	36.90	4.50	43.30	5.20
$\text{Pb}(\text{N}_3)_2$	$28\mu\text{F}$ 、9V	27.45	8.53	80.86	42.28
$\text{Pb}(\text{N}_3)_2$	$28\mu\text{F}$ 、28V	3.35	0.28	4.80	1.66

表 4.15 施加 5% 射频能量不同时间后作用时间变化

产 品	施加射频能量及时间	发火条件	$t/\mu\text{s}$ (均值)	$\sigma/\mu\text{s}$
敏感电雷管	0.20W、10s	$4.7\mu\text{F}$ 、14V	37.6	4.2
敏感电雷管	0.20W、30s	$4.7\mu\text{F}$ 、14V	43.3	5.2

表 4.13~表 4.15 中的数据表明:第一,经射频试验后产品的发火感度明显低于未经射频试验组的产品,即证明小射频能量对电火工品有钝感作用;第二,经射频试验后的产品的作用时间明显较长;第三,施加射频能量时间长的试样,其作用时间较大。这些都充分证明桥丝电火工品在小射频能量连续作用时,由于桥丝上产生的热积累使药剂发生了慢分解,相当程度上影响了作用性能。

2. 射频导致的电火工品瞎火

某型号电雷管是一种延期电雷管,装药为压装 $\text{Si}/\text{Pb}_3\text{O}_4$,该产品经不同能量的射频试验后,进行发火试验的结果见表 4.16 所列。

表 4.16 施加不同射频能量后电火工品发火率

产 品	发火能量	施加射频能量/W	发火数	药 剂 变 化
延期电雷管	$28\mu\text{F}, 28\text{V}$	0.8	4/4	
延期电雷管	$28\mu\text{F}, 28\text{V}$	1.5	0/4	部分产品药剂变黑
延期电雷管	$28\mu\text{F}, 28\text{V}$	1.8	0/4	4 发产品药剂均变黑

从表 4.16 中可以看出,对桥丝式电火工品施加一定射频能量后,有可能造成电火工品作用失效或瞎火。在小于射频发火能量下,尤其是在较长时间的射频能量作用下,施加射频能量的大小、时间及其药剂本身的分解温度是射频影响产品可靠性的 3 个重要因素。分解温度较低的药剂更易造成火工品射频瞎火。

4.5.3 射频对电火工品安全性的影响^[27]

电磁辐射对电火工品的危害能量传输有两种方式:一是通过直接的电气通道以传导方式注入电磁辐射能量;二是通过空间电磁辐射以电磁波形式输入电磁能量。实际使用过程中,电火工品通常是暴露在周围的电磁场中,所以绝大多数电磁危害是通过电磁波形式进行的。因此,射频对电火工品安全性的影响主要考虑这一方式。

1. 电火工品在射频场放置状态对其安全性影响

将某型号桥丝敏感电雷管放入吉赫横电磁波(GTEM)室进行

辐照实验。如图 4.13 所示。该电雷管的一条发火线 b 和芯板中心位置处电场方向垂直,改变另一条发火线 a 与芯板中心位置处电场方向的夹角 θ ,试验在敏感频率 600MHz 下进行,其结果见表 4.17 所列。

电雷管发火线 a 与电场方向垂直时,电雷管不发火;而发火线 a 与电场方向平行时,5 发电雷管均发火,且随着夹角 θ 的减小,电雷管发火所需场强也变小。当发火线 a 与电场方向平行时,电雷管接收的电磁能量最大。这说明电雷管发火线的放置状态对其射频敏感度影响较大。

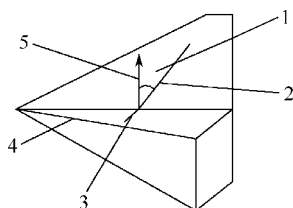


图 4.13 吉赫横电磁波(GTEM)室辐照实验

1—发火线与电场方向之间的夹角;2—电火工品发火线 a ;

3—电雷管发火线 b ;4—芯板;5—GTEM 室上部电场 E 的方向。

表 4.17 某型号电雷管不同位置状态的对比实验 ($f=600\text{MHz}$)

$\theta=90^\circ$		$\theta=60^\circ$		$\theta=0^\circ$	
场强/ $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$	发火状态	场强/ $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$	发火状态	场强/ $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$	发火状态
184.0	0	182.3	1	109.8	1
188.6	0	189.8	1	113.7	1
184.0	0	168.1	1	121.9	1
188.6	0	172.0	1	140.3	1
188.8	0	172.9	1	140.3	1

2. 电火工品发火线长度对其安全性的影响

电火工品发火线是接收电磁场中射频能量的天线,它对电火工品的射频安全性影响较大。某型号桥丝电雷管发火线处于最大

接收电磁能量时,发火线长度对火工品射频安全性的实验结果见 4.18 所列。

表 4.18 发火线长度对火工品射频安全性的实验结果

频率/MHz	发火线长度= $\lambda/4$ 时		发火线长度 $<\lambda/4$ 时	
	场强/ $V \cdot m^{-1}$	发火状态	场强/ $V \cdot m^{-1}$	发火状态
400	184.1	0	184.1	0
600	197.8	1	320.8	0
800	184.0	1	320.0	0
1000	158.7	1	224.6	0
1200	174.8	1	197.8	0
1500	131.5	1	198.7	0
注:1 状态表示发火;0 状态表示不发火				

从表 4.18 中可看出:当桥丝电火工品发火线长度相当于 $1/4$ 入射波波长时,将与入射波发生谐振现象,电火工品接收能量最大,电火工品容易起爆。

3. 不同直流感度的电火工品的射频安全性

直流感度越低的电火工品,其对电钝感性也越强,主要表现在电磁环境中的安全性也越高。有关标准如美国军标 MIL—STD—401D、MIL—STD—402D、我国军标 GJB—151、GJB—152 中均要求电火工品能经受强度为 $200V/m$ 的电磁场。几种不同直流感度的电火工品在射频环境中的安全性见表 4.19 所列。

表 4.19 不同直流感度的电火工品的射频感度

产品类型	钝感电雷管	次钝感电雷管	敏感电雷管
50%发火直流感度/A	2.83	0.34	0.13
射频场强/ $V \cdot m^{-1}$	280.1	274.0	169.3
发火状态	0	0	1
注:1 状态表示发火;0 状态表示不发火			

从表 4.19 中可以看出,在 $200V/m$ 的场强下,钝感和次钝感电火工品不发火,而敏感电火工品则会发火。这说明不同直流感度的电火工品的抗电磁辐射能力是不同的。钝感电火工品具有较

强的抗电磁辐射能力。因此,降低电火工品本身的感度有助于防止电磁辐射对电火工品的危害。

4.5.4 电火工品电磁危害最坏情况分析^[28]

在对系统用电火工品进行现场辐照试验时,只能得出武器装置中使用的电火工品不安全的结论,但通常需要的系统安全的结论则只有通过对武器装置进行电磁危害分析才能得出。武器装置中电火工品在环境电磁场受到的电磁危害通常是采用电磁危害最坏情况进行分析计算的,即假设武器装置既能最大限度地接收环境电磁场的射频能量,也能将该射频能量全部进入电火工品。分析计算时,首先考虑电火工品可能的使用结构状态和发火模式,并将其表征为适当的天线,然后,只要知道武器装置环境电磁场强度 P_0 及其接收特性(等效接收天线有效孔径 A_e),就可以计算出最坏情况下环境电磁场通过武器装置进入电火工品的射频功率 P ,即有

$$P = P_0 A_e \quad (4.5.1)$$

在美军标 MIL-STD-1576 的电磁危害分析中,假设的环境电磁场强度是:试验频率在 1MHz~50MHz 时,功率密度 P_0 为 $2\text{W}/\text{m}^2$;而试验频率大于 50MHz 时,功率密度 P_0 为 $100\text{W}/\text{m}^2$ 。在电火工品进行射频感度实验的基础上,可以推算出电火工品的最大不发火射频功率 P_{MNF} 。若 $P < P_{\text{MNF}}$,则武器装置中的电火工品在实际使用中是绝对安全的;若 $P > P_{\text{MNF}}$,则表明电火工品在使用环境中存在潜在的危險。

1. 电火工品脚—脚发火模式电磁危害分析

电火工品的使用系统状态如图 4.14(a)所示。

脚—脚发火模式等效环路见图 4.14(b)。其环路周长为 L ,环路面积为 A ,电火工品桥丝电阻为 R_T ,假设天线与负载之间阻抗匹配,辐射电阻内无功率损耗,且天线按最佳拾波方向取向。若入射波的波长 $\lambda > 2L$ 时,其等效的有效孔径为

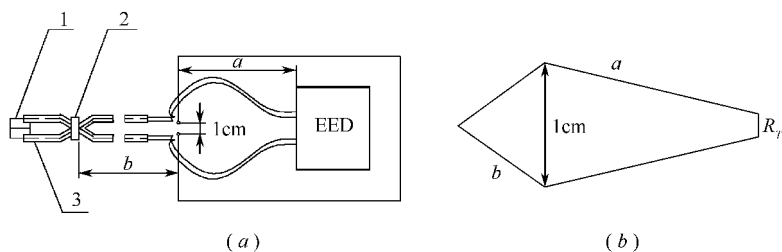


图 4.14 电火工品使用系统状态及等效环路

1—短路套；2—胶带；3—扭绞单屏蔽线。

$$A_e = \frac{4.67 \times 10^4 A^2}{\pi \lambda^2 R_T} \quad (4.5.2)$$

若入射波的波长 $\lambda < 2L$ 时,其等效的有效孔径为

$$A_e = \frac{D_F \lambda^2}{4\pi} \quad (4.5.3)$$

而天线方向系数 D_F 的取值与 L/λ 值有关,当 $L/\lambda \leq 1.7$ 时,有

$$D_F = 0.353L/\lambda + 1.5 \quad (4.5.4)$$

当 $L/\lambda > 1.7$ 时,有

$$D_F = 1.24L/\lambda \quad (4.5.5)$$

将 P_0 、 L 、 A 、 R_T 代入式(4.5.1)~式(4.5.5)可计算出进入电火工品的射频功率 P 。

2. 电火工品脚—壳发火模式电磁危害分析

电火工品脚—壳式发火模式如图 4.15 所示。此时, L 为发火线长度与火工品长度之和。

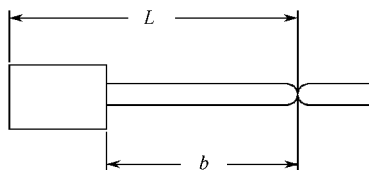


图 4.15 电火工品脚—壳式发火模式

对于高频段, 即当 $L/\lambda > 1/4$ 时, 其等效的有效孔径为

$$A_e = 1.64 \frac{\lambda^2}{4\pi} \quad (4.5.6)$$

这里已假设环路的方向系数为半偶极子的方向系数(1.64)。对于低频段, 即当 $L/\lambda \leq 1/4$ 时, 其等效的有效孔径为

$$A_e = \frac{L^2 Z_0}{R_e [Z_{pc}(f)]} \quad (4.5.7)$$

式中 Z_0 ——自由空间阻抗(377Ω);

$R_e [Z_{pc}(f)]$ ——特定频率时脚—壳阻抗的实部(电阻分量)。

将 P_0 、 L 、 $R_e [Z_{pc}(f)]$ 代入式(4.5.1)、式(4.5.6)和式(4.5.7)中可计算出进入电火工品的射频功率 P 。

3. 举例: 某敏感电雷管最坏情况电磁危害分析^[26]

1) 脚—脚发火模式最坏情况下接收功率—频率曲线

在图 4.14 中, 假设 $L=0.25\text{m}$, $A=6.3 \times 10^{-4}\text{m}^2$, $R_T=7\Omega$; 环境电磁场强度为: 试验频率在 $1\text{MHz} \sim 50\text{MHz}$ 时, P_0 为 $2\text{W}/\text{m}^2$; 而试验频率大于 50MHz 时, P_0 为 $100\text{W}/\text{m}^2$ 。代入式(4.5.1)~式(4.5.5)中, 得到该敏感电雷管接收功率—频率曲线, 如图 4.16 所示。

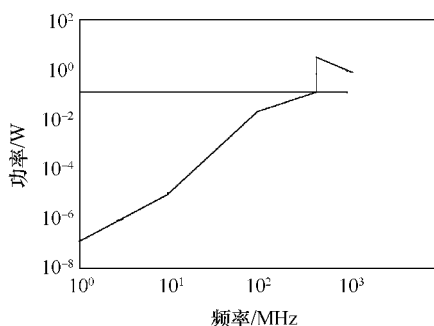


图 4.16 某电雷管接收功率—频率曲线

2) 某电雷管最大不发火射频功率 P_{MNF}

首先对该电雷管进行射频探测实验, 确定其敏感实验频率为

600MHz,然后在这一敏感频率下进行 20 发升降法感度实验,得到 50%发火射频功率 P_{50} 为 0.516W,标准差 σ 为 0.085W,最后推算出置信水平 $\gamma=0.95$ 下,发火可靠度为 $R=0.001$ 的射频水平 P_{MNF} 。

$$P_{\text{MNF}} = P_{50} - U_p \sigma - t_\gamma(v) Q \quad (4.5.8)$$

$$Q = \sqrt{\frac{\sigma^2}{N} + U_p \frac{\sigma^2}{2(N-1)}}$$

式中 P_{50} ——50%发火射频功率;

σ ——感度实验标准差;

N ——感度实验数;

U_p ——标准正态分布的下侧 p 分位数 ($R=0.001$ 时,

$U_p=3.09$);

$t_\gamma(v)$ —— t 分布的分位数,置信水平 $\gamma=0.95$, $v=N-1=19$ 时, $t_\gamma(v)=2.09$ 。

代入有关数据后,得出最大不发火射频功率为

$$P_{\text{MNF}} = 0.156 \text{ W}$$

3) 某敏感电雷管在最坏情况下的电磁危害分析^[29]

图 4.16 所示的水平直线为该雷管最大不发火射频功率,曲线为其接收功率—频率曲线。从中可以看出,当入射波频率等于谐振频率时,该电雷管的射频发火功率最低,对射频能量最敏感,实验也证明此频率为敏感频率。通过将该电雷管接收功率计算值与最大不发火射频功率比较,可知该电雷管在频率低于 430MHz 时是绝对安全的;而当频率高于 430MHz 时,该电雷管可能有危险。由于这种分析是在最坏情况下估计的,所以其结果比较保守。

4.6 电火工品防射频技术

电磁辐射对电火工品造成危害必须具备 3 个要素,即在电火工品所处环境中已出现危险的电磁辐射源;电磁辐射源能将电磁

能量耦合到敏感的电火工品上；其耦合能量已超过电火工品的最小发火能量。防止电火工品遭受电磁辐射危害的主要途径就是降低火工品本身的射频感度，提高内部对射频能量的衰减耗散；或在传输射频路径——发火线上附加衰减器来衰减进入火工品的射频能量。

4.6.1 电火工品射频钝感化技术

从火工品起爆机理上分析，脚一脚间通过桥丝的发火最终是电流作用，所以，一般对直流钝感的火工品，其射频感度也低，而通过改变电桥材料、形状和药剂以提高最小不发火能量为目的的技术，也有益于电火工品的防射频。在能量许可的情况下，采用钝感电火工品是防射频最简单、最有效的方法。直接使电火工品具有射频钝感化的技术则是以阻高频、通低频为目的的技术，如复合导线、宽频带衰减电极塞等。

1. 复合导线对电磁辐射防护率^[30]

在直流或低频电路中，均匀导线横截面上的电流密度是相同的。但在高频电路中，随着频率的增加，导线上电流分布越来越向表面集中，这种现象称为集肤效应。集肤效应减小了导线的有效截面积而增加了导线的等效电阻，所以在高频下导线的阻值会显著地随频率的提高而增加。同一根导线在高频下的阻值 R_F （简称射频电阻）要远高于直流电阻 R_L 。将导线射频电阻 R_F 与直流电阻 R_L 之比定义为集肤效应系数 ξ 。集肤效应系数 ξ 与导线的材料、半径和通过的高频电流频率有关。对于金属导线来说，有

$$\xi = \pi r_0 \sqrt{10 \mu_0 \sigma_0 f} \times 10^{-4} \quad (4.6.1)$$

式中 r_0 ——导线半径(mm)；

σ_0 ——导线电导率($\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)；

f ——频率(Hz)；

μ_0 ——导线的磁导率。

从式(4.6.1)中可以看出：磁导率和电导率较高的金属具有较

高的集肤效应,所以利用集肤效应原理选择导线,使之在高频下具有极高的电阻,从而达到阻高频通低频的目的。铜导线外包覆不锈钢的复合导线就具有这种功能。这时,复合导线集肤效应系数 ξ 为

$$\xi = K \pi r_0 \sqrt{10 \sigma_0 \mu_0 f} \times 10^{-4} \quad (4.6.2)$$

$$K = A \frac{\rho_w}{\rho_n} + 1 - A \quad (4.6.3)$$

$$A = \frac{\pi r_n^2}{\pi r_0^2} \quad (4.6.4)$$

式中 A ——芯截面积与导线截面积之比;

ρ_w ——包覆外层密度;

ρ_n ——芯层密度;

σ_0 ——包覆外层材料电导率;

μ_0 ——包覆外层材料的磁导率。

例如,半径为 0.32mm 的不锈钢复合铜导线(铜与不锈钢的横截面积比 72 : 28),当频率为 1MHz 时,集肤效应系数 ξ 约为 72。

电火工品对电磁辐射防护率 β 定义为

$$\beta = \frac{E_R}{E_L} \quad (4.6.5)$$

式中 E_R ——发火射频能量;

E_L ——发火直流能量。

由于任何情况下,发火能量都等于 $I^2 R t$ (I 为通过电桥的电流; t 为通电持续的时间),并认为使火工品激发的最小电流与临界时间是一个定值,所以,能量比就是其电阻比,故防护率又可表示为

$$\beta = \frac{R_T + R_F}{R_T + R_L} \quad (4.6.6)$$

式中 R_T ——桥丝电阻;

R_F ——导线射频电阻；

R_L ——导线直流电阻。

采用复合导线使导线射频电阻增大,从而提高了对射频的防护作用。

2. 宽频带衰减电极塞^[8]

电火工品电极塞材料常用陶瓷、玻璃等,但如果改为能衰减射频的材料做电极塞,就成了宽频带衰减器。宽频带衰减器是由能耗散射频能量、并以热能的形式释放出来的损耗材料压制而成。由于它不改变电火工品的发火性能,不需增加附加装置,因此价格低廉。

目前广泛使用羰基铁粉和铁氧体等两类衰减材料。羰基铁粉的制备工艺如下:先用羰基法制成 $10\mu\text{m}$ 的纯铁粉,将铁粉用丙酮润湿,再将稀磷酸加入,加热搅拌并烘干,然后加入环氧树脂,搅拌均匀后在高压下压制成型,压力越大衰减性能越好。这种衰减器可以等效成 $R-L-C$ 陷阱电路, R 、 L 、 C 分别表示增加铁粉塞后分布在电火工品导线上的等效电阻、电感和电容。 R 决定于导线本身的电阻、塞子中的涡流及磁滞等损失,其值较小,可以忽略。这种衰减器的固有频率 f_c 为

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4.6.7)$$

在 f_c 附近较宽的高频范围内,这种衰减器的衰减效果较好,而在低频时衰减效果不好,特别是当射频远小于其固有频率 f_c 时,这种衰减器基本不起衰减作用。美国匹克汀尼工厂用羰基铁粉电极塞雷管 M78 代替了敏感的 T24E1 酚醛电极塞雷管,达到在频率 500MHz 下衰减 20dB,但当频率低于 500MHz 时,衰减能力迅速下降。它作为衰减雷达频率时较为理想,但击穿电压较低,使用时常需外加绝缘套管以与金属壳绝缘。

铁氧体材料是一种烧结的金属氧化物,它在低频下有很好的衰减性能,用铁氧体电极塞制成的 T24E1 雷管的衰减性能比铁粉

塞大 4 倍。所以,美国已经用铁氧体电极塞雷管 M78E1 代替了羰基铁粉电极塞雷管 M78,但它在高频时衰减性能很快下降,如图 4.17 所示。铁氧体材料可以是单晶铁氧体,也可以是二种或二种以上的固熔体。例如,由锰、锌和四氧化三铁的混合物,在 1450℃ 下焙烧 2h,然后在氩气中慢慢冷却,就可以得到锰锌铁氧体材料,它能在 1MHz 时衰减 36dB,在 200MHz 时,衰减高达 150dB。

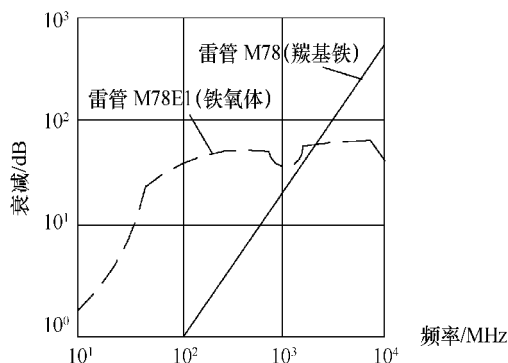


图 4.17 羰基铁粉和铁氧体材料的衰减性能

4.6.2 低通滤波器衰减射频能量技术^[31]

1. 低通滤波器衰减原理

火工品的射频能量主要是通过发火线进入的,因此,在射频能量的传输路径——发火线上,采用附加衰减器就可以达到衰减射频能量的目的。衰减器与电火工品配合使用时,其特点是电火工品本身感度不变,而主要是利用外加线路来降低电火工品对射频的感度,使其具有防射频能力。采用这种方法后,通到电火工品上的射频电流最大不超过几微安,大大低于发火电流,能确保整个系统的防射频效果。在导弹直列式点火系统中,当导弹内部带有发射机时,这种方法尤为重要。

射频衰减器实际上是一个低通滤波器,它通常由电容、电感等电子元件组成。对一个简单的 π 型对称 C—L—C 电路(见图

4.18(a))而言,可以根据网络匹配概念,运用中分定律,将其分为两个特性完全相同的 Γ 型电路(见图 4.18(b)),其中, $L_K = L_0/2$, $C_K = C_0$,这种 Γ 型电路的截止频率 f_c 为

$$f_c = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_K C_K}} \quad (4.6.8)$$

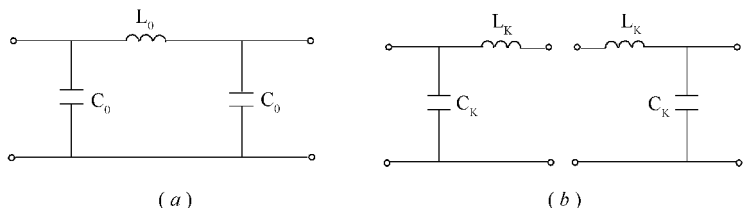


图 4.18 π 型对称电路及等效 Γ 型电路

此特性值也是 π 型对称 C—L—C 电路的特性值,若用 π 型对称 C—L—C 电路作为低通滤波器电路,则该滤波器对高于 f_c 的射频电流就具有衰减作用。对一固定的频率 f ,当 $f > f_c$ 时,其衰减率 β 为

$$\beta = \ln \left| \frac{1 + \frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 - 1}}}{1 - \frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 - 1}}} \right| \times 8.686 (\text{dB}) \quad (4.6.9)$$

$$\alpha = \frac{f_c}{f} \quad (4.6.10)$$

2. 法国 R550 空空导弹发动机点火器的射频衰减器^[31,32]

法国 R550 空空导弹是法国 20 世纪 70 年代的产品,该导弹发动机点火组件由一个点火器和射频衰减器组成。射频衰减器由两个低通滤波器并联组成。低通滤波器的结构是一个长圆柱体,里面将一对电感线圈装在一对铁氧体磁环中,线圈是用直径为 0.3mm 的漆包线绕成 40 匝,两边各并 1 个圆片形穿心独石电容,电容器的总电容量为 $0.03\mu\text{F}$,电感 7.43mH ,在接电源的一端还并联 1 对阻值为 $4.7\text{M}\Omega$ 的泄放电阻 R_2 。使用时,点火器的 2 根发火线各串联 1 个 π 型穿心低通滤波器(见图 4.19),2 个低通滤

波器呈并联状态。2 个低通滤波器外面还有 1 个圆筒形铜片防护罩作为共用线,而且铜片与发动机喷管壳紧密接触,构成屏蔽结构。整个连接点火器、射频衰减器、电源的电路图如图 4.20 所示。

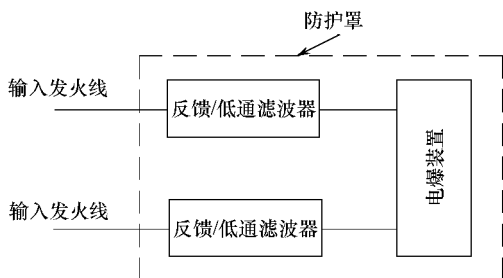


图 4.19 穿心低通滤波器使用状态

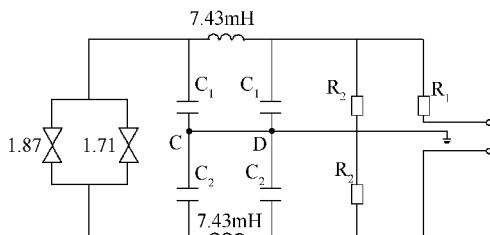


图 4.20 法国 R550 空空导弹发动机点火器和射频衰减器电路图

该连接电路的滤波电路(见图 4.21(a))实际上是一个 π 形平衡滤波电路,可将其变换为图 4.21(b)所示形式,由于 C、D 两点接地,将图 4.21(b)中的两并臂的串联电容合并,串臂电感合并等效成图 4.21(c)所示形式。

其中 $L_0 = 2L_1 = 2 \times 7.43 = 14.86\text{mH}$

$$C_0 = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \frac{0.015 \times 0.017}{0.015 + 0.017} = 0.008\mu\text{F}$$

再将图 4.21(c)的 π 形电路分为 2 个特性完全相同的 Γ 型电路(见图 4.18),其中 $L_K = L_0/2 = 7.43\text{mH}$, $C_K = C_0 = 0.008\mu\text{F}$,并按式(4.6.8)求得截止频率 f_c 为 20.6kHz 。根据式(4.6.9)求出不同频率下的衰减率,见表 4.20 所列。

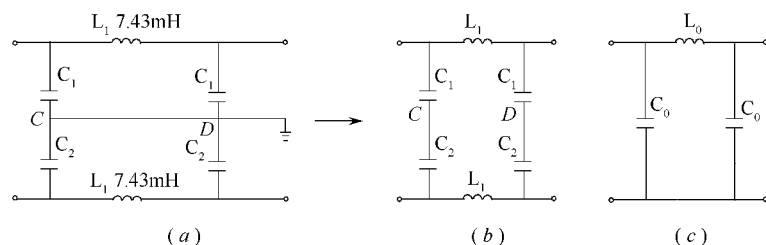


图 4.21 滤波电路等效变换图

表 4.20 法国 R550 导弹射频衰减器不同频率下的衰减率

频率/kHz	20.6	30	41.2	100	206
衰减率/dB	0	16.2	23	39.2	52

从表 4.20 中数据可以看出:频率越高,衰减率越大,该射频衰减器对高频信号具有良好的阻隔作用,而低于 20.6kHz 的电流信号能顺利通过。目前射频引起电火工品意外发火的频率集中在中低频率($1\text{MHz}\sim 10\text{MHz}$),法国 R550 导弹用的射频衰减器从较低的频率(1MHz)就有明显衰减,而使用磷化羰基铁粉电极塞的几种电火工品的衰减性能只在高频(100MHz)才开始衰减。需要指出的是,这种射频衰减器体积大,属附加元件,只适用于导弹等空间充裕的地方。

图 4.20 中的 R_1 阻值为 7.3Ω ,它具有两个放大作用:一是直流发火时,起降压限流作用,即保证通过点火器双桥丝的电流不能过大,同时也防止电流过大烧毁电感线圈;二是提高线路的输入阻抗,防止接通点火器时,短路导弹载机电源。图 4.20 中的 R_2 跨接在电路中,其作用是为电容器提供放电回路,由于放电回路始终是接通的,所以电容器上的电压不易积累,而是随充随放的。

参 考 文 献

- 2 蔡瑞娇. 火工品设计原理. 北京:北京理工大学出版社,1999
- 3 戴实之. 火工技术. 北京:兵器工业部教材编审室,1987. 105~107
- 4 焦彦玲等. 电子引信用小型电雷管设计参数研究. 213 所学术论文集,1998:27
- 5 钟佑全. 灼热桥丝电雷管作用时间研究. 火工品,1994(2):4
- 6 李运来. 镍铬丝和钨丝电雷管性能比较. 火工品,1981(4):7
- 7 崔勇. 浅谈影响雷管电点火元件发火性能的原因. 火工品,2001(3):47
- 8 贺树兴译. 武器系统防射频技术. 北京:国防工业出版社,1992
- 9 GJB736.11-90. 火工品试验方法:电火工品静电感度试验. 1990
- 10 MIL-STD-322. 电起爆爆炸元件的基本评定试验. 1975
- 11 MIL-I-23659C. 钝感电起爆器通用设计规范. 1972
- 12 MIL-STD-1512. 电起爆的电爆分系统的设计要求和试验方法. 1976
- 13 MIL-STD-1576. 航天系统用电爆分系统的安全性要求和试验方法. 1984
- 14 MIL-STD-331. 引信及引信元件的环境与性能试验. 1976
- 15 齐杏林. 电火工品人体静电放电实验研究. 火工品,1997(2):40
- 16 艾鲁群. 国外火工品手册. 北京:兵器标准化研究所,1988
- 17 齐杏林. 静电放电刺激对电点火具恒流发火时间的影响. 火工品,1999(1):9
- 18 马宏宣. 国外抗静电抗射频电火工品. 火工品,1981(3):21
- 19 孙丕强. 带绝缘外套的抗静电点火具. 火工品,1984(1):49
- 20 赵文虎. 某导弹用电点火具防静电技术研究. 火工品,2001(3):24
- 21 胡亚平. 小尺寸电起爆器防静电设计方法. 火工品,1996(4):27
- 22 王宗舜. 关于提高电火工品抗静电能力的研究. 火工品,1983(3)
- 23 MIL-STD-1385(B). 预防电磁场对军械危害的一般要求. 1972
- 24 王清瑞. 国外电磁辐射对军械危害的测试技术发展概况. 火工品,1980(4):20
- 25 王清瑞. 军械的危险场强与频率关系曲线. 火工品,1980(1):54
- 26 马宏宣等. 射频对桥丝电火工品性能的影响. 火工品,2003(3):15
- 27 景晓强. 电磁辐射对电火工品的危害分析及机理研究. 213 所硕士论文,2000
- 28 贺树兴译. 论射频危害计算. 火工品,1984(4):30
- 29 景晓强. 电火工品电磁危害评估. 火工品,1999(4):44
- 30 王宗舜. 关于电爆装置应用复合导线提高对电磁辐射防护率的估算法. 火工品,1981(1):7
- 31 刘淑贞. 法国 R550 空空导弹发动机点火器之射频衰减器性能分析. 火工品,1980(4):67
- 32 刘淑贞. 法国 R550 玛特拉空空导弹及其火工品性能简介. 火工品,1979(1):63

第5章 桥丝式电火工品设计技术

5.1 概 述

5.1.1 桥丝式电火工品分类

概括地讲,桥丝式电火工品一般包括两类:一类是电爆炸元件,如引信用瞬发电雷管、延期电雷管等;另一类是电点火元件,种类较多,如电底火、电点火管、电爆管、电点火器、电点火具等。在此,为论述方便,做如下规定:尺寸小于10mm且外形为圆柱形的点火元件称为点火管;尺寸介于10mm~20mm的点火元件称为点火器;尺寸大于20mm的点火元件称为点火具。电点火管通常主要用于引信或用于脉冲发动机的点火;电点火具通常用于武器系统的起飞点火;而电点火器通常用于武器飞行过程中的续航发动机、开瓶装置、燃气发生器等系统的点火。

依据安全性指标和发火能量大小将桥丝式电火工品分为高敏感型、敏感型、次钝感型和钝感型等四类。将发火能量小且不发火电流不大于50mA的产品称为高敏感电火工品;将发火能量较小且不发火电流介于50mA~150mA,且防静电的产品称为敏感电火工品;将发火能量较大且不发火电流不小于150mA,且防静电的产品称为次钝感电火工品;将发火能量大且满足防静电和1A1W5min不发火要求的产品称为钝感电火工品。

5.1.2 桥丝式电火工品一般设计原则

桥丝式电火工品通常由管壳、首层装药(起爆药或点火药)、输

出药、电极塞及桥丝组成,其一般设计原则是:第一,依据发火能量和不发火能量要求,选择桥丝直径和首层装药类型;第二,依据输出要求,选择输出药类型和输出端面壳体材料及厚度;第三,依据输出药类型,以实验得出起爆输出药的极限装药量,再以一定的裕度确定起爆药装药量;第四,依据安全性要求,进行防静电和防射频设计。另外,要保证桥丝与药剂、壳体材料与药剂、药剂与药剂之间的相容性,壳体材料还要兼顾环境性能和使用性能的要求。

本章主要通过系列典型桥丝式电火工品的设计介绍,达到对电火工品设计技术的了解,对第4章所介绍的设计原理实现灵活应用。

5.2 敏感桥丝电雷管设计

在小口径炮弹电子类引信(含电子时间引信、近炸引信、多用途引信)中,由于空间的限制,通常要求配用的电火工品具备如下特征:体积小、发火电压低、发火能量小及耐高过载。这类电火工品设计难度较大。典型敏感桥丝电雷管的主要技术参数为:电阻 $3\Omega\sim7\Omega$,发火条件 $3.3\mu\text{F}$ 、 17V 或 $6.8\mu\text{F}$ 、 12V ,耐过载 $50000g$,尺寸 $\phi 3.85\text{mm}\times 7\text{mm}$ 或 $\phi 2.59\text{mm}\times 6.35\text{mm}$ 。其设计主要包括桥丝选择、焊接工艺、装药设计和防静电技术。^[1,2]

5.2.1 桥丝选择与焊桥工艺

1. 桥丝选择

桥丝是影响电雷管发火感度的关键参数,为满足发火能量小的要求,首先应选择较细的、发火感度高的桥丝;其次,为保证能耐高过载、高旋转的要求,桥丝不仅本身要有较高的破断力(即桥丝被拉断的力),而且还要适应焊接强度高的焊接工艺;最后,长期储存后要有稳定的性能。目前,军用电雷管常用桥丝的种类有镍铬丝、铂铱丝、钨钼丝、铂钨丝等。各种桥丝对电雷管发火感度的影响见表5.1所列。各种桥丝的破断力见表5.2所列。

表 5.1 各种桥丝对电雷管发火感度的影响

桥 丝	桥径/ μm	电阻/ Ω	发火电容/ μF	发火感度/V	焊桥工艺
PtW _{8.5}	10	4~7	6.8	6.89	贮能焊
6J20	9	6~11	6.8	6.90	锡焊
WAl ₂ -1Re	8	2~3	6.8	7.30	贮能焊
PtW _{8.0}	10	4~7	6.8	6.80	贮能焊

表 5.2 各种桥丝的破断力

桥 丝	PtW	6J20	WAl ₂ -1Re
桥径/ μm	10	10	7
破断力/g	≥ 14	≥ 5	≥ 14

从表 5.1 和表 5.2 中可以看出:桥丝选用 PtW 和 6J20 桥丝都有利于提高电雷管的发火感度,但 PtW 桥丝的破断强度远比 6J20 高。此外,PtW 桥丝不仅可锡焊,也可贮能焊,可焊性比 6J20 好。为考察其长贮性能(长期储存性能),将三种桥丝用锡焊焊接压制成电雷管,经温度 71°C 、相对湿度 95% 以上、28 天的长贮试验后,观察其电阻变化绝对值的平均值 $|\overline{\Delta R}|$ 和标准偏差 σ ,结果见表 5.3 所列。

表 5.3 长贮后电阻变化情况

电极塞	项目	PtW($\phi 10\mu\text{m}$)	6J20($\phi 10\mu\text{m}$)	WAl ₂ -1Re($\phi 8\mu\text{m}$)
玻璃	$|\overline{\Delta R}|/\Omega$	0.08	0.10	1.3
玻璃	σ/Ω	0.10	0.07	2.0
塑料	$|\overline{\Delta R}|/\Omega$	0.15	0.16	60%断桥
塑料	σ/Ω	0.10	0.11	

从表 5.3 中可以看出,PtW 桥丝的耐腐蚀性与 6J20 桥丝相当,但远比 WAl₂-1Re 桥丝好,经解剖实验发现,PtW 桥丝发亮,焊点完好,无腐蚀现象。综合桥丝的发火感度、破断力、可焊性和长贮性能分析,认为 PtW 桥丝最适合用做敏感电雷管的桥丝。

$\phi 8\mu\text{m}$ 的 PtW 桥丝适合于发火能量小于 0.5mJ (如: $3.3\mu\text{F}$ 、 17V) 的高敏感雷管, 而 $\phi 10\mu\text{m}$ 的 PtW 桥丝则适合于发火能量稍大 (如: $6.8\mu\text{F}$ 、 12V) 的敏感雷管。

2. 焊桥工艺

由于小型敏感电雷管要求能经受 $50000g$ 的加速度冲击和 $5\times 10^4\text{r/min}$ 的高转速, 所以桥丝与电极的焊接强度极为重要。通常的焊接方法有锡焊和贮能焊, 锡焊是用融化的焊锡把桥丝和电极包覆在一起, 它易产生虚焊, 不利于高过载的冲击; 贮能焊是通过电容放电产生高温, 加以适当的压力, 将桥丝与电极熔为一体, 它的焊点强度高, 因此一般选择贮能焊桥工艺。

5.2.2 药剂选择和装药工艺

1. 滴状药头

为保证桥丝在高过载下不断桥, 通常采用包覆桥丝以提高桥丝的强度。为保证电雷管在低能量下可靠发火, 包覆桥丝的点火药应该具有爆点低、热丝感度高的特点。斯蒂芬酸铅 (LTNR) 的爆点低于氮化铅, 热丝感度又高于氮化铅 (见表 5.4), 所以选用 LTNR 做点火药。

表 5.4 氮化铅和斯蒂芬酸铅的热性能及作用时间

点火药	爆发点/ $^{\circ}\text{C}$	发火电容/ μF	发火感度/ V	感度偏差/ V	发火电压为 8V 时的作用时间		
					$\bar{t}/\mu\text{s}$	$t_{\max}/\mu\text{s}$	$t_{\min}/\mu\text{s}$
LTNR	267~268	22	4.63	0.19	44.9	57.9	31.7
$\text{Pb}(\text{N}_3)_2$	327~360	22	5.50	0.33	34.8	47.1	26.1

为提高灼热桥丝电雷管发火感度和作用时间的一致性, 滴状药头应做到以下几点: 一是应尽可能使用小粒度 LTNR, 因为这有助于增大药剂和桥丝的接触面积, 而接触面积大, 桥丝传给药剂的热量就多, 可提高产品的发火感度。美国军用微型敏感雷管 M100 采用 LTNR 的粒度小于 $10\mu\text{m}$, 我国所用的 LTNR 的粒度约为 $50\mu\text{m}\sim 100\mu\text{m}$, 所以发火感度较低。二是正确选择点火药中

的粘合剂,它应与 LTNR 的混合均匀性好、粘度大,配成的混合剂与电极塞表面粘接强度高。可采用的粘合剂有 5 号硝化棉等。

2. 起爆药和输出装药

小型敏感电雷管的重要特点是体积小,所以装药量有限,且装药困难。为保证有足够的起爆能力,起爆药应选用起爆威力大、流散性好的羧甲基纤维素氮化铅($\text{CMC}-\text{Pb}(\text{N}_3)_2$),输出装药应选用威力大的 HMX。

3. 装药工艺

为使小型雷管在尺寸小、装药量有限的情况下获得较大的输出威力,在总装药药高一定时,起爆药与输出装药的装药量应选最佳匹配药量。首先确定可靠起爆输出装药 HMX 的最小起爆药量(见表 5.5),然后,实验得到最大输出的最佳匹配药量(见表 5.6)。

表 5.5 起爆药量对起爆输出装药的影响($\phi 3.85\text{mm} \times 7\text{mm}$)

HMX/mg	$\text{Pb}(\text{N}_3)_2/\text{mg}$	压药压力/MPa	发火数/发	发火率/%
65	6	53.9	2/9	22
65	9	53.9	7/9	78
65	12	53.9	10/10	100
65	15	53.9	10/10	100

表 5.6 装药高度与输出威力($\phi 2.59\text{mm} \times 6.35\text{mm}$)

$\text{Pb}(\text{N}_3)_2$ 高度及药量		HMX 高度及药量		钢凹深度/mm	
药高/mm	药量/mg	药高/mm	药量/mg	\bar{H}/mm	σ/mm
1.3	13	3.1	18	0.193	0.033
1.5	15	2.9	17	0.203	0.013
1.7	17	2.7	16	0.191	0.020
2.0	20	2.4	14	0.169	0.023

从表 5.5 中可以看出, $\text{CMC}-\text{Pb}(\text{N}_3)_2$ 可靠起爆输出装药 HMX 的最小药量为 12mg,为保证可靠起爆,起爆药量可适当加大,如对 $\phi 3.85\text{mm} \times 7\text{mm}$ 的电雷管而言,起爆药量定为 20mg、压药压力为

53.9MPa;输出装药中松装药 15mg、压药压力为 53.9MPa;而主装药 50mg、压药压力为 147MPa。对 $\phi 2.59\text{mm} \times 6.35\text{mm}$ 的微型雷管来说,起爆药量定为 15mg,输出装药定为 17mg。

5.2.3 结构设计与防静电技术

1. 结构设计

结构设计主要包括管壳和电极塞设计。当装药条件相同时,电雷管的输出威力与雷管侧壁的约束力(即雷管侧壁强度)有关,约束力大,轴向输出威力就大;而装药条件和侧壁强度一定时,雷管底部厚度对轴向输出威力影响也较大,底部厚度增加时,需要更多能量才能把底部冲破,且使破片的加速度变小,不利于轴向输出威力。所以,小型电雷管宜采用镁铝合金或不锈钢作为管壳材料,底部厚度应小于 0.10mm。

与塑料电极塞相比,采用玻璃—柯伐合金烧结的电极塞有助于耐高加速度的冲击,也有利于长期储存后性能的稳定(见表 5.3)。典型敏感电雷管示意图如图 5.1 所示^[3]。

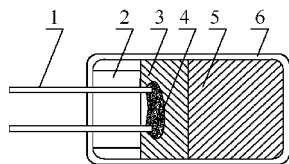


图 5.1 典型敏感电雷管示意图

1—脚线;2—电极塞;3—起爆药;
4—滴状药头;5—炸药;6—管壳。

2. 脚—壳间防静电技术^[4,5]

脚—脚之间的静电感度主要决定于系统所给电火工品发火能量。敏感型电火工品在保证可靠发火下,应尽量降低脚—脚间的静电感度。桥丝式电火工品因其电阻低,与人体阻抗串联分压小,施加在产品上的静电能量小且静电荷不易积累,所以桥丝式电火工品脚—脚间具有较其他类型的电火工品较低的静电感度。

与脚—脚间较低的静电感度相比,脚—壳之间静电冲击发火属火花式击穿,是最危险的静电放电通道。美国敏感型电雷管采取如下几项措施:一是要求脚—壳间的绝缘电阻大于 $50\text{M}\Omega$ (500V),目的是通过增大脚—壳间的绝缘强度来提高防静电能力;二是在覆盖整个电桥上的点状药外面再覆盖一层绝缘强度较高的粘合剂,以提高脚—壳间的绝缘强度;三是采用裸脚线,在管壳收口时,使管壳与外部脚线间留有小间隙,构成静电泄放通道。在类似并联压敏电阻、碳化硅酚醛塑料塞等防静电技术由于雷管尺寸限制或要求耐高冲击而无法使用的情况下,无需改变结构和工艺的涂防静电胶技术是最适合小型敏感电雷管的防静电措施。

将碳化硅与环氧树脂固化胶混合均匀,涂在电极塞尾部,相当于在脚—壳间并联了碳化硅压敏电阻,起到了防静电作用,但碳化硅与环氧树脂固化胶的比例不同,则碳化硅胶的伏安特性和工作电压也不同。不同比例碳化硅胶的伏安特性和工作电压见表 5.7 所列。

表 5.7 不同比例碳化硅胶的伏安特性和工作电压

SiC : 固化胶 (质量比)	电流 1.0mA 时 U_1/V	电流 0.1mA 时 U_2/V	偏离欧姆定律 系数 α	防静电性能 $500\text{pF}/25\text{kV}$
2 : 1	450~520	290~350	5.9	通过
1.75 : 1	300~480	200~250	4.3	通过
1 : 1	420~600	250~270	3.5	通过
0.5 : 1	>1000	>1000		

从表 5.7 中可知, α 值随 SiC 在固化胶中含量的增多而增大,但 U_1 、 U_2 值却随 SiC 在固化胶中含量的增多而减低。SiC 与固化胶比例为 2 : 1 及 1 : 1 时,都能通过静电冲击要求。有三个条件决定这种比例:一是 α 值越大越好;二是 U_1 、 U_2 值要适当;三是工艺性好。当 SiC 与固化胶比例为 2 : 1 时,因 SiC 含量大,不易涂,工艺性不好,所以选用 SiC 与固化胶的比例为 1.75 : 1。涂覆 SiC 胶后,对雷管的发火感度、作用时间和长贮性能均无影响。电雷管

脚—壳间虽能经受 10 次静电冲击,但静电冲击之后的 U_1 、 U_2 和 α 值均明显下降,对于低压发火的电雷管而言,这虽不会影响产品性能,但对于需较高电压发火的电雷管来说,这种防静电技术应谨慎使用。

3. 生产工艺及注意事项^[3]

敏感型电雷管的主要生产工艺为:压主装药、装起爆药、装电极塞、压合、收口、涂防静电胶、测电阻、产品短路、抽检、包装入库等。在生产过程中,压合工艺曾出现过多起爆炸事故,究其原因主要是碰撞摩擦。为了耐高加速度冲击,产品装配工艺要求电极塞和管壳过盈配合,而起爆药 $\text{CMC}-\text{Pb}(\text{N}_3)_2$ 对机械摩擦和冲击又较为敏感,所以压合时,在电极塞被推入管壳的过程中,过盈配合使起爆药受到较大的碰撞摩擦,从而引起爆炸。解决方法主要是降低压合速度,另外可考虑将不锈钢管壳替换为硬度较低的铝镁合金。

5.3 导弹引信用电雷管设计

导弹在命中目标时,控制系统使引信传爆序列中的电雷管起爆,并最终引爆战斗部,从而达到毁伤目标的目的。导弹引信用电雷管一般包括瞬发电雷管和延期电雷管等两类,其中延期电雷管主要用于侵彻目标。远程导弹引信一般多采用钝感电雷管;以反坦克导弹为代表的近程导弹引信则多采用次钝感电雷管。

5.3.1 次钝感电雷管设计

位于引信内的瞬发电雷管属于次钝感电雷管,其主要特征有:尺寸大、发火能量大、作用时间短、抗静电,有一定的抗射频能力,但未达到 $1\text{A}1\text{W}5\text{min}$ 不发火的钝感要求。典型产品的主要技术参数为:电阻 $3\Omega \sim 7\Omega$,发火条件为 $28\mu\text{F}$ 、 28V ,作用时间小于 $10\mu\text{s}$,脚—壳间满足 500pF 、 25kV 、 500Ω 静电冲击不发火的要求,且通 0.1A 直流时而不发火。次钝感电雷管的设计内容主要包括桥丝选择、装药设计、电极塞结构和防静电技术。

1. 桥丝、药剂选择及装药工艺

次钝感电雷管常用于反坦克导弹引信。当导弹碰上目标时,头部风帽开关闭合,引信电容器通过开关闭合对电雷管放电而使之起爆。早期曾采用钨丝电雷管,桥丝采用 $8\mu\text{m}$ 的超细钨钼丝 WAl_2-1Re (简称钨丝)来达到小电阻 $1\Omega\sim 3\Omega$,用贮能焊工艺将桥丝焊接到不锈钢脚线之间。利用酚醛塑料电极塞、铝加强帽和镍铜管壳,羧甲基纤维素氮化铅和太安装药,对镍铬丝和超细钨丝的性能进行了比较。直流发火感度和电容发火感度见表 5.8 所列^[6]。

表 5.8 镍铬丝和超细钨丝的直流及电容发火感度

桥丝材料及直径	直流发火感度		30 μF 时发火感度		30 μF 、28V 时作用时间		
	I_{50}/mA	σ/mA	U_{50}/V	σ/V	$\bar{T}/\mu\text{s}$	$T_{\max}/\mu\text{s}$	$T_{\min}/\mu\text{s}$
镍铬丝 $\phi 9\mu\text{m}$	112.8	3.47	6.2	0.43	5.87	10.6	4.8
钨丝 $\phi 7.4\mu\text{m}$	225.8	3.12	4.2	0.16	3.59	4.2	3.1

表 5.8 中数据表明镍铬丝直流发火感度高于超细钨丝,而电容发火感度结果则相反。似乎可以得出这种结论:钨丝适合做大电容、低电压下发火的快速电雷管桥丝,因此早期国内外都曾出现过相当数量的钨丝电雷管。但随着电雷管长贮性能要求的提出,开始发现这种超细钨丝不耐腐蚀,所形成的产品长贮性能差(见表 5.9),因此后来的产品大多采用铂钨丝等。电极塞为玻璃、焊接方式为贮能焊时,桥径为 $10\mu\text{m}$ 的几种桥丝与药剂的相容性情况见表 5.9 所列^[7]。

表 5.9 几种桥丝与药剂的相容性情况

桥丝材料	接触介质	环境	桥丝电镜观察	腐蚀程度
WAl_2-1Re	LTNR+硝化棉	A	无桥丝,只有腐蚀脚线点	严重
6J20	LTNR+硝化棉	A	桥丝有点腐蚀,脚线被腐蚀	轻微
6J20	LTNR	A	桥丝有点腐蚀,脚线被腐蚀	轻微
$\text{PtW}_{8.5}$	LTNR+硝化棉	A	桥丝光泽,脚线被腐蚀	非常轻微
$\text{PtW}_{8.5}$	LTNR	A	桥丝光泽,脚线被腐蚀	非常轻微

注: A 环境是指样品在 75℃、相对湿度 95% 下放置 48h

当要求作用时间较小时,应采用强起爆药和强约束,以便在最短时间内完成爆燃转爆轰。因此,起爆药通常采用羧甲基纤维素氮化铅;输出炸药常选太安、黑索今,当要求输出较大时,可选威力更大的奥克托今。在装药方式中,为达到强约束,先将电极塞、起爆药和少量输出药装入一加强帽(由铝带冲制而成)内,组成带电桥塞的装药加强帽,然后再将装药加强帽装入已压有较多数量的输出装药的白铜管壳内,最后收口。这样,在发火条件为 $33\mu\text{F}$ 、18V 或 $28\mu\text{F}$ 、28V 下,作用时间将介于 $3.0\mu\text{s}\sim 7.0\mu\text{s}$ 之间。

在使用过程中,有时产品会出现脚线抗拉力小、脚线下陷造成个别产品断桥的问题,这在国外许多产品中,已经将脚线采用打弯结构封装于电极塞中予以解决,从而使脚线抗拉力大大提高。次钝感电雷管典型结构如图 5.2 所示。

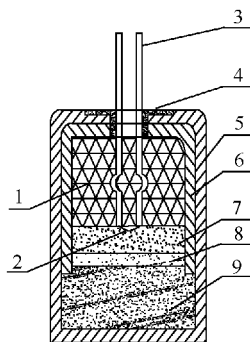


图 5.2 次钝感电雷管结构

1—电极塞;2—桥丝;3—脚线;4—密封胶;5—外壳;

6—加强帽;7—起爆药;8—输出装药 1;9—输出装药 2。

2. 防静电技术^[8]

早期电雷管的电极塞常用酚醛塑料压制而成,防静电结构采用在雷管的脚—壳间涂银粉导电胶的方法,使脚—壳抗静电能力达到 20kV。由于涂银粉导电胶的阻值散布范围大且不稳定,工

艺也较为繁琐,不便于大批量生产,以及还存在银粉导电胶使用几年后普遍变质的情况,所以后来普遍采用碳化硅防静电电极塞,使脚—壳抗静电能力达到 25kV。

碳化硅可以做成导电胶、压敏电阻、电极塞等,完成防静电功能。碳化硅防静电电极塞是由碳化硅粒子与酚醛塑料粒子混合,均匀压模成型而成。碳化硅和酚醛塑料的比例不同,其电极塞伏—安特性的稳定性和防静电性能也不同,试验结果见表 5.10 所列。

表 5.10 不同碳化硅含量电极塞的防静电性能

SiC 含量/%	电流 1.0mA 时, U_1/V	电流 0.1mA 时, U_2/V	偏离欧姆定律系数 α	静电试验电压/kV			
				27	20	10	5
30	4~1000 以上	10~1000 以上	2.8	✓	2/20	0/31	0/31
35	6~1000 以上	20~1000 以上	3.3	✓	2/20	0/18	0/18
40	9~300	26~500	3.5	✓	✓	✓	✓
50	30~250	47~380	5.8	✓	✓	✓	✓
注:✓表示通过							

表 5.10 表明,由碳化硅含量超过 40%的电极塞制成的雷管的脚—壳可承受 27、20、10、5(kV)连续 4 次静电电压的冲击;但当碳化硅含量超过 55%时,混合料的热流动性差,成型较困难,压出的塞子强度也较低。综上所述,确定碳化硅含量为 45%~55%,酚醛塑料比例为 55%~45%。

碳化硅粒度对电极塞伏—安特性的稳定性和防静电性能也有一定的影响,粒度不同性能有所变化,碳化硅含量为 50%时不同粒度的碳化硅电极塞的伏—安特性见表 5.11 所列。

表 5.11 不同粒度的碳化硅电极塞的伏—安特性

SiC 粒度/mm	电流 1.0mA 时, U_1/V	电流 0.1mA 时, U_2/V	偏离欧姆定律系数 α
0.093~0.110	65~170	110~280	4.33
0.076~0.093	60~370	105~440	4.78

≤ 0.076	30~250	47~380	5.8
--------------	--------	--------	-----

试验结果表明,随着碳化硅粒度减小,其电极塞的伏—安特性逐渐增大,其原因是电极塞的伏—安特性取决于无数颗碳化硅晶粒的串并联接触,粒度越小,接触就越紧密。另外,粒度越粗,成型后的电极塞端面越不易磨平,因此,碳化硅粒度应小于 0.076mm。

成型后的电极塞脚线短路时,对壳通 0.1mA 电流时,电压应大于 30V,伏—安特性系数应大于 3。

5.3.2 延期电雷管设计^[9]

依靠引信触发产生电能发火并延期爆炸的元件称为延期电雷管。延期电雷管是为配用引信延滞起爆弹丸达到最佳做功效果而设计的。按照不同弹丸需要的延期作用时间而需配用不同的延期电雷管。

1. 基本结构

目前,电雷管的延期方法主要有电子延时和药剂延时两种。电子延时技术比较先进,延期时间精度高,但需要设计专门的微型电子延时线路,费时费钱,另外,还需要研究雷管内部的封装与接口问题。所以,实际引信用延期电雷管仍采用药剂延时方法,它一般由电发火件、延期药、起爆药、猛炸药组成。

延期电雷管外形尺寸较大,直径一般在 5mm 以上,其长度依延期时间而定。如果发火件尺寸能降低,其对应的雷管外形尺寸还能更小些,例如美国研制的 $\phi 2.5\text{mm} \times 8\text{mm}$ PA506 延期电雷管。一般来说,靠药剂延期的电雷管的延期精度约为 20%~30%。

2. 桥丝与药剂选择

典型延期电雷管的技术指标为:外形尺寸为 $\phi 5.1\text{mm} \times 10.0\text{mm}$,电阻介于 $3.0\Omega \sim 7.0\Omega$ 之间,发火条件为 $28\mu\text{F}$ 、28V,脚—壳间满足防静电要求,安全电流为 100mA。而延期时间有 4.0ms~7.0ms、8.0ms~15.0ms 等系列。

常用于延期电雷管的毫秒级延期药主要有:单体延期药羧甲基纤维素三硝基间苯二酚钡(CMC—Ba—TNR)、三硝基间苯二酚铅(LTNR)与三硝基间苯二酚钡共晶(简称铅钡共晶)以及硅—铅丹混合延期药,其延期时间见表 5.12 所列。

表 5.12 部分毫秒级延期药的延期时间

药剂及配比	装药量或装药高度	延期时间/ms
CMC—Ba—TNR	30mg~130mg	1.71~4.08
铅钡共晶(20/80)	180mg~200mg	0.95~1.87
Pb ₃ O ₄ —Si(60/20)	2mm	12.9±4.0
Pb ₃ O ₄ —Si(70/10)	2mm	29.4±4.0
Pb ₃ O ₄ —Si(55/20)	2mm	45.1±5.0
Pb ₃ O ₄ —Si(55/30)	2mm	75.4±6.0

以延期时间 4.0ms~7.0ms 为例来说明装药设计过程。

首先确定输出药为太安或其他猛炸药。

其次,选择起爆药为羧甲基纤维素氮化铅,其原因是该起爆药具有起爆感度低、爆轰成长期短、热分解性能和装药流散性好等特点,其抗静电能力也优于同类起爆药,实验表明使产品达到稳定爆轰的起爆药量要大于 66.5mg。

最后,选择延期药配方和药量。从表 5.12 可看出,单体延期药 CMC—Ba—TNR 和铅钡共晶延期药由于延期时间短而不能满足要求。硅铅丹混合延期药已成为许多军民用产品的一种毫秒级延期药,当铅丹含量高时,延期时间将减小。为满足延期时间 4.0ms~7.0ms 的要求,初始用 $\phi 10\mu\text{m}$ 桥丝对 Pb₃O₄—Si(80/20) 进行发火实验,但出现了部分瞎火、部分作用时间为 8ms~10ms 的结果。可见,由于延期药比起爆药钝感,用 $\phi 10\mu\text{m}$ 桥丝直接点燃延期药较为困难。为提高起爆可靠性,可采用以下两种方法:一是使用涂敏感点药头,但这种方法的延期时间散布大、精度差;二是通过增大桥丝直径来增加发火能量,这种方法的延期时间散布小、精度高。用 $\phi 16\mu\text{m}$ 的桥丝直接点燃 50mg 不同配比的

Pb_3O_4 —Si的结果见表 5.13 所列。

从表 5.13 可以看出, Pb_3O_4 —Si 的比例为 80 : 20 时,产品延期时间稳定。另外也说明,不同配比的 Pb_3O_4 —Si 的发火感度差异较大。 Pb_3O_4 含量较低时,发火感度较低,但当氧化剂 Pb_3O_4 含量过高时,延期时间不但未能减小,反而有增大趋势。

表 5.13 不同配比的 Pb_3O_4 —Si 药剂的延期时间

$\text{Pb}_3\text{O}_4/\text{Si}/\%$	发火/实验数	\bar{t}/ms	t_{\max}/ms	t_{\min}/ms	σ/ms
60/40	1/5	13.0			
80/20	15/15	7.38	8.06	7.00	0.30
85/15	4/4	9.80	10.80	8.00	0.65

延期电雷管作用时间由三部分组成:第一,桥丝加热到延期药发火的时间;第二,延期药本身的延期时间;第三,延期药点燃起爆药的时间。当氧化剂 Pb_3O_4 含量过高时,虽然桥丝加热到延期药发火的时间和延期药本身的延期时间都较短,但由于参与反应的可燃剂硅含量太小,导致 Pb_3O_4 —Si 反应过程所释放热量较少,所以延期药点燃起爆药的时间大大延长且不稳定,其结果是总的延期时间和偏差都增大。因此,这种火工品结构的延期药配方的选取必须兼顾发火感和反应放热两方面。

延期药配比确定后,延期药药量和桥丝直径对延期时间有一定的调整作用。在使用桥径为 $14\mu\text{m}$ 的 PtW 桥丝时, Pb_3O_4 —Si (80/20)延期药不同药量的延期作用时间见表 5.14 所列。从表 5.14 中可以看出,药量为 35mg~45mg 范围都能满足延期指标要求。使用 $\bar{t} \pm 3\sigma$ 确定时间范围是可靠性设计的重要方法,能可靠控制产品的最终性能。药量为 35mg 和 40mg 时, $\bar{t} \pm 3\sigma$ 都在指标要求范围内。在满足要求条件下,应选择延期时间接近指标中值的药量。延期药的参考压药压力为 60MPa。

表 5.14 不同药量的延期作用时间

药量/mg	\bar{t}/ms	t_{\max}/ms	t_{\min}/ms	σ/ms	$(\bar{t}+3\sigma)/\text{ms}$	$(\bar{t}-3\sigma)/\text{ms}$
-------	---------------------	----------------------	----------------------	--------------------	-------------------------------	-------------------------------

50	6.90	7.12	6.61	0.156		
45	6.33	6.68	5.94	0.26	7.11	5.55
40	5.57	5.81	5.09	0.18	6.11	5.03
35	5.78	6.20	5.20	0.38	6.92	4.64

3. 装配结构及工艺

延期电雷管的装药工艺是：在一定尺寸的管壳中，依次装入猛炸药、起爆药、延期药、电发火件，并收口固定发火件。但为达到强约束，以在最短时间内完成延期药点燃起爆药和起爆药完成爆燃转爆轰，一般先将电极塞、延期药、起爆药和少量输出药装入一加强帽内，组成带有电桥塞的装药加强帽，然后再将装药加强帽装入已压有较多数量输出装药的白铜管壳内，最后收口。为提高防静电功能，有时在壳体内壁加绝缘套或用防静电电极塞，均可达到防静电目的。如果发火能量较小，且增加桥丝直径仍不能可靠发火时，可考虑借鉴针刺延期雷管的装药结构，即起爆药—衰减片—延期药—起爆药—输出药方式，提高发火可靠性。

5.3.3 钝感电雷管设计^[10,11]

导弹武器具有威力大、精度高、射程变化范围大等优点，但其储存和使用条件通常是极其严酷的，特别是舰用导弹的自然环境和电磁环境更为恶劣，因此，对火工品的要求也较为严格。在战略导弹和部分战术导弹引信中，使用钝感电雷管已成为基本要求。钝感电雷管的主要特征有：尺寸大、发火能量大、抗静电、抗射频、作用时间短。美国对地空导弹用 MK101 电雷管进行了钝感化技术改造，改造后的电雷管就是钝感电雷管的典型代表。

1. 钝感电雷管要求

最初的 MK101 电雷管不具备 1A1W5min 的防射频水平及作用时间不大于 $100\mu\text{s}$ 的要求。所以，MK101 电雷管钝感化技术改造主要是围绕这两点进行。典型钝感电雷管的主要技术指标为：尺寸为 $\phi 7.0\text{mm} \times 12.8\text{mm}$ ；电阻为 $1.0\Omega \sim 1.5\Omega$ ；发火能量为

100 μ F、50V；绝缘电阻为脚—壳间 50M Ω （500V）；静电感度为脚—壳间 25kV；作用时间为小于 100 μ s；安全性为 1A1W5min 不发火。

1A1W5min 不发火实际上是指电火工品的输入性能，即在给电火工品输入不小于 1A 的直流电流时，电火工品本身能耗损 1W 的功率，并在 5min 内不会发火。在确定电火工品是否满足 1A1W5min 不发火性能时，主要依据电火工品本身的桥路电阻。当桥路电阻大于等于 1 Ω 时，不发火电流应大于等于 1A；当桥路电阻小于 1 Ω 时，不发火电流要按耗数 1W 功率值计算。如电火工品桥路电阻为 0.13 Ω 时，若要满足 1A1W5min 不发火要求，则必须输入 5min 不发火的电流为

$$I = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{1}{0.13}} = 2.77 \text{ A}$$

也就是说，该电火工品要能经受 5min2.77A 直流电流时，才能认为其满足 1A1W5min 不发火要求。

2. 提高压药压力，降低作用时间

增大起爆药压药压力有助于电容放电发火时作用时间的减小（与直流发火时的情况相反），最初的始发装药为糊精氮化铅，在压药压力很大时将会出现压死现象。因此，首先用 RD1333 氮化铅（CMC—Pb(N₃)₂）取代糊精氮化铅，并将压药压力加大到 70.3MPa，其爆轰成长期比糊精氮化铅短很多。作用时间随 RD1333 氮化铅压药压力变化的情况见表 5.15 所列。从表 5.15 中可看出，作用时间随 RD1333 氮化铅压药压力增大而减小。

表 5.15 作用时间随氮化铅压药压力变化

起爆药及压药压力	作用时间/ μ s					
	1	2	3	4	5	6
糊精氮化铅、68.5MPa	112	98	120	92	103	105
RD1333 氮化铅、68.5MPa	79	86	89	80	80	83
RD1333 氮化铅、137MPa	73	72	74	88	86	79
RD1333 氮化铅、205.5MPa	75	67	81	68	62	71

RD1333 氮化铅、274MPa	66	56	63	63	74	65
-------------------	----	----	----	----	----	----

3. 使用桥带提高防射频、防静电性能

为提高 MK101 电雷管的防射频性能,在钝感化改造中,使用了光刻的带状电桥,如图 5.3 所示。起爆药只装在桥带的中部,桥带周围的锯齿形与壳体之间构成多个静电泄放通道。同时,由于桥带的表面积比常规桥丝大得多,所以桥带具有很好的散热性能。桥带既能耗散射频电流又能通过其锯齿形状向周边泄放静电,于是桥带就成为防射频、防静电电雷管的主要元件。桥带材料通常采用 6J20 镍铬合金箔,厚度为 $0.014\text{mm}\sim 0.020\text{mm}$,比集成电路薄膜厚得多,按一般的腐蚀方法是难以得到完整的桥带图形的。通过采用一整套匀胶、前烘、曝光、显形、清洗、坚膜、腐蚀、去膜等工艺,生产的桥带图形清晰完整,桥带上无任何被腐蚀痕迹,桥带电阻值稳定。改造后的 MK101 电雷管结构图如图 5.4 所示。电极塞采用柯伐合金—玻璃塞,电极塞装入如图 5.5 所示的铝加强装药帽中,在桥带与加强帽内壁间用绝缘垫圈绝缘。起爆药使用

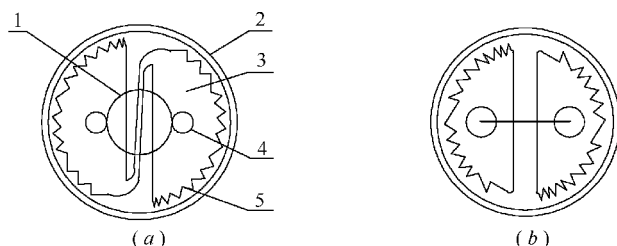


图 5.3 桥带形状

(a)MK101 型电雷管的桥带;(b)经改进的桥带。

1—炸药位置;2—可伐合金套管;3—镍铬合金桥带;4—焊端;5—玻璃。

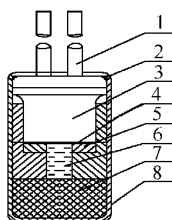


图 5.4 改造后的 MK101 电雷管
结构示意图

1—脚线；2—密封胶；3—柯伐合金
—玻璃电极塞；4—镍铬合金桥带；
5—绝缘垫圈；6—RD1333 氮化铅；
7—输出装药；8—金属壳体。

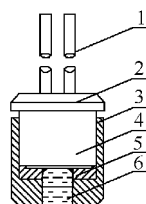


图 5.5 铝加强装药帽示意图

1—脚线；2—柯伐合金—玻璃电极塞；
3—加强帽；4—桥带；
5—绝缘垫圈；6—RD1333 氮化铅。

44mg 的 RD1333 氮化铅，其压药压力为 70.3MPa；输出装药使用 170mg 的太安，压药压力为 70.3MPa。柯伐合金—玻璃电极塞与桥丝装配图如图 5.6 所示。

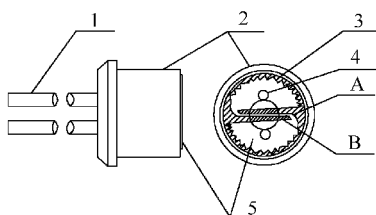


图 5.6 柯伐合金—玻璃电极塞与桥丝装配示意图

1—柯伐合金脚线；2—柯伐合金环；3—玻璃；4—焊点。

这种密封电雷管经过以上两个改进后就完全达到了钝感电雷管的全部要求。这种方法已成为改造敏感电雷管的有效手段。

5.4 桥丝式电点火管(器)设计

5.4.1 桥丝式电点火管设计

电点火管(有时也称发火管)通常是一种电激发的小尺寸的、

形状规则的简单点火元件,作用时产生火焰和气体,主要用于引信内推开保险销,起解除保险作用或在传爆序列中作为首发元件引爆其他火工品,以及用于对脉冲发动机点火。引信用电点火管的特点是小尺寸、低输入能、敏感型,外形是圆柱形。其结构有两类:一是电点火头外套一非金属壳,主要靠其输出火焰,引爆针刺雷管、延期管、火焰雷管等,在传爆序列中多作为首发元件使用。二是结构与电雷管相似,但装填点火药、发火药等低级炸药。位于引信内部时,靠其输出气体推开保险销,起解除保险作用;位于脉冲发动机时,起点火作用的电点火管外形是圆柱形,其结构是钝感电点火头外套一非金属可燃壳,并装填点火药、发火药,其主要特点是高输入能、钝感化,类似于钝感电点火器。

1. 引信用半密封式电点火管设计

半密封式电点火管是最简单的电点火管,其结构是由一电点火头外套一非金属壳组成(见图 5.7),主要靠其输出火焰引爆针刺雷管、延期管、火焰雷管等。

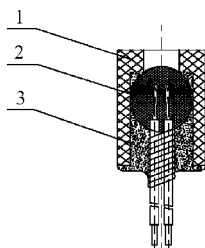


图 5.7 半密封式电点火管结构

1—塑料管壳;2—点火药头;3—填料。

典型技术参数为:尺寸为 $\phi 4.2\text{mm} \times 7\text{mm}$;电阻为 $7.0\Omega \sim 12.0\Omega$;发火条件为 $150\text{mA} \sim 500\text{mA}$ 或 8.5V 直流电压;安全电流为 50mA ;作用时间小于或等于 $400\mu\text{s}$ 。

设计时,一般采用酚醛或增强模塑料做电点火头的外套管壳材料,桥丝选用桥径为 $9\mu\text{m}$ 的 6J20 镍铬丝,点火药头常用 LTNR 药剂。在严格控制温湿度等工况环境下,蘸药头时,LTNR 一般配用乙酸乙脂粘合剂,但在一般工况环境下,为防止药头出现裂

纹,最好采用乙酸丁脂作为粘合剂。这种半密封的电点火管可经受模拟 15 年的高温高湿加速寿命试验。

当用半密封型电点火管引燃针刺雷管时,通常在点火管输出端增加一金属箔片(铝、铜等),点火药反应后的热气体和压力将会使金属箔片熔化成许多金属质点,这些热金属质点与热气体一起能有效地击穿针刺雷管盖片,从而可靠引燃针刺药。

2. 引信用密封式点火管设计

密封式电点火管是一种将点火药(或弱起爆药)压到桥丝上的电点火管,其结构是由电桥丝、点火药(弱起爆药)组成,外壳采用金属壳(见图 5.8),靠其输出气体推开保险销,在引信内起远距离解除保险作用。

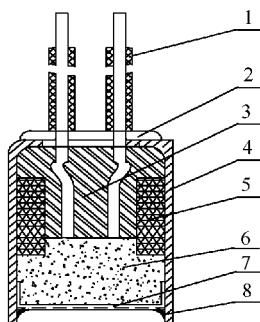


图 5.8 密封式点火管结构

1—脚线;2—导电漆;3—发火件;4—管壳;

5—绝缘套管;6—点火药;7—底帽;8—防潮漆。

典型技术参数为:尺寸为 $\phi 2.92\text{mm} \times 4.4\text{mm}$;电阻为 $5.0\Omega \sim 8.0\Omega$;发火条件为 500mA ;安全电流为 50mA ;绝缘电阻为脚—壳间施加 100V 时绝缘电阻不小于 $200\text{M}\Omega$;静电感度为脚—壳间施加 25kV 时电点火管不发火;作用时间小于或等于 $250\mu\text{s}$ 。

设计时,管壳材料一般采用金属材料,桥丝选用桥径 $\phi 0.012\text{mm}$ 的 6J20 镍铬丝,装药采用斯蒂芬酸铅。防静电结构采用在脚壳间涂导电胶和桥壳之间加塑料套绝缘的方法。这种密封

的电点火管可经受模拟 20 年的高温高湿加速寿命试验。

3. 可燃壳体钝感电点火管设计^[12,13]

脉冲发动机是固体火箭发动机技术发展的新一代结构形式,它是在一个分隔的燃烧室内串联多个药柱,每次通过点燃一个药柱,提供间断的推力,以改变火箭或导弹的速度特性,提高其射程和命中精度。其基本特点是各脉冲段的燃气流均从同一喷管流出,即各脉冲发动机共用一个喷管,第一脉冲发动机工作后的腔体即为第二脉冲发动机工作时的燃气通道,依此类推。这种结构的发动机比单室双推力发动机的射程高 10%~15%。由于它的特殊性,为保证各脉冲发动机有稳定的内弹道性能,要求各脉冲段的点火装置应完全可燃,从而导致了可燃壳体钝感电点火管的出现。

可燃壳体钝感电点火管由钝感电点火头、可燃壳体、扩燃药、密封片等组成(见图 5.9)。壳体材料是由一种经有机溶剂溶塑的含能材料压制而成。钝感电点火头是可燃壳体钝感电点火管设计的关键。钝感电点火头的钝感性主要通过桥路设计和使用优良的钝感药剂来实现。

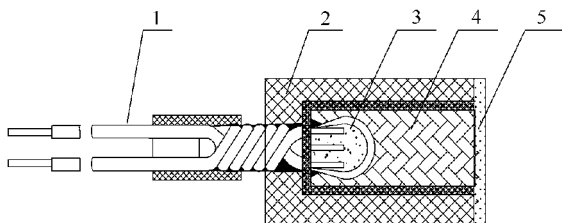


图 5.9 可燃壳体钝感电点火管结构

1—脚线;2—可燃壳体;3—电点火头;4—引燃药;5—密封片。

1) 脚线材料选择与桥路结构设计

典型产品的主要技术指标为:电阻为 0.7Ω ;发火电流为 5A;静电感度为脚—壳间 25kV;安全性为 1A1W5min 不发火;作用时间小于或等于 40ms。由于点火头中桥丝所发出的热量一部分传给药剂,另一部分传给脚线,所以为保证安全性,在选择理想的钝感药剂同时,首先应选择导热性好的材料做脚线,这有利于桥丝所

产生的热量尽快散失,满足在安全电流下不发火的要求。几种脚线材料的导热率和电阻率及安全性试验发火率见表 5.16 所列。

表 5.16 几种脚线材料的导热率和
电阻率及安全性试验发火率

	导热率 $J/(s \cdot cm \cdot ^\circ C)$ ($Cal/(s \cdot cm \cdot ^\circ C)$)	电阻率($\times 10^4$) / $\Omega \cdot cm$	桥路电阻/ Ω	1A5min 发火率	备 注
铜	3809(910)	0.018	0.3~0.4	0/10	
铁	628(150)	0.100	0.3~0.4	4/9	药头根部胀裂
铝	2093(500)	0.029			

从表中可以看出,铜材料的导热性最好,电阻率最小,从导热角度来说选择它做脚线较为理想。从安全性试验结果看,由于铜线的电阻率比铁镍线小,而导热率又比铁镍线大,在同样的桥路电阻和电流下,使用铁镍线时,药头根部的温度较高,容易发生胀裂,因此,选用铜制导线作为脚线材料。

从 5A 发火、1A1W5min 不发火及抗静电等技术指标综合考虑,电点火头桥丝选用直径 $80\mu m$ 的 6J20 镍铬丝。当桥丝电阻为 1.0Ω 时,桥长约为 $4.8mm$ 。从蘸制药头的工艺看,这样长的桥距给点火头的制作带来很大困难。另外,桥距越大会导致桥丝中点的温度越高,这将愈不利于 1A1W5min 不发火的安全性要求。所以,从导热性需要和蘸制药头工艺上的可行性考虑,在桥丝中点需增加焊接用一根与脚线材料相同的导热支撑线(见图 5.10)。

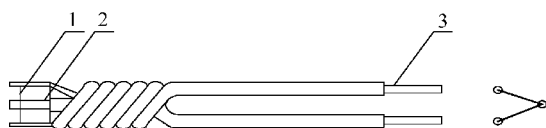


图 5.10 桥路结构

1—桥丝;2—导热支撑线;3—脚线。

这种特殊的桥路结构有利于蘸制药头,使电点火头药剂与桥丝的结合比较牢固,有利于提高产品的可靠性和安全性。

2) 钝感药剂及蘸药工艺

使电火工品钝感化的途径很多,但采用钝感药剂最为简便,尤其对发火能量大、作用时间长的火工品而言,更是如此。钝感点火药的发火点一般也较高,而发火点高低主要取决于可燃剂的发火点大小,除此之外,选择钝感点火药时还需考虑其静电感度。由镁粉、碲粉、二氧化碲组成的钝感点火药与常用点火药 $\text{Pb}(\text{SCN})_2/\text{KClO}_4$ 的性能见表 5.17 所列。

从表 5.17 中可以看出, Mg/TeO_2 点火药的冲击感度、热丝感度和火焰感度均比常用点火药 $\text{Pb}(\text{SCN})_2/\text{KClO}_3$ 低得多。

钝感电点火头采用蘸药工艺进行制作。为保证电点火头中药剂与桥丝的紧密接触,避免桥丝与药剂间的松动或脱接而影响发火的可靠性,通常在蘸制点火头外面再涂一层聚氨脂胶膜,以增加药头的强度和绝缘性,使发火可靠性得以提高。

表 5.17 点火药爆炸性能^[14]

药 剂	火焰感度 高度/cm	热丝感度 电流/A	冲击感度		爆发 点/℃	静电积累 /V(铝槽)
			落高/cm	爆率/%		
Mg/TeO_2	7.5	2.2	50	12	>400	910
$\text{Pb}(\text{SCN})_2/\text{KClO}_3$	39.8	0.55	7.7	50		

装这种钝感电点火头的发火管性能稳定,满足 1A1W5min 不发火及抗静电的钝感要求,其输出能量高,可直接点燃镁/聚四氟乙烯等高能点火药。由于壳体完全可燃,除可用于脉冲发动机点火系统外,还可用于其他发动机及火炮的电点火系统。

5.4.2 次钝感电点火器设计^[15,16]

电点火器有时也概括地称为电起爆器或电点火具,多用于飞行器飞行过程中续航发动机、燃气发生器等系统的点火。基本组成结构是使用电桥丝直接点燃点火药或通过起爆药点燃点火药,其特点是:电流发火,输入能量和尺寸均较大,形状较规则。电点火器最基本的电性能要求是必须具有防静电能力,同时具有一定的抗射频能力。根据其射频敏感程度,一般可分为次钝感型和钝

感型两类。

用于导弹加速发动机点火电点火器通常对弹道功能要求极为严格,不仅要求峰值压力精度,而且还要求弹道功能各段压力所对应的时间精度。这类点火器设计的技术关键是弹道功能的稳定性。某型号电点火器是这类点火器的典型代表,其主要技术指标是:外形尺寸为 $\phi 20\text{mm} \times 20\text{mm}$, 螺纹式安装;电阻为单桥 0.3Ω , 双桥 0.16Ω , 属双桥并联;发火电流为单桥 3A , 双桥 10A ;安全电流为 1A ;绝缘电阻大于或等于 $10\text{M}\Omega(500\text{V})$;静电感度为脚—壳间施加 25kV 时,电点火器不发火;作用时间为从通电到压力上升时间 $t_1 \leq 6\text{ms}$; 输出压力为在 10cm^2 容腔内峰值压力 P_m 为 23MPa , 压力到 14MPa 的时间 $t_2 < 12\text{ms}$; 压力从峰值压力 10% 上升到 90% 时的时间 t_3 介于 $3\text{ms} \sim 20\text{ms}$ 内(见图 5.11)。

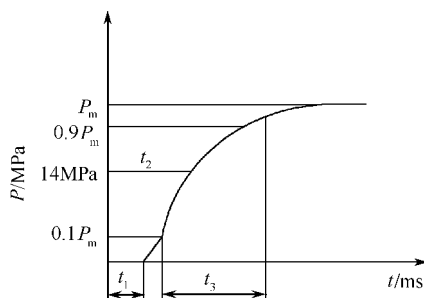


图 5.11 点火器弹道曲线

1. 设计方法

由于该类电点火器输出参数较多,为达到最终性能,首先需从设计上了解各个重要参数的期望控制值和设计裕度,将技术指标转化为设计中的控制指标,从而保证产品质量和可靠度在设计阶段就处于受控状态;最后通过设计参数控制指标对方案的筛选实现最佳性能。

1) 50%发火电流控制值

该类电点火器技术指标中,要求单桥安全电流大于 1A , 而单桥发火电流小于 3A 。当发火电流中值 I_0 为 2.0A 时,假设标准偏差

$\sigma < 0.12\text{A}$, 则可靠度为 0.99 时, 50% 发火电流期望控制值 $I_{50} = I_0 \pm 2.326\sigma$, 由此可推算出期望的控制值范围应在 $1.7\text{A} \sim 2.3\text{A}$ 内。

2) t_1 控制值

技术指标要求从该密闭容腔内通电到压力上升的一段时间 $t_1 \leq 6\text{ms}$, 根据 GB6378—86“不合格品率的计量抽查检查程序及图表”的“S”法, 采用加严检查抽样方案, 当 AQL 为 0.15% 时, k 值为 2.42, 容许上限 t_1 为 6ms, 预估标准偏差 σ 为 0.8ms, 则作用时间期望的控制值 $t_1^1 = t_1 - 2.42S = 4.0\text{ms}$ 。即该点火器的 t_1 均值应小于 4.0ms。

3) t_2 控制值

当 AQL 为 0.4% 时, k 值为 2.00, 容许上限 t_2 为 12.0ms, 预估标准偏差 σ 为 2.2ms, 则期望控制值 $t_2^1 = 12.0 - 2 \times 2.2 = 7.6\text{ms}$ 。即 t_2 期望的控制值应小于 7.6ms。

4) t_3 控制值

当 AQL 为 0.4% 时, k 值为 2.00, 容许上限为 20ms, 容许下限为 3ms, 当标准偏差 σ 为 3.0ms 时, 则 t_3 期望控制值应在 9ms~14ms。考虑到串联试验的影响, 将 t_3 期望值控制在 7ms~12ms 内。

2. 结构设计

这类电点火器一般为双桥结构, 通常由壳体、电极塞、桥丝、绝缘环、橡胶挡片、盖片、引线、连接管、套管等零件组成, 内装始发药、中间药和输出药。壳体材料一般选用不锈钢 (1Cr18Ni9 合金)。根据不发火电流和发火电流、电阻等技术指标, 桥丝选用桥径为 $90\mu\text{m}$ 的 6J20 镍铬丝。考虑到绝缘电阻、介电强度、气密性等性能指标要求, 选用柯伐合金—玻璃封接电极塞。电极塞设计有静电保护击穿通道, 保护通道击穿电压不大于 2kV, 且危险通道与保护通道击穿电压之比大于 6。另外, 在产品的危险处设置了绝缘环, 以提高其绝缘能力。这两种措施能确保产品静电安全。

引线可选用电性能、机械性能和可焊性能均良好的 FQ 型

19mm×0.12mm 的镀银铜导线,绝缘层为聚四氟乙烯。电极塞脚线与引线之间用连接管锡焊转接。转接处用热塑管保护,以加强其机械强度和绝缘性能。

3. 药剂及装药工艺选择

药剂选择、药剂间相互关系和装药密度是该类电点火器满足弹道功能要求的关键技术。

1) 药剂选择

选择始发药的原则是既要满足不发火电流、发火电流和作用时间的要求,还应考虑点燃下一级药剂的能力和对弹道功能的影响。几种始发药 50%发火电流及对弹道功能的影响见表 5.18 所列。

表 5.18 始发药的 50%发火电流和各药剂组合的弹道功能

始发药	中间药	输出药	I_{50}/mA	t_1/ms	t_2/ms	t_3/ms	
3 号点火药	黑火药	黑火药	1.43		2.9	4.2	4 发 $t_3 < 4\text{ms}$
斯蒂芬酸钡	黑火药	黑火药	2.05	3.1	10.3	6.3	2 发 $t_1 > 6\text{ms}$
斯蒂芬酸铅	黑火药	黑火药	1.55				
7 号点火药	黑火药	黑火药	1.78		10.5	12.5	
7 号点火药	黑火药	HR-1	1.78	4.2	10.9	10.3	2 发 $t_2 > 12\text{ms}$
7 号点火药	DBK-1	HR-1	1.78	3.0	7.5	8.4	
注:①7 号点火药主要成分为斯蒂芬酸铅和斯蒂芬酸钡,3 号点火药主要成分为硫磺、酸铅、铬酸铅、氯酸钾等;②HR-1 为缓燃黑火药,DBK-1 为 B/KNO_3 点火药							

始发药的选择主要以 50%发火电流和 t_1 值是否超出控制值为判定标准。从表 5.18 中可看出,当始发药为 3 号点火药和斯蒂芬酸铅时,50%发火电流偏低,较为敏感,由于燃速快、点火能力强、不符合要求;而始发药为斯蒂芬酸钡时,虽然 50%发火电流适当,但点火能力弱, t_1 值明显偏长, t_1 值有 2 发超过指标,不符合要求;而 7 号点火药 50%发火电流和 t_1 值均在期望的控制范围内,故选用 7 号点火药作始发药。

中间药起承上启下的作用,首先应有适中的感度,能被始发药

可靠点燃;其次要有适中的威力,能可靠引燃输出药;最后要有适中的燃烧成长期和燃速。中间药的选择主要以 t_2 值是否超出控制值为依据。始发药为 7 号点火药、输出药为缓燃黑火药 HR-1 时,用黑火药做中间药时, t_2 均值超出控制值,且有 2 发大于 12ms,所以用 DBK-1(B/KNO₃)做中间药较为理想。

输出药选择的原则是:一要有适中的产气量,使其在规定的容积内燃烧所产生的气体压力峰值在所要求的范围内,且应稳定;二是应有适中的燃烧成长期和燃速,与中间药相匹配。分析技术指标可知:在 0MPa~14MPa 范围内压力上升速率较快,以满足小于 12ms 的要求,而在 14.0MPa~21MPa 范围内压力上升速率较缓慢,以满足 t_3 期望控制值。黑火药的特点是:当密度较小时,由于装药内部空隙较多,燃烧时火焰容易钻入空隙内燃烧,此时生成的气体不易排出,空隙内压力很快增大,致使装药破碎,燃烧面积进一步扩大,导致燃烧规律遭到破坏,弹道功能不稳定。但当黑火药密度达到 1.9g/cm³ 时,由于装药内部空隙较少,其燃速几乎不变,在此密度下,在较大的压力范围内药剂也能有规律地逐层燃烧。为增大 t_3 值,故选用缓燃黑火药(HR-1)。

2)装药工艺

为符合弹道功能技术指标要求,在选择药剂的同时还应考虑各装药量的匹配和各药剂装药密度的影响,试验结果见表 5.19 所列。

表 5.19 药剂装药量及压药压力对弹道功能的影响

试 验	始发药		中间药		输出药		弹道功能		
	药量 /mg	压力 /MPa	药量 /mg	压力 /MPa	药量 /mg	压力 /MPa	P_m /MPa	t_2 /ms	t_3 /ms
始发药中间 药药量影响	100	29.4	150	49	500	215	26.9	8.0	9.8
	120	29.4	120	49	500	215	23.0	8.3	8.6

输出药药量 影响	120	29.4	130	49	460	215	19.3		
	120	29.4	130	49	500	215	24.0	4.9	7.8
	120	29.4	130	49	550	215	28.5		
输出药压药 压力影响	120	29.4	130	49	500	179	24.2	4.8	7.0
	120	29.4	130	49	500	215	24.0	4.9	7.8

从表 5.19 中可以看出,始发药或中间药较少时,影响点燃下一级装药的燃烧成长期和燃速,故 t_2 、 t_3 均较长;输出药量对峰值压力有较明显的影响;而输出装药达到一定值时,药剂密度随压力变化较小,压药压力在 179MPa~215MPa 范围内对 t_2 、 t_3 影响不明显。

3)约束状态设计

输出端盖片除应具有化学稳定性和一定的机械强度外,还应考虑到对弹道功能的影响。输出端盖片影响装药的约束状态,盖片强度越大,对装药的约束越大,导致药剂燃速越快,猛度增大。盖片材料对弹道功能的影响见表 5.20 所列。

表 5.20 盖片材料对弹道功能的影响

盖片材料	P_m/MPa	t_2/ms	t_3/ms
无盖片	19.3	6.87	8.73
硝基软片 0.11mm	21.3	5.91	8.30
硝基软片 0.14mm	22.4	6.82	7.66
聚酯膜片 0.6mm	22.3	4.84	7.06

从表 5.20 中可以看出,无盖片时,压力明显偏小,但使用 0.6mm 厚聚酯膜片时, t_2 、 t_3 值均较短。综合各方面考虑,选用 0.11mm 厚硝基软片更合适些。考虑到硝基软片具有吸潮性,当该点火器在装配过程中停留过长或在武器系统中密封不严时,输出端盖片应考虑使用防潮性好的聚酯膜薄片。

5.4.3 耐高温钝感电点火器设计^[17]

战略导弹和宇宙飞行器对电点火器的钝感性、同步时间、耐高

温等性能提出了特殊要求。典型钝感电点火器的主要技术指标为:电阻为 1Ω ;发火电流为 $5A$;静电感度为脚—壳间 $25kV$;安全性为 $1A1W5min$ 不发火;作用时间不大于 $50ms$;耐温 $200^{\circ}C$ 。示意图如图 5.12 所示。

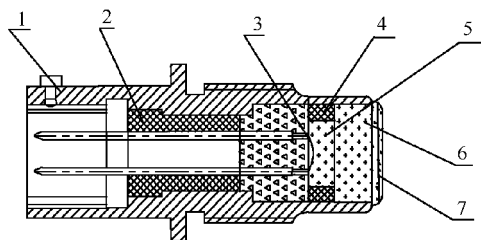


图 5.12 钝感电点火器结构示意图

1—插座;2—泄放衰减塞;3—电桥;4—绝缘环;
5—点火药;6—引燃药;7—盖片。

1. 设计思想

$1A/1W$ 钝感电点火器为单桥式电发火装置。当输入直流电流时,电流通过电桥产生的热量一部分用来加热电桥,同时还用来加热点火装药,此外,还有一部分沿管壳、电极、脚线导出。输入功率小时,电桥的升温热就等于电流产生的热量与因传导而散失的热量之和。为达到 $1A1W5min$ 不发火的要求,可选用热容量大的电桥,以增大电桥升温过程中的热损失,同时选用钝感药剂,降低产品的直流感度。为进一步保证产品的安全性,还应采用静电泄放、射频衰减等措施。

2. 插座、电桥设计

1) 插座设计

按照使用方便、联接迅速可靠、易于替换的原则,电点火器本体设计成插座式。为提高插座的气密性和耐压能力(耐压大于 $20MPa$),两根插针与外壳用玻璃封接为一体。为增大热损失,在插座的玻璃端面上加一个氧化铝瓷片(配比为三氧化二铝粉/618 环氧树脂/四乙烯五胺/邻苯二甲酸二丁脂 = $250/100/13/7$)。氧

化铝瓷片不仅绝缘性能好,而且导热系数比玻璃大 20 倍,有利于电桥上热量的传导,能降低电桥的温升,从而提高产品的安全功率。而在大电流发火时,由于时间短,热损失很小,故不影响发火性能及作用时间。各种电极材料的导热性能见表 5.21 所列。

表 5.21 电极材料的导热性能^[18]

材料	氧化铍	氧化铝 95%	陶瓷	玻璃	酚醛塑料	环氧树脂	聚四氟乙烯
导热率	4862	700	46	20	3~6	4~5	6
电阻率	10^{14}	10^{14}	10^{14}	10^{13}	10^{12}	10^{13}	10^{16}
注:导热率为 $\lambda_0 \times 10^{-4} \times 4.1855 \text{J} (\lambda_0 \times 10^{-4} \text{Cal/cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}) / \text{cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$; 电阻率为 $\Omega \cdot \text{cm}$							

2) 电桥设计

灼热桥式电火工品一般有桥丝式和桥带式两种类型。对于钝感型电点火器,选用带状电桥是有利的。电桥的散热量 Q 可近似表示为

$$Q = \lambda_0 \cdot A_0 \cdot \Delta T \cdot t \quad (5.4.1)$$

式中 A_0 ——电桥表面积,也就是说,在电桥材料相同时,增大电桥的表面积能增大电桥的散热量。

带状电桥的表面积比圆柱状电桥的表面积要大得多,这样单位长度电桥的热散失也就较大。因此,钝感型电点火器常选择带状电桥结构。电桥材料一般选用镍铬合金,原因主要是其特性值较小,可以得到较高的电桥温度,另外,镍铬合金具有温度系数小、比热容大,熔点高及机械强度好等优点,因而选用 6J20 带材作桥带材料。

为保证产品具有 1A1W5min 不发火性能,同时又满足 5A、50ms 全发火的要求,桥带必须具有两种功能,即集热区的点火功能和散热区的散热功能。遇到射频或杂散电流时,可以让热量通过散热区迅速散失,不致引起发火,同时在大电流作用下,又能依靠集热区迅速升温,实现正常发火。

桥路应选用单桥,与双桥相比,单桥在设计和工艺上有如下优

点:第一,单桥比双桥接受外来杂散电流的能量小,因而可以减小杂散电流对电点火器的危害,提高安全性。第二,单桥可以消除双桥间杂散电流引起的相互作用。第三,钝感电点火器的单桥发电电流为 5A,双桥则需要 10A,对电源系统压力较大,单桥可以减少电能消耗,减缓对电源系统的压力。第四,可以简化桥带的制作工艺。由于桥带式点火器的结构与桥丝式不同,桥带底部有紧密贴合的衬垫,上面有药剂压实,桥带材料又与药剂有很好的相容性,因此正常焊接的桥带不会断开,选用单桥不会降低它的可靠性。

桥带外形应与美国 MK101 改型电雷管所用桥带(见图 5.3)基本相似,如设计成如图 5.13 所示的变形 S 形。两边大面积部分为散热区,中间细部分为集热区。变形 S 形能在保证散热部分面积尽可能大的前提下,使桥带中间细

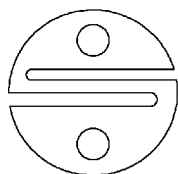


图 5.13 桥带外形

腰部分尽量加长,这样,在保证电阻范围时,中间细腰部分不致太窄,有利于加工制作和保证有足够的强度。另外,桥带取消了作为静电泄放措施的锯齿形周边,给加工、焊接工艺带来了极大的方便,而且可以采用其他的防静电措施予以弥补^[19]。

3) 桥带的制造与焊接

桥带可以用线切割或光刻的方法制得。光学蚀刻的制造过程如下:先把桥带放大图用照相法制成掩模,再用掩模印像法将图形转移到涂有感光抗蚀剂的镍铬合金带材上,然后蚀刻出桥带。这样制出的桥带边缘整齐,尺寸、电阻值稳定,并且可以任意选择形状。桥带的焊接采用贮能焊工艺。

3. 药剂选择

1) 点火药

作为首发装药,确定点火药实质上就是在给定的技术条件下,确定点火药的着火性。要使点火药点燃,则要在药剂上面建立稳定的加热层,这就需要热量 Q ,即

$$Q = \frac{\eta}{\mu} (T_k - T_0) \quad (5.4.2)$$

式中 μ ——药剂燃速；

η ——药剂导热率；

T_k ——药剂强烈分解的起始温度。

显然, Q 大的药剂难以点燃。从发火电流 5A 和作用时间(小于 50ms)来看, 其发火电流大, 瞬发性要求不高, 故增大 Q 有利于满足 1A1W5min 不发火的要求。增大 Q 主要就是增大药剂导热率 η 和药剂强烈分解的起始温度 T_k 。所以, 所用点火药就不能选用起爆药或含有起爆药成分的药剂, 而宜选用由氧化剂和可燃剂混合的药剂。可燃物最好选用金属粉末, 以便使药剂导热率 η 增大, 同时还可加入少量导热不导电材料, 并使用发火点较高的粘合剂。典型配方见表 5.22 所列。

表 5.22 点火药和引燃药(1 号点火药)配方

	Mg/%	TeO ₂ /%	BN (外加)	氟橡胶(外 加)/%	聚四氟乙 烯/%	铬酸钡 /%	硝基纤维 素丙酮溶液
点火药	25~30	70~75	少量	3			
引燃药	50				20	30	造粒

表 5.22 所列点火药导热性能好, 5s 发火点大于 400℃, 静电火花感度低, 火焰强度好, 是一种较理想的钝感点火药。

2) 引燃药

1A1W 钝感电点火器的能量输出要求在 -40℃ 低温下能可靠点燃发动机中的点火药盒, 因此需要一定量的引燃药。黑火药常被用作引燃药, 但是它易于吸潮, 且难以满足耐 200℃ 高温 5min 的要求, 特别是在低压下, 会出现燃烧困难。而由镁粉、聚四氟乙烯、铬酸钡等组分混合, 并经硝基纤维素丙酮溶液造粒而成的 1 号点火药其点燃能力较强, 能在 200℃ 高温下持续 5min 不发火, 且 5s 发火点在 400℃ 以上。

4. 防射频、防静电设计

1)防静电设计

根据该产品所用的插座式结构,采用脚—壳间并联压敏电阻的方法,可起到静电泄放的作用。氧化锌压敏电阻是较理想的静电泄放元件,它是一种非线性半导体材料制成的电阻,以氧化锌为主体,并掺入其他氧化物而组成。氧化锌压敏电阻具有时间响应好(ps级)、漏电流小、承受多次大电流冲击性能稳定及固有电容大等特点。将氧化锌压敏电阻并于钝感电点火器脚—壳之间,当施加静电高压时,压敏电阻以大约50ps的时间快速响应,阻值按指数关系急剧下降,由高阻态变为低阻态,能量几乎全部由压敏电阻泄放掉,从而起到保护作用。典型氧化锌压敏电阻的工作电压为600V,非线性系数大于20。另外,由于氧化锌压敏电阻具有耐大电流冲击、固有电容大等特点,可以对雷击起到一定的防护作用。

2)防射频设计

为达到1A1W5min不发火的防射频要求,已经在电桥结构设计和钝感点火药选择上进行了考虑。当然,还有其他的射频衰减措施,如采用羰基铁粉电极塞或铁氧体电极塞,这两种材料都属于宽频带衰减电极塞,射频能量对它们产生涡流和磁滞,使馈入产品的射频能量在未到达电桥之前,有一部分被消耗掉。其等效电路类似于在电桥两端又并联了一个电阻,使射频电流分流。由于羰基铁粉电极塞绝缘强度太低,会给防静电带来不利,且衰减能力不如铁氧体,故一般常选用铁氧体电极塞。铁氧体电极塞在直流500V电压下冲击5min不击穿,在频率500MHz~1000MHz下,射频衰减量达到15dB以上。不过,这两种电极塞的密封性不如玻璃封接电极塞。

综上所述,插座式耐高温钝感电点火器由于采用了防射频、防静电冗余,使其安全、可靠性大大提高,并能在特高温(200℃)、低温环境下可靠作用,是用于战略导弹和宇宙飞行器的理想的点火器。

5.4.4 其他钝感电点火器设计

1. 高瞬发钝感电点火器设计^[20]

虽然传统的桥带式电点火器能满足 1A1W5min 不发火的安全性要求,但作用时间较长(约 50ms)。对一些特殊用途的电点火器而言,已开始提出高瞬发钝感化的要求。其主要技术指标为:电阻为 1Ω ;发火电流为 5A;静电感度为脚—壳间 25kV;安全性为 1A1W5min 不发火;作用时间小于或等于 $700\mu\text{s}$ 。

显然,这种电点火器的基本结构仍可采用插座式钝感电点火器的结构,桥带外形选择与美国 MK101 改型电雷管所用桥带(见图 5.3)基本相似的锯齿形结构,使之具有防射频、防静电功能。但由于有作用时间高瞬发的要求,显然不可能再使用常用的钝感点火药,因此,这类电点火器的技术关键在于药剂选择及其装药设计。

1) 点火药选择

为缩短发火时间,可采用一些热丝感度敏感的起爆药作为点火药。用电阻为 1Ω 的镍膜桥对几种点火药进行发火时间、最大安全电流及静电安全性试验,其结果见表 5.23 所列。

表 5.23 几种点火药发火时间、最大安全电流及静电安全性

点 火 药	抗静电性能 (500pF、5k Ω 、25kV)	最大安全 电流/A	5A 下的发火 时间/ μs
Pb(CNS) ₂ /KClO ₃ /NC	不发火	1.8	5274
LTNR/BaTNR/NC	不发火	2.0	493
LTNR/硅橡胶	不发火	2.0	1326
LTNR/NC	不发火	2.0	419

从表 5.23 中可知,Pb(CNS)₂/KClO₃/NC 的最大安全电流最小,而发火时间最长;LTNR/NC 发火时间最短。可见,药剂本身的性质对最大安全电流和发火时间起决定作用。

影响最大安全电流的因素是药剂的爆发点或初始反应温度。

$\text{Pb}(\text{CNS})_2/\text{KClO}_3/\text{NC}$ 属烟火剂,初始反应温度低,所以最大安全电流最小。其他 3 种点火药都是以起爆药 LTNR 为主体,爆发点较高,所以最大安全电流相应较大。尽管 $\text{Pb}(\text{CNS})_2/\text{KClO}_3/\text{NC}$ 的初始反应温度较低,但燃速较小,故发火时间较长;而其他 3 种点火药反应速度极快,故发火时间较短。由于硅橡胶作粘合剂时,其本身不参与反应且对 LTNR 有钝感作用,而 NC 作粘合剂时,其本身参与反应(爆发点为 170°C),能增加反应热,有利于缩短发火时间,所以 LTNR/NC 发火时间最短,适用于高瞬发钝感电点火器。

2) 引燃药选择

选用 LTNR/NC 点火药来引燃作为引燃药使用的几种高能点火药。可以采用将 LTNR/NC 点火药 $10\text{mg}\sim 20\text{mg}$ 直接涂在电桥上,再装入 100mg 的引燃药(压药压力为 55MPa),也可以直接装入引燃药。这两种装药结构的发火时间见表 5.24 所列。

表 5.24 不同装药结构的发火时间

引 燃 药		点 火 药		发火电流/A	发火时间
种 类	质量/mg	种类	质量/mg		/ μs
$\text{Pb}[\text{Fe}(\text{CN})_6]/\text{KClO}_3$	100	LTNR/NC	$10\sim 20$	5	214
Mg/聚四氟乙烯	100	LTNR/NC	$10\sim 20$	5	180
B/ KNO_3	100	LTNR/NC	$10\sim 20$	5	236
B/ KNO_3	100			5	15934
Zr/ KClO_3	100			5	860

从表 5.24 中可以看出:当使用 LTNR/NC 点火药时,复合装药结构的发火时间比单一引燃药装药结构的发火时间短得多。LTNR 作为低爆速弱起爆药,有极强的初始点火能量点燃引燃药,使发火时间明显缩短。复合装药结构中,Mg/聚四氟乙烯引燃药的发火时间最短,而 B/ KNO_3 的发火时间最长。由于 Mg/聚四氟乙烯发火点低,再加上镁粉易于气化,气化后能产生二次燃烧,提高了燃速,使其发火时间最短;而 B/ KNO_3 中的氧化剂 KNO_3 在

分解时吸收大量的热,降低了燃烧温度,使燃速降低,所以其发火时间最长。

总之,通过以上点火药和引燃药的合理选择,可以满足钝感电点火器的高瞬发要求。

2. 有熔断时间要求的电点火器设计^[21]

电点火器以其可控性好、适应性强等优点被广泛应用于各种导弹。由于弹上电源电路设计不同,某些导弹要求电点火器通电一定时间内,电桥必须熔断,以避免电点火器完成预定功能后继续消耗弹上电源,造成不必要的浪费,所以有些小型导弹提出了熔断时间小于 60ms 的要求。

这类电点火器的壳体材料为 30CrMnSi,其电桥材料为 6J20,而且脚线 4J29、95% Al_2O_3 陶瓷片及玻璃整体封接在一体。在封接件输出端粘结聚四氟乙烯绝缘环,始发装药采用斯蒂芬酸钡,最后在输出药端面垫一铝箔盖片,翻边收口。用 4A 直流发火时,可靠正常发火,但桥丝未断。为了在要求的时间内熔断桥丝,将始发装药改成作用更快、桥丝感度更高、威力更大的斯蒂芬酸铅,但结果仍然出现了桥丝未断和熔断时间超时的现象。据此分析,可能是输出药端面的铝箔盖片太薄,当点火器通电引发后,产生的高温高压气体会从该铝箔面泄出,使作用于桥丝上的能量减小。因此,在输出药端面增加一个厚度 2mm 的盖帽,并在盖帽内垫一铝箔盖片,这在一定程度上阻止了能量释放,从而使作用于桥丝上的能量大大增加,桥丝在高温高压气体和桥丝通电后产生的作用下迅速熔断,满足了桥丝熔断时间要求。

5.5 武器发射用电火工品设计

导弹及火箭武器发射时,常使用电点火具或电点火管对起飞发动机实施点火,而通用弹药在火炮发射时,常使用电底火点燃发射装药,完成对弹药的速射。因此,这里的武器发射用电火工品主要是指电点火具和电底火两类。

5.5.1 电点火具设计概述^[22]

大口径、大威力火箭武器的发射通常是由电点火具将外界电能转化为热能,通过主装药作功,将化学能转化为系统的动能,从而完成预定的任务。由于起飞用电点火具往往直接暴露于作战环境,且与发动机装药呈直列结构(见图 5.14),因此,其安全性和可靠性直接关系着火箭武器安全性和可靠性。

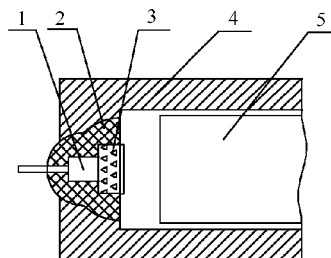


图 5.14 电点火具在武器中的装配结构

1—电点火具;2—发动机喷堵;3—HY-5 黑火药;

4—发动机本体;5—发动机装药。

1. 电点火具基本结构

电点火具一般由装点火药的发火元件、引燃药、高能输出药及壳体组成。发火元件是电点火具感度高低的决定性因素,按使用要求分为钝感发火元件和敏感发火元件。电点火具的输出通常是高温高压气体,其设计考虑的主要是其点燃推进剂的特性。电点火具的主要特点是直流发火、输入能量范围大(从 $0.5\text{A} \sim 5\text{A}$)、尺寸大和形状不规则。

发火元件通常有两种典型结构:电极塞式和电点火头式^[23]。在实际设计中,为提高发火可靠性,往往采用了冗余发火结构。在电极塞式发火元件中,冗余结构是通过双桥四脚实现的(图 5.15);而在电点火头式发火元件中,冗余结构则是通过使用 2 个单桥发火管来实现的(图 5.16)。电点火具由于钝感程度不同,装药结构也不同。发火电流较小时的发火元件称为敏感发火元件,其典型

装药结构为：先在发火管内桥丝上装填敏感点火药或在点火头桥

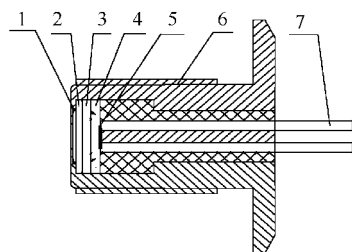


图 5.15 电极塞式发火元件
火具示意图

1—密封胶；2—盖片；3—第二装药；
4—第一装药；5—桥丝；
6—壳体；7—脚线。

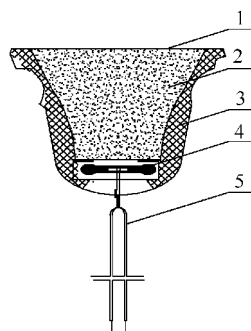


图 5.16 电点火头式发火元件
点火具示意图

1—药室盖；2—引燃药；3—壳体；
4—发火管；5—引线。

丝上涂覆敏感点火药(如氯酸钾/硫氰酸铅/铬酸铅)，当发火管内的敏感点火药发火后，点燃引燃药或高能输出药，完成输出作用；发火电流较大时的发火元件称为钝感发火元件，其典型装药结构为：在电极塞桥丝上压装钝感点火药或在点火头桥丝上涂覆钝感点火药(如 Mg/TeO_2)，钝感点火药发火后，依次点燃引燃药、高能输出药，完成输出作用。

2. 引燃药及高能点火药

影响电点火具输出压力峰值的主要因素是输出点火药种类及其装药量。早期电点火具使用的输出点火药一般都采用大粒黑火药。该药可燃性好，装药结构简单，但燃烧热值低，燃烧产物固体含量少，点燃复合型推进剂时可靠性较差，当低温点燃发动机主装药时，会出现“喘气”燃烧现象。因此，输出点火药已基本改用烟火型点火药。烟火型点火药燃烧产物温度高，固体含量大，有利于热量的传播。目前常用的点火药有 B/KNO_3 、 $\text{Mg}/\text{聚四氟乙烯}$ ，其中硼属稀有金属，价格昂贵，因此，一般战术火箭弹中大都采用价格

偏低的 $\text{Mg}/\text{聚四氟乙烯}$ 点火药,而对小型、装药结构简单、机械性能差的易燃型推进剂的点火则仍使用小粒黑点火药。

3. 电点火具壳体

电点火具壳体按其所用材料的不同一般分为金属类与非金属类。金属类主要包括铁丝网型、铝壳型等;非金属类主要包括硝基软片型、赛璐珞板型及高分子聚乙烯膜型等。金属壳体和非金属壳体原则上都能用于中大口径武器发射系统,而为减少后喷物对己方人员的伤害,单兵肩发射武器系统通常应使用非金属壳体。

硝基软片型壳体成型简单,原材料成本低,但抗电磁干扰能力和耐环境性能差;铝壳体密封性好,抗电磁干扰能力强,但成本高;铁丝网型壳体是介于二者之间,突出缺点是加工工艺复杂,成品率低。这些材料在震动、高温、低温和吸湿试验后,硝基软片型壳体的电点火具性能均不理想,不适合在中大口径火箭发动机中使用。用铁丝网做壳体的电点火具,在缩醛胶层中嵌入铁丝网,使壳体的强度有很大的提高,但由于铁与胶之间的表面张力相差太大,两相界面不能很好地结合,容易形成界面缺陷。当受到外力作用时,容易在界面联接处首先破裂,造成漏药、进水等现象,引起发火延迟、瞎火等。铝管壳结构的电点火具以铝作为基材,强度得到很大的提高;侧壁涂以虫胶漆,增加了电点火具的密封防潮性(见图 5.17)。另外,铝管壳对外界电磁干扰有屏蔽作用,增加了在恶劣电磁环境中的使用安全性。

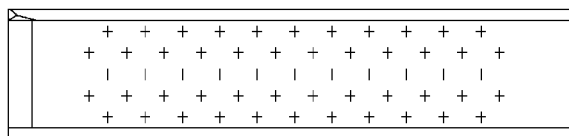


图 5.17 铝管壳网型壳体示意图

对几种非金属壳体做成的电点火具进行环境试验、长贮加速试验、发火试验后发现:采用硝基软片型、赛璐珞板制成的电点火

具均有药剂吸潮现象;而用高分子聚乙烯膜制成的电点火具具有耐环境性和耐吸湿性的优点,经受高温、低温、震动、浸水、高温高湿加速老化 15 年的试验后,发火性能可靠。高分子聚乙烯膜是一种理想的电点火具非金属壳体材料,适合于小型、装药结构简单、机械性能差的易燃型推进剂的点火。高分子聚乙烯膜也是一种优良的防静电高分子复合材料,广泛应用于军工产品的包装,其基本组成是载体树脂和导电性填料。载体树脂选用防潮性能较好、耐低温、易热封、且与药剂相容性好的低密度聚乙烯树脂(LDPE),导电性填料选用较经济的油炉法导电炭黑。将导电炭黑按 10%~25%的比例加入低密度聚乙烯树脂中,并加入偶联剂充分搅拌均匀,加热成型^[24]。

5.5.2 典型电点火具设计

1. 肩发射武器用敏感电点火具设计

敏感电点火具常用于肩发射武器系统的起飞发动机(内装小型的易燃型推进剂)的点火。典型敏感电点火具的主要技术指标是:电阻为 $2\Omega\sim3\Omega$;发火电流为 500mA;安全电流为 150mA;静电感度为脚—壳间耐 25kV;达到峰值压力时间为 50ms。

1) 电发火元件设计

电点火具采用由两个带绝缘保护套的电点火管组成并联的发火件(见图 5.17)。每个电点火管由电点火头、绝缘套组成。点火头桥丝选择直径 0.016mm 的镍铬丝,点火药选硫氰酸铅型点火药(氯酸钾/硫氰酸铅/铬酸铅 = 50 : 47 : 3)。当发火电流为 500mA 时,最小全发火电流约为 370mA,发火裕度为 1.34;计算的最大不发火电流约为 300mA,实测安全电流为 200 mA,安全裕度为 1.33。由于采用了冗余设计,所以发火可靠性得以提高,同时在电点火头外套绝缘管,大大提高了点火具脚线对外壳的绝缘强度,对提高产品抗静电性能十分有利。另外,也可以选用固定性及抗震性好的刚性材料作为药头基板,基板结构规则,桥丝焊接后电阻精度高,同时基板表面积大,点火更均匀、稳定、可靠,而较大表

面积的基板也有利于安全电流的提高。

2) 引燃药与壳体设计

由于小型发动机内装易燃型推进剂,所以引燃药可以采用 2 号小粒黑火药。为减少后喷物对己方人员的伤害,单兵肩发射武器电点火具壳体可采用高分子聚乙烯膜等非金属材料。由于该材料盒盖具有一定的拉伸性,所以,电点火具起发火作用时,输出火焰呈球状,点火冲量适中,这有利于发动机装药的全面点火。但是,这种壳体的生产工艺较难控制,比如当边缘部位的封接强度低于非金属材料壳体的强度时,可能造成火焰从边缘处提前泄漏喷出,反而会影响点火可靠性,另外,低温下该材料易出现脆化。所以,选用的非金属材料壳体必须能经受高温、低温、震动、浸水、高温高湿加速老化 15 年的试验的考验,且其表面不易积累静电荷。

2. 大口径武器用钝感电点火具设计

1) 电点火具结构与壳体选择

大口径武器发射用钝感电点火具主要由发火件(含钝感点火药)、引燃药(黑火药)、高能点火药、壳体组成。主要特点是:直流发火、输入能量大、尺寸大、形状不规则。当电点火具通一点火电流后,发火件发火,引燃引燃药,继而引燃高能点火药,当点火压力达到一定值后,火焰从喷火孔喷出,点燃火箭发动机主装药,完成其预定功能。

电点火具位于主发动机前端,通过螺纹与主发动机相连,在主发动机内部处于悬空状态,为此,内装高能点火药的电点火具壳体必须选择具有一定强度的铝材材料,目的是减轻电点火具的消极质量,增加电点火具的强度,也使之有利于电点火具的储存和运输。当高能输出点火药被点燃后,往往会瞬时在管体内形成高温高压环境,这极易形成对发动机主装药的不均匀点火。为此,通常在电点火具壳体表面开设喷火孔,并通过对壳体强度、传火面积等参数的优化设计,确保点火压力符合主发动机装药稳定燃烧的要求。同时,在壳体内壁加衬弹药筒纸,并使衬纸与壳体内壁贴紧,然后在喷火孔处多次涂覆酒精虫胶漆,确保电点火具能耐吸

潮、耐浸水,具有良好的密封性能。

2) 发火件设计

大口径武器发射用钝感电点火具的主要技术指标为:电阻为 0.7Ω ;发火电流为 $5A$;静电感度为脚壳间 $25kV$;安全性为 $1A1W5min$ 不发火;作用时间小于或等于 $40ms$ 。钝感电点火具的发火件通常采用钝感电点火头,而电点火头的钝感是主要靠桥路结构设计和使用钝感点火药实现。桥路结构设计及钝感点火药的选择可参考 5.4 节的“钝感电点火管”内容。

大口径武器造价高,为提高点火的可靠性,点火系统采用冗余设计,点火具有 2 套点火系统,4 根点火导线。当一路出现故障时,备用系统即可投入使用,提高了武器系统的可维修性。

3) 装药与传火序列设计

黑火药具有火焰感度好、易于被点燃且传火速度快的特点,所以可以选择粒度适中的 5 类黑火药作引燃药。但是由于发动机主装药的发火点较高,不易点燃,所以电点火具输出点火药可选用高能点火药 $Mg/\text{聚四氟乙烯}$,这有利于迅速建立点火压力,同时形成高温粒子,可靠点燃发动机主装药。电点火具的点传火方式采用点火头—黑火药—高能点火药序列点火,当点火头引燃黑火药时,容易在黑火药周围产生较高的温度和压力,且由于短时间内来不及泄放,局部压力过高发生爆燃,这对发动机点火极为不利。为此,可设计一中心传火管,当黑火药点燃后,燃烧产物通过中心传火管向高能点火药传播,避免了由于局部压力过高可能导致的爆燃现象出现,同时也缩短了点火时间差,提高了点火一致性和稳定性,改善了点火性能。

3. 延期电点火具设计^[25]

常用电点火具的作用时间约为 $50ms$,但在一些武器系统中,对电点火器提出了延时范围从 $0.2s\sim 1.5s$ 等不同作用时间的要求。当延时为 $200ms\sim 300ms$ 时,称为短延时;当延时为 $1.2s\sim 1.8s$ 时,称为长延时。这类电点火具的长度往往较大。除延时结构和药剂及装药结构外,其他有关结构的设计与电点火器相同(电

极塞结构)。

1) 延时结构设计

延时结构一般有直接式、垫环式和间接式三种结构。直接式结构就是将发火件直接与各种装药直接接触,这往往由于点火药输出强而使延期时间缩短;垫环式结构是用垫环将发火件与延期体隔开,但由于垫环对点火药输出的衰减变化不一致,存在延期时间散布大,且作用不可靠的缺点;间接式是发火件与延期体之间用空心管隔开,通过空心管长度的调整达到可靠地使延期体作用的目的,延期时间通过延期药的种类、长度予以调整。

2) 药剂及装药结构选择

一般来说,延时电点火具装药结构包括点火药(有时还有过渡药)、空心管、延期药、转换药和输出点火药。其作用过程是:桥丝首先使点火药发火,点火药引燃过渡药并使之燃烧稳定,再经空心管将其能量准确衰减后,引燃延期药,延期药依次引燃转换药、输出点火药。从中可以看出,几种药剂的作用各不相同,因此,其选择标准要求也不一样。

始发装药为点火药,它的主要作用是在给定能量下保证能可靠快速点火,同时要求其输出较弱,以防冲散过渡药,所以,一般情况下点火药选用弱起爆药斯蒂芬酸铅;当过渡药要求感度适中、燃烧输出稳定、能量低时,一般选择锰系点火药或3号点火药;当转换药感度高、输出大时,一般选用小粒黑火药;当输出点火药要求高能输出时,一般选用Mg/聚四氟乙烯或铝/高氯酸钾/亚铁氰化铅。延期药必须发火点高,难于点燃,燃烧稳定,生成热小。延期药一般由可燃物和氧化剂组成,要求可燃物发火点高、放热量小,而氧化剂要求熔点高且分解时放出的氧含量低。几种原材料的性能参数见表5.25所列。从中可以看出,延期药的可燃物可选用Si、Cr、Fe、FeSi,氧化剂可选用 K_2CrO_4 或 $PbCrO_4$ 。为提高延期精度,应将延期药压药压力提高到280MPa。有关文献介绍了一种低燃速硅铁延期药,它由FeSi、 Pb_3O_4 、 $BaCrO_4$ 组成,燃速为1.60 mm/s~2.00mm/s,延期精度为10%,该延期药已用于某导

弹增程发动机延期电点火器的延期点火^[26]。

表 5.25 延期药所用原料性能参数^[22]

氧化剂	KClO ₃	K ₂ CrO ₄	PbCrO ₄	KNO ₃	Ba(NO ₃) ₂	PbO ₂	KMnO ₄
熔点/℃	360	975	600	336	592	290	240
氧含量/%	39	12.4	8	47	30	7	25
可燃物	Al	B	Mg	Si	Cr	Fe	Zr
发火点/℃	800	900	550	900	1800	500	400
放热量/kJ·g ⁻¹	30.9	58.5	24.7	30.9	10.9	7.1	12.1

5.5.3 电底火设计

由于战场上战斗车辆、飞机、舰艇等运动速度的提高,要求攻击的武器弹药具有高射速,从而对发射用底火相应地提出了作用迅速性的要求,而一般撞击底火不论是操作过程还是作用过程都不能满足这一要求。所以,弹药的速射越来越依赖于电能激发的电底火的使用。电底火主要配用于射速较高的小口径航炮、舰炮及发射空间严重受限的坦克/反坦克炮各弹种。

1. 电底火基本要求

一般而言,对电底火的基本要求是安全可靠、作用时间短、耐高膛压、能经受上膛时的震动等,具体如下。

(1)安全可靠。电底火作为一种电火工品,首先要符合安全可靠这一电火工品的基本要求。由于电底火往往直接暴露于作战环境,使用环境缺乏隔爆机构,与发射装药呈直列状态,其安全性和可靠性直接关系着弹药的安全性和作用可靠性。因此,要求安全性能(防静电、防射频)好。

(2)作用时间短。对于高射速武器,如航 30mm 机关炮射速为每分钟 1400 发,平均每发炮弹射击所占时间只有 10ms,而要求从击发机击发底火到底火发火并点燃发射药的时间则远小于这一时间。因此,作用时间短是关系到电底火作用可靠,乃至安全的一

个重要指标。

(3)耐高膛压。由于弹药要求具有较大的初速,所以发射时膛压较高,而膛压高会造成底火击穿漏烟等问题。

(4)经受上膛时的震动。射速高的炮通常采用气压上膛,如航30mm 机关炮上膛的气压为 55MPa,因此,电底火的各零件应能承受此震动而不影响底火性能。

2. 灼热桥丝电底火设计^[27]

典型电底火的主要技术指标是:电阻为 $1.5\Omega\sim 3.5\Omega$;发火电流为 5A;安全电流为 200mA;静电感度为脚壳间耐 25kV;作用时间小于 $700\mu\text{s}$ 。以用于 23mm、30mm 机关炮的海双 30 电底火为例(见图 5.18),电底火一般由外壳、环电极、芯电极、绝缘垫片、桥丝、点火药、绝缘塑料等组成。其发火过程为:当撞针撞击底火底部时,撞针同底火芯电极接触,底火电路就构成回路,具体为电源—撞针—底火芯电极—双桥丝—环电极—底火壳—电源。通电后,桥丝升温点燃斯蒂芬酸铅,继而点燃传火药。

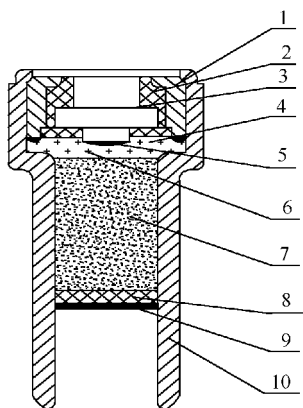


图 5.18 海双 30 桥丝式电底火结构

1—环电极;2—绝缘塑料;3—芯电极;4—绝缘垫片;5—桥丝;

6—点火药;7—黑药;8—密封纸垫;9—漆;10—管体。

桥丝为 $\phi 0.03\text{mm}$ 的 6J20 镍铬丝,点火药通常选用作用时间

短的斯蒂芬酸铅,传火药为过氯酸钾/亚铁氰化铅混合药或黑火药。为提高底火强度,防止火药气体直接作用于绝缘塑料,用来衬托桥丝和药剂的绝缘垫片必须选用高强度塑料酚醛层压板,而环电极与芯电极之间的绝缘塑料层必须是击穿强度高、机械性能好,在高温下不软化的加有玻璃纤维的热固性塑料,而且要保证其内部无气孔。这对底火强度和脚壳间耐静电性能都有很大的影响。传火孔内的密封纸垫涂含 1%~3% 易燃细铝粉的硝基漆。

随着穿甲弹药的发展,发射膛压也随之提高,已经要求底火要能承受 550 MPa 的强度冲击。为保证底火有足够的强度,通常在发火件的结构和工艺上采取以下措施:第一,在环电极与芯电极之间采用多台阶式结合,增加气体外泄的弯曲路径和难度;第二,减少点火药与引燃药、引燃药与输出药之间接触的面积,实现逐级传火,最好在引燃药与输出药之间设有闭气塞(见图 5.19)。另外,为解决断桥引起的电底火瞎火问题,通常使用具有一定厚度的双面不锈钢环形圆片做电桥基板,将电桥焊到上下双面不锈钢之间,并将掺有硝基漆的斯蒂芬酸铅填入基板中空间,保证震动、勤务处理时电桥和点火药不受力,并由高强度的环形圆片提供支撑保护。这种结构电底火的安全性和可靠性主要靠桥丝直径来保证,如当选用 $\phi 0.04$ mm 的 6J20 镍铬丝时,单桥电阻为 $2.0\Omega\sim 3.5\Omega$,双桥并联电阻为 $1.0\Omega\sim 2.0\Omega$,安全电流能达到 300mA 以上。

3. 电撞两用底火^[28]

利用撞击机械能和电能都可激发的底火称之为电撞两用底火,其示意图如图 5.20 所示。它集中了撞击底火和电底火的优点,一般由底火体 6、火帽 5、电发火件 4、绝缘塑料 3、传火药管 2 和密封盖 1 组成。在撞击作用下,火帽发火点燃传火药管;在电能作用下,电发火件发火,点燃传火药管。由于既可以由电能激发又可由撞击能激发,所以电撞两用底火的发火可靠性较高。由于图 5.20 所示的结构属简单并列式结构,制造工艺复杂且成本较高,所以实际的电撞两用底火结构是在电底火(见图 5.20)基础上增加撞击功能,即将撞击火帽放置于电发火件下部的芯电极内,形成

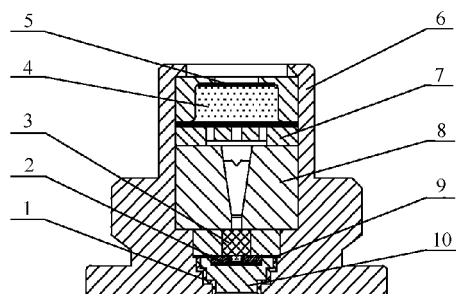


图 5.19 耐高强度冲击电底火

1—绝缘层;2—环电极及桥丝;3—引燃药;4—输出药;5—输出盖片;

6—底火体;7—传火孔垫块;8—闭气塞;9—环形绝缘片;10—芯电极。

串联式结构,且电发火件与装药管之间设有闭气塞。撞击发火时,底火在击针撞击作用下,火帽发火,点燃电发火件内装药,继而引燃装药管内的黑火药;而电发火时,底火在电流作用下,电发火件直接发火。这种串联式结构有利于装配。

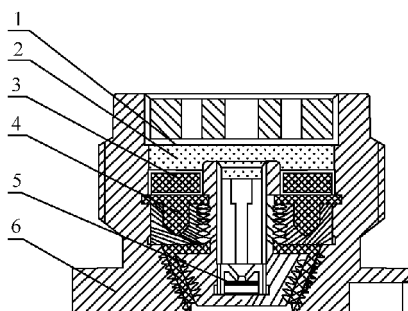


图 5.20 电撞两用底火

1—密封盖;2—传火药管;3—绝缘塑料;

4—电发火件;5—火帽;6—底火体。

5.6 电火工品应用失效分析与重新设计

除与产品本身性能缺陷有关外,电火工品在使用中出现的作

用失效很大程度上与武器的使用环境有关,这种环境不仅包括自然环境,也包括武器系统供给电火工品发火的输入能量环境。

5.6.1 输入能量过大引起的电火工品作用失效^[28]

由于高可靠性作用和高精度打击的需要,各种武器系统对火工品可靠性的要求越来越高。总体使用系统为了增加火工品可靠作用裕度,在提出发火能量要求时,往往对火工品提出的发火能量远远低于实际武器提供的能量,这看似增加了能量裕度,但实际为电火工品作用失效留下了隐患。

1. 电火工品作用失效情况

某电点火管在验收合格以后,使用中出现了瞎火现象,经解剖分析后表明电点火管桥丝已熔断。经查该电点火管在实际使用和出厂验收时,发火电流存在非常大的差异。在实际使用中,武器系统提供的最大发火电流为 2.11A,而出厂时却要求按 160mA 发火电流验收。

2. 发火电流对电火工品作用分析

(1)发火过程分析。电点火管通电发火后的发火过程可分如下几个阶段:第一,从通电到药剂爆发点所需时间 t_1 ;第二,从通电到桥丝熔断所需时间 t_2 ;第三,药剂爆发延滞期 t_3 ;第四,药剂爆燃时间 t_4 ;第五,产品作用时间 t 。整个过程中,桥丝升温时间和药剂爆发延滞期较长,药剂爆燃时间较短。

(2)电流对产品发火可靠性的影响。当发火电流较小时,桥丝升温较慢,桥丝熔断时间 t_2 较大,此时熔断时间 t_2 大于从通电到药剂稳定燃烧所需时间,在药剂稳定燃烧以前,桥丝持续为药剂提供能量,直至产品可靠发火;而当发火电流过大时,桥丝很快达到较高的温度,此时桥丝熔断时间 t_2 很小,桥丝熔断时间接近于从通电到药剂达到爆发点时间,但远小于产品作用时间,如果药剂相对比较钝感,则在药剂还未达到足够的初始激发能量时,桥丝已经熔断,造成产品瞎火。

3. 电流对产品发火可靠性的影响试验

1) 电流对钝感药剂发火可靠性的影响

不同电流下,装钝感药剂产品的桥丝熔断时间与作用时间见表 5.26 所列。

表 5.26 电流对钝感药剂发火可靠性的影响试验

发火电流/A	试验数量/发	熔断时间 t_2 /ms	作用时间 t /ms	发火率
0.16	20	6.03	6.90	20/20
0.75	20	0.13	5.50	20/20
1.30	20	0.08	6.67	20/20
1.80	20	0.04	5.73	18/20

从表 5.26 中可以看出,当发火电流较小时,桥丝熔断时间与产品作用时间比较接近;随着电流逐渐增大,桥丝熔断时间变小,但由于药剂比较钝感,产品作用时间基本保持不变;当电流达到 1.8A 时,桥丝熔断时间只有 $40\mu\text{s}$,而产品作用时间为 5.73ms,因此产品就出现了瞎火现象。

2) 电流对敏感药剂的发火可靠性的影响

如果将上述产品中的钝感药剂变为敏感药剂,则电流对产品发火可靠性的影响试验结果如表 5.27 所列。从表 5.27 中可以看出,药剂为敏感药剂而发火电流较大时,作用时间降低且对发火可靠性没有影响。

表 5.27 电流对敏感药剂发火可靠性的影响

发火电流/A	试验数量/发	熔断时间 t_2 /ms	作用时间 t /ms	发火率
0.16	20	4.46	5.60	20/20
0.75	20	0.14	2.86	20/20
1.30	20	0.08	2.00	20/20
1.80	20	0.04	1.80	20/20

4. 提高产品发火可靠性的设计方法

电火工品重新设计时,可通过理论计算和实验确定技术状态。

1) 理论计算确定产品技术状态

根据能量守恒定律,电能转变成的热量是桥丝升温所需热量

与损失热量之和,即

$$I^2 R t_2 = \rho c_P V_0 (T - T_0) + \gamma (T - T_0) t_2 \quad (5.6.1)$$

式中 V_0 是金属桥丝的体积; ρ 是桥丝材料的密度; c_P 是桥丝材料的比热; R 是桥丝电阻; I 是通入电流; γ 是热损失系数; T_0 是室温; T 是桥丝加热后的温度; t_2 是桥丝熔断时间。

忽略电阻随温度的变化,将 R 视为定值;另外,因通电时间一般较短,热量损失可以忽略不计,并设 T 远大于 T_0 ,桥丝熔点为 T_1 ,则桥丝熔断时间 t_2 为

$$t_2 = \frac{T_1 V_0 c_P \rho}{R I^2} \quad (5.6.2)$$

桥丝熔断电流 I 为

$$I = \sqrt{\frac{T_1 V_0 c_P \rho}{R t_2}} \quad (5.6.3)$$

可以将此电流和产品工作电流相比,初步确定产品状态是否合理。

2) 通过试验确定技术状态

先确定产品实际使用状态的发火电流,然后调整点火药感度和桥丝材料及直径,使产品的桥丝熔断时间大于作用时间,保证其发火可靠性。同时测出桥丝熔断时间、作用时间的波形(见图 5.21)。在输入电流回路中采集一电压信号为一靶信号,以产品作用后所产生的声、光、压力、破坏作用等作为二靶信号。 A 点表示通电起始时间, B 点表示产品开始作用, C 点表示桥丝熔断。

5.6.2 高温高湿环境引起的电火工品作用失效^[29]

配用于弹药或引信的电火工品在数年的储存过程中,遇到的自然环境多种多样。对含有含能材料药剂的火工品而言,高温高湿环境会使含能材料药剂发生化学变化,同时也影响着药剂与金属桥丝的相容性。因此,环境对电火工品长贮后的作用失效有着

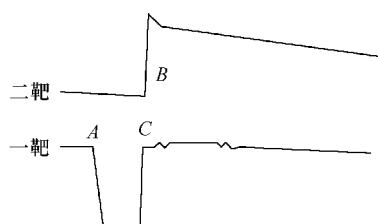


图 5.21 同时测出桥丝熔断时间、作用时间的波形

重要的影响。

1. 电点火头作用失效情况

在某迫弹引信远距解除保险机构中,电点火头的主要作用是发火后切断定位销上的铜丝,使定位销回位,以达到解除保险的目的。但该引信在某仓库储存 7 年后,装配于引信内的电点火头出现了作用失效现象,电点火头发火后不能切断铜丝。在解剖的 66 发电点火头中,其中断桥 11 发,2 发电阻超标。另外,所有药头药剂均已经分解变质,变成深黄色,且脚线锡层发黑,只残存桥丝。

2. 失效原因分析

该电点火头所用药剂为 1 号点火药,主要由 KClO_3 、 PbCrO_4 和 $\text{Pb}(\text{SCN})_2$ 等三种成分混合而成,桥丝为 $\phi 0.09\text{mm}$ 的镍铬丝,用 ZnCl_2 焊剂焊接,药头外涂覆硝棉漆。装在引信中的电点火头药头端与定位销孔相通,定位销孔与引信包装相通,电点火头在引信中不密封,属做功元件。

分别按密封和非密封状态,在温度 60°C 、相对湿度大于 95% 的温湿度环境条件下保持 3 天、6 天和 9 天,分别模拟 5 年、10 年和 15 年的长贮试验,其结果见表 5.28 所列。

表 5.28 密封和非密封状态的长贮试验结果

包装状态	时间/天	试验数量/发	电阻合格数/发	发火率/%	解剖分析
密封	3	80	80	100	药剂颜色正常,桥丝脚线光亮
密封	9	80	80	100	药剂颜色正常,桥丝脚线光亮

非密封	3	120	120	55	药剂颜色发黄,脚线发暗露铜
非密封	6	150	144	7.3	药剂深黄、疏松,脚线发黑露铜
非密封	9	150	65	0	药剂深黄或发绿,脚线发黑露铜,断桥

表 5.28 的结果表明,该电点火头在非密封状态下,无法满足长贮要求。在高温高湿环境下,引信塑料包装材料能和大气中水分子进行交换。所以,当电点火头与引信包装相通时,水分子通过防潮漆(事实上,不能完全防潮)或从药头根部进入药头内部,使点火药的三种组分缓慢地发生化学反应,反应产物中包括黄色硫单质、绿色 Cr_2O_3 及气体,从而造成药头药剂疏松,颜色发黄。由于药剂膨胀,使脚线受力、拉断、拉脱桥丝或从锡铅焊料中拉松桥丝,最终导致药头桥丝断桥或电阻变大。随着药剂进一步分解,形成的硫氰酸具有强腐蚀性,能够腐蚀桥丝和脚线,使脚线发黑,所以即使药头电阻合格,能正常发火,但由于药剂已经部分分解,总能量下降,因此也不能完成所要求的做功功能。

3. 产品耐高温高湿环境设计

更换药剂和改变产品密封状态都能使产品达到耐高温高湿环境的要求。用不易受潮的单质起爆药斯蒂芬酸铅代替易受潮的 1 号点火混合药,同时对电点火头加装套管,并使用硝基漆使产品进一步能耐耐高温高湿环境。另外,建议引信结构设计应保证非密封火工品具有密封性,同时对引信的包装作进一步的改进。

5.7 电火工品通用要求与系列化设计^[30]

电火工品系列化设计主要包括尺寸系列化、输入能量系列化和通用要求三方面。

5.7.1 电雷管系列化设计

1. 电雷管尺寸系列化

尺寸由直径和高度组成。1975 年,美国军用标准 MIL—STD—320A《引用用爆炸元件的术语尺寸和材料》中,较为明确地提出了要求^[31]。1990 年,在参考美国军标的基础上,我国制定了相应的军标^[32],其中电火工品直径系列除没有 7.24mm 尺寸外,其余等同于美国军标;长度系列除没有 3.63mm 尺寸外,其余与美国军标相同。结合国内外电雷管的产品实际尺寸和使用情况,确定了以后电雷管设计的尺寸系列,见表 5.29 所列。

表 5.29 桥丝式电雷管尺寸系列

直径/mm	2.03	2.54	2.92	3.25	3.76	4.17	4.94	5.10	6.20	7.06	8.00
高度/mm	5.33	6.35	7.36	8.00	8.68	9.40	10.00	11.1	12.10	13.50	

桥丝式电雷管直径(ϕ)共 11 个系列,除增加了 5.10mm 尺寸外,其余尺寸完全等同于 GJB862—90《引信爆炸元件的尺寸和材料》。而增加 5.10mm 尺寸则是考虑到现役产品的实际情况。在现役电雷管中,该尺寸占的比例较高,装备量也较大,且该尺寸的生产模具、工艺、生产线布局相当完善。基型直径尺寸确定为 2.54mm、4.94mm、5.10mm、7.06mm。

桥丝式电雷管的高度(h)一般在 14mm 之内。考虑电极塞长度和最少装药高度,电雷管的最小长度确定为 5.33mm。在 5.33mm~14.0mm 范围内,高度系列完全采用美国军标。基型高度尺寸确定为 6.35mm、9.40mm。基型桥丝电雷管尺寸为 $\phi 2.54\text{mm} \times 6.35\text{mm}$ 、 $\phi 4.94\text{mm} \times 9.40\text{mm}$ 、 $\phi 5.1\text{mm} \times 10\text{mm}$ 。另外,以 $\phi 4.9\text{mm} \times 9.4\text{mm}$ 或 $\phi 5.1\text{mm} \times 10\text{mm}$ 尺寸为基本尺寸,发展延时为 3 ms~10ms、10ms~17 ms、17ms~25ms 系列延期电火工品,以满足不同需求。

2. 桥丝式电雷管发火能量系列

参考国内外桥丝式电雷管的发火条件,绝大部分采用电容放电电路作为表达输入参数的标准发火电路,用电容量(μF)和电压(V)来表达电雷管的输入特性。发火能量可表示为: $E=CV^2/2$ 。

以 2mJ 为感度增量,将发火能量划分为三个区域。具体如

下。

(1) 第一能量区域为 $[0, 2]$ mJ。先假设第一能量区域为 $[0, X]$ mJ, 其中: $X = 0 + 2 \times 1 = 2$, 即 $[0, 2]$ mJ 为第一能量区域。将发火能量介于 0 mJ ~ 2 mJ 的产品称为敏感电雷管, 以 0.1 mJ、0.5 mJ、1 mJ 等三种能量为典型代表。

(2) 第二区域为 $[2, 6]$ mJ。先假设第二能量区域为 $[2, Y]$ mJ。其中: $Y = 2 + 2 \times 2 = 6$, 即 $[2, 6]$ mJ 为第二能量区域, 将发火能量介于 2 mJ ~ 6 mJ 的产品称为次敏感电雷管, 以 4 mJ 能量为典型代表。

(3) 第三能量区域为 $[6, 12]$ mJ。同样先假设第三能量区域为 $[6, Z]$ mJ。其中 $Z = 6 + 2 \times 3 = 12$, 即 $[6, 12]$ mJ 为第三能量区域, 将发火能量介于 6 mJ ~ 12 mJ 的产品称为钝感电雷管, 以 10 mJ 能量为典型代表。

依次类推, 可得到第四、第五能量区域。

根据现役国内外产品实际情况, 钝感电雷管的输入参数为 $28 \mu\text{F}$ 、27 V, 而高敏感电雷管的输入参数为 $3.3 \mu\text{F}$ 、17 V。对于炮弹引信而言, 由于引信空间容积和电源能量的限制, 发火电容不可能太大, 发火电压不会太高, 但电压过低, 会使电雷管作用时间过长。综上所述, 电雷管输入能量系列, 见表 5.30 所列。

表 5.30 电雷管输入能量系列及对应安全指标

能量系列	0.1 mJ	0.5 mJ	1 mJ	4 mJ	10 mJ
基型参数	$3.3 \mu\text{F}$ 、8 V	$3.3 \mu\text{F}$ 、17 V	$6.8 \mu\text{F}$ 、17 V	$28 \mu\text{F}$ 、17 V	$28 \mu\text{F}$ 、27 V
安全电流	50 mA 5 min	50 mA 5 min	100 mA 5 min	150 mA 5 min	1 A 1 W 5 min
静电要求		防静电	防静电	防静电	防静电

5.7.2 直流发火电火工品输入能量系列化设计

用直流电流起爆的电火工品有许多种, 一类是起爆器、电点火具、抛放弹、电爆管、作动器、电底火等电火工品, 其外形尺寸受总体制约很大, 与上一级系统接口尺寸不容易确定, 只能对其输入参

数形成系列化；另一类是电点火管等电火工品，外形尺寸则可以形成系列化（同电雷管系列）。

以 $1.0A$ 为感度增量，将发火能量划分为多个区域。具体为：

(1) 第一能量区域为 $[0, 1]A$ 。先假设第一能量区域为 $[0, X]A$ ，其中： $X = 0 + 1.0 \times 1 = 1.0$ ，即 $[0, 1]A$ 为第一能量区域。将发火能量介于 $0A \sim 1A$ 的产品称为敏感型电火工品，以 $0.50A$ 、 $0.80A$ 等两种能量为典型代表；

(2) 第二区域为 $[1, 3]A$ 。先假设第二能量区域为 $[1, Y]A$ ，其中： $Y = 1 + 1.0 \times 2 = 3.0$ ，即 $[1, 3]A$ 为第二能量区域，将发火能量介于 $1A \sim 3A$ 的产品称为次敏感型电火工品，以 $1.2A$ 、 $2A$ 能量为典型代表；

(3) 第三能量区域为 $[3, 6]A$ 。同样先假设第三能量区域为 $[3, Z]A$ 。其中 $Z = 3 + 1.0 \times 3 = 6$ ，即 $[3, 6]A$ 为第三能量区域，将发火能量大于 $3A$ 的产品称为钝感型电火工品，以 $5A$ 能量为典型代表。

直流发火电火工品输入能量系列见表 5.31 所列。

表 5.31 直流发火电火工品输入能量系列

能量系列/A	0.5	0.8	1.2	2	5
安全指标	100mA5min	150mA5min	200mA5min	1A1W5min	1A1W5min
静电要求	防静电	防静电	防静电	防静电	防静电

5.7.3 电火工品通用要求

1. 桥丝式电雷管通用要求

依据 GJB2002—94《电雷管通用规范》^[33]，并参考 3.6.3 节的针刺雷管通用要求，重点将电雷管和针刺雷管的自然考核环境要求一致起来，归纳出电雷管的通用要求。具体如下：

1) 尺寸与结构要求

尺寸应符合电雷管直径和高度系列；结构为全密封。

2) 电性能特性

(1)电阻:电雷管的桥路电阻应符合相关要求;

(2)绝缘电阻:桥路与壳体之间施加 500V 直流电压 1min 后,其绝缘电阻要大于 50M Ω ;

(3)介质耐压:在标准装配工房条件下,对电雷管短路脚线与壳体间施加 500V 直流电压 1min,绝缘层应无击穿;

(4)发火及输出:在满足使用要求且符合发火能量系列的某一能量下,产品应可靠发火,且作用时间和输出能满足要求;

(5)不发火:在与发火能量系列对应的某一不发火能量下,产品应不发火;

(6)静电感度:电雷管短路脚线与壳体间施加电容为 500pF,串联电阻为 5000 Ω ,充电电压为 25kV 的静电冲击时,产品不得发火;

(7)抗杂散电流脉冲:对产品施加 2000 个杂散电流脉冲(100mA、300ms),产品不得发火。

3)长期储存性要求

正常储存条件下,储存寿命不少于 15 年。

4)其他要求

作用可靠性要求、环境适应性要求、外观质量要求同 3.6.3 节针刺雷管通用要求相关内容。

电点火具通用要求基本与电雷管相同,区别在于其尺寸、锤击试验、泄漏试验、浸水试验、储存年限可按总体要求,另外考虑到点火系统无保险隔离,所以需增加电磁兼容性试验。

2. 电底火的通用要求

WJ1971—90《电底火制造与验收通用规范》规定了电底火性能的考核试验内容,通用性能要求有:性能特性(发火与输出、不发火)、环境要求(震动、振荡、高温、低温、吸湿、上膛安定性)和实际射击(单发、连发)试验要求^[34]。但是,这些考核项目不能完全包括底火和电火工品两项内容的要求。综合电火工品和底火要求,电底火通用要求具体如下:

1)尺寸要求

外形和螺纹尺寸应符合产品相关要求。

2) 电性能特性

同本节桥丝式电雷管通用要求相关内容。

3) 上膛和射击试验

(1) 上膛安定性试验: 将底火装在配用的药筒上, 以假引信、填沙弹装成与全备弹质量相同的试验弹, 人工或自动进行上膛, 反复 4 次, 不许出现发火、结构损坏和电阻超差;

(2) 强度试验: 将底火装在配用的药筒上, 以假引信、填沙弹、强装药在配用的武器上进行单发试验, 不许出现瞎火、击穿、脱落、漏烟、烧蚀炮门镜面等缺陷;

(3) 连发射击试验: 将底火装在配用的药筒上, 以假引信、填沙弹、强装药在配用的武器上进行连发试验, 不许出现瞎火、击穿、脱落、漏烟、烧蚀炮门镜面等缺陷。

4) 其他要求

作用可靠性要求、环境适应性要求、外观质量要求、长期储存性要求同本小节桥丝式电雷管通用要求相关内容。

参 考 文 献

- 1 马宏宣. LD-14 小型桥丝式电雷管的研究. 火工品, 1995(2):14
- 2 焦彦玲等. 电子引信用小型电雷管设计参数研究. 213 所学术论文集, 1995:27
- 3 喻斌民. LD-14 电雷管在生产中爆炸原因探讨. 火工品, 1995(3):26
- 4 马宏宣. 再论压敏电阻在火工品中的应用. 火工品, 1988(2):20
- 5 李运来. 关于电爆装置的防静电问题. 火工品, 1985(1):27
- 6 李运来. 镍铬丝和钨丝电雷管性能比较. 火工品, 1981(4):7
- 7 梁鸿书. 用扫描电镜判断火工药剂与金属桥丝长期接触的相容性. 火工品, 1998(2):16
- 8 周胜利. 碳化硅防静电塞子的研究. 火工品, 1987(2):14
- 9 杨庆玲. 延期电雷管的研究. 火工品, 1998(3)
- 10 Scott G L. 改进型 1A1W 电雷管. 导弹火工技术, 1980(1):46
- 11 Enig J W. 降低密封电火工品对静电放电敏感的技术研究. 导弹火工技术, 1980

(1):52

- 12 史春红. 可燃壳体钝感电点火管研究. 第 11 届火工年会, 2001
- 13 朱玉堂. 一种新结构钝感电点火头. 火工品, 1998(4):6
- 14 马宏宣. 镁/二氧化碲钝感点火药. 火工品, 1990(1):6
- 15 马宏宣. GOI 点火具. 火工品, 1997(2):23
- 16 马宏宣. GOI 点火具弹道功能影响因素分析. 第 10 届火工年会, 1998:10
- 17 杨树彬. 1A/W 钝感电点火器的研制. 火工品, 1987(4):18
- 18 郭鹏. 研制钝感电爆管的几种途径. 火工品, 1982(4):13
- 19 杨正发. YS-1 型电发火管. 火工品, 1990(3):20
- 20 张静伟. 药剂对金属膜式钝感电点火管发火时间的影响. 火工品, 2002(4):1
- 21 胡亚平. 电起爆器桥丝熔断时间影响因素分析. 火工品, 2002(4):5
- 22 崔庆忠. 几种火箭弹点火具的对比研究. 火工品, 1998(4):31
- 23 戴实之. 火工技术. 北京:兵器工业部教材编审室, 1987:163
- 24 杨虎林. 防静电高分子复合材料的制作工艺. 火工品, 2003(3):18
- 25 姜玉琴. 一种新型的延期电点火具. 2002 年火工品及药剂发展研讨会, 2002:
282~287
- 26 陈红俊. 低燃速硅铁延期药. 火工品, 2000(1):31
- 27 刘伟钦. 火工品制造. 北京:国防工业出版社, 1981
- 28 陈保伟. 某电点火管瞎火问题研究. 火工品, 2002(4):13
- 29 龚继海. 某电点火头长贮失效研究. 火工品, 2003(1):2
- 30 王凯民. 火工品“三化”研究. 炮兵防空兵装备技术研究所, 2003
- 31 MIL-STD-320A. 引信用爆炸元件的术语尺寸和材料. 1975
- 32 GJB862-90. 引信爆炸元件的尺寸和材料. 1990
- 33 GJB2002-94. 电雷管通用规范. 1994
- 34 WJ1971-90. 电底火制造与验收通用规范. 1990

第 6 章 航天火工品设计技术

6.1 概 述

火工品具有能量质量比高、体积小、长贮性好、起爆及输出能量可控等特点,能够在相当短的时间内释放出相当大的能量来做机械功,完成预定的某项动作,因此,它广泛应用于运载火箭、载人飞船、卫星、导弹及航天飞机等各种空间飞行器上。随着空间飞行器越来越复杂,使用的火工品也越来越多,例如,在美国的“水星”号飞船上使用了 46 件火工品,在“双子座”号飞船上使用了 139 件,在“土星”号飞船上使用了约 150 件,在“阿波罗”号飞船上使用了 314 件^[1]。从运载火箭发射到航天器返回的整个过程中各个程序的动作都离不开火工品的作用。

在航天技术中,火工装置(又称动力源火工品)是指通过装有一种小型的,内含少量火药、炸药或烟火剂的元件在比较小的初始能量下的燃烧或爆炸作用,来推动一定的机构,完成释放、抛放、切割破碎、驱动开关等机械功能的系列复杂装置的总称。其英文标准术语确定为 Pyrotechnics(简称 Pyros),而不是 Explosive Device^[1],这主要是因为设计人员最初为减少航天工程管理者对使用火工品的担心。显然,常说的火工品在此只是火工装置中的一个元件。在航天设计中,除火工装置外,还大量使用了由多个火工元件及火工装置联成一体、能完成一定功能的火工系统,即非电传爆系统。所以,广义地讲,火工元件、火工装置和火工系统都称为火工品,它们是航天火工品应用中的 3 个重要层次。

6.1.1 非电传爆系统组成及特点

非电传爆系统是将火箭、导弹、空间飞行器上用的多个独立的火工装置通过某些中间装置或部件组成一个系统,该系统只需用一个电火工品引爆。所以,首发电火工品元件的安全性一定程度上代表了这种系统的安全性。当电火工品具有较高的抗静电、抗射频能力时,系统的安全性就得到了保证。为了提高系统的可靠性,从首发元件到终端输出装置可用两个独立的线路引爆,即从整个系统上采用冗余设计。使用非电传爆系统的目的是减少电火工装置的数量,提高首发元件电火工品的安全性和发火能量,从而提高系统的安全性。从 20 世纪 60 年代美国率先研究非电传爆系统以来,这种系统已在“土星”V 号运载火箭、“阿波罗”号飞船、“海神”号潜地导弹等多种型号上得到应用。

非电传爆系统典型结构如图 6.1 所示,它基本上由 3 部分组成:第一,首发元件,如钝感电起爆器、电雷管、电爆管等火工品;第二,传爆元件,如限制性导爆索、歧管,必要时还有延时元件;第三,终端元件,如非电起爆隔板起爆器、非电起爆爆炸螺栓、线型分离类火工装置等。非电传爆系统的特点是:第一,电火工品数量少,一般为 1 个,冗余设计为 2 个,受电干扰而意外发火的危险性小,安全性高,同时减少了弹上电源载荷;第二,多个终端元件作用的

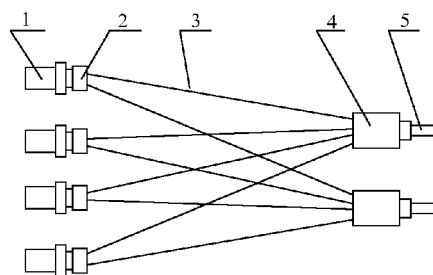


图 6.1 非电传爆系统的典型结构

1—终端元件；2—输出接头；3—CDF；
4—歧管；5—钝感电起爆器。

同步性高,特别适用于级间分离、尾罩分离和子弹头抛射等要求火工品同步作用高的地方;第三,整个系统在作用中和作用后无破碎、无污染,对弹上其他设备无影响;第四,能大大简化控制系统;第五,减轻弹上电源负荷及电池重量。

6.1.2 航天火工装置分类^[2,3]

一个完整的航天工程主要包括地面系统、发射和控制系统、逃逸系统、动力系统、分离系统、回收和着陆系统及自毁系统等分系统。火工品在这些分系统中都得到了广泛应用。根据功能和结构形式划分,航天用火工装置主要有解锁类、弹射分离类、切割类、推力类四类。

1. 解锁、分离、释放装置

(1)爆炸螺栓。爆炸螺栓是可靠且有效的机械固紧装置,具有自身解脱的特点。它由一个带腔的螺栓组成,腔体内含有炸药或可分离药筒。发火时,螺栓将在预设薄弱槽位置处破裂或分离。它一般有两种基本类型,一种是高能炸药型,由高能炸药爆轰产生的冲击波使螺栓破裂或分开,此冲击波超过了螺栓的极限张力强度;另一种是压力型,由螺栓腔内产生的高压作用于腔的端部,使螺栓破裂或分开。

(2)分离螺母。分离螺母是利用高压气体使螺母与螺栓分离的火工装置,它分爆炸螺母和易碎螺母两类。爆炸螺母是由许多扇形螺母瓣(由壳体内壁支撑)、产生气体药管组成的一个圆柱形壳体。当作用时,电爆管作用压力使扇形螺母瓣分开,螺栓移出。易碎螺母是通过2个雷管或传爆药筒的爆炸作用使其沿螺母外缘的预定分离面分离,从而导致螺母中心的压紧螺栓释放。

(3)连接杆分离装置。连接杆内放置膨胀管或装药进行分离。也可以利用电爆管启动扇形瓣固定释放装置,完成连接杆分离。

(4)拔销器。用于飞行器上多种释放操作,作用原理与推冲器相同,不同之处是活塞将伸出的轴端回拉,利用低压气体能量切割低强度销钉,克服剪切摩擦,使活塞缩回,从而释放出载荷。

2. 弹射类

(1)推冲器/驱动器。推冲器用来弹射舱盖、门、整流罩,或用来分离各种结构。对于载荷小于 2250kg 的推冲器,常采用低强度剪切销来固定活塞;当载荷大于 2250kg 时,常使用滚珠销定释放机构。驱动器作用原理与推冲器相同,但只能用于释放机构。

(2)弹伞筒。弹伞筒由短的圆柱形内、外筒组成,可以弹射主伞、引导伞和稳定伞。

(3)爆炸阀门。利用活塞关闭或打开阀门。

3. 切割类

(1)切割器。电爆管启动的切割器用于切割钢丝绳、电缆、耐压软管、燃料管及各种高强度绳索。

(2)线型切割索。线型切割索是用于面切割的切割装置,常用于整流罩分离系统、自毁系统、级间分离系统,主要分为切割索分离和膨胀管分离两类。

4. 推力类

(1)燃气发生器。燃气发生器通常由密封室、点火具、推进剂、喷管组成。作用后产生高压气体,主要用于驱动各种控制装置、伺服装置、机电系统,如给陀螺、流体泵及涡轮起动器提供动力,也可给气球、浮袋及应急滑梯等充气。

(2)小火箭发动机。结构与燃气发生器基本相同,作为卫星旋转稳定火箭、消旋火箭、级间分离火箭、飞船着陆缓冲火箭、弹射座椅火箭包等使用。

6.1.3 航天火工装置基本要求^[4]

尽管航天火工装置多种多样,但其结构大多数属驱动作用型,其余作用则通过索类火工品完成。驱动作用型火工品主要通过活塞/活塞筒结构完成,如推冲器、拔销器、阀门、分离螺帽、分离螺栓、切割器等;索类火工品主要通过柔性切割索分离和膨胀管分离来完成分离功能。

航天系统对火工品设计的基本要求是高可靠性、高安全性、标

准化、无碎片和无污染。

1. 高可靠性

从发射到返回,火工品作用的任何一个程序动作的失效都能引起整个飞行任务的失败。同时由于火工品是一次性作用产品,具有不可维修性,所以其可靠性至关重要。保证高可靠性的设计途径有:

(1)冗余设计。冗余就是通过两条完全独立途径完成同一功能。系统可靠性可通过冗余设计得以提高。例如,在布置降落伞伞衣收口绳切割器时,沿伞衣底边均布 2 只~3 只收口绳切割器,则只要有 1 只切割器动作,就能保证切割伞衣收口绳,使伞衣能够胀满,从而大大提高了伞衣松口这一程序动作的可靠性。

(2)裕度设计。在设计火工装置的装药量时,要按照裕度设计进行验证。例如,在设计隔板起爆器时,用低于和高于 20% 施主装药量的火工装置进行发火试验,保证 80% 施主装药量时能可靠起爆受主装药,而 120% 施主装药量时又能保证隔板不破裂。

(3)采用密封设计。火工装置所用的火工药剂对潮湿比较敏感,受潮后其工作性能将发生变化,因此火工装置应采用密封设计。

2. 高安全性

安全性是指在生产、测试、运输、储存、使用过程中,不发生意外发火或爆炸的性能。要求从测试、发射、运行至返回的全过程,能确保火工品性能稳定,不出现意外失效和对人身及周围环境不安全的因素。要做到这一点,首先要求始发元件钝感,如使用钝感电起爆器,其安全指标为 1A1W5min 不发火,对静电、射频、雷击的作用不敏感。

在设计航天器的供配电系统时,对关键的火工品要求由专用电池供电、正负线悬浮、对壳体绝缘,并设有短路保护连接器。

3. 标准化

航天火工品使用特点是数量大、品种多,但不同的航天系统之间所用火工品有很大的雷同。由于研制一种新的火工品时,需要

进行大量的性能试验和可靠性试验,因此为提高经济效益和缩短研制周期,火工品的设计应实行系列化,实现最大的通用化。只有这样,才能降低成本和易于保证产品的质量和安全性。美国航空航天局已在标准起爆器、标准雷管、标准安全保险结构及标准聚能切割索等方面实现了通用化设计^[5]。

4. 无碎片、无污染

火工品在作用时,往往产生强烈的化学反应,并伴有较高的气体压力。因此,在特殊使用条件下,火工装置的结构必须具有充分的强度,保证不会被炸裂及产生碎片,也不允许有任何反应产物和碎片自由飞出。例如,某些火工装置作用时,会排放出带有颗粒的烟雾,这在高真空空间环境条件下,很容易污染遥感器的窗口或镜头以及太阳能电池片等,导致这些设备的效能降低甚至失效,因此,在卫星的某些部位,要求在其附近作用的火工装置必须是无污染的。

6.2 火工系统首发元件设计

在航天火工系统中,首发火工元件主要有灼热桥丝起爆器、爆炸桥丝起爆器、电雷管、电爆管等火工品。其中,美国航天用灼热桥丝起爆器和电雷管已完成了标准化。

6.2.1 NASA 标准起爆器/雷管设计

1. NASA 标准起爆器设计^[8]

起爆器是火工装置或其他火工元件中使用最为广泛的首发火工品。由于火工装置常常执行与乘员及飞行直接相关的关键任务,因此,起爆器的安全可靠就成为主要关心的因素。为此,美国从“阿波罗”登月工程开始就致力于航天用电起爆器的标准化设计,形成了 NASA 标准起爆器(如图 6.2 所示),成为美国所有载人及非载人航天器用火工装置首要选择的标准产品。

NASA 标准起爆器作为一个基型火工品,主要用于 NASA 标

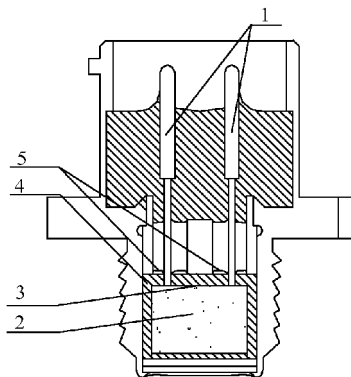


图 6.2 NASA 标准起爆器(I 型)

2—点火药; 3—桥丝; 4—绝缘陶瓷药室; 5—火花隙。

准雷管、拔销器、各种压力药筒及压力药筒基的火工装置上。NASA 标准起爆器(I 型)的壳体由不锈钢制成,为提高插座的气密性和耐压能力,两根插针与外壳用玻璃封接为一体。将 114mg 锆—高氯酸钾点火药(50% Zr、47% KClO_3 、3% Viton-B)装入绝缘陶瓷药室并压到涂有浆状点火药的单桥丝上。为达到较高的可靠性和涂覆均匀性,要求高氯酸钾和锆粉的粒度均为 $3\mu\text{m}$ 。为防静电,每根插针的周围都有一个密封于内部的火花隙。美国几乎所有的航天器都采用过这种标准起爆器。其主要技术指标为:长度为 22mm,最大直径为 18mm;最小发火电流为 3.5A,推荐工作电流为 5A;桥丝电阻为 1.05Ω ;安全指标为 1A1W5min;输出压力为 $4.5\text{MPa}(10\text{cm}^3)$ 。

1988 年,美国完成了 I 型标准起爆器的改进,命名为 NASA 标准起爆器(II 型)。其主要改进是使用真空沉积钛桥,装药壳与沉积钛桥形成一个完整的屏蔽罩,可防止插针与地短路时引起的电弧对装药作用。另外,真空沉积钛桥能降低成本,提高可靠性^[9]。

2. NASA 标准雷管设计^[8]

NASA 标准雷管常用于起爆聚能切割器组件、易碎螺母传爆

药筒、导爆索歧管及阀门驱动药筒。其结构如图 6.3 所示。

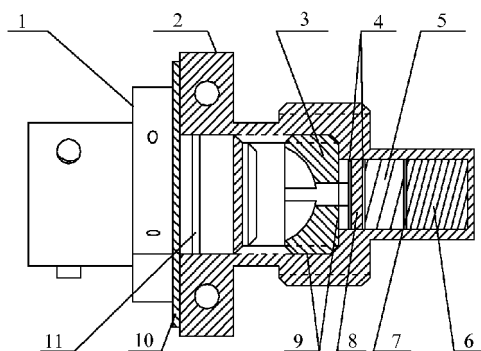


图 6.3 NASA 标准雷管

1—标准起爆器；2—壳体；3—塞套；4—隔片；5—氮化铅；6—RDX；
7—隔片；8—垫片；9—封结；10—垫片；11—O 形环。

它一端与标准起爆器螺纹连接，另一端是雷管装药序列，即将 NASA 标准起爆器旋进一含氮化铅药柱（2 节，总药量 376mg）和黑索今药柱（2 节，总药量 400mg）的不锈钢壳体内，组成 NASA 标准雷管。其主要参数是：长度为 41mm，最大直径为 20mm；输出为 1.14mm（钢凹），底壳速度为 $3.2\text{mm}/\mu\text{s}$ 。

6.2.2 爆炸桥丝起爆器设计^[10,11]

爆炸桥丝起爆器，又称 EBW 起爆器，是航天领域所用钝感程度最高的一类电起爆器（B 类）。它取消了敏感起爆药的使用，通过数千伏放电下低阻桥丝的爆炸直接起爆猛炸药。由于中低电压（650V~1400V）和低电流不能使爆炸桥丝起爆器作用，因此，其本身具有较高的固有安全性。

1. 爆炸桥丝作用原理

与灼热桥丝的热作用机理不同，爆炸桥丝起爆器是利用易于气化的桥丝在强大电流下会瞬间气化成高温高压气体，从而像爆炸一样迅速地向四周扩张，形成强烈冲击波，并以冲击波方式在几微秒内引爆猛炸药。

在金属丝的爆炸过程中,电阻将发生强烈变化。使用 $1\mu\text{F}$ 电容器充电到 2000V 向金属丝放电时,从桥丝两端测量出的电流波形如图 6.4 所示^[12]。电流以近似 $1000\text{A}/\mu\text{s}$ 的速度加热桥丝,直至其气化。由于桥丝受热,其电阻大大增加,在大约 $1\mu\text{s}$ 处,电流下降。在桥丝气化后的几十纳秒内,桥丝爆炸放出热能和冲击波,表现在电流曲线上为出现拐点。之后,电离作用开始。由于离子化气体具有低电阻,所以电流又开始增加。

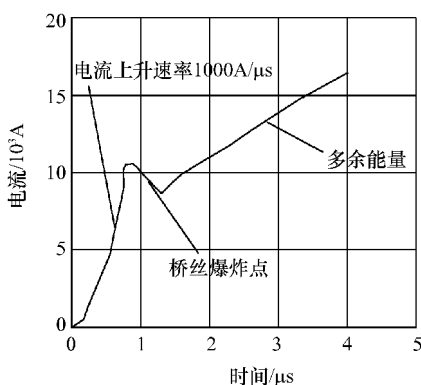


图 6.4 桥丝爆炸电流波形

2. 爆炸桥丝雷管设计

爆炸桥丝雷管的结构与灼热桥丝电火工品类似,主要区别在于桥丝材料选择和装药设计。

(1)桥丝材料及其尺寸。金属材料应选用沸点低、气化热小的金属,如 Au 、 Ag 、 Cu 、 Al 等金属。这些材料气化能的大小顺序为: $\text{Ag} < \text{Al} < \text{Au} < \text{Fe} < \text{Cu} < \text{Pt} < \text{W}$, 但试验发现在相同条件下,各种金属丝的起爆能量顺序为: $\text{Au} > \text{Ag} > \text{Cu} > \text{Al} > \text{Pt} > \text{W} > \text{Fe}$ 。所以,常用的爆炸桥丝材料为 Au 和 Ag , 由于 Au 的安定性好,所以用得较广。实验表明,在爆炸桥丝雷管中,各种桥丝材料在起爆猛炸药时,各有一个有利于炸药爆轰成长的有效体积,如桥丝直径为 0.05mm 时, Au 桥丝的最佳长度为 1.90mm , 电阻

约为 0.022Ω 。

(2)装药设计。由于爆炸桥丝雷管所装猛炸药的起爆属冲击波起爆方式,所以应选用对冲击波敏感的炸药做起爆炸药。在最常用猛炸药中,太安炸药的冲击波感度最高,同时考虑到细结晶比粗结晶药剂的感度高,故起爆炸药选用密度为 $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ 的细结晶太安炸药,而输出装药则选用含粘结剂的高密度黑索今炸药。因为起爆炸药密度较低,不能单独压成药柱,必须首先将起爆炸药直接装入管壳内,再将压成药柱的输出装药装入管壳,保持与起爆炸药接触。

(3)电路设计。由于爆炸桥丝雷管的桥丝电阻较低(通常小于 0.5Ω),消耗于电路部分的能量占很大比例,故外电路设计时要求电阻和电感都要小,否则电路中消耗能量过多,会造成爆炸桥丝雷管发火困难。

3. 爆炸桥丝点火器设计^[13]

爆炸桥丝点火器的基本结构(见图 6.5)与爆炸桥丝雷管相同,区别在于输出装药不同。桥丝仍采用 Au 桥丝,起爆炸药选用超细低密度太安炸药或黑索今炸药,输出装药选用硼—硝酸钾点火药。为保证发火后的密封性,使用了玻璃陶瓷封接。为保证爆炸桥丝点火器对多次静电冲击不受影响,需要在插针与壳体之间设计静电泄放通道,即在插塞外圆柱面上对应于两根插针处各钻一 0.8mm 小孔,与插针联通,以构成静电泄放通道^[14]。在一些改进型爆炸桥丝起爆器中,通过在桥丝上串联一固定的火花隙来防止中低电压($650\text{V}\sim 1400\text{V}$)和低电流通过桥丝,以达到防静电的目的^[15]。

4. 爆炸桥丝起爆器应用

由于爆炸桥丝起爆器具有固有的安全性,所以使用时无需安全保险机构,同时作用时间极短,同步性好,但缺点是体积大,且所需发火能量高,这在一定程度上限制了它的应用。目前该起爆器较多地用于战略导弹武器的起爆和自毁装置等对质量体积要求不严格的地方。

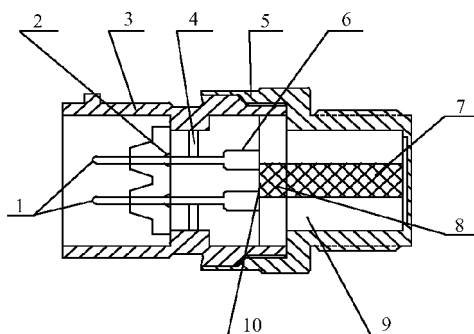


图 6.5 爆炸桥丝点火器

- 1—钨合金插针；2—电极衬垫；3—插塞壳体；4—防静电隙；5—接头；
6—陶瓷绝缘体；7—硼/硝酸钾；8—黑索今；9—套管；10—金桥丝。

6.2.3 电爆管及压力药筒设计^[3]

1. 电爆管

通常只用于航天系统的电爆管是装有推进剂(发射药)的起爆器,常用于在短时间内产生热及高压气体,具有快速增压作用。在体积为 10cm^3 的密闭容腔内,典型电爆管在 $5\text{ms}\sim 10\text{ms}$ 时间内的压力峰值可达 31MPa 。电爆管的作用原理与电发火管基本相似,主要区别在于壳体、插塞、接插方式及密封设计等。装有玻璃烧结插塞的典型电爆管的结构如图 6.6 所示。

它有一个发火件,在壳体内装有压制的发射药作为主装药,发射药产生一定量的气体和所需要的温度。由于气体量较少,所以,用电爆管引爆的火工装置必须在很短的时间内做功,否则其性能将会由于热气体与周围介质的热交换而大大降低。电爆管可理想地用于驱动分离螺母与螺栓、活门、抛射系统、压力泵、开关、活塞装置及切割器。

2. 压力药筒^[8]

航天火工装置的做功往往是通过电起爆的压力药筒(管)的作

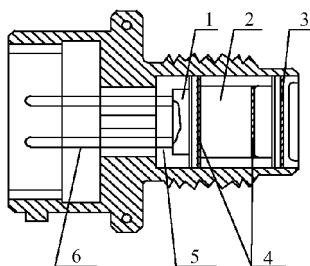


图 6.6 玻璃插塞电爆管

1—起爆药；2—主装药；3—挡板；4—绝缘片；5—插塞；6—插针。

用而实现的。与电爆管类似，压力药筒的主要输出是快速增压作用，所以，广义地讲，电爆管本身是一种小尺寸的压力药筒。典型的压力药筒属积木式结构，前端是发火件，后端是输出装药筒。按其发火输入类型具体又分为两种结构：一种是点火输入（如标准起爆器），后端直接是装药筒（装药多采用推进剂和增压混合物），如图 6.7 所示；另一种是爆轰输入（如导爆索或雷管），后端是爆轰转燃烧隔板式装药，输出药多采用点火药，如图 6.8 所示。

图 6.7 所示是分离螺栓用压力药筒示意图，其作用过程如下：NASA 标准起爆器起爆辅助装药，辅助装药再起爆主装药，主装药驱动分离螺栓的活塞。辅助装药和主装药均采用低氢化钛/高氯酸钾点火药（低氢化钛 30%、高氯酸钾 60%、维通 B5%）。图 6.8 所示是驱动阀门用压力药筒示意图，其作用过程如下：压力药筒从雷管处接收到一个爆轰输入，爆轰冲击引爆隔板中的施主装药，并通过隔板传递到受主装药，受主装药又引燃输出装药。施主装药和受主装药直接压在隔板的两端，这样才能确保冲击波通过隔板传递时不断裂，而保持密闭结构。爆轰通过隔板后将降低为爆燃以起爆输出药。受主装药和施主装药均采用太安或黑索今，输出药选用 $Zr/KClO_4$ 点火药。

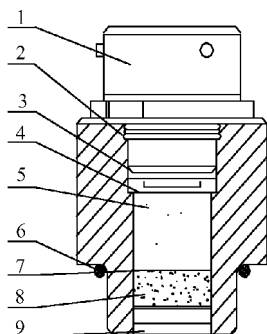


图 6.7 分离螺栓用压力药筒示意图

1—起爆器；2—O 形环；
3—输出孔；4—绝缘片；
5—辅助装药；6—O 型环；
7—绝缘片；8—主装药；9—盖帽。

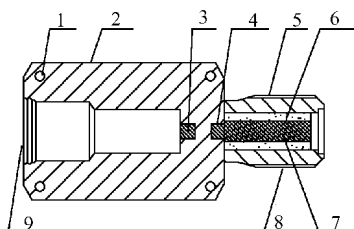


图 6.8 驱动阀门用压力药筒示意图

1—锁定线孔；2—扭转平台；
3—施主装药 RDX；4—受主装药 RDX；
5—螺纹；6—Zr/KClO₄ 药柱；
7—松装 Zr/KClO₄；
8—配件端部；9—雷管。

6.3 火工传爆元件设计

在航天火工系统中,往往需要将首发火工元件的爆轰信号快速或延期传递到各个输出端的火工装置。承担这一传递任务的元件主要有柔性导爆索、延期索及延期雷管。柔性导爆索主要是通过索内装药起到快速长距离传递爆轰的作用,而延期索通过置于延期雷管内起到延期传输爆轰信号的功能。

6.3.1 限制性导爆索设计^[16, 17]

导爆索主要有 4 种类型:柔性导爆索、限制性导爆索(简称 CDF)、屏蔽导爆索和聚能切割索。柔性导爆索又称金属管导爆索,其被覆层为金属,并具有良好的柔性。限制性导爆索是在小药量柔性导爆索的外面再包覆一层内层材料(多用聚乙烯塑料)和多层编织玻璃纤维而成,有的最外层还编有一层不锈钢丝(见图

6.9)。传递爆轰时,这些包覆层能将爆轰产物及碎片封闭在金属壳内而不损坏相邻零部件,具有无污染性,所以限制性导爆索又称无污染导爆索。屏蔽导爆索是在小药量柔性导爆索的外面包覆一层不锈钢管,不锈钢管与导爆索金属壳之间填充聚四氟乙烯塑料,以保持导爆索居中。为增加塑性,不锈钢管要经过退火处理,所以,屏蔽导爆索又称为刚性爆炸传输线,主要用于高温环境。CDF导爆索是最为常用的航天火工系统传输元件。

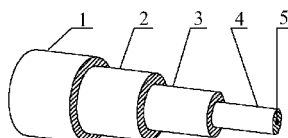


图 6.9 限制性导爆索结构

2—层编织玻璃纤维；2—第 1 层编织玻璃纤维；

—聚乙烯；4—铅壳；5—黑索今混合炸药。

由于限制性导爆索的主要用途是传递爆轰波,因此它必须传爆可靠,爆轰稳定。柔性导爆索装药量(指每米药量)的多少对限制性导爆索的包覆影响很大,装药量越小越有利于包覆,越有利于减小产品的外径和质量,但装药量过小,则会产生爆轰波传播中断等熄爆现象。因此,限制性导爆索的设计关键主要是:第一,如何设计爆轰稳定、传爆可靠的小药量柔性导爆索;第二,如何选择作用可靠、无爆炸产物泄漏的包覆材料及工艺。显然,柔性导爆索的设计是限制性导爆索设计的核心。

1. 小药量柔性导爆索设计

设计小药量柔性导爆索的主要困难是装药量的减少会使药芯直径相应减小。如果药芯直径小于柔性导爆索所处状态下的炸药的临界直径,则会发生熄爆现象,因此如何减少药芯临界直径是设计的重点。

影响炸药装药临界直径的因素有炸药的状态、粒度、装药密度和金属壳材料等。首先,压装炸药的临界直径比铸装或液装的要小得多;其次,炸药粒度越小,临界直径也愈小,而密度增加,临界

直径也将减小;最后,外壳材料作为高能炸药爆轰传递的约束体,其密度和质量是影响临界直径的主要因素(而非外壳材料的强度),所以,外壳材料密度越大,壁越厚,临界直径越小。另外,还要求外壳材料延展性能好,回火温度低,同时与炸药的相容性好。目前的产品使用较多的炸药有六硝基芪、黑索今,外壳材料多选择银和铅铋合金。

由于六硝基芪具有极好的热安定性和真空安定性,所以是最适合航天系统应用的火工药剂。使用六硝基芪作药芯装药,用密度较大的银作外壳材料,用拉伸制造方法进行临界直径的摸底试验结果见表 6.1 所列。

表 6.1 柔性导爆索临界直径试验结果

外径/mm	药芯直径/mm	装药量/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-1}$	试验数/发	失败数/发	可靠度 ($\alpha=0.95$)
0.79	0.43	0.230	815	0	0.9963
0.55	0.30	0.110	210	0	0.9858
0.39	0.22	0.061	94	0	0.9686

从表 6.1 可以看出,使用六硝基芪作药芯装药,用密度较大的银作外壳材料的导爆索的临界直径不大于 0.22mm。

但要达到传爆稳定,就要求传爆速度基本接近于药柱状态的正常爆速。将一根外径为 1.4mm 的 Ag/HNS—II 导爆索拉制成各种尺寸,分别取样,测量爆速,据此判断爆轰传递的稳定性。试验结果见表 6.2 所列。

表 6.2 柔性导爆索传爆稳定性试验结果

外径/mm	药芯直径/mm	装药量/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-1}$	平均爆速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	试验结果	试验数/发
0.39	0.22	0.061	6618	可靠传爆	6
0.55	0.30	0.110	6931	可靠传爆	6
1.07	0.57	0.420	7006	可靠传爆	6
1.28	0.67	0.590	7089	可靠传爆	10

外径位于 $0.39\text{mm} \sim 1.28\text{mm}$ 内的导爆索药芯密度约为 1.65 g/cm^3 。有关资料表明,当 HNS—II 药柱密度为 1.656 g/cm^3 时,其爆速为 7019 m/s 。从表 6.2 所列可知,当银皮导爆索药芯直径位于 $0.55\text{mm} \sim 1.28\text{mm}$ 时,产品的爆速与这一理想速度基本一致。这说明此时产品的爆轰波是以稳定爆速传播的,具有稳定性。因此,产品的设计外径确定为 1.0mm ,而药芯直径确定为 0.55mm 。导爆索在拉索完成后,应及时进行去应力处理,防止在应力集中处产生断裂。

2. 小药量柔性导爆索使用性能试验

使用过程中导爆索往往要经受弯曲、扭曲操作,而生产过程中药芯可能存在裂缝、气泡缺陷,这些都可能对产品的传爆性能构成影响。为此,需要对设计产品进行性能考核试验。

1) 弯曲试验

为确定产品最小弯曲半径,按图 6.10 所示进行了弯曲试验。将导爆索试样沿一根芯棒螺旋密绕 3 个 360° ,然后展开伸直,如此分别重复 3 次、2 次和 1 次,然后进行传爆性能试验。其结果见表 6.3 所列。

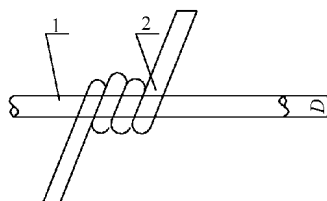


图 6.10 导爆索弯曲试验示意图

1—芯棒; 2—MDF。

弯曲试验结果表明,严重的弯曲对产品的传爆无影响,但对爆速有影响。当弯曲半径为 4.4mm 时,对爆速基本上没有影响。

2) 导爆索扭曲试验

将一根 400mm 长的导爆索一端固定,另一端沿其轴线分别扭转 130 圈(每 360° 为一圈)、50 圈、20 圈和 10 圈后进行传爆试

验。

表 6.3 导爆索弯曲试验结果

试样	芯棒直径 /mm	弯曲重复 次数/次	弯曲后外观描述	平均爆速 /m·s ⁻¹	样本总数 /发
试样 1		未弯曲	无裂纹、裂缝、起皱现象	6981	10
	2.00	3	无裂纹、裂缝、起皱现象	6811	10
	8.81	3	无裂纹、裂缝、起皱现象	6902	10
试样 2		未弯曲	无裂纹、裂缝、起皱现象	7035	10
	8.81	2	无裂纹、裂缝、起皱现象	6941	10
	8.81	1	无裂纹、裂缝、起皱现象	7043	10

其结果见表 6.4 所列。

表 6.4 导爆索扭曲试验结果

试样	扭转圈数/圈	扭曲后外观描述	平均爆速 /m·s ⁻¹	样本总数/发
试样 1	0	无裂纹、裂缝、起皱现象	6997	15
	130	无裂纹、裂缝、起皱现象	6316	2
	20	无裂纹、裂缝、起皱现象	6829	10
	10	无裂纹、裂缝、起皱现象	6930	10
试样 2	0	无裂纹、裂缝、起皱现象	6981	10
	50	无裂纹、裂缝、起皱现象	6601	10

扭曲试验结果表明,严重扭曲对产品的爆速影响较大,但不影响产品的传爆性能。当扭曲圈数为 10 圈时,扭曲对产品爆速的影响不明显。实际使用过程中,一般不会出现扭曲 10 圈的极端情况,所以可以认为生产和使用过程中产生的扭曲对产品性能无影响。

3) 导爆索间隙传爆试验

在导爆索使用过程中,当严重折弯或端端对接时,药芯内部可能出现断裂现象,这种缺陷在生产过程也有可能出现。为了解药芯断裂对传爆性能的影响,按图 6.11 所示进行了间隙传爆试验,

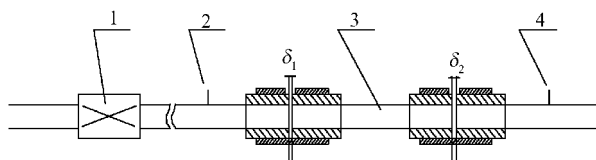


图 6.11 导爆索间隙传爆试验

1—电雷管；2—电离探针 1；3—MDF；4—电离探针 2。

结果见表 6.5 所列。

表 6.5 导爆索间隙传爆试验结果

间隙 δ_1 /mm	间隙 δ_2 /mm	平均爆速 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	传爆结果
0.04	0.26		δ_2 处断爆
0.04	0.08	6919	传爆
0.08	0.10	6782	传爆
0.10	0.14		δ_2 处断爆
0.12	0.12		δ_1 处断爆

导爆索间隙传爆试验结果表明：当两段导爆索的端面间隙不大于 0.10mm 时，爆轰波都能通过间隙传播下去，且基本上对爆速无影响；但当间隙大于 0.10mm 时，间隙将造成爆轰能量损失而导致爆轰波中断。这些都表明导爆索的间隙传爆能力极其有限。这些实验实际上模拟了导爆索端端对接时的情况，与实际药芯中的空气间隙状态不完全一致。所以，有关药芯中的空气间隙缺陷对传爆性能的影响还需进一步试验。

4) 模拟气泡试验

在生产过程中，假如导爆索药芯也有可能出现较大的空气间隙，考虑到导爆索间隙传爆试验与实际药芯中的空气间隙状态不完全一致，所以在一段导爆索上间隔 150mm 分别钻直径 0.24mm 和 0.40mm 的两个孔，进行模拟气泡试验，结果见表 6.6 所列。

表 6.6 导爆索模拟气泡试验

D_1 /mm	D_2 /mm	试验数 /次	断爆数 /次	断爆位置	平均爆速 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
0.24	未钻孔	2	0		7016

0.24	0.40	10	6	D_2 处	7031
------	------	----	---	---------	------

导爆索模拟气泡传爆试验结果表明,空气气柱直径为 0.24mm 时,不影响产品的传爆性能,且爆速不受影响;当空气气柱直径为 0.40mm 时,空气气柱将造成爆轰能量损失而导致爆轰波中断。实际生产过程中,药芯一般不会出现尺寸为 0.24mm 的孔隙,所以不会影响产品的传爆性能。

3. 限制性导爆索包覆设计

柔性导爆索设计确定后,限制性柔性导爆索的设计主要是包覆设计。包覆设计一般采用实验方法进行。先将外径为 1.0mm 的柔性导爆索包覆一层聚乙烯塑料,然后逐层编织。在不同编织层数时进行引爆试验,直到爆炸产物被完全包住为止,如对柔性导爆索逐层编织包覆到外径为 6mm 时,导爆索爆炸后无爆炸气体、爆炸残渣等爆炸产物溢出,且聚乙烯层未损坏。这种限制性柔性导爆索无污染,完全符合航天火工系统使用的要求。有文献报道对外径为 1.0mm 的 Ag/HNS—II 导爆索用 E 型玻璃纤维编织到 16 层时,就达到了限制性导爆索的要求,且质量轻^[18]。

6.3.2 延期索及延期雷管设计

在航天火工系统中,延期索通过置于延期雷管内起到延期传输爆轰信号的功能。与柔性导爆索类似,延期索表面光滑、柔韧性好,可弯曲成一定的形状,直径小,具有良好的防潮能力,可用火帽点燃。延期索的基本结构是金属管内装入延期药,其设计内容主要包括金属管材料的选择、延期药的选择、加工方法及金属管包覆材料。

1. 延期索设计

1) 金属管材料选择

能用作延期索金属管的材料较多,如铝、铜、银、铅等,但铝、铜管加工后会硬化,使用前必须在高温下退火以恢复其挠性,而银管价格较贵。所以金属管材料一般选用延展性好、与药剂相容性好

的铅铋合金。

2) 延期药选择

对延期药的要求是火焰感度好、传火连续、延时准确、点火能力强。能用作延期药的组分较多,可根据不同需要进行选择。航天火工系统要求的延期较长,所以主要选择燃速在每秒几毫米至几十毫米的延期药。目前常用的药剂有钨系延期药和硼系延期药。

钨系延期药是以钨为可燃组分的延期药,主要组分有可燃剂钨粉、氧化剂高氯酸钾和铬酸钡等,通常是燃速较慢的一类延期药。在反应初期,主要是由钨粉与高氯酸钾反应,当反应达到一定温度后,钨粉与铬酸钡反应。影响延期药燃速的主要因素有钨粉粒度、药剂配比、装药密度、延期索直径、金属管包覆层及弯曲半径等。一般而言,配比相同时,当装药密度或弯曲半径减小时,延期索燃速将加快;延期索直径和包覆层增加时,延期索燃速也加快。但对延期药燃速起主要作用的是钨粉粒度、铬酸钡粒度和延期药配比^[19]。试验结果分别见表 6.7 和表 6.8 所列。

表 6.7 钨粉粒度对延期索燃速的影响

钨粉粒度/ μm	钨粉含量/%	平均燃速/ $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	试验数/发
2.64	65	12.58	50
4.08	65	9.10	10

表 6.8 药剂比对延期索燃速的影响

组分含量/%				平均燃速/ $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	试验数/发
钨粉	铬酸钡	高氯酸钾	硅藻土		
55	35	5	5	7.8	30
50	40	5	5	6.5	20

试验结果表明,钨粉越细或钨粉含量越大,延期索燃速越快。所以,钨粉粒度增大或铬酸钡粒度降低都能降低燃速,提高延期量,但钨粉越细,延期精度越高,所以,调节燃速应主要通过调节钨粉的含量。用于延期索的钨系延期药应注意以下几点:第一,钨粉

小于 30% 或高氯酸钾小于 5% 时, 难以点燃; 第二, 钨粉大于 50%, 高氯酸钾大于 5% 时, 延期药的发热量和燃速过高, 将会使金属管熔化; 第三, 钨粉大于 30%, 高氯酸钾大于 20% 时, 由于产气量显著增大, 燃速增加, 金属管膨胀, 延期不稳定。所以, 适宜的配比是钨粉 30%~50% (粒度 $3.5\mu\text{m}$)、高氯酸钾 10% (粒度小于 $15\mu\text{m}$)、硅藻土 5% (粒度小于 $15\mu\text{m}$)、铬酸钡 55%~35% (粒度小于 $1.5\mu\text{m}$, 易分散)^[20], 其对应的延期索燃速小于 8mm/s, 精度达 2%。

与钨系延期药相比, 硼系延期药的燃速调节范围较大。硼系延期药的主要成分为硼粉和四氧化三铅。为方便装药, 另外加 1% 的虫胶漆粘合剂造粒。在延期索外径为 1.64mm 时, 不同配比的燃速试验结果见表 6.9 所列^[21]。

表 6.9 不同配比的硼系延期药延期索燃速试验结果

B : Pb_3O_4 (质量比)	B 和 Pb_3O_4 粒度/(目/英寸)	试验数/发	燃速/ $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$			备 注
			μ_{max}	μ_{min}	均值	
1 : 99	200~300	10	4.7	4.1	4.21	2 发熄灭
2 : 98	200~300	12	8.8	8.1	8.41	
2 : 98	400 以下	12	9.5	8.9	9.22	
3.9 : 96.1	200~300	12	20.6	19.7	20.46	
3.9 : 96.1	400 以下	12	21.7	20.9	21.31	
7 : 93	200~300	20	40.9	37.7	39.36	金属管破裂
10 : 90	200~300	20	53.3	46.2	49.18	金属管烧熔

试验结果表明, 如果硼粉与四氧化三铅的配比稍加改变, 燃速变化就很大。当硼粉比例增加时, 燃速加快。当硼粉含量低于 1% 时, 将出现断燃; 当硼粉含量高于 10% 时, 金属管将出现烧熔。而原材料粒度愈小, 其表面积愈大, 燃速也愈快。另外, 粘合剂外加量对燃速影响较大, 虫胶漆除造粒功能外, 还能起到钝化作用, 即能降低延期药的感度。由于虫胶往往杂质过多, 会给燃速带来

不确定性,所以,使用前必须过滤及低温沉淀除去杂质和蜡质。虫胶外加量对燃速影响见表 6.10 所列。

表 6.10 虫胶外加量对燃速影响

虫胶外加量 /%	试验数/发	燃速/ $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$			备 注
		ℓ_{max}	ℓ_{min}	均值	
0	20	199.6	178.1	190.13	B : $\text{Pb}_3\text{O}_4 = 3.9 : 96.1$, 产品外径为 2mm
0.5	20	97.1	80.3	89.42	
1.0	20	24.6	19.2	22.17	
1.5	20	16.3	14.1	15.19	

试验结果表明,延期药的燃速随粘合剂外加量的增加而显著下降。另外,当产品具有包覆层时,由于包覆层能抑制燃烧过程中金属管的膨胀,从而使燃速略有提高;当产品直径大时,在适当范围内,产品燃速随直径的增加也略有提高。

3) 延期索加工工艺

延期索药芯直径应大于 0.7mm。为了使金属管能有足够的强度,药芯直径应不超过产品外径的 70%。

延期索的加工工艺基本上分装填、辊压、拉拔、包覆等步骤。首先,在具有满足要求的直径和长度的壁厚均匀的金属管内,振动装填延期药;然后将装有延期药的金属管敲打封口后,在辊压机上将端头管径缩小到适当程度,再用拔丝设备将管子通过不同规格的拉模,拉伸到所需直径;最后,在金属管外面编织涤纶数层,以增强其耐磨、耐热性,防止金属管损伤,抑制燃烧过程中金属管的膨胀。

2. 延期雷管设计^[22]

在火箭级间分离及火箭与卫星分离系统中,往往要求几百毫秒到几百秒的延时传爆,这通常是通过将不同长度的延期索插入延期雷管内部,实现不同延期的效果。延期雷管的基本作用过程是:限制性导爆索的爆轰输出使火帽起爆,火帽又使点火药、延期索燃烧,最后,延期索引燃输出端的起爆药,完成燃烧转爆轰后,输出端输出药再起爆下一限制性导爆索,以达到在传输线延期传输

爆轰信号的功能。

6.4 隔板起爆器设计

航天火工系统的爆轰信号经传输元件传输后,到达各个输出终端来完成点火、起爆、切割等功能,其对应的输出终端装置也主要是隔板起爆器、非电爆炸螺栓、切割索及其他非电终端火工装置,其中以隔板起爆器应用数量最多。由于隔板起爆器密封性能极好,所以,不仅广泛用作固体和液体火箭发动机的点火装置(是防止发动机燃烧室气体回漏到用过的点火器的最好的密封),也可用作卫星整流罩的无污染分离的起爆器,或用于载人宇宙飞船舱段间解锁机构和分离机构,同时也能用作多个同步性高的起爆装置。

6.4.1 隔板起爆器设计技术^[23,25]

隔板起爆器是通过金属隔板传递冲击波能量的火工品。它主要由施主装药、受主装药和带有隔板的壳体等3部分组成(见图6.12),其作用过程是金属隔板一侧的施主装药爆炸所形成的冲击波通过金属隔板的衰减传递后,引爆另一侧的受主装药,再经过内部传火传爆系统,完成预定的功能。隔板起爆器主要特点是能长时间地耐高压高温而不穿孔,保持了结构的密封和完整,防止气体反向泄漏。隔板起爆器主要用于固体火箭发动机的非电点火和其他各种非电起爆装置。作用时,隔板点火器外壳完整无损,可保持

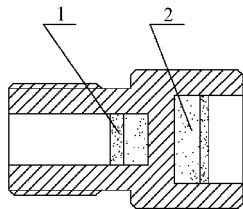


图 6.12 隔板起爆(点火)器结构示意图

1—受主装药; 2—施主装药。

点火腔的密封性;点火器可露在火箭发动机外,便于检查;可用燃气、导爆索等非电刺激激发,而不必设置电点火源,且不受静电、射频影响,具有安全性。

1. 隔板传爆机理分析

隔板传爆原理如图 6.13 所示。施主装药爆压为 P_E ,冲击波在施主装药和隔板分界面 X_0 上的压力为 P_0 ,由于隔板的冲击阻抗大于施主装药的冲击阻抗,所以 $P_0 > P_E$,冲击波通过隔板时受到衰减,到达隔板与受主装药界面 X_1 时下降为 P_1 ,最后以 P_2 压力传入受主装药。受主装药能否被引爆,决定于 X_1 界面的冲击波大小。隔板越厚,对冲击波的衰减越大,受主装药越不容易被引爆;反之,隔板越薄,对冲击波的衰减越小,受主装药越容易被引爆。但这并不是说隔板越薄越好,隔板太薄时,将会在冲击波压力 P_0 下被完全击穿。所以,隔板起爆器的设计实质上是在受主装药可靠起爆与隔板可靠完整之间寻求平衡。可靠起爆是指在置信水平 0.95 时,受主装药被引爆的可靠性大于 0.9999;同时隔板不被击穿的可信性也为 0.9999,并且证明这两种可靠性是相容的,而非相互矛盾。

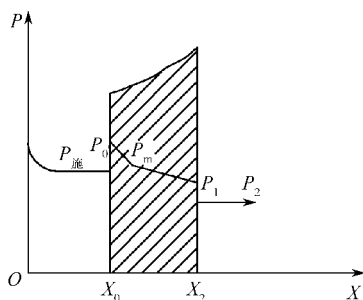


图 6.13 隔板传爆过程中的压力变化

2. 隔板起爆器工程设计方法

要同时满足可靠起爆与隔板可靠密封的要求就必须使可靠起爆得出的最小隔板厚度大于隔板可靠密封的最大厚度,否则其中之一将会出现不可靠情况。从工程设计角度而言,最佳隔板范围

主要通过变隔板厚度法和变药量法试验获得。

1) 变隔板厚度法

变隔板厚度法是在施主装药和受主装药状态(几何尺寸、装药种类、压药压力等)不变情况下,通过改变隔板厚度来得到最佳值。变隔板厚度法一般需做两组试验:可靠传爆试验(第一组)和不击穿实验(第二组)。按升降法由第一组求出 99.99% 传爆时的隔板厚度 h_1 ; 由第二组求出 99.99% 不击穿的隔板厚度 h_2 , 如果 $h_1 > h_2$, 则取二者的中值为设计隔板最佳值。如图 6.14 所示, 某状态下, 99.99% 传爆时的隔板厚度 h_1 为 3mm, 99.99% 不击穿的隔板厚度 h_2 为 1mm, 则产品的隔板最佳值应设计为 2mm。但是, 假如出现 $h_1 < h_2$, 那么说明受主状态选择不合理, 需要重新调整。

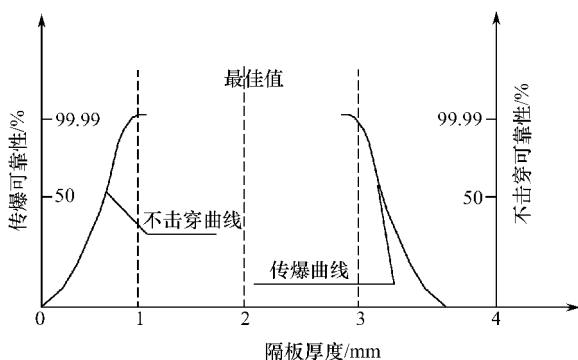


图 6.14 变隔板厚度法下隔板相容曲线

2) 变药量法

从作用目的而言,隔板起爆器主要是完成受主装药的引爆。从隔板传爆机理分析可知,受主装药能否被引爆的关键是隔板厚度和施主药量。隔板越薄,对冲击波的衰减越小,受主装药越容易被引爆。而当隔板厚度一定时,施主药量越大,冲击波强度衰减越小,受主装药同样也越容易被引爆。所以,可以采用固定隔板厚度和受主装药状态来确定施主药量及状态,即变药量法。变药量法同样需要做两组试验:可靠传爆试验(第一组)和不击穿试验(第二组)。按升降法由第一组求出 99.99% 传爆时的施主药量 W_1 ; 由

第二组求出 99.99% 隔板不击穿的施主药量 W_2 , 如果 $W_2 > W_1$, 则取二者的中值为设计施主药量最佳值。但当 $W_2 < W_1$ 时, 如图 6.15 所示, 在某状态下, 99.99% 传爆时的施主药量 W_1 为 40mg, 99.99% 不击穿的施主药量 W_2 为 30mg, 这两种药量出现不相容, 说明受主状态或隔板厚度的选择不合理, 需要重新调整。

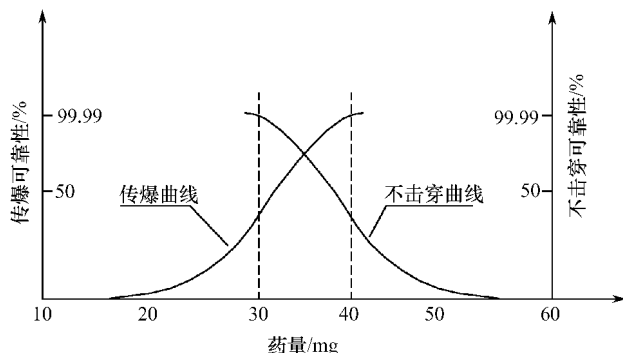


图 6.15 变药量法下药量不相容曲线

3) 工程设计方法

变隔板厚度法首先要确定施主装药和受主装药状态, 然后通过试验求出隔板最佳值。但在实际试验时, 由于不知道隔板最佳值范围, 从而需要加工许多种不同隔板厚度的隔板起爆器, 耗时费力。相比而言, 变药量法就较为简单, 首先固定隔板厚度和受主装药状态后, 就相当于产品的基本状态已确定, 只要试验求得最佳施主药量即可。所以, 一般情况下, 应尽量采用变药量法。但当隔板起爆器的施主端有特殊要求时, 则必须使用变隔板厚度法, 比如“土星”号宇宙飞船级间 18 对分离火箭发动机用的隔板起爆器发火后, 要求输入端的紧固螺帽能固定住导爆索, 这就需要将施主装药控制到最小, 因此, 它的设计只能采用变隔板厚度法进行^[24]。

3. 隔板起爆器设计概述

1) 输入输出设计

隔板起爆器的输出形式有爆轰和燃烧两种, 前者用来引爆导

爆索,后者用来点燃固体发动机药柱(具体又有点火和延时点火两种形式,通常又称之为隔板点火器)。输入端为导爆索的隔板起爆器主要用作航天火工系统的输出元件(本节重点讨论),通常用于完成发动机的非电点火及其他各种非电火工装置的起爆;输入端为电信号的隔板起爆器主要作为独立元件来实现各类发动机(特别是发射时)的电点火。

2) 装药尺寸设计

从爆轰理论上讲,施主孔径只要大于施主装药的临界直径即可,但从机械加工方便程度和保证引爆可靠两方面考虑,施主孔径一般取 $4\text{mm}\sim 6\text{mm}$ 为宜。通过隔板传递的冲击波波阵面是球面形状,对受主装药起作用的仅是球面的中心部分,因此,受主孔径可以比施主孔径小些。从力学角度看,受主孔径越小,抗压差能力(即隔板抗破裂能力)就越强,但受主孔径不能小于受主装药的临界直径。一般来说,受主孔径取 3mm 较为合适。

3) 隔板形状设计

隔板形状直接影响隔板传爆的可靠性和隔板传爆后的完整性。典型的 3 种隔板形状如图 6.16 所示,其中 a 型的施主孔底和受主孔底均采用平底(图 6.16(a));b 型的施主孔底为平底,而受主孔底为球底(图 6.16(b));c 型的施主孔底和受主孔底均为球底(图 6.16(c))。3 种隔板形状中,隔板抗压差能力是 $a\text{型} < b\text{型} < c\text{型}$,可靠引爆受主装药的施主药量也是 $a\text{型} < b\text{型} < c\text{型}$ 。c 型隔板的抗压差能力最强,但由于施主孔为球底,施主装药爆轰后产生的冲击波是发散的,能量损耗大,故所需的施主药量也最大,有可能将输入端的导爆索接头打坏;a 型隔板的受主孔径与施主孔径相同,由于应力集中的缘故,其抗压差能力最弱;b 型隔板的抗压差能力居中,因施主装药孔底为平底,爆轰波发散较少,能量较为集中,故所需的施主药量相应少些。所以,b 型隔板形状兼顾了施主药量和隔板的抗压差能力两方面,是最佳的隔板形状。

4) 药剂

隔板起爆器施主装药常用氮化铅、太安两层装药,氮化铅的作

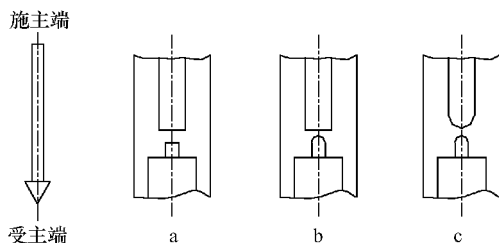


图 6.16 几种隔板形状

用是引爆太安,这种装药结构适合于爆轰输出;有时也可以直接用氮化铅作施主装药,这种装药结构适合于爆燃输出。受主装药的冲击波感度直接关系着隔板起爆器的可靠性,其冲击波感度应等于或高于施主装药。对冲击波较敏感的药剂如低密度超细太安、氮化铅、针刺药等都适合作受主装药,但为保证隔板稳定性,隔板起爆器装药设计原则是尽量减小隔板两边的压力差。所以,隔板起爆器中隔板两边的装药种类往往相同,如太安—太安、氮化铅—氮化铅等。

5) 隔板材料设计

由于隔板起爆器的工作环境是较长时间处于高温状态,当装药采用猛炸药时,相应的冲击波强度较大,因此,壳体材料应具有较高的抗拉强度 σ_b 、冲击韧性 a_k 和良好的高温机械性能,如耐高温、耐高压不锈钢材料。几种不锈钢材料性能见表 6.11 所列。

表 6.11 几种不锈钢材料性能

材料牌号	$\sigma_b / \text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$		$a_k / \text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$		试样状态
	室温	500℃	室温	500℃	
1Cr11Ni2W2MoVA	1225	882	106	113	1000℃ 正火, 680℃ 回火, 1000℃ 淬火油冷, 560℃ 回火
Cr17Ni2	1084	798	52	127	1050℃ 淬火油冷, 550℃ 回火
2Cr13	706	431	118	245	1020℃ 空冷, 720℃ 回火
1Cr18Ni9Ti	708		441		1050℃ 空冷或水冷

从表 6.11 中可以看出,1Cr11Ni2W2MoVA 材料在室温、高温下的抗拉强度和冲击韧性值都比较理想,它属于复杂合金化的 12% 铬型热稳定不锈钢,由于填加了 W、Mo、V 等强化元素,所以,其高温强度、持久强度和蠕变极限都很高,同时具有良好的冲击韧性,最适合作隔板起爆器的材料。而使用 Cr17Ni2 作隔板起爆器材料的一些产品,曾出现过个别批整批隔板炸裂现象,后改用 1Cr11Ni2W2MoVA 材料彻底解决了隔板炸裂问题^[26]。

6.4.2 无起爆药隔板点火器设计^[25]

一般情况下,电能起爆的隔板点火器中通常装有起爆药,虽然也能满足 1A1W5min 不发火的钝感要求,但用于发动机点火时,仍需要隔离保险机构。在实现火箭级间分离、抛放、控制等作用时,用于发动机、小火箭、弹射筒等火工装置的点火往往是直列式点火。根据安全性要求,必须采用无起爆药的隔板点火器。所以说,作为非电传爆系统中的一个重要部件,无起爆药式隔板点火器具有普遍适用性。

与隔板起爆器比较,非电传爆系统中的无起爆药隔板点火器有 3 个特点:一是导爆索输入;二是无起爆药装药;三是点火输出。因此,其设计的关键技术也对应应有 3 点:第一,导爆索输出接头中无起爆药装药,即导爆索能直接可靠引爆猛炸药;第二,要同时保证可靠传爆与作用后的隔板完整性。因为受主猛炸药装药的起爆感度较低,所以施主药量必须相应增大,这无疑增加了保证隔板完整性的难度;第三,保证无起爆药隔板点火器输出的是火焰而非爆轰,且不能把输出点火药打出点火器,若受主猛炸药引爆产生的爆轰波未及时衰减,可能会在输出点火药燃烧之前将其打出点火器壳体,所以受主装药必须在爆轰转爆燃后,才能可靠点燃输出点火药。

1. 导爆索输出接头设计^[27]

在非电传爆系统中,传输爆轰的柔性导爆索的输出能量较小,通常无法直接起爆隔板点火器的施主猛炸药装药。所以,需要设

计导爆索输出接头(含一扩爆管)来增大导爆索的能量输出。其设计包括装药设计和结构设计两方面。

1) 导爆索输出接头结构设计

柔性导爆索引爆输出接头内猛炸药的问题,实际上也是爆轰波的界面传递与成长问题。爆轰波从一种介质通过界面传递到另一种介质时,将会存在能量损失,因此,需要首先保证导爆索接头与扩爆装药之间无间隙;另外,径向强约束也有利于爆轰成长。目前,无起爆药的导爆索输出接头结构主要有直插式结构、内锥套结构(图 6.17)。直插式(图 6.17(a))结构简单,并能保证导爆索药芯端面与接头装药之间无间隙,减少了爆轰波界面传递时的能量损失,因而具有良好的性能;内锥套结构(图 6.17(b))采用锥孔过渡方法,有利于爆轰成长,但不能从根本上保证导爆索药芯端面与接头装药的紧密贴合。综合这两种结构的优点,得到了最佳的无起爆药的导爆索输出接头结构,如图 6.17(c)所示,其中装药直径为 3mm,内锥套采用铜材料,加强套管采用不锈钢材料。这种结构与美国航天用导爆索传爆接头结构类似。

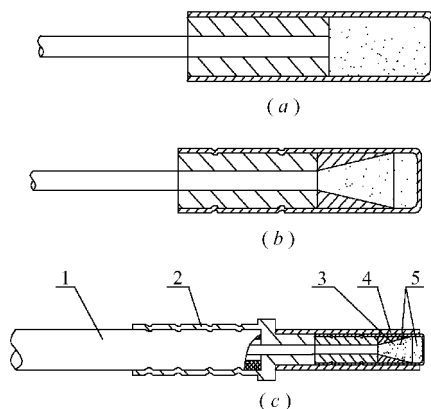


图 6.17 无起爆药限制性导爆索接头形式

1—导爆索; 2—接头套管; 3—内锥套; 4—加强套管; 5—接头装药。

2) 导爆索输出接头装药设计

炸药的冲击波感度越高越容易被导爆索引爆。在猛炸药中,较为敏感的是太安,其中细结晶太安(细太安)的冲击波感度最高。由于细太安的感度较高,其压药压力对传爆影响不大,故推荐使用药量为 40mg,压药压力为 68MPa,药剂密度为 $1.65\text{g}/\text{cm}^3$ 。裕度实验证明,导爆索输出接头装药采用细结晶太安有很高的传爆可靠性。美国航天用导爆索传爆接头采用压药压力为 220MPa 的 HNS-1 药剂,锥孔装药和加强帽装药装药量分别为 35mg 和 65mg^[1]。

2. 隔板点火器设计

1) 总体结构设计

隔板点火器结构设计参数包括材料设计、装药孔径、隔板形状设计、隔板厚度设计和装药设计等 5 部分,具体为:第一,选用高温下抗拉强度和冲击韧性较高的 1Cr11Ni2W2MoVA 不锈钢作隔板点火器壳体材料,以保证较长时间耐高温耐冲击而不出现破裂;第二,施主装药孔径取 4mm,受主装药孔径取 3mm,这两种孔径的匹配有利于增强隔板的抗压差能力;第三,隔板形状采用图 6.16 (b)所示的 b 型形状,即施主孔平底,而受主孔球底,兼顾了施主药量和隔板的抗压差能力两方面;第四,选用厚隔板,由于无起爆药隔板点火器的施主装药和受主装药均采用猛炸药,冲击波强度较大,所以选用厚度为 2.4mm 的隔板;第五,施主装药和受主装药均采用较敏感的太安猛炸药,既便于输入端的导爆索引爆施主装药,又便于受主装药被通过隔板的冲击波引爆。受主装药最好采用冲击波感度更高的超细太安,且应选取较低的装药密度,如密度 $1.1\text{g}/\text{cm}^3$,对应压药压力为 7.8MPa。低密度受主装药被引爆时,只能产生爆燃,无法形成爆轰,这有利于点燃输出点火药。同时,低密度受主装药冲击波感度较高,也有利于提高传爆可靠性。

2) 最佳施主药量确定

在总体结构参数设计确定后,采用变药量法试验确定最佳施主药量。试验装置图如图 6.18 所示。试验数据见表 6.12 所列。

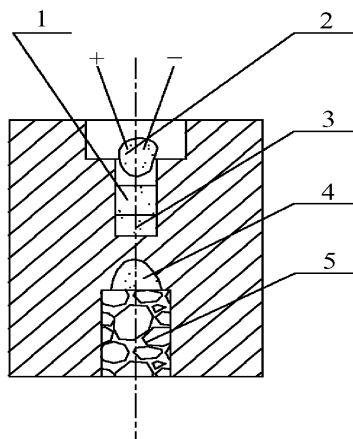


图 6.18 确定施主药量的变药量法试验装置

1—氮化铅(50mg,压药压力 80MPa); 2—发火头;

3—太安(变量,压药压力 80MPa); 4—超细太安
(15mg,压药压力 7.8MPa); 5—示证棉。

表 6.12 变药量法试验数据

隔板厚 δ/mm	受主装药		施主引爆装药		施主装药(太安,压药压力 80MPa)	
	细太安 /mg	压药压力 /MPa	氮化铅 /mg	压药压力 /MPa	50%传爆 时药量/mg	99.99%传爆时药量 ($C=0.95$)/mg
2.40	15	7.8	50	80	24.1	46.5

试验还求得隔板最大不击穿药量为 180mg, 所以, 只要施主药量在 46.5mg~180mg 之间, 均可满足传爆可靠且保证不击穿隔板。设计施主药量确定为 80mg。受主药量在可靠点燃输出点火药的前提下, 应尽量减少, 以避免形成爆轰。所以, 设计受主药量确定为 15mg。

3) 裕度试验

采用两种隔板厚度($h \pm 0.25h$)来进行设计裕度试验。当隔板厚度为 $1.25h$ 时, 要保证传爆可靠; 当隔板厚度为 $0.75h$ 时, 要保证隔板不击穿。两组实验各做 10 发进行裕度试验。

3. 爆炸转点火输出设计

隔板点火器的爆炸转点火输出设计包括装药设计和挡药板设计两方面,它们都对爆炸转点火输出有影响。

1) 爆炸转点火装药设计

隔板点火器中,受主装药爆炸转点火输出设计有 3 种基本形式:第一,猛炸药—衰减室(空气隙)—点火输出药,这是国外早期产品的设计方案,结构复杂,产品较长;第二,低密度猛炸药—点火输出药;第三,直接装填冲击点火性能好的烟火输出药,如低氢化钛点火药 $\text{TiH}_{0.65}/\text{KClO}_4$,这种结构最简单,但在有些场合(如快速点火)不适应。当直接装填其他点火药时,可靠传爆的施主装药量将大大增加,造成与隔板点火器输入端相连的导爆索接头容易被打坏。所以,爆炸转点火输出设计使用低密度猛炸药—点火输出药结构较为合适。

为了使受主药的爆轰迅速而可靠地转化为点火输出药的爆燃,有时也采用在受主药与点火输出药之间加一层起过渡作用的传火药的方法。传火药爆速低于受主药,但能可靠点燃点火输出药。在一些小型化的火工装置(如燃气发生器、固体小火箭等)中,已经取消了点火药盒的使用,而采用了加大隔板点火器中点火输出药量的方法。输出点火药爆燃产生的高温高压气体和灼热药渣能可靠地将火工装置中的固体推进剂药柱引燃。某型号燃气发生器用隔板点火器采用了 120mg 的 3 号小粒黑火药作传火药和 8g 的 2 号大粒黑火药作点火输出药后,其输出可在容腔 100ml 内可产生 24MPa 的峰值压力(12ms 内)^[28]。

2) 挡药板设计^[28]

隔板点火器爆炸转点火输出设计中的一个重要内容是挡药板的设计。挡药板主要的作用是防止点火输出药在还没有燃烧之前就被打出点火器。但挡药板的阻挡作用不能过强,否则会使点火输出药产生爆轰而非爆燃。因此,就必须在挡药板上进行开孔。开孔数目及孔径按压力要求由试验具体确定。几种不同孔洞数目的挡药板如图 6.19 所示。压力试验表明:挡药板具有 1 个 $\phi 17\text{mm}$ 孔时,基本上起不到阻挡作用,有许多点火药被打出;挡药

板具有 5 个 $\phi 3\text{mm}$ 孔时,上升到峰值压力的时间仅 5ms ,黑火药接近爆轰,压力曲线极陡,属于冲击加压,不适合点燃固体推进剂药柱;挡药板具有 9 个 $\phi 3\text{mm}$ 孔时,压力曲线也较陡;而挡药板具有 12 个 $\phi 3\text{mm}$ 或 $\phi 4\text{mm}$ 孔时,上升到峰值压力的时间为 20ms ,有利于固体推进剂药柱的点火。

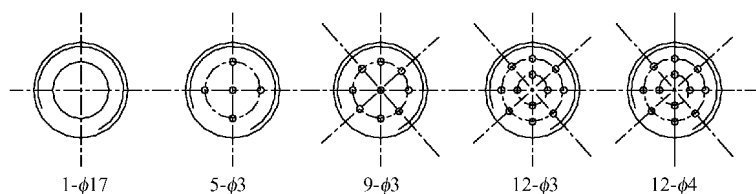


图 6.19 不同孔洞数目的挡药板

6.4.3 隔板延期起爆(点火)器设计

在航天器的抛撒火工系统中,作用程序通常是先切割后抛撒。由于切割和抛撒序列的启动使用了同一首发电发火元件,所以就需要在抛撒序列中使用一隔板延期管来完成切割与抛撒之间的延期(如 $150\text{ms}\sim 200\text{ms}$)功能。另外,在导弹起飞过程中,将隔板延期点火器置于助推发动机与主发动机之间,当助推发动机点火后,其高温高压燃气引爆隔板延期点火器的施主装药,施主装药爆炸产生的冲击波通过隔板后再引燃受主装药,受主装药作用后将延时装药点燃并经延期后喷出火焰,点燃点火药盒,最终点燃主发动机装药。

1. 隔板延期管设计^[29]

隔板式延期管主要由 3 部分组成:隔板点火器组件、延期管组件和接力管等,其结构如图 6.20 所示。隔板延期管应能被火工系统的首发元件电爆管起爆,且其输出能可靠引爆导爆索传输元件。延期时间为 $150\text{ms}\sim 200\text{ms}$ 。

1) 隔板点火器组件

隔板点火器结构与通常的隔板起爆器类似(见图 6.12),施主

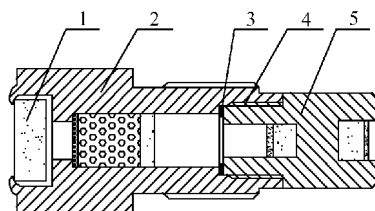


图 6.20 隔板延期管结构

1—接力管；2—延期组件；3—密封垫圈；
4—HYJ-4 胶粘剂；5—隔板点火器组件。

装药为起爆药，可容易地被电爆管起爆。受主装药为针刺药，引爆后点燃延期组件内的引燃药和延期药。受主端螺纹用于与延期组件连接。该隔板点火器组件具有通用性，可与不同装药量及不同配方的延期管组件结合，构成不同时间的延期管。

2) 延期管组件

延期管组件由延期管壳、盖片、延期药组成，结构如图 6.21 所示。为达到延期药稳定燃烧，延期管壳压装药后有一定的空腔，以衰减受主装药针刺药的压力（或称消爆效应）。延期药选用四氧化三铅 60%、硅铁 40%，外加 1.3%~1.7% 的虫胶。粘合剂含量对延期时间有较大影响（见表 6.13）。四氧化三铅粒度为 325 目/英寸，硅铁粒度要求小于 $10\mu\text{m}$ 。前两种成分干混均匀后加入虫胶酒精液湿混、造粒、干燥、过筛而成。为保证延期药稳定燃烧，该延期药压药压力为 570MPa，压装后的密度控制在 $3.8\text{g}/\text{cm}^3 \sim 4.0\text{g}/\text{cm}^3$ 。

表 6.13 粘合剂含量对延期时间的影响

虫胶量/%	延期药量/g	引燃药量/g	延期时间 范围/ms	平均延期 时间/ms
1.3	0.80	0.12	165.0~175.9	172.6
1.7	0.80	0.12	179.6~191.7	186.8

受主装药针刺药的药量对延时精度有重要影响。药量过大，会击穿引燃药和延期药，无延期时间；药量过小，就会出现点火不

足或断燃。常用针刺药的药量为 40mg。由于延期药可燃剂硅铁熔点高,点火困难,用针刺药直接点燃时,着火反应的一致性差,因此,加入引燃药后,点火能量增大,改善了延期药平面燃烧性能,进而提高了延时精度。针刺药药量和引燃药对延时精度的影响见表 6.14 所列。另外,压药次数对延时精度也有影响,分层压药能保证压药密度的均匀性。例如,为提高延时精度,要求每次压药高度不超过管壳直径的一半,每次压药量为 0.16g~0.21g。

表 6.14 针刺药药量和引燃药对延时精度的影响

	针刺药药量/g		引燃药药量/g	
	0.04	0.045	0	0.12
延期时间范围/ms	176.5~197.5	158.8~189.4		
平均延期时间/ms	182.94	175.38	167.20	172.65
标准偏差/ms	7.58	9.06	7.16	4.45

3) 接力管

接力管传由接力管壳、绸垫、垫片、起爆药及主装药组成。其作用是被延期药引爆后由它来引爆导爆索。控制主装药药量极其重要,药量过大将会导致导爆索接头被打出或被破坏。

2. 隔板延期点火器

1) 秒级隔板延期点火器^[30]

置于助推发动机与主发动机之间的隔板延期点火器被助推发动机火焰可靠点燃后,其输出经 2.0s~3.8s 延时后将可靠点燃主发动机的点火药盒(黑火药包)。隔板延期点火器由施主装药、隔板、受主装药、消爆空腔和延期装药等五部分组成,如图 6.21 所示。其中,隔板厚度为 6mm,施主装药采用太安,受主装药采用点火药。在受主药量和隔板厚度确定情况下,利用变药量法得出施主装药可靠起爆受主装药时的装药量,并利用隔板裕度试验验证。

延期药采用锰系延期药,其中锰粉 35%、铬酸钡 25%、铬酸铅 40%及硝化纤维素。延期管内径为 5mm。锰系延期药分 5 次压入延期管内。由于锰系延期药属无气体延期药,其压药压力不应低于 21MPa,但高于 40MPa 时会出现压死现象。采用 50mg 的

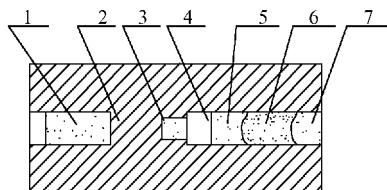


图 6.21 隔板延期点火器结构

1—主装药；2—隔板；3—受主装药；4—消爆空腔；
5—引燃药；6—延期药；7—输出药。

601 耐水药作引燃药，无引燃药或引燃药量过大都对延时精度有影响。由于隔板延期点火器属密封式结构，所以，为了减少受主装药燃烧产生的气体对延期药燃烧的影响，应设计一消爆空腔泄压。当装药直径为 5mm 时，消爆空腔长度选 5mm~8mm 为宜。延期药面上应加一个加强帽，一方面为缓冲受主药火焰的起始冲力；另一方面为防止延期药燃烧的气体反向冲击延期装药，造成中间出现断火现象。延期药底部要有合适的支撑，在锰系延期药底层加一层 80mg 的 601 耐水药。

2) 毫秒级隔板延期点火器^[31,32]

当某种导弹发射时，扣动扳机，发射发动机点火后将导弹弹出筒口。当导弹弹出约 6m 时，主发动机才能点火作用，故在助推发动机与主发动机之间需采用延时 280ms~350ms 的延期点火器。如果延时过短，就会过早地点燃主发动机，其主装药的燃烧火焰从尾端喷出，烧伤射手；若延时过长，尚未点燃主发动机，导弹就会有掉落地上的危险。

这种毫秒级隔板延期点火器具有被发射发动机可靠点燃，又能可靠点燃主发动机的双重任务，其结构如图 6.22 所示。它由不锈钢材料制成的延期点火管组件和辐射传火管组件组成。延期点火管内装有点火药、延期药、引燃药；而辐射传火管内装有针刺药、氮化铅和斯蒂芬酸铅。它们分别装药后，将辐射传火管旋入延期点火管内。其发火原理是：在导弹发射时，发射发动机的燃烧火焰冲破辐射罩，点燃斯蒂芬酸铅，再使氮化铅爆炸，氮化铅爆炸后的

冲击波通过厚 1.40mm 的隔板迅速使针刺药发火,完成爆轰转燃烧。针刺药发火后点燃引燃药,再点燃延期药,经短延期后,点燃烟火药;烟火药燃烧后产生很大的火焰,冲破顶盖,点燃点火药盒,最终点燃主发动机。

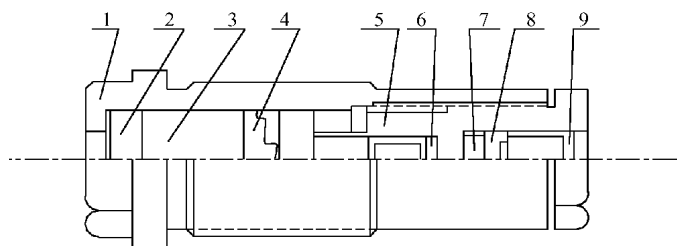


图 6.22 毫秒级隔板延期点火器结构

1—延迟点火管；2—点火药；3—延期药；4—引燃药；5—辐射传火管；
6—针刺药；7—氮化铅；8—斯蒂芬酸铅；9—辐射罩。

在辐射传火管中的斯蒂芬酸铅装药量为 30mg,压在辐射传火管的外端,而氮化铅作为隔板施主装药,装药量为 35mg。隔板受主装药为 40mg 针刺药,其装药量对延期药的延期时间有影响,针刺药药量越大,延期时间越短,但药量较少时(25mg),时间精度不好。引燃药采用 60mg 的锆—铅丹药(锆粉 30%,铅丹 70%,弱棉 3%),能被针刺药的火焰所点燃,同时也可点燃延期药,引燃药装药量在 30mg~60mg 内对延期时间无明显影响,但时间精度随引燃药药量的增加而提高。延期药在引燃时,受热冲量越大,越易达到稳定燃烧。点火药装药量约为 100mg,其配比为硫氰酸铅 45%、高氯酸钾 55%,外加 2%松香粘合剂。延期药采用 Al—Mg 系毫秒级延期药,其主要成分为 Al—Mg 合金(1:1)、 KClO_3 和 FeO_3 ,装药量约为 440mg,压药压力为 280MPa。延期 280ms~350ms 的延期药配方为 Al—Mg37%(粒度 320 目/英寸~400 目/英寸)、 KClO_3 65%(粒度 200 目/英寸,筛下物),外加 160%的 FeO_3 ,最后外加 0.5%虫胶造粒。

6.5 点式分离类火工装置设计

航天器级间分离、舱段间分离、整流罩分离、舱门盖分离等都需要使用分离类火工装置,它主要有点式分离类(如螺栓、螺母)和线型分离类(如聚能切割分离、膨胀管分离等大面积分离)等两类。螺栓螺母类火工装置在早期的航天系统中应用极其广泛,它又可具体细分为爆炸螺栓、分离螺栓、爆炸螺母等几类,其中爆炸螺栓及螺母通常内装大药量猛炸药,而分离螺栓内仅装推进剂或烟火药,它们作用后均能使两个相连的物体完成点式分离。

6.5.1 爆炸螺栓及螺母设计

1. 常规爆炸螺栓结构及作用过程

爆炸螺栓是最早应用于航天技术上的一种火工装置,通常又称开槽式解锁螺栓,如图 6.23 所示。

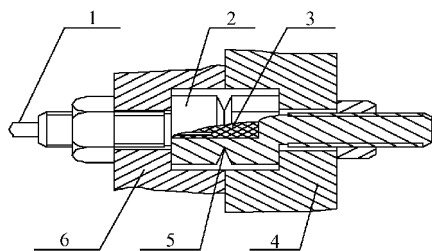


图 6.23 爆炸螺栓结构示意图

1—导线；2—爆炸螺栓；3—猛炸药；

4,6—被连接结构；5—断裂面。

在爆炸螺栓圆柱形药室的外壁上,开一圈环性凹槽,形成一个强度上的薄弱环节。爆炸螺栓作为将 2 个物体连接在一起的一个连接件,在分离时,当药室内装猛炸药发生爆炸作用后,药室内的压力升高,当压力增高到开槽部位的断裂强度时,螺栓将断裂,2 个被连接的物体被分为两体^[6]。这种常规爆炸螺栓结构简单,且

在螺栓头和本体分离时不产生碎片,但由于爆炸产物会从分离面溢出,会对周围设备或环境造成污染,所以不适合在要求高度清洁的地方使用。

2. 爆炸螺母设计^[33]

爆炸螺母又称易碎螺母(见图 6.24),是所有分离火工装置中最简单的一种,通常利用高压气体使螺母与螺栓分离。作用前后示意图如图 6.25 所示。螺母中心连接的是双头螺栓。当装在易碎螺母中压力药筒的雷管发火时,其输出将使连接易碎螺母 2 个半块的临近的薄轮辐断裂,分开螺母的 2 个半块,并引起对称位置的 2 个薄轮辐也因螺母半块的支轴作用而断裂,继而导致螺母中心的压紧螺栓释放。易碎螺母使用 2 个压力药筒,主要起冗余作用。美国航天飞机在不同的连接件处,使用了 3 种不同直径的易碎螺母。当航天飞机从发射台上离开时,采用了 8 个直径为 8.89cm 的爆炸螺母,使 2 个固体火箭助推器与发射台上固定装置同时分离,其中每个螺母都能承受 453 600kg 的载荷;轨道飞行器主发动机熄灭后,在前端使用分离螺栓将外燃料箱分离,在尾部连接点上用 2 个直径为 6.35cm 的易碎螺母分离,其中每个螺母都能承受 272 000kg 的载荷;每个轨道飞行器与外燃料箱之间的液氢和液氧燃料供应管支承板上各使用 3 个直径为 1.90cm 的爆炸螺母固定,其中每个螺母都能承受 43 500kg 的载荷。

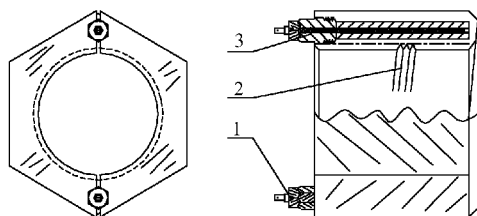


图 6.24 易碎螺母结构及安装图

1—雷管; 2—锯齿螺纹; 3—扩爆管。

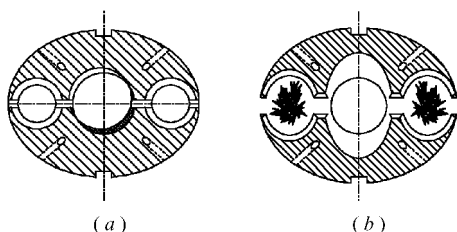


图 6.25 易碎螺母作用前后示意图

(a)作用前；(b)作用后。

6.5.2 隔板式无污染爆炸螺栓设计^[34]

卫星整流罩通常是用 8 个螺栓将 2 个半圆锥筒连接成的一个圆锥体，且圆锥底通过 8 个螺栓与火箭箭体相连。当运载火箭将卫星送入预定高度后，控制器使螺栓爆炸，解除整流罩的连接，整流罩向两边分离，脱离离开卫星。

由于卫星的能源靠卫星表面光洁明亮的太阳能电池板供给，这就要求整流罩脱离、离开过程中不允许太阳能电池板受到污染。因此，卫星整流罩的脱离、离开需要使用无污染的爆炸螺栓。

适合于非电起爆系统的无污染爆炸螺栓结构如图 6.26 所示，它主要由导爆索接头（或电起爆器）、隔板起爆器、螺栓本体、活塞推杆分离机构等 4 部分组成。螺栓本体是保证螺栓能承受连接力和能被爆炸分离的主要受力件，它由螺栓体、活塞推杆和压紧螺圈组成。活塞推杆装于螺栓体的内孔，通过压紧螺圈压紧固定，将三者组成一个整体。在螺栓头和螺杆的分界处，有一削弱槽，是螺栓爆炸时的断裂分离面。

无污染爆炸螺栓作用过程为：接到分离信号后，控制器开始使分离火工系统的首发元件作用；首发元件的爆轰信号通过传输线路起爆爆炸螺栓的导爆索接头；导爆索接头作用后引爆隔板起爆器的施主装药，其冲击波通过隔板引爆隔板起爆器的受主装药及

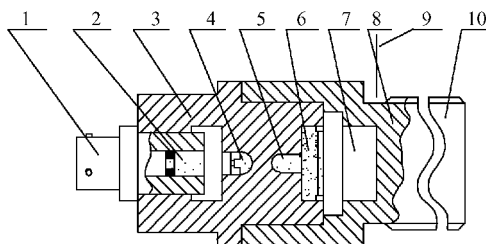


图 6.26 无污染爆炸螺栓结构示意图

- 1—电起爆器；2—起爆器装药；3—隔板起爆器；4—施主装药；5—受主装药；
6—主装药；7—活塞推杆；8—螺栓体；9—分离面；10—螺栓头。

主装药；主装药爆炸产生的强大爆炸压力使活塞推杆向右移动，并推顶螺栓体的螺杆内孔端面，使削弱槽受拉；当活塞推杆的推顶力大于削弱槽断面的抗拉强度时，螺栓则断裂分离。其设计主要包括爆炸气体的密封设计、削弱槽结构和作用可靠性设计。

1. 爆炸气体密封设计

1) 输入端密封

输入端应该有两级密封，一级为导爆索接头与隔板起爆器的施主装药爆炸气体的密封，另一级为隔板体对隔板起爆器的受主装药及主装药爆炸气体的密封。另外，在导爆索接头与隔板装药体之间、隔板装药体与螺栓体之间都应该采用“O”型橡胶圈在螺纹端面进行密封。当隔板起爆器的受主装药采用敏感药剂时，既可以减少施主装药量又可以增加隔板厚度，缓解输入端的两级密封压力。

2) 输出端密封

由于螺栓头和螺杆的分离是通过活塞推杆间接作用而不是主装药爆炸气体的直接作用，所以，只要螺杆顶断分离后，活塞推杆不被压出，爆炸气体就将留在螺栓体内。这可以通过在活塞推杆上设计一台阶（当活塞推杆移动到台阶时将被阻住）予以解决。另外，在活塞推杆头装有一“O”型橡胶圈，保证运动初始的密封。使用 CrWMn 钢作活塞推杆材料时，曾出现过裂纹而导致漏气，因

此,采用高强度、高硬度的弹簧钢 60Si2Mn 作活塞推杆,并增大直径,解决了裂纹漏气和变形太大影响分离的问题。

2. 结构设计及计算

1) 削弱槽设计

螺栓体材料应能满足一定的强度,能承受爆炸冲击,且削弱槽断裂后,分离面应规整而不破碎。因此,螺栓体材料选用了高强度不锈钢,并经热处理到中上等强度,使其综合机械性能最好。削弱槽的结构形式一般有 3 种:第一,V 形,断裂点在尖点,但尺寸不便控制和测量;第二,U 形,断裂点在正中的最低点,尺寸加工和测量均较方便;第三,半口形槽,如图 6.27(a)所示,断裂点在两直角尖点的任一处,尺寸加工和测量均较方便。为加工方便,削弱槽一般设计在外表面。

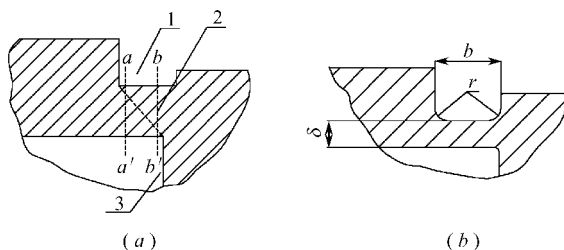


图 6.27 削弱槽的结构形式和尺寸

1—U 形槽; 2—断裂面; 3—内台阶。

为保证半口形削弱槽的断裂点在 a 尖处,在内表面需有一相应的内台阶。在 $a-a'$ 断面上,应力 q 分布很不均匀,最大应力点在 a 点,故 a 点首先断裂,而 $b-b'$ 断面上的应力分布也很不均匀,但最大应力点在 b' 点,故断裂面将为 $a-b'$ 。受拉断面的角度大约为 45° ,槽宽 b 可表示为

$$b = 2r + \delta \quad (6.5.1)$$

式中 r ——槽壁与槽底连接处的圆角半径;

δ ——断裂面的厚度。

2) 螺栓体设计计算

设螺栓的分离力为 P , 材料的拉伸强度为 σ_b , 制成零件后, 材料零件的拉伸强度折算为 σ'_b , 则削弱槽的断面面积为

$$S = P/\sigma'_b \quad (6.5.2)$$

设削弱槽的断面圆环内径为 d (实际为活塞推杆直径确定), 外径为 D , 则圆环面积为

$$S_1 = \frac{1}{4}\pi(D-d)^2 \quad (6.5.3)$$

$$D = \sqrt{4S_1/\pi + d^2} \quad (6.5.4)$$

若已知螺栓的分离力、材料的零件拉伸强度和活塞推杆直径后, 就可求得螺栓体的外径。

3) 活塞推杆设计及计算

活塞推杆的主要作用是承受压力, 所以, 要求材料抗拉强度高, 变形小。为增大爆炸压力的传递面积, 推杆头的直径应大于推杆直径。另外, 活塞推杆的设计移动量应大于螺栓体断裂分离时的最大有效变形量, 否则不能分离。

螺栓的断裂分离是靠活塞推杆顶断的, 所以, 推杆承受的压力必须大于螺栓的断裂力 P 。设活塞推杆的直径为 d , 活塞推杆的设计使用应力为 σ ,

则

$$P = S_0\sigma \quad (6.5.5)$$

$$S_0 = \frac{1}{4}\pi d^2 \quad (6.5.6)$$

得

$$d = \sqrt{4P\sigma/\pi} \quad (6.5.7)$$

设推杆头的直径为 d_2 , 压紧螺圈所占去的直径长度为 $2L$, 则推杆头的有效直径为

$$d'_2 = d_2 - 2L \quad (6.5.8)$$

设爆炸气体压强为 q , 则传给推杆头的总压力大于等于断裂力 P , 则有

$$d'_2 = \sqrt{4Pq/\pi} \quad (6.5.9)$$

3. 主装药设计

主装药的作用是产生足够的压力, 推动活塞推杆, 达到螺栓的

断裂分离。可用两种实验确定主装药的装药量,首先找出正常螺栓分离时的最小装药量,再将最小装药量乘安全系数得到装药量;其次,用不同装药量对放大(乘以安全系数)设计载荷的螺栓进行实验,找出能分离放大载荷的螺栓的最小装药量,以此作为正常螺栓的装药量。对得到的两种装药量综合分析确定出设计装药量。

6.5.3 分离螺栓设计

分离螺栓的特点是其内部只装推进剂或烟火药,螺栓分离力并不是来源于猛炸药的爆炸或爆炸驱动,而是来源于药筒输出压力经其他介质传递后的相互作用。解锁分离螺栓主要包括剪切销式解锁螺栓和滚珠式解锁螺栓等两种,也属于分离螺栓。

1. 双端起爆式无污染分离螺栓设计

双端起爆式无污染分离螺栓结构如图 6.28 所示。它的两端各有一对压力药筒、药室、主活塞和次活塞。在两端的主活塞和次活塞之间,各有一个软铅联接塞,在螺栓外壳的中央开有一道环形的凹槽。作用时,两端药室的火药压力推动各自的主活塞,主活塞通过压缩软铅联结塞而得到加强后,传递给次活塞,两个端面顶在一起的次活塞或相互作用,或与对应衬套的台肩作用都将以应力形式拉伸着螺栓的外壳,直至在中央的凹槽处断裂,实现分离,并将螺栓分离的两端加速到约 30m/s 。这种分离螺栓的特点是两个药室在火药燃烧完后,仍保持密闭,火药燃气不会泄漏到壳体外面,因此是一种无污染分离螺栓。

该分离螺栓中的软铅连接塞实际上是一个压力放大器,它将根据其大端面积与小端面积之比来放大来自小端面所受的压力。适合作压力放大器的材料还有硅橡胶。另外,螺栓两端任一个压力药筒都能使螺栓断裂,使用两个压力药筒具有冗余功能。这种螺栓结构简单、工作可靠,使用方便,特别是能够承受巨大的连接力,但缺点是断裂时刻的分离力(推力)超过了连接力,会产生相当大的分离干扰。有时,在一个分离面上,会同时使用数个分离螺栓,为减小分离干扰,分离螺栓在分离面上的分布以轴对称分布为

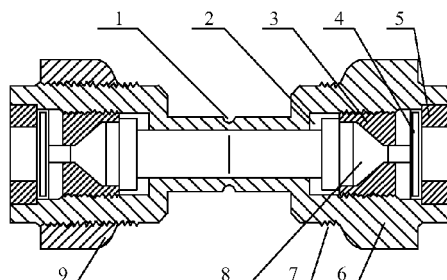


图 6.28 双端起爆式无污染分离螺栓

1—破裂凹槽；2—次活塞；3—衬套；4—主活塞；5—定位套；

6—螺栓体底座；7—螺栓体；8—压力放大器。

好。美国航天飞机固体火箭助推器与外燃料箱的分离及半人马座火箭整流罩分离系统均使用了这种分离螺栓。

2. 剪切销式解锁螺栓设计^[35]

剪切销式解锁螺栓结构如图 6.29 所示。它主要由内筒、外筒、剪切销和动力源组成，内外筒靠剪切销固定在一起，当药室压力增加到切断剪切销时，两者解销分离。它的分离面是其内筒和外筒的套接面。剪切销式解锁螺栓加工方便，装配容易，但其连接力受到剪切销强度的限制，只适应于连接力较小的部位，如火箭的回收数据舱容器与盖之间的连接。典型的剪切销式解锁螺栓连接载荷为 1000kg。

1) 连接力计算

设剪切销式解锁螺栓主要依靠直径为 d 的剪切销承受轴向连接力，销子材料经调质处理后的拉伸强度为 σ_b ，剪切销与内外筒的孔配合公差等级为 H8/f7。连接力为

$$F = 2 \times \frac{\pi d^2}{4} \times 0.6 \times \sigma_b \quad (6.5.10)$$

2) 启动压力计算

启动压力与内筒的活动面积有关，设内筒直径为 d_1 ，则启动压力为

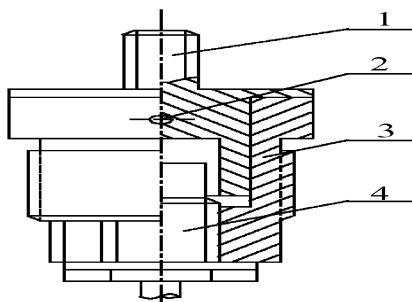


图 6.29 剪切销式解锁螺栓结构

1—内筒；2—剪切销；3—外筒；4—起爆器。

$$P_0 = \frac{4F}{\pi d_1^2} \quad (6.5.11)$$

3) 最大推力计算

设装药的火药力为 $f(\text{J/kg})$, 装填密度为 $\rho(\text{kg/l})$, 余容为 $a(\text{l/kg})$, 则最大压力 P_m 、最大推力 F_m 及安全裕度 n 分别为

$$P_m = \frac{f\rho}{1 - a\rho} \quad (6.5.12)$$

$$F_m = P_m \frac{\pi d_1^2}{4} \quad (6.5.13)$$

$$n = \frac{P_m}{P_0} \quad (6.5.14)$$

4) 外筒强度计算

为保证作用过程中不漏气, 要求外筒无塑性变形, 即外筒强度必须大于最大内压。设材料的弹性极限为 σ_e , 外筒直径为 D , 内筒直径为 d , 按最大变形理论计算, 则外筒强度为

$$P_w = \frac{3}{2} \sigma_e \frac{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2}{2\left(\frac{D}{2}\right)^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2} \quad (6.5.15)$$

3. 滚珠式解锁螺栓设计

滚珠式解锁螺栓结构如图 6.30 所示。它由螺栓头、活塞、剪切销、联结体、滚珠及动力源组成。其分离面是其内筒和外筒的套接面,只是两者是靠若干个滚珠来限制其相对位移。在外筒内表面的某个截面上,开一圈环形的正梯形槽,梯形槽的 2 个斜边相互垂直,梯形槽的宽度和深度能容纳半个滚珠;在内筒相应的截面上,沿周向均匀开若干个直径与滚珠外径相同的径向圆孔,在每个圆孔内各安置一粒滚珠,这些小滚珠限制着内外筒的相对运动,内筒内设有一个活塞,以防止滚珠从圆孔中掉出来。内筒与活塞用剪切销固定。当药室发火产生的压力剪断剪切销,并把活塞推向前去时,滚珠就失去活塞的依托而滚滑出来,内外筒之间失去机械联系而分离,达到解锁分离的目的。

在图 6.30 中,螺栓头上部有螺纹,与被分离物体相连接,而螺栓头下部是空心,可作为内筒。外筒通过螺纹与基座相连。与剪切销式解锁螺栓相比,滚珠式解锁螺栓比较复杂,装配难度大,但连接力大,且只要很小的力就能推开活塞,达到解锁目的。解锁时的分离力远低于连接力(典型滚珠式解锁螺栓连接力为 5000kg),只有连接力的 10%~20%,所以,分离干扰较小,用途广泛,如用于卫星的仪器舱与再入舱连接,在卫星主动段飞行和轨道飞行段时保证两舱连接可靠,当收到解锁指令时,能及时起爆,保证两舱正常分离,为仪器舱回收提供必要条件。

1) 连接力计算

当受到轴向力时,解锁螺栓的最弱处是螺栓头。典型的螺栓头上有滚珠孔 m 个,每个直径为 d_0 ,内径为 d_1 (与活塞直径相同)、外径为 D 。螺栓头材料经热处理后的拉伸强度为 σ_b ,则连接力为

$$F = \sigma_b \left[\frac{\pi}{4} (D^2 - d_1^2) - m \frac{d_0 (D - d_1)}{2} \right] \quad (6.5.16)$$

2) 启动压力计算

启动压力受两部分力的影响。要使活塞运动,让滚珠滚入空

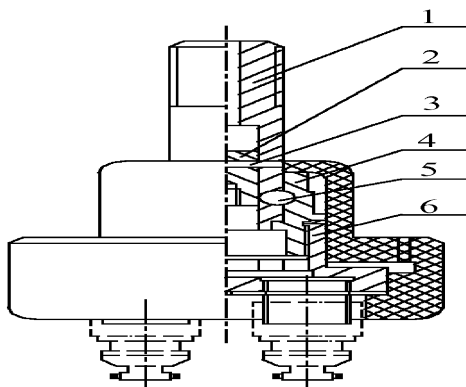


图 6.30 滚珠式解锁螺栓结构

1—螺栓头；2—活塞；3—剪切销；4—外筒；5—钢球；6—底座。

腔,达到解锁目的,就必须克服剪切销锁紧和滚珠对活塞的摩擦力。设剪切销的直径为 d ,拉伸强度为 σ'_b ,则剪切销锁紧力为

$$F_1 = 2 \times \frac{\pi d^2}{4} \times 0.7 \times \sigma'_b \quad (6.5.17)$$

滚珠对活塞的摩擦力 F_2 由连接力 F 与火药产生最大压力 P_m 对螺栓头端面上的推力 F' 组成,设摩擦系数为 μ' ,则滚珠对活塞的摩擦力 F_2 、启动压力 P_0 、推动活塞最小力 F_0 分别为

$$F_2 = (F + F')\mu' \quad (6.5.18)$$

$$P_0 = \frac{4(F_1 + F_2)}{\pi d_1^2} \quad (6.5.19)$$

$$F_0 = F_1 + F_2 \quad (6.5.20)$$

3) 最大推力计算

最大推力计算见式(6.5.13)。

6.6 线型分离类火工装置设计

在大型运载火箭和导弹系统上,级间分离、星箭分离、卫星整流罩分离等具有大面积分离面的分离机构已经完成了从多点式分

离向线型分离的转变。与多点式分离相比,线型分离具有工作可靠、安全性高、同步性好、电能消耗低、勤务处理方便等特点。线型分离装置又分为切割索分离和膨胀管分离等两类。前者利用切割索爆炸后的聚能射流直接将分离面切开达到分离的目的,具有能量大、能切割多种结构及材料等特点,适应于承载能力较大、结构厚度较厚的切断与分离,是应用较早较多的线型分离装置,但由于作用时冲击过载高,有污染、碎片产生,所以它不能用于卫星整流罩分离、飞行员逃逸系统等场合;后者利用金属管内导爆索及填充物的膨胀效应将分离板撑破断裂,实现分离,具有无污染、冲击过载小等特点,适应于弹内装有高精密仪器设备、光学仪器、太阳能电池以及载人飞船的舱段和整流罩的分离,是一种新型的线型分离装置。

6.6.1 聚能切割索设计^[36]

聚能切割索是内装有猛炸药的金属管被拉制成截面呈 V 字形的细长索条。其作用原理是:当起爆器起爆聚能切割索后,管内的炸药爆炸,因聚能穿甲效应而形成一股由高温高压气体和金属气化后的气体所组成的射流,对一定厚度的金属板进行切割(见图 6.31)。它具有能量大、能切割多种结构及材料等特点,是应用较早较多的线型分离装置,如美国阿特拉斯—人马座火箭、“土星”V 号运载火箭及多种导弹上的绝热隔板分离。

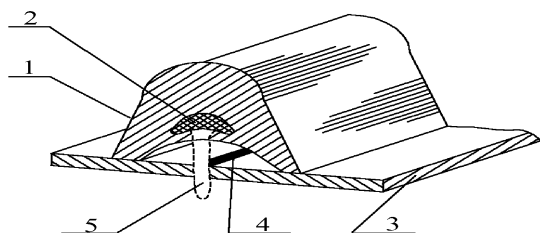


图 6.31 聚能切割索作用原理

1—金属保护罩; 2—猛炸药; 3—被切割结构; 4—断裂线; 5—爆炸射流。

聚能切割索有药条式聚能切割索和金属管聚能切割索等两种基本结构。典型药条式聚能切割索(图 6.32)是由黑索今炸药配以辅助成分压制成药条,药条外加一个由硅青铜条压制而成的金属聚能罩。典型金属管聚能切割索(图 6.33)是将纯黑索今或六硝基芪炸药装在铅、铅铋、银、铜等管内,用模具多次压制而成。聚能切割索所能切割金属的厚度是与炸药的威力、装药量、聚能角、炸高(切割索离金属表面的距离)等因素决定。在两种基本结构中,金属管聚能切割索切割效果更好些。

金属管聚能切割索的设计主要是金属管尺寸选择、装药选择、横截面尺寸设计等,下面以银管聚能切割索为例说明。可选用纯度在 99.99% 以上、内径为 15mm、壁厚为 2mm 的银管,装填六硝

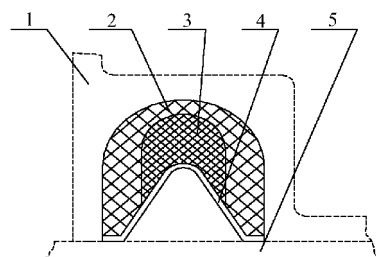


图 6.32 药条式聚能切割索

1—金属保护罩；2—橡胶保护套；
3—药条；4—聚能罩；5—被切割结构。

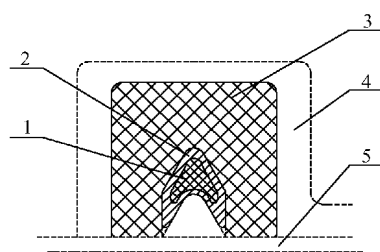


图 6.33 金属管聚能切割索

1—装药；2—铅管；3—橡胶保护罩；
4—金属保护罩；5—被切割结构。

基芪炸药,设计的横截面尺寸系列见表 6.15 所列。

表 6.15 银管聚能切割索系列

装药量/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-1}$	宽度/mm	高度/mm	聚能角角度/ $^{\circ}$
3	2	2.2	75
5	3	3.1	75
7	3.5	3.5	90

将表 6.15 中的银管聚能切割索粘入橡胶护套,用聚氨酯胶将橡胶护套及切割索粘在待切割的靶板上,切割索处于零炸高位置,用电雷管起爆。进行切割试验的结果见表 6.16 所列。

表 6.16 银管聚能切割索靶板切割试验结果

装药量/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-1}$	靶板材料	靶板厚度/mm	试验结果
3	锻铝	3	切割分离, 侵切深度 2mm
3	锻铝+玻璃钢	3+2	切割分离, 侵切深度 2mm
3	45 号钢	2	切割分离, 侵切深度 1.2mm
3	碳纤维	7	切割分离, 侵切深度 1.8mm
5	锻铝	4	切割分离, 侵切深度 2.7mm
5	锻铝+玻璃钢	4+2	切割分离, 侵切深度 2.7mm
5	45 号钢	3	切割分离, 侵切深度 1.7mm
5	碳纤维	7	切割分离, 侵切深度 3mm
7	锻铝	5	切割分离, 侵切深度 3mm
7	锻铝+玻璃钢	5+2	切割分离, 侵切深度 3mm
7	45 号钢	3.5	切割分离, 侵切深度 1.9mm
7	碳纤维	7	切割分离, 侵切深度 4mm

从表 6.16 中可以看出, 银管聚能切割索能可靠切割和分离不同厚度的铝板、铝与玻璃钢组合板、钢板、碳纤维板等靶板, 是一种用于大面积分离的作用效能高的切割装置。

由于金属管切割索管壁最薄处往往只有 0.1mm 左右, 且外壳可能存在微小裂纹和砂眼, 因此, 当产品经受长时间温湿度试验后, 可能会有水分进入药芯, 使之变质, 从而导致切割索出现断燃现象。所以, 通常会在相对湿度小的工况环境下, 对已进行过清洁处理的切割索表面涂保护剂, 实施保护。

6.6.2 膨胀管分离装置设计^[37, 38]

20 世纪 60 年代早期, 美国洛克希德公司首先提出了膨胀管分离装置的概念并进行了初步的应用研究, 美国麦道公司也于 1969 年申请了称之为“超级拉链”(Super Zip)即膨胀管分离装置的专利。这一概念一经提出, 就立即受到航天界的重视和应用研究, 并在多种型号上获得应用, 如美国载人飞船轨道实验站防护罩分离装置、“三叉戟”导弹第三级发动机分离装置及航天飞机救生逃逸舱分离装置及日本 H-Ⅱ 运载火箭卫星整流罩分离装置等。

1. 膨胀管分离装置结构及作用原理

1) 结构特点

典型的膨胀管分离装置如图 6.34 所示,其分离板带有凹槽,称之为分离板式膨胀管分离装置。它一般由导爆索、填充物、金属管、分离板组成。导爆索是整个分离装置的能量源,其装药量(线密度)则根据分离载荷和金属管不破裂的承载能力来决定。填充物是导爆索爆炸时吸收冲击能量、减少自由容积的物质,同时也能在储存、运输过程中起到支撑、保护导爆索的作用。金属管在作用前包容填充物和导爆索,作用时能膨胀变形,并在作用后将爆炸产物密封,其规格根据结构尺寸和分离板联接强度决定。分离板作为系统的分离对象,在作用前联成一体,而作用后断裂分离。其结构形式为带削弱槽板联接方式,分离板的具体结构和形状尺寸由分离载荷和使用情况决定。

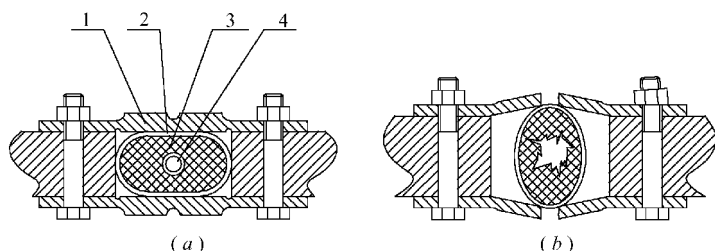


图 6.34 分离板式膨胀管分离装置作用前后

1—分离板; 2—金属管; 3—填充物; 4—导爆索。

2) 作用原理

导爆索爆炸后,其爆炸冲击能量大多数被填充物所吸收,并迅速气化成气体,这样爆炸产生的气体和填充物气化的气体很快在金属管内部形成高压状态,对平椭圆形的金属管做功,使其膨胀变形,当金属管内部气体的压力足以克服金属管的变形力及分离板的破坏力时,分离板就将断裂分离。只要导爆索的装药量及分离板的连接力选择适当,就能保证在分离板分离的同时而金属管不破裂,使爆炸产物和填充物气化气体不泄漏,从而达到无污染、无碎片的要求。

膨胀管分离装置作用时,不是将导爆索的爆炸能量直接作用

于分离连接件上,而是通过转化为气体膨胀做功的形式达到解锁分离的目的。整个作用系统受力均匀,受冲击载荷低,且爆炸产物始终密封于金属管内,具有线型分离装置的优点,又达到了低冲击、无污染的目的。所以,可以应用于航天器内要求高度清洁、低冲击的地方。

2. 膨胀管分离装置设计

(1)导爆索选择。选择导爆索外壳材料的标准是容易气化,作用后不留碎渣,目前适合的材料主要是铅金属。装药量及外形尺寸根据具体装置确定。

(2)金属管选择。为保证分离时金属管不破裂,金属管材料应有足够的刚性和韧性,国外大多使用不锈钢管。在相同的形状和相同的分离板承载力下,金属管尺寸越大越有利于分离,但整个系统要求尺寸要小。可使用直径为 $\phi 14\text{mm} \sim \phi 20\text{mm}$ 之间,管壁厚为 1mm 的 1Cr18Ni9Ti 不锈钢管挤压成一定长短轴比的椭圆形管。

(3)填充物选择。填充物的作用除支撑保护导爆索外,主要的功能是吸收导爆索爆炸的冲击能量,因此,应选择塑性好的材料作填充物,如国外大多使用硅橡胶类或聚乙烯塑料材料。为了有效地提高导爆索的爆炸能量利用率,填充物应尽可能填满金属管的内腔。聚乙烯塑料可以用挤塑的方法成型,这样导爆索与填充物就成为一体,既能够保护导爆索,又利于装配。

(4)分离板选择。分离板应选择强度较高、质量较轻的铝合金材料。削弱槽处为分离面。

3. 举例:整流罩径向分离装置设计

对于类似整流罩径向分离、级间分离等环状分离结构一般在整体结构上采用分离板式膨胀管分离装置(见图 6.34)。环状分离结构的特点是结构尺寸大(直径大多在 1m 以上)、分离强度低(分离厚度太薄)。导爆索选择装黑索今的铅管导爆索,金属管尺寸选择为 $\phi 16\text{mm}$,管壁厚为 1mm 的 1Cr18Ni9Ti 不锈钢管挤压成长细比为 3.0 的椭圆形管,分离板材料选择为长 1.1m 的强度较

高的 LD10 铝板,填充物材料为聚乙烯塑料。

1) 导爆索极限药量设计

导爆索极限药量设计以金属管自由膨胀不破裂为标志。试验结果见表 6.17 所列。试验结果表明:上述平椭圆形膨胀管的最大破坏药量(即导爆索极限药量)为 4.43g/m~4.72g/m。

表 6.17 导爆索极限药量试验结果

导爆索装药线密度/g·m ⁻¹	3.78	4.18	4.43	4.72	5.04	5.33
金属管情况	未破	未破	未破	有裂纹	破裂	破裂
金属管膨胀量/mm	9.56	10.40	10.96	11.00		

2) 单分离槽试验

单分离槽是指:分离板为三槽形式,中间一道为分离槽,两边的两道为弯转槽,分离试验结果见表 6.18 所列。

试验结果表明:分离板开 V 形槽时,比 U 形槽更易断裂分开,但 U 形槽加工容易。弯转柔度越大,分离板越易断裂分开。使用 U 形槽,弯转柔度为 10.5mm 时,导爆索装药线密度为 2.20g/m 就可使厚度为 2.0mm 的分离板分离。

表 6.18 单分离槽的分离试验结果

分离厚度 /mm	槽型	弯转柔度 /mm	导爆索装药线密度/g·m ⁻¹	分离件	膨胀管
1.5	U、V	7.5	3.78	分开	未破
1.5	U	2.5	2.80	未分开	未破
1.5	V	2.5	3.12	分开	未破
2.0	V	2.5	3.78	分开	未破
2.0	U	2.5~7.5	2.80~4.00	未分开	未破
2.0	V	7.5	3.78	分开	未破
2.0	V	10.5	3.78	分开	破裂
2.0	U	10.5	2.20~3.12	分开	未破
2.5	V	10.5	3.78	分开	未破
2.5	U	10.5	3.40	分开	未破

3) 双分离槽试验

双分离槽是指:分离板为双槽形式,两道槽为分离面,分离试验结果见表 6.19 所列。比较表 6.19 和表 6.18 的结果可知,单分离槽比双分离槽更易断裂分开。

表 6.19 双分离槽试验分离试验结果

分离厚度 /mm	槽型	弯转柔度 /mm	导爆索装药线密度/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-1}$	分离件	膨胀管
1.5	V	2.5~7.5	3.78	未分开	未破
2.0	V	2.5	3.78	未分开	未破
2.0	V	7.5	3.78	未分开	未破
2.0	U	7.5	4.00	未分开	未破

4. 应用失效与可靠性设计^[39]

超级拉链(Super Zip)分离接头最早于 20 世纪 60 年代开始使用。它用于火箭级间分离和整流罩盖分离系统已有多数。但 1984 年在航天飞机/人马座火箭整流罩的地面低温分离试验时却出现了失效。超级拉链膨胀管分离装置如图 6.35 所示。扁平椭圆形钢管内使用了两根导爆索作冗余之用。当第一根导爆索在预定时间内未发火时,才起爆第二根导爆索。

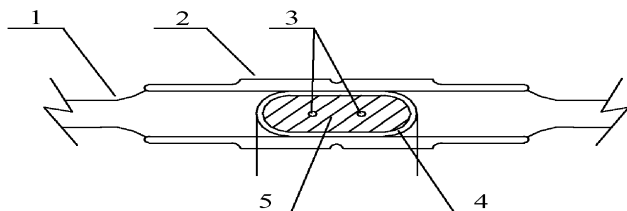


图 6.35 超级拉链膨胀管分离装置

1—罩盖结构；2—易碎夹板；3—导爆索；4—扁平管；5—橡皮垫圈。

在调查过程中发现失效的主要原因是：第一，分离板材料发生了变化。从使用敏感断裂的 7570—T6 铝材料改变成抗断裂的 7075—T73 耐腐蚀材料。当时为了使 7570—T6 铝材料耐腐蚀，将其进行过热处理，材料就改变成了 7075—T73 耐腐蚀材料。但用后者进行试验的作用裕度几乎为 0。第二，没有适当地控制分离板的厚度。所以说，最初的设计未达到合适的作用裕度以适应分离材料性能和厚度的变化。在失效实验中，厚度直到 2.18mm 时都能成功地断裂。但大于 2.18mm 时则会出现分离失效。所以，当材料断裂性能是最重要的参数时，分离板厚度就是第二个最

主要的参数。因此,通常使用分离板厚度作为性能参数。

使用楔形分离板(板的厚度被逐渐减小成楔形板,凹槽的深度被固定不变,相当于不同分离板厚度)进行参数评估,应保证每次发火后都能测量到最大的分离板厚度。分离板使用 7075T6 材料。对重新设计的膨胀管分离装置使用正常炸药装药量进行楔形板试验时,证明允许分离板的最大厚度为 2.5mm。而飞行时的分离板的最大厚度为 2.1mm。考虑到分离板的断裂机理是分离板的弯曲力矩效应,而弯曲力矩与厚度的立方成正比,所以,弯曲力矩裕度定义为实际装药处最小成功分离的分离板的弯曲力矩与最大实际分离的分离板厚度的弯曲力矩之比,即: $2.5^3/2.1^3=1.71$,也就是说膨胀管分离板的能力比分离实际所需分离板的能力大 71%。

分离板最厚处断裂的最小装药量为 19.1g/m,由于钢管在装药量 28.0g/m 时破裂,所以最大允许装药量确定为 25.5g/m。实际装药量最大为 25.5g/m,最小为 24.2g/m。所以装药裕度定义为实际最小装药量与分离板最厚处断裂的最小装药量之比,即: $24.2/19.1=1.27$,也就是说最小的实际炸药装药量比分离最厚分离板所需装药量大 27%。

6.7 活塞式作动装置设计

利用电能使装填的烟火药爆燃,从而产生推动活塞运动的活塞式作动装置已广泛用于航天系统。这类线性运动装置主要包括驱动器、推冲器、拔销器、切割器、阀门、开关等。活塞式作动器通常按其发火后活塞所处状态而分为伸长型和缩回型两类,前者的典型代表是推冲器,后者的典型代表是拔销器。

6.7.1 活塞式推冲器设计^[40]

1. 结构设计及作用过程

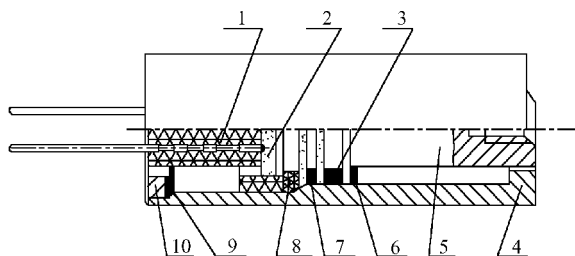


图 6.36 典型活塞式推冲器结构

1—电发火管；2—混合发火药；3—O形密封圈；4—筒体；5—活塞杆；
6—缓冲圈；7—挡烟圈；8—支承圈；9—密封圈；10—挡环。

典型活塞式推冲器结构如图 6.36 所示。它主要由柱状管壳、活塞杆、剪切销、电爆管、密封件等组成。它是基于内燃机原理把热能变成机械能的物理系统，与内燃机的惟一不同之处在于它是装有单发装药的、一次性作用的单冲程内燃机而已。活塞式推冲器作用过程是：当发火管通电时，点火药装药将发生爆燃并迅速产生高压高温气体，该气体使活塞末端与发火管之间的初始容腔增压，继而推动活塞上的预加负载以极高的速度运动到所要求的冲程长度，预加负载是类似插头座分离所必须克服的连接力。为了使运动活塞完成预定的动作，往往将活塞端头设计成和负载相适应的各种结构。为防止做功前推冲器的活塞杆在外加负载时会出现位移，往往在活塞杆上需要设计止推结构（剪切销锁定）。

2. 活塞式推冲器设计

活塞式推冲器的输出特性主要是力或速度，如级间分离要求的是相对分离速度，而用于切割器时则要求的是推力。决定活塞式推冲器输出特性的主要因素是推冲器的结构和装药量。在结构上，一般要求采用较厚的筒壁，以保证输出压力峰值对预加负载有较大的裕度。

1) 装药选择

为满足小型活塞式推冲器所需的输出速度或推力，一般只装少量的点火药。由于活塞式推冲器体积小，结构设计相当紧凑，在

活塞产生运动前的初始容积很小,因此,要绝对避免使用强起爆药和炸药,否则,爆轰将使推冲器完全碎裂。活塞式推冲器装药通常采用混合点火药、发射药、弱起爆药等,如使用氯酸钾(50%)、硫氰酸铅(47%)和铬酸铅(3%)组成的混合药,经40%硝基漆调均后灌注到发火管内。另外,某产品曾使用了细结晶的弱起爆药斯蒂芬酸铅。

2) 装药量设计^[41]

当发火管发火产生的爆燃气体作用到活塞杆端面时,先克服止推力(切断剪切销),再推动活塞杆向前运动,同时带动剪切销快速运动。活塞杆端面受到的启动压力 F 应大于等于切断剪切销的止推力 F_1 、活塞组件运动与壳体内壁的摩擦力 F_2 及外负载 F_3 之和,即存在

$$F = F_1 + F_2 + F_3 \quad (6.7.1)$$

设剪切销的直径为 d ,拉伸强度为 σ'_b ,剪切销铆钉结构的拉伸强度约为材料拉伸强度 σ'_b 的 $0.6 \sim 0.8$,并设切断剪切销安全系数为 2,则克服止推力 F_1 由式(6.5.17) 求出。

设活塞组件运动与壳体内壁之间的摩擦系数为 μ' ,对活塞的摩擦力为

$$F_2 = (F_1 + F_3)\mu' \quad (6.7.2)$$

在密闭药室,药剂爆燃产生的能量一部分消耗在管壁上,一部分损失在残渣中,而推动活塞做功的力约占药剂释放能量的 $30\% \sim 40\%$ (近似取 35%),所以,药剂燃烧放出的能量作用到活塞杆端面的压强为

$$P_m = \frac{FS}{0.35} \quad (6.7.3)$$

该值即为可靠做功所需的压强值。设装药的火药力为 f ,装填密度为 ρ ,余容为 a ,药室体积为 V ,联立式(6.5.12) 和式(6.7.3) 可得到火药装填密度 ρ ,则装药量为

$$W = \rho V \quad (6.7.4)$$

3) 密封设计

活塞式推冲器的输出特性很大程度上取决于推冲器的密封性。密封失效将使活塞式推冲器输出推力或速度下降,冲程不能完全释放,从而导致装置作用不可靠。所以,发火后,活塞式推冲器的活塞与筒体之间的运动密封必须可靠。这通常采用“O”形密封圈予以保证。由于发火瞬间产生的压力峰值极高,所以,应尽可能地增大“O”形密封圈的压缩量,如采取缩小“O”形密封圈的安装槽尺寸等。

除了在活塞与筒体之间必须采取可靠的运动密封外,整个非运动组件在高压燃气下不应对外发生泄漏。通常产生泄漏的地方有:一是插座基体和插针之间,由于材料收缩率不一致往往形成微漏通道;二是在“O”形密封圈受燃气压力作用变形和形成紧密密封之前存在一个时间间隙,此时,燃气可以绕过“O”形密封圈而进入活塞另一端空间向外泄漏燃气,这可以通过在活塞末端“O”形密封圈前设置挡焰环予以解决。

6.7.2 活塞式拔销器设计^[42]

典型活塞式拔销器结构如图 6.37 所示。它主要由柱状管壳、销子、剪切销、压力药筒、密封件、冲击吸能帽等组成。与活塞式推冲器相同,它也是一次性作用的单冲程装置,其作用过程是:当任一个压力药筒发火后,其输出的高温高压气体通过一个 $\phi 2.5\text{mm}$ 的小孔排出,进入体积极小的自由容腔以便给活塞的销子一端施压,压力增大到一定值后将剪切销切断并推动活塞,活塞向内运动拉出伸在外面的销子。销子缩回 12mm 后,活塞停止在冲击吸能帽内。冲击吸能帽实际上是一个薄壁钢扁壳,主要用于消除来自活塞和销子的过多能量,且防止其反弹。

1. 活塞式拔销器设计

活塞式拔销器的设计主要包括压力药筒选择和密封设计。压力药筒选择要用输出能量为依据,而不是压力峰值;密封设计不仅包括“O”形密封圈的装配,而且还应包括影响密封的其他因素。

1) 压力药筒选择

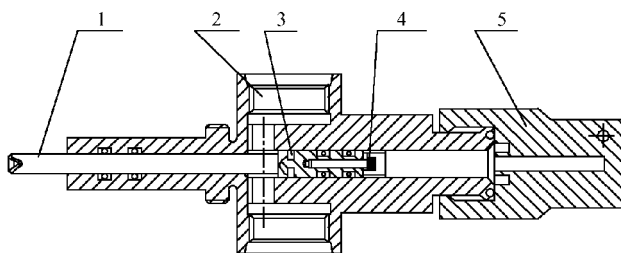


图 6.37 典型活塞式拔销器结构

1—销子；2—起爆器插口；3—剪切销；4—吸能帽；5—密封帽。

压力药筒的选择依赖于对其输出性能的参数的确定。通常压力药筒的输出性能是以在密闭容器(如 10ml)中测量装置发火后的压力波形及最大压力峰值来衡量的。但在用于做功装置时,药筒的输出是在可变容器内燃烧或做功,所以,这种定容法不能真实地测量出药筒的输出做功。压力药筒输出做功的能力只能以能量为衡量参数。

1966 年,美国麦克唐纳飞机公司研制出一种模拟火工品输出做功的能量测试装置(见图 6.38)。它由试件发火装置和能量传感器两部分组成。火工品组件发火后的能量推动活塞,使能量传感器中的金属蜂窝吸能体受到挤压。活塞直径为 12.7mm,由 0.05mm 铝箔制成的可挤压金属蜂窝吸能体提供一个 1.33kN (136kg)的抵抗力。使用这一装置可评估用于活塞式拔销器及推冲器的火工品的输出性能。其能量值是火工品作用之后金属蜂窝吸能体的变形量与金属蜂窝吸能体的挤压强度之积。金属蜂窝吸能体挤压强度值由跌落物体标定。

2) 密封设计

包括“O”形密封圈装配在内的密封设计与活塞式推冲器基本相同,但在活塞式拔销器中,影响密封的其他因素还有销子镀层被擦掉,粘在“O”形环表面等。

2. 应用失效与可靠性设计^[39,42,43]

1976 年,美国“海盗”拔销器曾作为火星表面释放天线装置用

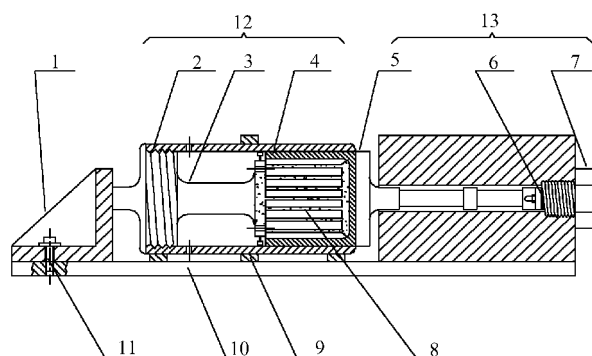


图 6.38 火工品输出能量测试装置

1—支撑架；2—套筒；3—砧；4—蜂窝件护圈；5—活塞；6—活塞帽；

7—连接装置；8—蜂窝件；9—支承块；10—底座；

11—紧固螺钉；12—能量传感器；13—起爆器发火装置。

于火星登陆工程。1986年，美国航天局兰格里研究中心准备将其应用于哈洛金淹星试验时，发现这种拔销器的冲程不合格。“海盗”拔销器的最初设计是靠调节拔销器内产生的峰值压力来理解作用裕度的。当将“海盗”起爆器的火工药量降低到在拔销器内产生正常峰压的一半时，拔销器仍能作用，当时就认为作用裕度为2，即是所需能量的2倍。20年后的失效调查发现：第一，早期发火试验中作用裕度较小，活塞并没有运动到它的可能冲程，活塞只接触了冲击吸收壳而无挤压。第二，活塞腔内的软铬酸盐涂层与“O”形环粘连妨碍了密封；销的硫化钼/石墨涂层被擦掉且积聚在销“O”形环的受压压力表面，妨碍了密封。第三，拔销器铝壳有损坏变形，而药筒传递能量主要受壳体材料、销/活塞涂层和“O”形环密封的影响，所以，这些变量将使拔销器作用性能降低。

为解决这一失效问题，对“海盗”拔销器进行了重新设计。先用钢代替铝作为拔销器壳体，然后在活塞/销表面使用电沉积的镍/特氟隆涂层，并在安装前对“O”形环界面进行了充分润滑，最后利用新的试验方法选择压力药筒及确定拔销器作用裕度。用火工品输出能量测试装置对3批药筒各测试5个~10个元件，测得

其传递能量为 11.2、14.3、6.0(N·m)。由此选择较大输出能量的药筒。拔销器作用所需能量可通过垂直坠落小球到真实装置上剪断剪切销,并使活塞冲程且锁定在吸能壳内予以确定。完成做功所需能量就是跌落高度与小球质量的乘积,已测得所需能量为 2.8 N·m。另外,使用 5 个真实装置测量的火工品传递能量为 18.6N·m。拔销器作用裕度定义为超出完成功能所需能量与完成功能所需能量之比,即 $(18.6-2.8)/2.8=5.6$ 。这样在量化参数基础上,通过在研制过程中确定作用裕度就会具有较高的可靠性和最小的飞行失效危险性,且使其装置和系统水平(真实结构)的试验量最小。

6.8 非电传爆系统设计与应用

火工品在航天飞行器中占有非常重要的地位,从运载火箭发射到航天器返回整个过程的各个程序动作都离不开火工品的作用。在国外航天器中,火工品已不是从属于某个分系统的个别元件,而是一个独立的分系统^[44]。

6.8.1 非电传爆系统连接设计^[45]

非电传爆系统的连接设计主要包括钝感电火工品与多根导爆索之间的连接歧管设计以及导爆索输出接头与终端火工装置的连接设计。

1. 歧管结构设计

所谓歧管就是把一个方向的传爆根据需要变换成若干个方向传爆的装置。根据需要的传爆路数(即系统终端执行任务的火工装置数量),歧管可分成两路歧管、三路歧管等。非电传爆系统连接设计主要就是各种歧管的设计。

歧管主要有独立结构和集束结构等两种基本形式。

独立结构的歧管是由壳体和 CDF 端接头组成,如图 6.39 所示。

歧管内每根 CDF 都有一个端接头,内装引爆 CDF 用的雷管。主要特点是 CDF 间相互独立,可根据不同应用任意改变 CDF 路数,具有结构简单、加工装配容易、零部件通用性好等特点。

集束结构的歧管是将所有 CDF 集成一束后联接在壳体内,用一个引爆雷管引爆所有的 CDF,如图 6.40 所示。

主要特点是歧管内总装药量小、作用后结构破坏小、系统作用同步性高。

从联接的可靠性及加工装配的工艺性考虑,歧管一般采用独立结构形式,所以,歧管设计可分解为 CDF 端接头设计、CDF 引爆设计和首发元件的主装药设计 3 部分。

1) CDF 端接头设计

由于 CDF 的外表面柔软,直接与歧管壳体联接比较困难,因此,可用一不锈钢端接头联接 CDF 和歧管壳体,如图 6.41 所示。CDF 装上后,灌胶并用专用紧口工具紧口四道,将 CDF 挤紧,同

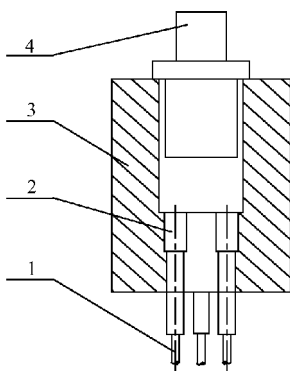


图 6.39 独立结构歧管

1—钝感电起爆器；2—CDF 端接头；
3—歧管壳体；4—CDF。

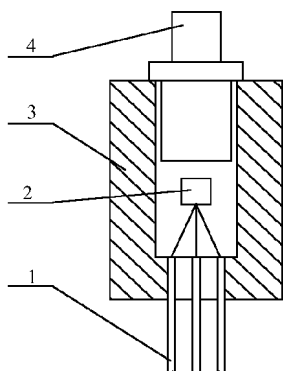


图 6.40 集束结构歧管

1—钝感电起爆器；2—雷管；
3—歧管壳体；4—CDF。

时保证密封。

CDF 端接头中心有一直径与柔性导爆索(MDF)外径相同的小孔,装配时,将 MDF 穿在小孔内,其端面紧贴引爆雷管,以保证

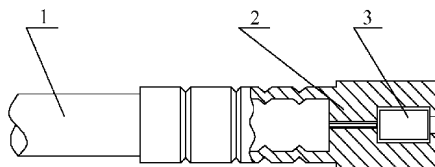


图 6.41 CDF 端接头结构

1—CDF；2—端接头壳体；3—引爆雷管。

引爆可靠。小孔的主要作用有二：一是定位 MDF；二是减少引爆端头爆轰产生的压力对 CDF 联接强度的影响。试验结果表明。当歧管内腔压力最小为 1136MPa 时，CDF 才可能从端接头被打出，这实际上是无法达到的。所以，可以认为 CDF 在作用中不会从歧管和端接头中打出，能满足无污染、无泄漏的要求。

2) CDF 引爆设计

在 CDF 端接头结构内，装有一个引爆 CDF 的雷管。CDF 路数越多，引爆雷管数量也越多，作用时对歧管的破坏作用也越大，因此，引爆雷管应最小化，如直径 3.0mm 等；引爆雷管结构与针刺雷管相似，起爆端的密封盖片要薄，如 0.05mm 的铝薄；装药可选起爆药和猛炸药两层；其输出要能可靠引爆 CDF。

3) 首发元件主装药设计

作为非电传爆系统用首发元件，钝感火工品应能可靠起爆歧管内所有 CDF 端接头中的引爆雷管。主装药的设计应考虑到安装方向、距离和歧管内腔自由容积的影响。存在自由容积时，引爆雷管实际上是由冲击波引爆的。由于引爆雷管内装起爆药的冲击波敏感度极高，所以首发元件主装药装 50mg 氮化铅时，就能使直线装配的引爆雷管起爆。但当首发元件装药为起爆药和猛炸药时，由于输出的是爆轰波，其方向性很强，且在空腔内侧向衰减很快，所以，可能存在不能可靠起爆侧向引爆雷管的现象。而由于引爆雷管内装起爆药氮化铅对压力敏感，当入射冲击波压力为 10MPa 时，引爆雷管就能被可靠起爆^[46]。当首发元件主装药为烟火药时，烟火药输出的高温高压气体充满整个自由容积，不存在显著的

方向性,且能保持结构完整,所以首发元件主装药使用烟火药更好些,特别是当引爆雷管与钝感火工品装配呈非直线状态时。

2. 输出接头结构设计

非电传爆系统输出接头主要是用于 CDF 与终端火工装置之间的连接,以保证可靠起爆终端火工装置。

为了使用安装方便,输出接头与终端火工装置一般是分开的。使用时,终端火工装置安装完成后,再用螺帽将输出接头联上。实际应用中,一般一根 CDF 引爆一个终端元件,但在许多情况下,为了保证系统作用的可靠性,也可采用两根 CDF 引爆一个终端元件。输出接头的结构与图 6.40 所示的 CDF 端接头结构基本相同,区别在于输出接头的输出为扩爆管,用来增加 CDF 的输出能量,以保证可靠引爆终端火工装置。

扩爆管装药分起爆药型和非起爆药型两类。起爆药型扩爆管通常装氮化铅,能被 CDF 可靠引爆,特别能用于 CDF 输出接头与终端火工装置非直线联接时;而非起爆药型扩爆管采用图 6.16 所示的无起爆药限制性导爆索接头形式,内装细结晶太安,更适合 CDF 输出接头与终端火工装置直线连接^[47]。

6.8.2 非电传爆系统应用介绍

1. 某运载火箭分离系统用非电传爆系统^[44]

某多级运载火箭分离系统曾经使用了多个电爆装置(见表 6.20),不但可靠性低、同步性差,分离面难密封、电源消耗大,而且发火电流和安全电流都较低。典型发火电流为 $1\text{A}\sim 2\text{A}$,安全电流为 $50\text{mA}\sim 200\text{mA}$ 。在电磁环境中存在着不安全因素,现要求对其分离系统进行安全性改造。

表 6.20 某运载火箭分离系统用火工品

火工品	类型	数量	主要性能	用途
爆炸螺栓	电	12	破坏载荷 18t	I—II 级分离
爆炸螺栓	电	12	破坏载荷 18t	II—III 级分离

反推火箭	电	8	冲量 $300\text{kg}\times 0.5\text{s}$	Ⅱ级反推
正推火箭	电	2	冲量 $200\text{kg}\times 3\text{s}$	Ⅲ级正推
爆炸螺栓	电	14	破坏载荷 12.5t	星箭分离
反推火箭	电	2	冲量 $300\text{kg}\times 0.5\text{s}$	星箭分离

美国军事规范 MIL—P—24014“预防电磁辐射对军械危害的一般要求”规定“尽量少用电爆装置,必要时采用钝感电爆装置”。美国军事规范 MIL—I—23659C“电起爆器的通用设计规范”对钝感电爆装置作了明确说明,其中要求发火电流 5A ,且 $1\text{A}1\text{W}5\text{min}$ 不发火。如果该运载火箭分离系统全用钝感电爆装置,仅 I—Ⅱ级分离的 12 个爆炸螺栓就需要 60A 的工作电流,弹上的电源往往难以满足。解决电源的惟一方法是用非电传爆系统减少电爆装置的数量。

1) I—Ⅱ级分离用非电传爆系统

目前, I—Ⅱ级分离使用了 12 个电起爆爆炸螺栓。这种点式分离若用线形分离代替,仅使用两个钝感电爆装置来起爆聚能切割索即可。这种线形分离已经在美国的人马座飞船、双子星座飞船、土星 V 号 I—Ⅱ级等系统中采用。但该火箭用这种方案的困难在于要对分离面附近的结构进行大的改动。作为对 I—Ⅱ级分离系统的安全性改造而言,这种方案是不可取的。当然,对一个新研制型号而言,选用线形分离是最佳的选择。

I—Ⅱ级分离系统进行改造的非电传爆系统如图 6.42 所示。

该非电传爆系统由 2 个钝感电爆装置、2 个 12 路传爆歧管、24 根限制性导爆索和 12 个非电爆炸螺栓组成。整个系统采用冗余设计,大大提高了可靠性。虽然该系统比较复杂,但弹体结构可不做任何改动,因而切实可行。另外,爆炸螺栓数量、结构、承载能力、连接方式基本上不变。只需要将爆炸螺栓的电起爆改为双股 CDF 起爆,并增加若干非电传爆元件,就将电爆装置数量由 12 个减少到 2 个,并使电爆装置钝感化。整个系统除 2 个钝感电爆装置外,其余全部是非电元件,大大提高了系统的安全性。

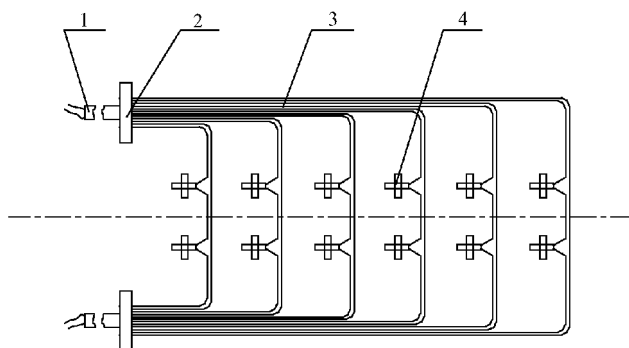


图 6.42 I—II 级分离系统用非电传爆系统

1—钝感电爆装置；2—歧管；3— 2×12 CDF；4—非电爆炸螺栓。

2) II—III 级分离用非电传爆系统

II—III 级分离过程是：当 II 级游动发动机关机 0.8s 后，装在 III 级上的 2 台正推火箭点火；当 II 级游动发动机关机 1s 后，装在 II—III 级分离面上的 12 个爆炸螺栓通电起爆；与此同时，装在 II 级上的 8 台反推火箭点火。整个 II—III 级分离过程共用 20 个火工装置，若全采用钝感火工装置，则需要 100A 的电流。当使用 2 个独立的非电传爆系统完成 II—III 级分离过程时，则只需要 4 个钝感火工装置。把装在 II 级上的 12 个爆炸螺栓和 8 台反推火箭构成一个独立的非电传爆系统，并与装在 III 级上的 2 台正推火箭完全独立，各自分别供电。整个 II—III 级分离过程由 20 个电火工装置减少到 4 个。整个系统采用冗余设计，可靠性得到了提高。

3) 卫星整流罩分离用非电传爆系统

卫星整流罩分离通常有纵向分离和周向分离 2 个分离面，共 14 个爆炸螺栓，其中纵向分离 8 个，周向分离 6 个。在周向爆炸螺栓分离 100ms 后，纵向爆炸螺栓再起爆分离。卫星整流罩分离要求对整流罩内的仪器设备无爆炸燃气污染。

卫星整流罩纵向分离和周向分离可用一个非电传爆系统完成，如图 6.43 所示。纵向分离采用分离板式膨胀管分离装置，周向分离是由两条钢带通过两个调节螺栓将整流罩的后圆锥段的框

紧紧地连接在一起。纵向分离和周向分离是火工品通过歧管和CDF连成完整的系统。分离时,2对共4个螺栓切割器切割张紧带,从而完成整流罩的纵向分离和周向分离。

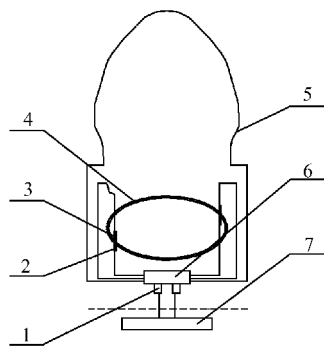


图 6.43 卫星整流罩分离系统

—螺栓切断器；3—拉紧螺栓；4—张紧钢带；5—CDF；
6—火工品点火装置；7—分离点火信号。

2. 某固体导弹分离系统用非电传爆系统^[48]

固体导弹弹体与再入体分离时,首先使连接弹体与再入体之间的爆炸螺栓解锁;并立即使弹体上固体火箭发动机的推力终止,同时还要在弹体上施加一定的负推力,从而使再入体保持惯性飞行,弹体作减速飞行,完成弹体与再入体的分离。固体火箭发动机关机一般采用发动机前封头上的推力终止机构的方法,使燃烧室的燃气在通过发动机主喷管排出产生正向推力的同时,还要通过几个推力终止机构的反向喷管向斜前方排出,产生比正推力更大的负推力,以达到发动机推力终止并产生一定负推力的目的。所以,固体导弹分离火工系统应包括完成数个解锁功能的火工装置和数个打开推力终止机构的起爆器。假设一固体导弹有4个无污染解锁爆炸螺栓和4个打开推力终止机构的起爆器,若全部采用钝感电爆装置,会存在4个问题:第一,系统电源大。8个装置需要的供电电流很大。第二,作用不同步性会造成分离时对再入体的扰动。钝感电爆装置发火时间长,同步性差,各爆炸螺栓之间、

各推力终止起爆器之间难以同时作用,对于作用时冲击较大的 4 个推力终止起爆器而言,这种不同步性(约为毫秒级)必然造成分离时姿态的扰动。第三,作用不同步性可能会造成爆炸螺栓和推力终止起爆器作用时序的倒置,若推力终止起爆器先作用,会对再入体的飞行姿态扰动很大。第四,钝感电爆装置数量多,安装分散,很难采用安全保险机构,系统的安全性难以进一步提高。但采用非电传爆系统,在采用冗余设计时,钝感电爆装置数量由 8 个减少到 2 个,终端采用 4 个非电无污染爆炸螺栓和 4 发非电推力终止起爆器,完成导弹分离功能(见图 6.44)。非电传爆系统首先降低了钝感电爆装置的数量;其次,钝感电爆装置和歧管内引爆雷管作用快慢不影响终端火工装置的同步性,使再入体能有一个良好的飞行姿态;最后,通过 CDF 长度不同,确保爆炸螺栓和推力终止起爆器的作用时序。另外,系统采用冗余设计,大大提高了可靠性。

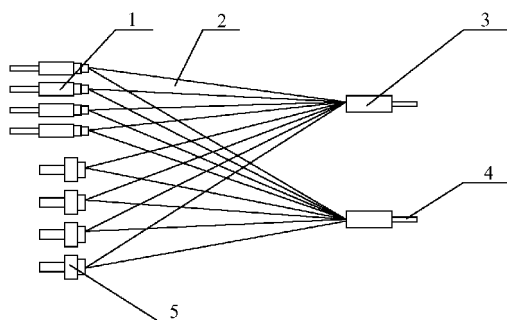


图 6.44 固体导弹分离系统用非电传爆系统

- 1—无污染爆炸螺栓(4 发); 2—限制性导爆索(16 根); 3—8 路歧管(2 个);
4—钝感电起爆器(2 发); 5—推力终止起爆器(4 发)。

参 考 文 献

- 1 Bement L J. Manual for Pyrotechnic Design, Development and Qualification. N95—31358, 1995
- 2 马宏林. 火工品在空间飞行器上的应用. 火工品, 1983(1):5
- 3 Brauer K O. Handbook of Pyrotechnics. 1974
- 4 王希季等. 航天器进入与返回技术. 北京: 宇航出版社, 1991:181
- 5 Schutze N R. NASA Pyrotechnically Actuated System Program. The First NASA pyrotechnic system workshop(USA), 1992
- 6 Graues J J. 航天飞机火工品纵览. 导弹火工技术, 1984(1):1
- 7 任萱. 军事航天技术. 北京: 国防工业出版社, 1999
- 8 Steffes P. Pyrotechnically Actuated System Database and Application Catalog. N95—18387. 1995
- 9 Roberts Research Lab. . Development and Verification of NASA Standard Initiator—II. N88—29044, 1988
- 10 蔡瑞娇. 火工品设计原理. 北京: 北京理工大学出版社, 1999
- 11 陈福梅. 火工品原理与设计. 北京: 兵器工业出版社, 1990. 174
- 12 Hi-shear Technology Corp. . EBW detonator
- 13 Tweed P B. 改进型爆炸桥丝起爆器的研制. 导弹火工技术, 1983(1)
- 14 严炳林. 爆炸桥丝发火管的研究设计. 导弹火工技术, 1986(1):3
- 15 Munger A C. Development of A Fully Qualified Detonator for the Titan Launch Vehicle. 22th Pyro. Semin. , 1996
- 16 龚翔. 小药量柔性导爆索的传爆可靠性. 火工品, 1998(1):1
- 17 龚翔. 无污染导爆索的研究与设计. 导弹火工技术, 1986(1):54
- 18 Garrison C G. 柔性导爆索的包覆. 导弹火工技术, 1986(1):85
- 19 齐淑敏. 金属管延期索研究. 兵工学报(火、化工分册), 1984(3):67
- 20 二宫一芳. 精密延期索. 火工品, 1984(1):47
- 21 刘红旗. 金属管延期索的初步研究. 导弹火工技术, 1986(1):25
- 22 望月昌. H—1 火箭上段固体火箭发动机及火工品类的开发. 工业火药(日), 50(1), 1989
- 23 吴惠国. 隔板起爆器的研究与设计. 导弹火工技术, 1986(1):31
- 24 Corwin L W. 土星隔板起爆器的研制. 导弹火工技术, 1989(1):59
- 25 吴惠国. 无起爆药隔板点火器的研制. 导弹火工技术, 1994(1):18
- 26 刘红旗. 隔板起爆器与抛罩导爆索的设计与实验. 导弹火工技术, 1990(1):13

- 27 龚翔. 无起爆药限制性导爆索接头. 导弹火工技术, 1994(1):64
- 28 吴惠国. 大药量 1A1W 隔板点火器的研制. 导弹火工技术, 1989(1):17
- 29 卢秀珍. 隔板式延期起爆管延时精度的研究及控制方法. 导弹火工技术, 1994(1):
77
- 30 陈志玮. 延时隔板起爆器的设计. 火工品, 1995(2):45
- 31 徐云庚. 延期隔板点火器研究. 火工品, 1996(1):1
- 32 徐云庚. 影响隔板点火器延期时间因素的研究. 火工品, 1983(2):11
- 33 Barbour R T. Pyrotechnics in Industry. The Kiningsport Press, USA, 1981
- 34 刘春明. 供卫星整流罩分离用的无污染爆炸螺栓的研究设计. 导弹火工技术, 1989
(1):1
- 35 李志强. 三种解锁螺栓综述. 导弹火工技术, 1986(1):1
- 36 成琦. 聚能切割网络系统在航天器和导弹武器上的应用研究. 导弹火工技术, 2001
(1):67
- 37 谢鲁. 膨胀管分离装置研究. 火工品, 1997(2):1
- 38 谢鲁. 膨胀管分离装置研究. 导弹火工技术, 2001(1):1
- 39 王凯民. 航天火工品输出性能试验及作用裕度确定. 火工品, 1999(3)
- 40 严为林. 小型活塞式启动器的设计. 导弹火工技术, 1981(1):1
- 41 魏巧兰. 小型敏感动力源火工品. 火工品, 1996(1):23
- 42 Bement L J. 火工装置功能裕度的测定. 导弹火工技术, 2001(1):72
- 43 Bement L J. Integration of Pyrotechnics into Aerospace System. N94-29634, 1994
- 44 孙秀亮. 对我国运载火箭分离火工品系统的改革. 火工品, 1993(1)
- 45 杜晓东. 多路非电传爆系统的结构设计. 导弹火工技术, 1994(1):1
- 46 王凯民. 传爆序列界面能量传递技术研究. 北京理工大学博士学位论文, 2002
- 47 Smith F Z. 供航天器使用的切割分离系统. 导弹火工技术, 1989(1):34
- 48 马吉亭. 新型的固体导弹分离火工系统. 火工品, 2002(1):8

第 7 章 爆炸序列设计技术

7.1 概 述

火工品通常组成爆炸序列在武器弹药中使用,以构成武器弹药的激发系统。弹药爆炸序列一般是由一系列激发感度由高到低而输出能量由低到高的火工品组成的有序排列,其功能是把一个相当小的初始冲能有控制地放大到适当的能量,以起爆弹药主装药或引燃发射装药^[1]。它一般由 3 类火工元件组成:第一,转换能量元件(如火帽、雷管),将外界施加的电、机械能转换成爆炸输出;第二,控制时间元件(如时间药盘、延期管),以一定的时间要求完成延期功能;第三,放大能量元件(如导爆管、传爆管、传火管),其输出能足以起爆主装药或引燃发射装药。弹药的爆炸序列按其作用不同可分为传爆序列和传火序列等两类,其中传爆序列输出爆轰冲能,用以引爆弹丸中的爆炸装药;而传火序列输出火焰冲能,用以引燃火炮发射装药、火箭发动机点火装药等。

7.1.1 典型引信传爆序列设计分析^[2]

弹药引信最初采用的是初级的直列式传爆序列,但因雷管感度过高,导致弹药安全性差,屡屡出现膛炸事故,因此,从 1890 年起,开始出现了隔爆式引信,即传爆管与雷管不是直线排列,形成错位结构的传爆序列^[3],从而确立了现代弹药传爆序列的基本结构。从此以后,引信的技术内容主要在于为提高安全性而设计各种保险和解除保险机构^[4]。随着隔爆引信的大量使用,对引信传爆序列就有了传爆可靠和隔爆安全的设计要求。从引信隔爆安全

性要求分类,传爆序列分为非保险型和保险型传爆序列;从配用弹种及需求背景分类,传爆序列又分为迫击炮弹、中大口径榴弹及小口径弹用传爆序列。

1. 迫击炮弹引信传爆序列

迫击炮是陆军装备数量最多的火炮,它装备的各类弹药均配有机械触发引信。第一代迫击炮弹引信传爆序列是击针直接刺激针刺雷管(中口径)及击针击发针刺火帽,火帽点燃延期药及火焰雷管(大口径)。这两种引信均无专门的延期解除保险装置,所以安全性较差,屡屡发生事故。第二代中口径弹传爆序列基本未变,不同之处是增加了钟表定时机构(延期解除保险机构)。而第二代大口径弹采用火药定时解除保险机构,其传爆序列分别为击针—针刺雷管—传爆药(瞬发)和击针—针刺延期雷管—传爆药(延时),而针刺火帽主要起点燃火药保险用。当使用钟表定时保险时,火帽就失去了存在价值。延时装定时,用一个针刺延期雷管代替了针刺火帽—延期药—火焰雷管组合体,大大简化了传爆序列。即使有的引信中仍有火帽,但其用途发生了变化。随着保险机构的完善,火帽会逐渐弃用。尽管第二代引信都具有专门的延期解除保险机构,但仍为单一环境保险(靠后座力解除保险),安全性仍没有充分保障。第三代引信采用双环境力保险机构,炮口多用机械方法实现延期解除保险。传爆序列为击针—针刺延期雷管—导爆药。导爆药变为适合安全性标准的传爆药,并采用隔爆机构。新一代通用迫弹引信可配用于 60mm~120mm 迫击炮各弹种,并在引信机芯不变的前提下,通过调整引信外形与弹丸的配合尺寸,形成派生引信,构成引信系列。传爆序列分两种作用方式:瞬发时,击针—针刺雷管—导爆药;延期时,击针—针刺延期雷管—导爆药。

2. 中大口径榴弹引信传爆序列

中大口径榴弹是装备量较大、用途广泛的弹种,主要用于杀伤敌人的有生力量、武器装备、车辆工事等。根据不同的战术要求,榴弹可具有瞬发、惯性、延期、空炸等要求,其榴弹引信对应可分为

机械触发引信、无线电引信等,其中前者使用量最大。在第一代榴弹引信传爆序列中,尽管首发元件、继发雷管、延期药的尺寸和种类各不相同,但核心火工元件是火帽和火焰雷管。使用火帽的重要原因是它能较长距离地通过弯曲孔或直孔传火通道可靠地引爆火焰雷管及延期药。但火帽—火焰雷管序列是利用火焰热来作起爆作用,整个过程作用时间较长,瞬发度高达毫秒级。另外,在延期和惯性作用时,由于热作用时间长,使总系统的延期时间不确定且复杂化。由于当时的电引信也采用了火焰雷管,因而同样存在着相同的问题。

美国 M739 系列引信是美国 20 世纪 80 年代的中大口径榴弹机械触发基型引信^[5],它是集瞬发、惯性、延时三种装定为一体的引信,是榴弹机械触发引信的代表。其传爆序列作用图如图 7.1 所示。

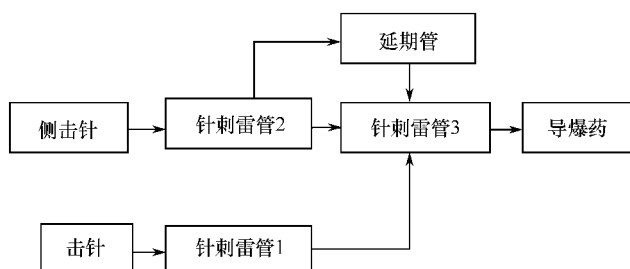


图 7.1 榴弹机械触发引信传爆序列

结合其他类似引信,有关榴弹机械触发引信传爆序列界面尺寸范围见表 7.1 所列。

从表 7.1 所列数据可以看出,相同火工元件构成传爆序列时,其界面有很大的灵活性,这是引信及传爆序列形成通用化、系列化的前提。在这种传爆序列中,核心元件是敏感小型化的继发针刺雷管。它能敏感地接受来自直孔或弯曲通道的爆炸气体压力或破片而迅速起爆,同时为隔爆装置的小型化提供了条件。另外,针刺雷管作为首发元件和继发元件,代替了第一代榴弹引信传爆序列的火帽—火焰雷管序列,用冲击波压力作为刺激源就保证了延期

元件及继发雷管的密封性和起爆迅速性,使瞬发度由过去的毫秒级提高到目前的微秒级。而首发元件采用针刺雷管既保证了与火帽相似的敏感输入条件,也具有与火帽可比的输出能力,即能通过直孔和弯曲通道长距离地起爆敏感的继发雷管。延期装定时,延期元件由非密封变成密封,不仅使长贮性能获得改善,而且用针刺雷管作刺激源,使延期精度显著改善。以 M732A1 为代表的近炸电引信,其电雷管发火后驱动击针刺刺激针刺雷管,针刺雷管起爆后可以通过 25.4mm 间隙起爆导爆管。用电雷管取代了电点火管,用针刺雷管取代了火焰雷管,瞬发度也得到较大提高。

表 7.1 榴弹机械触发引信传爆序列界面尺寸

	界 面	通道尺寸及结构
瞬发时	针刺雷管 1—针刺雷管 3	$\phi 3.2\text{mm} \times (30\text{mm} \sim 170\text{mm})$ (直孔)
惯性时	针刺雷管 2—针刺雷管 3	$\phi 3\text{mm} \times 5\text{mm}$ (直孔) + $\phi 3\text{mm} \times 5\text{mm}$ (斜孔) + 3mm~5mm 空隙
延期时	针刺雷管 2—延期管	$(\phi 1\text{mm} \sim 2\text{mm}) \times 10\text{mm}$
	延期管—针刺雷管 3	$\phi 3\text{mm} \times 5\text{mm}$ (直孔) + $\phi 3\text{mm} \times 5\text{mm}$ (斜孔)
扩爆时	针刺雷管 3—导爆管	0.5mm~1.0mm 间隙或 $\phi 3\text{mm} \times (1.5\text{mm} \sim 5\text{mm})$

3. 小口径弹传爆序列

小口径弹是指口径大于 20mm 而小于 37mm 的弹丸,可有效对付如武装直升机、坦克等低空和超低空或地面突然出现的近程目标。其配用引信按要求有瞬发、惯性、延期及近炸等功能,但大多数为机械触发引信。由于弹丸小,所配用引信及火工品均要求尺寸小、功能优良和安全性好。

早期的小口径弹用引信均属非保险型引信,其传爆序列为击针—火帽—火焰雷管—主装药。它主要靠火帽通过气动延期体提供短延期,以达到进入目标一定厚度后起爆的目的。同时,客观上也有利于解除炮口保险,但因无保险机构,所以屡屡发生事故。作为一种改进,在第二代引信传爆序列中,使用两个针刺火帽,其中

之一为侧击火帽,起炮口远解作用;另一针刺火帽则在碰击目标后由击针起爆,再起爆火焰雷管。同时,由于雷管与导引药之间有隔爆装置,安全性得到了提高。在高炮触发引信中,使用的传爆序列则为击针—针刺雷管—导引药。小口径引信使用的小型雷管输出能力较小,这不仅缩小了隔爆机构尺寸,而且雷管起爆导引药而不是直接起爆主装药。针刺雷管比火焰雷管更易小型化和密封化,也更有益于隔爆机构特别是空间严格限制的小型引信的设计。在美国 20 世纪 80 年代定型的 M758 及 M759 引信中,所用的小型针刺雷管可以通过 6mm 间隙起爆 PBXN-5 导爆管^[6]。另外,小口径弹多用于己方的防空作战,所以,要求引信具有自炸功能。典型的传爆序列如图 7.2 所示。

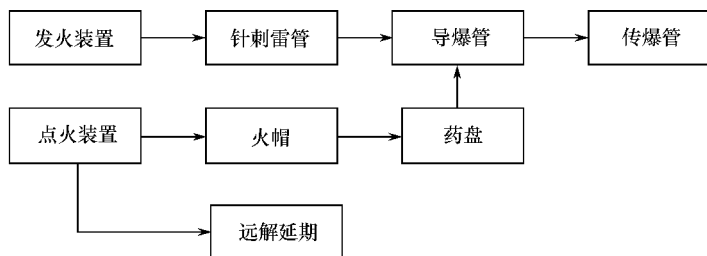


图 7.2 典型小口径引信的传爆序列

远距离解除保险和自炸既可以用机械机构也可以用上述的火工品完成。由于传统的药盘和远解延期黑药不防潮,长贮性能差,元件数量多,工艺结构复杂,失效率高,为此,已研制出组合火工品(第 2 章已有详述),即用一个密封的组合火工件完成发火、点火、延期、起爆等系列功能,这既解决了以上问题,又简化了引信的设计^[7]。

7.1.2 引信传爆序列设计要求与内容

弹药引信传爆与隔爆转换是通过引信的保险与解除保险装置实现的,所以,传爆序列的基本要求是传爆可靠和隔爆安全。当引信解除保险要求作用时,火工元件之间必须传爆可靠,以完成引爆

主装药的目的;而引信处于保险状态而不要求作用时,火工元件之间必须隔爆安全。所以,传爆序列设计实质上就是火工元件之间的传爆可靠性和隔爆安全性的设计。

从典型引信传爆序列设计分析中可知,一个完整的传爆序列设计应包括:第一,首发雷管通过直的或弯曲的传爆通道起爆继发雷管,简称为雷管—雷管传爆界面设计;第二,雷管—导引传爆管—传爆药—主装药界面的设计,简称为扩爆界面可靠性设计;第三,雷管—导引传爆管界面安全隔离的设计,简称为隔离界面安全性设计。因此,传爆序列设计内容既包括传爆、扩爆和隔爆界面设计,也包括构成这些界面的火工元件设计。

7.2 雷管—雷管界面传爆设计

各类弹药机械引信传爆序列的发展大致都经历了两个阶段:第一,火帽—雷管阶段,其特点是作用时间长(达毫秒级),引信瞬发度较低,延期装定时,延期时间不稳定,所以,这种传爆序列多用于早期的引信。第二,雷管—雷管阶段,其特点是作用时间短。当首发针刺雷管作用后,小型化的继发针刺雷管能敏感地接受来自长通道的首发雷管的输出能量而迅速起爆,它是这种传爆序列的核心组件,其小型化客观上为隔爆装置的小型化提供了保证,因此,这种传爆序列广泛应用于隔爆型引信。

雷管—雷管传爆界面主要包括两方面:其一是瞬发装定时,首发雷管通过直孔通道起爆位于安全机构中的继发雷管;其二是延期装定时,首发雷管通过弯曲的通道起爆偏离轴线的延期雷管,后者再起爆位于安全机构中的继发雷管。位于安全机构中的继发雷管是高敏感的针刺雷管。

7.2.1 雷管—直通道—雷管传爆设计^[8]

传爆序列系列化设计是引信系列化设计的核心。传爆序列系列化设计的最简单的方法就是使用相同的火工元件,通过改变直

孔传爆通道长度(几十毫米至百毫米),构成首发雷管一直通道—继发雷管系列。直孔通道的极限长度和传爆起爆可靠性的设计是这种传爆序列系列化设计的关键。

1. 传爆机理分析

当首发雷管爆炸后,其爆炸气体将向通道内膨胀,在空气内形成初始冲击波,同时向爆炸产物内传入稀疏波。初期,空气冲击波与爆炸产物连在一起,且爆炸产物压力要大于空气冲击波。随着进一步膨胀,空气冲击波压力大于爆炸产物压力,且二者逐渐脱离。最后冲击波独自向前传播,此时,当继发雷管只受到空气冲击波的作用时,即使空气冲击波能使其起爆,继发雷管作用时间也会较长;而当受到未完全脱离的冲击波和产物的共同作用时,继发雷管作用时间将较短。

在某一通道长度处,有些首发雷管输出的空气冲击波与爆炸产物未分离,作用时间较小;而另外一些雷管则出现了分离,对应的作用时间较大。这说明该位置能反映出首发雷管输出之间的差异。在传爆作用时间上,这种差异表现忽大忽小,极不稳定。作用时间的稳定性是传爆序列设计的基本要求。把具有稳定作用时间的最大通道长度称为极限长度。

2. 实验设计

在选定传爆序列首发雷管、直孔通道直径和继发雷管后,通道的极限长度可通过测定针刺雷管—直孔通道—针刺雷管序列的作用时间及其稳定性予以确定,这里所说的极限长度就是通道的最大长度。模拟实际引信结构(见图 7.3)进行作用时间测试:第一步使用电探针法测量首发雷管起爆后经长通道起爆继发雷管完成输出的时间 t_1 ,传爆长度为通道长度与继发雷管长度之和;第二步使用高响应速率的 PVDF 压力计测量首发雷管爆炸输出经通道传递到继发雷管输入端的时间 t_2 ,传爆长度为通道长度。等通道长度下的两时间差 $\Delta t (\Delta t = t_1 - t_2)$ 即为继发雷管的作用时间。选用通道尺寸为 $\phi 3.2\text{mm}$ 。除缓冲垫圈和火工元件外,其余零件均选用 LY12 硬铝材料。当继发雷管为 M55 小型针刺雷管,而首发

雷管分别选用 M94 和 M55 铝壳雷管(参数见表 7.2)时,测到的 M94→M55 及 M55→M55 序列作用时间随通道长度的变化情况如表 7.3、表 7.4 所列。

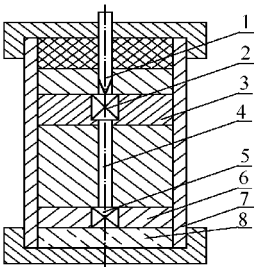


图 7.3 长通道传爆模拟实验示意图

1—击针;2—首发针刺雷管;3—雷管座;4—传火通道;
5—继发针刺雷管;6—雷管座;7—套筒;8—垫块。

表 7.2 火工品参数^[23]

雷管	尺寸/mm	针刺药/mg	起爆药/mg	输出药/mg	盖片厚度/mm
M55	$\phi 3.7 \times 3.63$	25	56	19	0.07
M94	$\phi 4.24 \times 6.1$	30	75	75	0.12

表 7.3 M94→M55 序列作用时间测量结果

L/mm	90		265			365	465		585		
$t_1/\mu s$	18.6	20.0	87.0	90.0	92.6	260.0	232.0	413.0	288.0	403.0	621.0
$t_2/\mu s$	16.3	18.16	73.4	74.7							

表 7.4 M55→M55 序列作用时间测量结果

L/mm	90	150		210		265	365	465	585	
$t_1/\mu s$	24.0	42.4	40.2	69.5	142.2	158.5	301.0	247.0	306.0	860.0
$t_2/\mu s$	20.9	33.3	39.0			71.1			254	262

从表 7.2~表 7.4 所列可以看出:M94→M55 和 M55→M55 序列作用时间分别在通道 265mm 和 150mm 处具有稳定性。也就是说,M94→M55 和 M55→M55 序列的直孔通道的极限长度分

别近似为 265mm 和 150mm。

3. 数值模拟^[9]

1) 计算模型建立及其依据

用图 7.3 所示模拟装置进行实验后发现,首发雷管的爆炸对周围的硬铝 LY12 约束体有强烈的冲击压缩作用,雷管座孔径显著增大,即它的爆炸能已大量消耗在对约束体的膨胀做功上。据此推断雷管输出进入长通道的能量仅是与通道直径相对应的装药量(即有效装药)。这样就可以将图 7.3 所示的模拟实验系统简化为图 7.4 所示的简化物理模型。

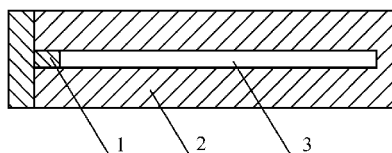


图 7.4 计算的简化物理模型

1—雷管有效装药；2—约束体；3—传火通道。

2) 首发雷管装药简化处理

引信中使用的首发雷管一般为针刺雷管,其基本装药有针刺药、起爆药和输出炸药等 3 层装药。利用爆热参数将针刺药和起爆药量换算成等能量的 RDX 输出药量。130 针刺药爆热约为 $0.834 \times 10^3 \text{ kJ/kg}$,起爆药氮化铅爆热为 $1.52 \times 10^3 \text{ kJ/kg}$,输出药 RDX 爆热为 $5.42 \times 10^3 \text{ kJ/kg}$ 。

由于爆热不同,需根据能量相似原理将不同种类装药换算成黑索今药量,转换公式为

$$W_e = W_i \frac{Q_i}{Q_e} \quad (7.2.1)$$

式中 W_i ——针刺药或起爆药药量；

Q_i ——对应的爆热；

W_e ——折合成输出装药黑索今的药量；

Q_e ——黑索今的爆热^[10]。

这样就得到雷管的折合药量。同时再将施主雷管的有效装药视为与通道尺寸对应的折合,即 M55 和 M94 的计算装药尺寸分别为 $\phi 3.20\text{mm} \times 3.0\text{mm}$ 和 $\phi 3.20\text{mm} \times 5.3\text{mm}$ 。

3) 数值模拟结果

利用 LS-DYNA 3D 程序计算了首发雷管 M94 和 M55 在传爆通道中不同位置处的压力 P 、冲击波到达时间 t , 计算结果见表 7.5 和表 7.6 所列。

表 7.5 M94 雷管爆炸输出在传爆通道中
不同位置处的参数计算

L/mm	30	90	150	210	265
$t/\mu\text{s}$ (计算)	5.5	18.5	34.0	47.5	62.5
$t/\mu\text{s}$ (实验)	5.47	17.24	33.8	46.8	73.95
P/MPa (计算)	26.5/49.0	14.5/18.0	10.0/11.0	9.0/10.0	8.0/7.0
注: 压力值 P_1/P_2 , 其中 P_1 指冲击波压力峰值, P_2 指产物压力峰值					

表 7.6 M55 雷管爆炸输出在传爆通道中
不同位置处的参数计算

L/mm	30	90	150	210	265
$t/\mu\text{s}$ (计算)	6.0	20.0	36.0	53.0	68.0
$t/\mu\text{s}$ (实验)	5.8	21.1	36.9		71.1
P/MPa (计算)	22.5/23.5	9.6/10.0	8.0/6.0	6.0/5.8	4.5/4.0
注: 压力值 P_1/P_2 , 其中 P_1 指冲击波压力峰值, P_2 指产物压力峰值					

从计算结果可知, M94 雷管爆炸输出在通道 265mm 处的冲击波压力/产物压力为 8.0MPa/7.0MPa, 而 M55 雷管爆炸输出在通道 150mm 处的冲击波压力/产物压力为 8.0MPa/6.0MPa, 且冲击波压力开始大于产物压力。另外, 计算结果表明 M55 继发雷管可靠起爆的入射冲击波压力为 8.0MPa。当 M55 继发雷管具有作用稳定性时, 传爆序列长通道的极限长度约为首发雷管装药高度的 40 倍(对 RDX)。对其他装药, 可折合成 RDX 药量进行估算。

4)起爆可靠性

位于通道不同长度处的继发雷管的起爆作用裕度则可通过比较该处压力与极限长度处的起爆压力予以确定。例如对 M94→M55 序列,当继发雷管位于 150mm 处时,冲击波压力为 10.0MPa,则起爆作用裕度为 $10.0/8.0=1.25$ 。

7.2.2 雷管—弯曲通道—延期雷管传爆设计

当引信同时需要瞬发、短延期等多种作用时,传统方法是设计与瞬发传爆序列独立的短延期传爆序列。它通常有两种结构:其一是侧击针—侧雷管—延期管—继发雷管序列,结构繁杂,火工品元件多;其二是侧击针—侧延期管—继发雷管序列,延期时间易受目标特性、刺入速度的影响。但如果将瞬发、短延期传爆序列进行组合设计,即瞬发装定时,传爆序列为主击针—首发雷管—直通通道—继发雷管,而短延期装定时,传爆序列为主击针—首发雷管—弯曲通道—延期管—继发雷管,则会减少火工品元件和激发机构的数量,从而使结构简化、成本降低、作用可靠。这一新型延期设计的作用过程为:将延期管置于侧向非轴线位置,首发雷管的爆轰输出通过两个近似直角的弯曲通道起爆延期管,延期管的爆轰输出再通过斜传爆通道起爆位于安全机构中的继发雷管^[11]。组合传爆序列如图 7.5 所示。这种组合传爆序列设计的重点是延期管的设计。

1. 延期管的设计

延期管的可靠起爆与引信首发雷管的输出有很大关系。引信首发雷管的爆炸输出主要是冲击波、破片和热爆炸气体。当其经过近似直角的弯曲通道后,破片将被阻止到直通道内,所以起爆延期管的能量主要是爆炸产物膨胀产生的空气冲击波及产物的热作用。当形成的空气冲击波强度较大时,可直接起爆延期管,此时,延期管的首发装药采用对冲击波敏感的起爆药或针刺药,如针刺延期雷管;而当空气冲击波强度较小时,只能使用产物的热作用来点燃延期管,此时,延期管首发装药只能采用对热作用敏感的点火

药或延期药,如火焰型延期雷管,由于火焰型延期雷管不使用针刺药,所以,具备安定性高、传爆可靠和延期平稳的特点。

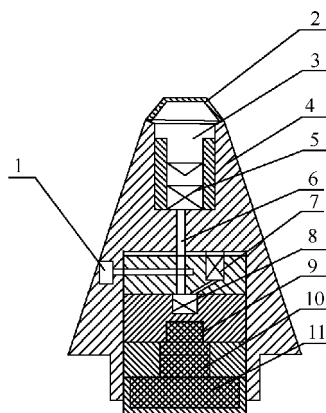


图 7.5 组合传爆序列

1—阻火杆；2—引信帽；3—击针；4—引信体；5—首发雷管；6—传火孔；
7—延期管；8—继发雷管；9—导爆管；10—扩爆管；11—传爆管。

在传爆通道尺寸和结构确定后,影响空气冲击波强度的主要因素是首发雷管的输出装药。输出过小,影响延期管的起爆可靠性,而输出过大将会影响延期精度。有两种方法可用来调整延期管输入能量:其一是改变首发雷管的输出装药;其二是改变延期管输入端盖片厚度。

2. 引信使用要求

由于延期管的起爆能量来源于首发雷管的爆轰输出,所以,传爆通道的密封性直接影响着延期管的作用可靠性。实际引信中,影响主传爆通道密封性的主要因素是装定杆阻火部位与引信体内孔的配合精度。

7.3 传爆序列扩爆元件设计

传爆序列具体作用过程是:在引信安全系统解除保险之后,安

全机构中的雷管与导引传爆管处于直列状态,起爆指令使雷管起爆炸作用时,其输出能可靠引爆导引传爆管,而这一放大的爆轰能量再起爆传爆管,最后引爆战斗部主装药。这种爆轰能量的逐级扩大是通过雷管—导爆管—传爆管—主装药多个界面完成的,其设计简称为传爆序列扩爆可靠性设计。它主要包括导爆管、传爆管元件设计及界面爆轰能量传递设计等。

7.3.1 传爆药设计

目前,多数引信的导爆管装药和传爆管装药都采用同一种炸药,两者仅是尺寸不同而已,所以可以概括地将导传爆药统称为传爆药。

1. 传爆药感度要求与鉴定试验

1) 传爆药感度要求

传爆序列选择传爆药的主要要求是感度,而对药剂感度的要求首先来源于安全性考虑。长期以来,引信传爆序列的“错位”保险要求已成为引信设计安全性准则之一。与此相应的是对“错位”保险以下的导爆药和传爆药的感度作出限定,以保证在隔离状态时发射和使用弹药的安全,否则,传爆序列的隔爆设计就毫无意义。其次,药剂感度的要求来源于传爆可靠性的考虑。传爆药在传爆序列中具有双重作用,对雷管来讲,它是被发装药,须依靠雷管才能起爆,即作为受主,要求传爆药的感度适中,以兼顾起爆可靠性和安全性;对主装药来讲,它又是主发装药,即作为施主,要求传爆药的爆轰速度要高,以提高其单位质量的起爆能力^[12]。

2) 传爆药鉴定试验^[13]

在 1950 年之前,特屈儿是广泛用于美国军械产品中导爆管和传爆管的标准传爆药,所以,普遍认为“感度不高于特屈儿的炸药”才可用作传爆药。由于特屈儿在制造过程中存在污染问题,美国从 1970 年就开始规定特屈儿不再生产,不得用于新研制的产品。

随着传爆药新品种的不断出现,美国军标 MIL—STD—1751《炸药安全性和性能鉴定试验》中规范了传爆药安全性鉴定的试验

内容,主要有冲击波感度小隔板试验、撞击感度试验、撞击易损性试验、真空安定性试验、桥丝点火试验、热烤爆性试验、静电感度试验、摩擦感度试验等。通过上述试验及爆速测定的药剂才能定为许用传爆药,其爆速应不小于主装药爆速。

2. 国内外许用传爆药介绍

1) 美国许用传爆药介绍^[13]

从 1977 年起,美国军标 MIL—STD—1316B《引信安全性设计准则》就给出了供美国陆、海、空三军通用的许用传爆药及其配方(见表 7.7)。

表 7.7 美国许用传爆药及其配方

药剂	规 范	配方/%
A5	MIL—E—14970	黑索今 98.75、硬脂酸 1.25
CH—6	MIL—C—21723	黑索今 97.5、聚异丁烯 0.5、石墨 0.5、硬脂酸钙 1.5
PBXN—5	MIL—E—81111	奥克托今 95、氟化橡胶 5
PBXN—6	WS—12604	黑索今 95、氟化橡胶 5
PBX9407	MIL—R—63419	黑索今 94、埃克森(Exon)6
DIPAM	WS—4660	3,3'—二氨基—2,2',6,6'—六硝基联氨炸药
HNS—I	WS—5003	六硝基芪

A5 是美国 20 世纪 60 年代研制的,其性能与特屈儿基本接近,但成型性能差些,所以,多用于美国陆军引信的传爆管装药。CH—6 的爆轰感度及造粒和流散性能与特屈儿接近,比较适合于自动压药。PBXN—5(奥克托今基炸药)和 PBXN—6(黑索今基炸药)是使用双峰颗粒尺寸的混合物,在标准装填压力下会得到较高的装填密度。双峰颗粒尺寸是指含 75% 大颗粒,其余 25% 属小颗粒,比大颗粒尺寸一半还小。PBXN—5 的性能最接近于特屈儿,能被小型爆炸元件可靠引爆,更适合作导爆管装药使用。PBX9407 的起爆感度与 PBXN—5 接近,可压制成导爆管和小尺

寸的传爆药柱,由于属于黑索今基炸药,所以在某些情况下可取代成本较高的 PBXN-5。

2)国内许用传爆药介绍

目前,我国已完成了 5 种传爆药的定型(见表 7.8),即聚黑-14(JH-14C)、聚黑-6(JH-6C)、聚奥-9(JO-9C)、聚奥-10(JO-10C)、钝黑-5(DH-5C)等^[14]。另外,国内也完成了一种钝感传爆药的研制,这种传爆药命名为聚黑苯(JHB-1),其主要组分和配比为 TATB/RDX/EVA 粘合剂(48/48/4),它的性能为:撞击感度和冲击波感度远小于特屈儿;爆速高于特屈儿;在慢速烤爆条件下只发生温和的反应(特屈儿则发生了爆轰);具有适宜小批量生产的工艺性。其性能达到了钝感传爆药的要求^[15]。

表 7.8 国内定型传爆药及性能

传爆药	理论密度 /g·cm ⁻³	爆速 /m·s ⁻¹	冲击波感 度/mm	主要配比/%
JH-14C	1.818	8463	10.46	黑索今 96.5、氟化橡胶 3、石墨 0.5
JH-6C	1.764	8308	10.99	黑索今 97.5、聚异丁烯 0.5、石墨 0.5、硬脂酸钙 1.5
JO-9C	1.897	8333	10.07	奥克托今 95、氟化橡胶 5
JO-10C	1.899	8296	8.07	奥克托今 94、氟化橡胶 5、石墨 1
DH-5C	1.800	8245	11.15	黑索今 98.5、硬脂酸 1.5
注:爆速和冲击波感度均在 90%理论密度下测得的				

7.3.2 传(导)爆管设计

扩爆元件是指在传爆序列中起传递并扩大爆轰作用的火工品,其基本结构是金属壳内装传爆药。它一般包括导爆管、传爆管两种,但在小口径武器的引信中,由于雷管与传爆管之间的距离很短,所以一般只用传爆管。而当雷管远离传爆管时,就需要导爆管来传递和扩大爆轰。扩爆元件设计主要包括传爆药选择和外形尺寸设计两部分。

1. 导爆管设计^[16]

1) 导爆药结构

导爆药的主要作用是传递并放大雷管的输出,以使传爆药得以爆炸。导爆药结构通常可分为不带壳和带壳两类:前者是将药剂直接压入隔板孔内,其优点是导爆药与隔板之间无径向间隙,也比较能耐冲击,但除密封性差外,它还对压药模具和压药工艺要求较高,例如压药后,药面不得突出或凹入太多等,所以这种结构多用于早期的引信设计。而带壳结构则是预先把导爆药或导爆药柱压在金属管壳内,然后再装入安全机构的隔板中,这种结构有如下优点:第一,使导爆管成为一个独立元件,有利于自动化、标准化生产,且还能满足某些引信结构设计的特殊要求,如将导爆药放在两个零件之间;第二,有利于药剂的密封性设计,同时还有助于使用一些难以压制而性能优越的药剂,如将其装入管壳内不会出现药柱碎裂及掉块等现象;第三,有利于装配安全。导爆管一般作为标准元件由火工品厂生产,这样就可以把导爆管的装配放到工序的最后,从而有利于装配安全。所以,目前的引信设计基本上都采用导爆管结构。

在装配过程中,圆柱形导爆管通常以端面定位,装入隔板孔后,用环铆或胶粘加以固定。胶粘固定方式一般用于低膛压火炮,而环铆固定方式一般用于高膛压火炮。

2) 装药密度及药量

导爆管实际装药量一般为传爆药量的 $1/30$ 。导爆管装药密度的确定应兼顾爆轰感和爆轰输出两方面。炸药的爆速和起爆威力随装药密度的增加而增加,这有利于传爆药的起爆;但同时随密度增加,导爆管感度却下降,这又不利于自身的起爆和爆轰成长。为兼顾威力和感度两个方面,引信导爆管装药密度应为其所选传爆药理论密度的 $85\% \sim 95\%$ 。作为导爆管而言,应侧重考虑其感度,装药密度应取低些,如理论密度的 $85\% \sim 90\%$ 。

3) 导爆管尺寸

作为引信的一个元件,导爆管的尺寸主要决定于引信设计的

要求。一般而言,为保证可靠传爆,导爆管的直径应略大于雷管外径。对引信体中的导爆管而言,由于属于强约束,所以,药柱的长径比接近于 1 时,便能满足爆轰传递的要求。导爆管尺寸已经形成系列化,直径(ϕ)系列可采用 GJB862—90《引信爆炸元件的尺寸和材料》中的规定尺寸,高度(h)系列可采用美国军标 MIL—STD—320A《引信用爆炸元件的术语尺寸和材料》中的规定尺寸,具体见表 7.9^[17]所列。

表 7.9 导爆管尺寸系列

直径/mm	2.84	3.43	3.68	4.09	4.34	4.87	5.08	5.60	6.10	7.00	7.60
高度/mm	3.17	3.81	4.45	5.08	5.71	6.35	7.00	7.63	8.26	8.89	9.52

2. 传爆管设计

传爆管的地位与导爆管类似,其作用是进一步扩大爆轰,以达到完全起爆弹丸装药的目的。所以,其设计考虑也与导爆管基本类似。

1) 装药密度及药量^[16]

为确保传爆管作用可靠,中大口径榴弹的传爆药药量取为战斗部装药量的 0.5%~1%,其他小口径弹、迫弹、穿甲弹、破甲弹等则取 1%~2.5%。对于一些大威力战斗部,仅用引信传爆药不能足以完全起爆战斗部装药,此时需在战斗部内放置辅助传爆药柱。

对传爆药而言,主要考虑其输出威力大小,所以,装药密度应为其所选传爆药理论密度的 90%~95%。有时为兼顾输入感度和威力的两方面,传爆药柱可分两层压制:与战斗部装药相邻的一层密度高些,以提高爆速,使主装药迅速达到稳定爆轰;而与导爆管相邻的一层密度低些,以增加感度。两层的密度差值可达 0.3g/cm³左右。

2) 传爆管尺寸^[18]

由于传爆管均在引信中使用,而引信外形尺寸在弹丸设计时

已被确定,这相当于确定了传爆管的最大直径,所以,确定传爆管外形尺寸就是在许可范围内,合理确定长径比,用尽量少的传爆药量得到最大的爆轰能量输出。有关实验表明:药量一定时,增大直径比增加高度更能提高其爆轰输出,其原因是当主装药与传爆管接触面积大时,在主装药爆轰成长区域内,单位表面积炸药所具有反应炸药的体积增大了,也就是说单位表面积炸药获得的热点数增多了,因此,主装药起爆更快。所以,扁圆柱形药柱轴向输出大,装药利用率高。实际引信使用的传爆管的长径比约在 $0.3 \sim 1.5$ 之间,当引信口螺较小或传爆药量较大时,长径比应接近上限值;而当引信口螺较大或传爆药量较小时,长径比应接近下限值。对于主装药量很大的火箭弹、航空炸弹、导弹和鱼雷等,传爆管的长径比可大于 1.5 ,但应小于 2.0 ,必要时可采用两节药柱串联使用,甚至在主装药输入端增装辅助传爆药柱。

7.4 传爆序列扩爆界面设计

在引信中,雷管与导爆管之间、导爆管与传爆管之间、传爆管与战斗部装药之间,通常不是紧密配合,而是有空气、纸、金属等介质,其界面间的爆轰传递只能通过冲击波和/或高速破片实现。冲击波起爆适合于界面之间空气间隙较小或有多种金属或非金属介质的场合,而这些介质对传爆都有一定的负作用。这种应用最多的传爆模式由于这些介质的存在和多样性而难于量化描述,因此,很大程度上是依赖经验进行设计,最后用试验确定。作为定性分析,通过冲击波方式进行爆轰传递时,界面间的介质越少越好,介质厚度越薄越好^[18]。

许多试验表明,当界面之间存在一定长度的空气间隙时,高速破片比衰减的冲击波更能有效地完成界面能量的传递,例如在 M758、M759 引信中,使用小型针刺雷管的高速破片可以通过 $5\text{mm} \sim 6\text{mm}$ 间隙起爆 PBXN-5 导爆管。另外,使用特殊传爆药结构或合理改变传爆药在主装药的装配位置也能使传爆管与战斗

部装药界面的爆轰能量传递更为有效。

7.4.1 输出破片能量传递设计^[19]

由于雷管、导爆管和传爆管的爆炸输出均能产生高速破片,所以,利用高速破片完成传递界面能量的方式适合于传爆序列各个扩爆界面,但要求传爆界面火工元件之间需有的一定的空气隙(如 $0.75\text{mm}\sim 3.0\text{mm}$)。

1. 输出破片的能量传递计算

下面以图 7.6 所示的雷管—导爆管界面为例,建立能量传递理论。界面由施主装药及约束、施主输出盖片、界面空气隙、受主盖片(靶板)和受主装药等组成。当施主装药爆炸形成的破片经过空气隙撞击到受主盖片后,撞击产生的冲击压力脉冲经受主盖片衰减后到达受主装药,使之起爆。计算步骤为:第一,施主装药驱动破片(称为飞片)速度计算;第二,飞片与受主盖片(称为靶板)撞击相互作用分析;第三,靶板对撞击产生的冲击脉冲衰减计算;第四,靶板—受主装药界面相互作用计算。

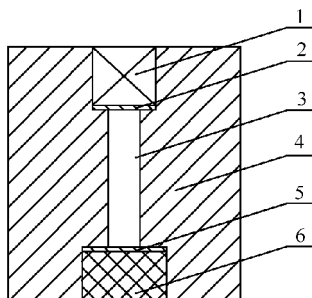


图 7.6 雷管—导爆管界面结构

1—雷管; 2—输出盖片; 3—传爆通道; 4—套筒; 5—导爆药盖片; 6—导爆药。

1) 施主装药驱动飞片速度计算

飞片速度主要由飞片质量、施主装药质量及结构决定。可通过 Gurney 方程计算对称结构、开口结构和非对称结构下的飞片速度 V_F 。例如,对对称结构的计算方程如下:

$$V_F = \sqrt{2E} \left(\frac{M_F}{C_E} + \frac{1}{3} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (7.4.1)$$

式中 E ——内能；

M_F ——飞片质量；

C_E ——炸药质量。

2) 飞片与靶板撞击动力学分析^[20]

当施主装药驱动飞片以一定速度 V_F 撞击受主盖片即靶板时,两者将相互作用,形成高压脉冲。当飞片中的冲击传递在较短时间内完成时,来自飞片—靶板界面的反射冲击波将反方向向飞片内传播,当其到达飞片自由表面时,来自自由表面的稀疏波向前传播,进入反射冲击波经过的飞片和撞击冲击波经过的靶板后,形成压力脉冲起爆受主炸药,如图 7.7 所示。

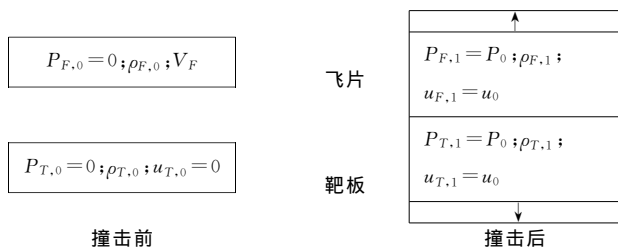


图 7.7 飞片和靶板撞击前后的界面参数

由于稀疏波经过的区域压力将卸载到零,所以,受主装药起爆时间必须小于稀疏波到达的时间。飞片与靶板相互作用有两种极端情况:第一,飞片厚度远大于靶板时,冲击波和稀疏波在飞片内的传播时间相应地加长,从而增大了受主炸药的冲击波持续时间;第二,靶板厚度远大于飞片时,飞片自由面的稀疏波到达飞片/靶板界面后将在靶板内赶上进入靶板的初始冲击波,从而在到达受主炸药之前使冲击脉冲衰减。

在飞片—靶板界面,飞片和靶板的压力和粒子速度相同。设 P_0 和 u_0 分别为撞击后飞片/靶板界面的压力和粒子速度值,对飞片而言,存在以下关系式:

$$D_{F,0} = V_F - [a_F + b_F(V_F - u_0)] \quad (7.4.2)$$

$$P_0 = \rho_{F,0}(V_F - D_{F,0})(V_F - u_0) \quad (7.4.3)$$

对靶板而言,存在以下关系式:

$$D_{T,0} = a_T + b_T u_0 \quad (7.4.4)$$

$$P_0 = \rho_{T,0} D_{T,0} u_0 \quad (7.4.5)$$

联立式(7.4.2)~式(7.4.5)可求出 P_0 、 u_0 、 $D_{F,0}$ 、 $D_{T,0}$,然后,可求出飞片和靶板冲击波过后的密度分别为:

$$\rho_{F,1} = \frac{\rho_{F,0}(V_F - D_{F,0})}{u_0 - D_{F,0}} \quad (7.4.6)$$

$$\rho_{T,1} = \frac{\rho_{F,0} D_{T,0}}{D_{T,0} - u_0} \quad (7.4.7)$$

3) 靶板材料对撞击产生的冲击波衰减计算^[21]

引入靶板中冲击波能量衰减公式来计算靶板材料对撞击产生的冲击波衰减。设 P_0 是冲击波的初始峰值压力,经厚度为 h 的材料衰减后,冲击波峰值压力 P_1 与 P_0 之比为

$$\frac{P_1}{P_0} = \left[1 + 2b \left(\frac{P_0}{K} \right) \left(\frac{h}{\delta_0} \right) \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (7.4.8)$$

式中 P_0 ——冲击波的初始峰值压力;

P_1 ——经靶板厚度 h 衰减后的冲击波峰值压力;

b ——靶板材料的 Hugoniot 常数;

K ——靶板材料的体模量($K = \rho_{T,0} a_T^2$);

δ_0 ——初始方形冲击波的波长($\delta_0 = 2D_{T,0} \tau_0$)。

将式(7.4.8)计算出的 P_1 值代入式(7.4.4)~式(7.4.5)中,求出 u_1 值。

4) 靶板内冲击波与受主炸药相互作用分析^[20]

考虑到靶板对入射初始冲击波的衰减,设靶板—受主装药界面的压力为 P_2 、粒子速度为 u_2 。靶板内反射冲击波经过后的压力为

$$P_2 = \rho_{T,0}[a_T + b_T(2u_1 - u_2)](2u_1 - u_2) \quad (7.4.9)$$

对受主炸药有

$$D_{E,0} = a_E + b_E u_2 \quad (7.4.10)$$

$$P_2 = \rho_{E,0} D_{E,0} u_2 \quad (7.4.11)$$

联立式(7.4.9) ~ 式(7.4.11), 可求出 P_2 、 u_2 。并求出 $D_{T,2}$ 和 $\rho_{T,2}$:

$$D_{T,2} = \frac{P_2 - P_1}{\rho_{T,1}(u_2 - u_1)} + u_1 \quad (7.4.12)$$

$$\rho_{T,2} = \frac{\rho_{T,1}(u_1 - D_{T,2})}{u_2 - D_{T,2}} \quad (7.4.13)$$

5) 进入受主炸药的冲击波脉冲时间计算

计算进入受主炸药的冲击波脉冲时间首先需要求出飞片内平均稀疏波速度 C_F 、靶板内的平均稀疏波速度 C_T 。飞片内稀疏波后的粒子速度可通过沿飞片卸载曲线(从 $P_0 \rightarrow 0$) 计算, 粒子速度为 $2u_0 - V_F$, 然后根据质量守恒定律和动量守恒定律, 飞片内稀疏波经过前后的状态可分别由以下方程给出:

$$\rho_{F,1}(u_0 - C_F) = \rho_{F,2}(2u_0 - V_F - C_F) \quad (7.4.14)$$

$$\rho_{F,1}(u_0 - C_F)^2 + P_0 = \rho_{F,2}(2u_0 - V_F - C_F)^2 \quad (7.4.15)$$

式中 C_F ——飞片内平均稀疏波速度。

稀疏波之后的压力为零, 可得

$$C_F = u_0 - \frac{P_0}{\rho_{F,1}(u_0 - V_F)} \quad (7.4.16)$$

当靶板厚度小于飞片厚度时, 假设靶板内的稀疏波后的粒子速度等于 $2u_2 - 2u_1$, 建立如下方程:

$$\rho_{T,2}(u_2 - C_T) = \rho_{T,3}(2u_2 - 2u_1 - C_T) \quad (7.4.17)$$

$$\rho_{T,2}(u_2 - C_T)^2 + P_2 = \rho_{T,3}(2u_2 - 2u_1 - C_T)^2 \quad (7.4.18)$$

联立式(7.4.17) ~ 式(7.4.18) 得出靶板内的平均稀疏波速度为

$$C_{T,1} = u_2 - \frac{p_2}{\rho_{T,2}(u_2 - 2u_1)} \quad (7.4.19)$$

当靶板厚度大于飞片厚度时,来自飞片的稀疏波将进入靶板,稀疏波之后的粒子速度假设为零,则靶板内的平均稀疏波速度为

$$C_{T,2} = u_0 + \frac{P_0}{\rho_{T,1} u_0} \quad (7.4.20)$$

在求出飞片内平均稀疏波速度 C_F 、靶板内的平均稀疏波速度 C_T 后,就可得出冲击波和稀疏波通过飞片和靶板的传输时间。对于飞片而言,从飞片 / 靶板界面反射回的冲击波的传输有效厚度为 $d_F - V_F \tau_1$,反射冲击波通过飞片传播的时间为

$$\tau_1 = \frac{d_F}{V_F + |D_{F,0}|} \quad (7.4.21)$$

通过这一有效距离的稀疏波传输厚度为 $d_F - (V_F - u_0) \tau_1 + u_0 \tau_2$,所以稀疏波通过飞片的对应时间为

$$\tau_2 = \frac{d_F - (V_F - u_0) \tau_1}{C_F - u_0} \quad (7.4.22)$$

来自飞片的稀疏波进入并通过靶板后与受主炸药作用,通过靶板的有效厚度为 $d_T - u_0(\tau_1 + \tau_2) + (\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 - \frac{d_T}{D_{T,0}})u_2$,稀疏波通过靶板的时间为

$$\tau_3 = \frac{d_T + (\tau_1 + \tau_2)(u_2 - u_0) - \frac{d_T u_2}{D_{T,0}}}{C_T - u_2} \quad (7.4.23)$$

最后,进入受主炸药的总持续时间 τ 等于上述 3 个时间之和,减去冲击波通过靶板的传输时间,即

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 - \frac{d_T}{D_{T,0}} \quad (7.4.24)$$

6) 受主炸药起爆能量计算

对于长脉冲而言,入射冲击波压力决定爆轰成长的距离。压力越高,爆轰成长距离就越短。当压力低于阈值时,将无法达到爆轰。短脉冲冲击波加载下的实验表明:当冲击脉冲宽度下降时,冲击波

压力阈值将增加。1969 年, Walker 等通过对薄飞片撞击起爆固体炸药实验数据的拟合, 提出了临界能量概念^[22], 即起爆阈值由下式确定:

$$P^2 \tau = K \quad (7.4.25)$$

其中 K 为常数, 与受主炸药组成及密度有关, 即单位面积的冲击波能量必须大于一定值时, 起爆才能发生。进入受主炸药单位面积的总能量为

$$\Delta E = \Delta E_K + \Delta E_a = \frac{P^2 \tau}{\rho_E D_E} \quad (7.4.26)$$

其中 ρ_E 和 D_E 分别为受主炸药的密度和冲击波速度, P 和 τ 分别由 (7.4.9) 和 (7.4.24) 计算得出。对于极强的冲击波, 内能变化等于动能, 所以, 受主炸药每单位面积的内能增量为

$$\Delta E_a = \frac{P^2 \tau}{2 \rho_E D_E} \quad (7.4.27)$$

除一些极钝感炸药 (如 TATB) 和一些极敏感炸药 (如氮化铅) 外, 一般炸药起爆临界内能增量即临界起爆能量介于 $0.6 \text{ J/mm}^2 \sim 1.6 \text{ J/mm}^2$ 。当导爆药接受能量大于临界起爆能量时, 导爆药将起爆, 否则将不爆^[20]。

2. 输出破片能量传递设计举例

假设有一导爆管 — 传爆管界面, 其中导爆管内装 HNS — II 药剂, 不锈钢片底壳厚度为 0.254 mm , 导爆管爆炸后底壳速度为 3.18 km/s 。而传爆管装药为 A4 炸药, 配比为 $97\% \text{ RDX}$ 和 $3\% \text{ 蜡}$, 临界起爆能量为 1.110 J/mm^2 。现在可供选择传爆管的盖片有钢片 (0.254 mm 和 0.762 mm)、铝 (0.254 mm 和 0.762 mm) 及无盖片等 5 种。有关参数见表 7.10^[21] 所列。

表 7.10 一些材料及受主炸药的密度和雨果纽参数

材料	密度 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	a / $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	b	备 注
钢	7.89	4.58	1.49	直径 $\phi 4.762 \text{ mm}$

铝	2.784	5.37	1.29	
A4	1.621	1.557	2.386	起爆能量为 1.115J/mm ²

根据上述计算,5种传爆管的起爆压力和能量计算结果见表 7.11^[20] 所列。

表 7.11 五种传爆管的起爆压力和能量计算结果

飞片及厚度 /mm	飞片速度 /mm·μs ⁻¹	靶板及厚度 /mm	受主 炸药	P /GPa	τ /μs	ΔE /J·mm ⁻²	排序
钢 0.254	3.180	钢 0.254	A4	24.83	0.1171	1.620	3
钢 0.254	3.180	钢 0.762	A4	18.88	0.0771	0.699	5
钢 0.254	3.180	铝 0.254	A4	29.56	0.0998	3.617	2
钢 0.254	3.180	铝 0.762	A4	23.70	0.0843	1.073	4
钢 0.254	3.180		A4	27.51	0.1597	5.185	1

从表 7.11 可以看出,由于 A4 临界起爆能量为 1.115 J/mm²,所以,使用 0.762mm 的钢或铝作传爆管密封盖片时,传爆管将不会起爆。而使用 0.254mm 的钢或铝作传爆管密封盖片时,作用裕度分别为 1.45 和 3.24,当传爆管无密封盖片时,作用裕度则高达 4.65。

当火工品装药确定后,影响输出破片传递能量的主要因素有输出破片厚度及材料和受主密封盖片材料及厚度。为最大传递能量,首先要求输出破片材料的冲击阻抗和厚度应不小于受主密封盖片的对应值;其次,受主密封盖片越薄越好;最后,输出破片材料应有较高的抗拉强度和一定的厚度,以保证输出破片有一定的面积,当破片撞击面积较小时,受主药的起爆能量将会增大。

7.4.2 高效率爆轰传递的传爆药结构设计

随着“极钝感”主装药的出现和大威力战斗部弹药的应用,要求引信传爆序列增大输出。传统方法是加大传爆药尺寸和药量,但

这会使武器敏感并增加意外爆轰的机会,且成本也要显著增加。目前可通过使用特殊传爆药结构或合理改变传爆药在主装药的装配位置来显著增大传爆序列的输出,从而更为有效地将传爆药爆轰能量传递到战斗部装药。

1. 合理改变传爆药装配位置

当传爆药埋入主装药时,由于减少了传爆药爆轰产物径向飞散的能量损失和增大了起爆面积,所以,这种方法能增加传爆药的起爆能力。在此基础上,如果再在主装药中埋有反射筒(见图 7.8),则能以较少药量可靠起爆临界起爆压力和临界直径都较大的“极钝感”主装药^[23]。

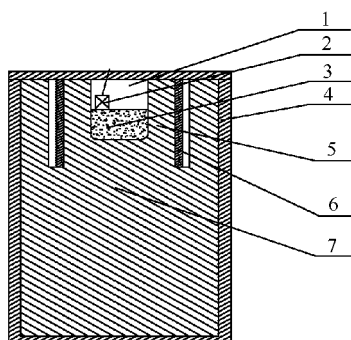


图 7.8 埋有反射筒的传爆界面

1—引信；2—雷管；3—传爆药；4—主装药外壳；

5—反射筒与传爆药之间的主装药；6—反射筒；7—主装药。

主装药中埋有反射筒的界面传爆结构是将引信、雷管及传爆药装入主装药内,在传爆药四周的主装药内埋入一中间空、底部开口的高冲击阻抗反射筒(如金属),当传爆药爆炸时,其冲击波以垂直角入射撞击到反射筒的高阻抗内表面,高阻抗内表面又将该冲击波反射回传爆药区域,从而使位于反射筒与传爆药之间的主装药的压强陡增(约为无反射筒时的 2 倍),直到其起爆,继而再引起其余主装药发生爆轰,这样就能使引爆钝感主装药的传爆药量大大降低。假如,无反射筒时,起爆 27kg 的 PBXW—122 钝感主装药

需要 $\phi 125\text{mm} \times 75\text{mm}$ 的 PBXN-110 传爆药;而主装药中埋有反射筒时,只需 $\phi 75\text{mm} \times 75\text{mm}$ 的 PBXN-110 传爆药,传爆药量减少了 64%。这种传爆药装填结构和传爆界面设计能达到高能输出的目的,改变了常规结构中使用钝感传爆药起爆极钝感主装药可靠性低的缺点。

2. 使用特殊传爆药结构

将传爆药由通常的圆柱形结构改变为外锥内球形结构时,如图 7.9 所示,能提高传爆药的输出威力^[24]。内球形结构又称聚能穴,当传爆药爆轰时,爆轰产物沿着半球形空穴的直径方向向球心处集中,并在球心处汇聚成一股高能密度气流,由于它具有很高的速度和压力,从而大大提高了传爆药柱的输出威力。对 TNT 主装药的起爆试验结果见表 7.12 所列。

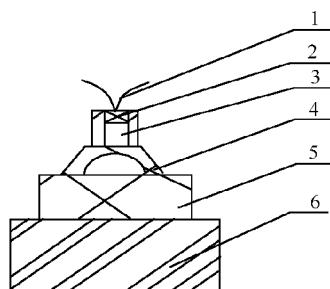


图 7.9 外锥内球形传爆药起爆装置

1— 引火头; 2— 雷管; 3— 导爆药柱; 4— 外锥内球形传爆药柱;
5— 主装药柱; 6— 钢鉴定块。

表 7.12 对 TNT 主装药起爆试验结果

传爆药结构	质量 /g	密度 /g · cm ⁻³	高度 /mm	上部直 径 /mm	下部直 径 /mm	球径 /mm	钢凹深度 /mm
外锥内球形	20.52	1.67	22.58	24.56	35.04	24.14	4.40
等质量圆柱形	20.48	1.67	17.22	30.08	30.08		3.20
等高度圆柱形	26.76	1.67	22.44	30.08	30.08		3.48

当外锥内球形传爆药带有铝球形罩时,传爆药爆炸时就会形

成小型自锻破片,这样铝破片的高速伴随着自燃性能能可靠引爆钝感主装药(见图 7.10)^[25]。同时,这种结构具有钝感弹药的特征。在经受飞片撞击时,传爆药将变形,即以非对称方式反应,能防止球形铝药型罩同步射入主装药,毁掉主装药起爆所需的的同时性和对称性。该传爆结构不仅达到了钝感的目的,而且也增大了输出能力。

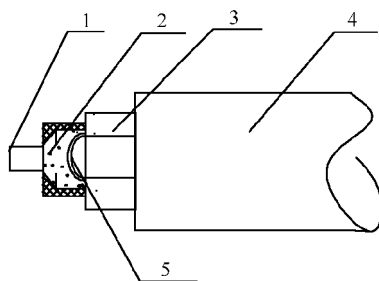


图 7.10 自锻破片传爆结构

1—导引药；2—传爆药；3—环形泡沫垫圈；4—主装药；5—半球形铝型罩。

7.5 传爆序列安全性设计

引信传爆序列的隔爆主要是通过雷管—导爆管界面实现。在引信安全系统解除保险之前,安全机构中的雷管与导引传爆管处于错位状态,即使雷管由于某种原因意外作用,也可以靠隔板的衰减作用使爆轰中止,而不会引起导引传爆管及其后续火工品的作用,从而保证了弹药的安全。传爆序列安全性设计主要是安全机构中的雷管的隔爆设计。

7.5.1 传爆序列隔爆计算

目前隔爆引信传爆序列的错位方式有转盘式、回转体式及滑块式等 3 种,其隔爆机理均是通过隔爆材料将雷管爆炸产生的径向冲击波衰减到较小程度,使之不能起爆导爆药。

1. 隔爆计算理论及模型^[8]

雷管的输出威力并不是沿空间各方向均匀分布的,实测的雷管起爆能力空间分布如图 7.11 所示^[18]。从中可以看出轴向起爆能力比侧向更强些,因此,引信的传爆功能主要是由靠雷管的轴向输出完成,而隔爆则是将雷管的轴向错位,利用隔板衰减其侧向冲击波,使之无法起爆导爆管。

通过隔板起爆或隔爆本质上是一种殉爆效应。可通过建立简化的物理模型(见图 7.12) 计算出导爆管接受的压力,再根据引信结构的几何关系推出最小的许可隔板厚度或隔离角度。为简化计算,假设雷管壳、约束体、导爆管管壳的材料均与隔爆件相同。雷管爆炸后的最大侧向冲击波在隔爆机构的衰减,就转化为装入一定厚度约束体内的炸药爆炸时约束体外侧受主炸药得到的冲击波能量的计算。约束体的最小厚度对应于隔爆机构的雷管底侧边到导爆管的最小直线距离。

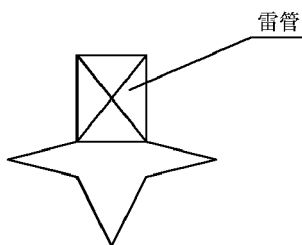


图 7.11 雷管起爆能力空间分布

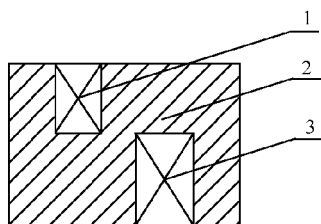


图 7.12 隔爆简化物理模型

1—雷管; 2—隔爆介质; 3—导爆管。

设装药直径 d 与雷管内径相同。由于雷管装药结构复杂、装药量小且常常未达到稳定爆轰,所以,首先应根据雷管的轴向压力得出对应稳定爆轰的装药密度 ρ_0 及爆速 D_1 ,再根据轴向参数求出侧向最大初始冲击波压力,从而把雷管输出药的非稳定爆轰问题转化为可计算的稳定爆轰问题。

圆管中装药一端引爆时,管壳侧壁将受到爆轰产物的压缩而变形(即爆轰波平行于固壁表面),则在固体壁面形成冲击波,而在

爆轰产物则传入稀疏波。炸药与侧壁界面的初始移动速度 u_X 和压力 P_X 关系为^[26]

$$u_X = u_r = \frac{2}{\gamma - 1}(C_H - C_X) = \frac{2\gamma D}{\gamma^2 - 1} \left[1 - \left(\frac{P_X}{P_H} \right)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}} \right] \quad (7.5.1)$$

由于分界面处产物和介质中所形成的冲击波初始压力和质点速度相同,因此介质中初始冲击波的压力和质点速度为

$$P_0 = P_X \quad (7.5.2)$$

$$u_0 = u_X \quad (7.5.3)$$

在固体介质中,引入介质的雨果纽方程和动量方程:

$$D_0 = a_m + b_m u_0 \quad (7.5.4)$$

$$P_0 = \rho_m D_0 u_0 \quad (7.5.5)$$

联立式(7.5.1) ~ 式(7.5.5),可求得介质的初始冲击波压力 P_0 和质点速度 u_0 。当雷管装药在侧壁表面爆炸时,由于接触表面有限,因而将传入侧壁的冲击波近似视为球形波。为简化计算,假定冲击波在传播过程中波速不变,但由于球面扩散效应,冲击波峰值压力将随传播距离而衰减。冲击波传出侧壁外表面时,波阵面参数可由下式计算^[27]

$$P_1 = P_0 \frac{R_0}{R_0 + h} \quad (7.5.6)$$

式中 R_0 —— 雷管装药半径;

h —— 隔爆隔板厚度;

P_0 —— 雷管侧壁初始冲击波峰值;

P_1 —— 隔爆隔板厚度 h 处的冲击波峰值。

将求出的 P_1 值代入式(7.5.4) ~ 式(7.5.5)中,求出对应的粒子速度 u_1 。建立隔爆介质 — 导爆药界面参数 P_2 、 u_2 的求解方程。对介质有

$$P_2 = \rho_m [a_m + b_m (2u_1 - u_2)] (2u_1 - u_2) \quad (7.5.7)$$

对受主炸药有

$$D_E = a_E + b_E u_2 \quad (7.5.8)$$

$$P_2 = \rho_E D_E u_2 \quad (7.5.9)$$

联立式(7.5.8)~式(7.5.9),可求出 P_2 。滑移爆轰波掠过隔板装药,炸药的起爆主要是冲击起爆机理。炸药能否起爆与其中形成的冲击波参数(主要是压力)密切相关。若该压力大于临界起爆压力,则导爆药将起爆;否则,导爆药将不会起爆。

2. 小型雷管的隔爆计算与验证

假设引信传爆序列是 M55 雷管起爆 508 导爆管,其隔爆元件材料为硬铝。M55 雷管的内径 $\phi 3.43\text{mm}$,输出装药 RDX 的密度 ρ_0 为 1.65g/cm^3 ,测的轴向输出峰值压力为 18.3GPa ,根据表 7.13^[28]所列,以这一压力作为 CJ 压力,对应密度 ρ_1 约为 1.40g/cm^3 ,对应爆速 D_1 为 $7.35\text{mm}/\mu\text{s}$ 。

表 7.13 RDX 密度及对应 CJ 爆压

密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	1.29	1.46	1.60	1.72	1.76	1.80
CJ 爆压/GPa	16.4	20.8	26.0	30.85	32.5	34.1

设 $\gamma = 3$,并利用硬铝材料的雨果纽方程(见表 7.10),联立式(7.5.1)~(7.5.6),可求得 $P_0 = 12.13\text{GPa}$, $u_0 = 0.6953\text{mm}/\mu\text{s}$ 。设隔爆介质厚度 h 为 1.60mm ,根据式(7.5.7)求得 $P_1 = 6.267\text{GPa}$, $u_1 = 0.384\text{mm}/\mu\text{s}$ 。将受主药的雨果纽参数(见表 7.10)代入式(7.5.7)~式(7.5.9)得 $P_2 = 2.74\text{GPa}$ 。这个值与钝黑—5 导爆药的临界压力基本相等。使用不同厚度隔板进行的隔爆实验结果见表 7.14 所列。隔爆实验证明所建立的计算模型较准确地预测了雷管—导爆管之间的隔爆起爆特性,且计算简便,可作为工程计算方法使用。

表 7.14 隔爆距离及其反应程度

隔爆距离/mm	1.65	1.55	1.45
导爆药反应情况	药剂未反应	药剂燃烧反应,套筒未扩孔	爆燃,套筒扩孔

7.5.2 传爆序列隔爆工程设计

在传爆序列整体结构及火工品确定后,雷管意外爆炸时,主要

是通过隔离安全转角来保证导爆药的安全,其设计的合理与否直接关系到整体系统的安全性。长期以来,对最大隔离安全转角的确定基于经验和少量的验证实验,这远远低于验证高安全性所需的试验量。所以,从工程设计上确定符合高安全性的最大隔离转角是有必要的。

1. 极限安全隔离转角工程设计^[29]

外推法是假定正态分布下基于少量感度实验统计结果而外推得到高安全隔爆率下的隔爆转角。由于感度实验得到的偏差 σ 的准确性较低,从而使外推结果往往过于乐观。解决这一问题的方法之一是对 σ 值纠偏^[31]。正态分布下,考虑纠偏系数时可靠隔爆转角的外推公式可写为

$$\varphi(p) = \varphi_{50} + k(p) \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (7.5.10)$$

同样,不可靠隔爆转角(即传爆)的外推公式可写为

$$\varphi(p) = \varphi_{50} - k(p) \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (7.5.11)$$

式中 ϵ ——纠偏系数;

$k(p)$ ——隔爆率 p 对应的正态分位数;

φ_{50} ——隔爆率为 50% 下的隔离转角;

$\varphi(p)$ ——隔爆率 p 对应的隔离转角。

由于要求传爆序列要有极高的传爆可靠性,所以假设传爆序列完全对正后的传爆可靠性为 100%,并考虑隔离转角最小为 0° 这一极限条件,从式(7.5.11)可得到修正系数 k/ϵ 的最大值。即存在

$$\varphi_{50} - \left(\frac{k}{\epsilon} \right)_{\max} \sigma \geq 0 \quad (7.5.12)$$

即

$$\left(\frac{k}{\epsilon} \right)_{\max} \leq \frac{\varphi_{50}}{\sigma} \quad (7.5.13)$$

将式(7.5.13)代入式(7.5.10),可求得极限隔离安全转角 φ_{LM} :

$$\varphi_{\text{LM}} = \varphi_{50} + \left(\frac{k}{\varepsilon} \right)_{\max} \sigma \quad (7.5.14)$$

即

$$\varphi_{\text{LM}} = 2\varphi_{50} \quad (7.5.15)$$

式(7.5.15)即为最大安全隔离转角工程计算公式。

2. 极限隔离安全转角的估算与实验验证

用 Bruceton 法对隔爆角度进行感度实验,分别得到榴—5 引信和炮引—6 引信的临界隔离转角范围为 77.0° 和 12.6° ,用式(7.5.15)计算得到的极限隔离安全转角范围分别为 154° 和 25.2° 。验证实验分别在 153° 和 24.5° 进行(结果见表 7.15)。这两种引信实际采用的隔离转角分别为 153° 和 24.5° ,隔爆试验和多年的实践证明它们均具有较高的安全性。实际用隔离转角与估算的极限隔离安全转角具有一致性。

表 7.15 极限安全隔离转角实验验证结果

	榴—5 引信	炮引—6 引信		
隔离转角 / ($^\circ$)	153	18	21	24.5
实验隔爆率 / %	100	100	100	100
样本量 / 发	278	50	50	300

由于钝化太安过于敏感,因此,在改榴—5 引信中被钝化 RDX 代替,实验测定的安全临界转角为 57.17° ,据此得到极限隔离安全转角为 114° (无需 153°),隔离安全转角降低为引信其他功能的设计提供了更多的余地。在某引信(火工元件为 LZ—30 雷管和 A5 导爆药)^[31]中,实验得到的安全临界转角为 36.19° ,据此得出极限隔离安全转角应为 72.4° 。但实际该引信的设计值为 134° ,这大大高于极限隔离安全转角,设计裕度过大。

7.6 传爆序列界面传爆性能评估

在评估传爆序列界面爆轰传递概率时,普遍采用以下 4 种方

法:第一,升降法或兰格里法;第二,变组分法;第三,计数法;第四,定量测试法。大量事例证明,升降法或兰格里法推出的结果过于乐观,而计数法却由于试验量大而不现实。定量测试法是通过测试雷管输出能量和破片速度推算可靠性,被认为是一个更可取的方法,因此,采用定量测试与作用裕度相结合的方法(简称裕度法)能很好地评定传爆序列传爆性能。另外,变组分法是采用一个比实际受主药钝感的一个变组分受主药进行传爆实验,以此结果来推算实际使用条件下的可靠性,其优点是实验量少,计算方便,是一种比较理想的方法,国外已用于多种引信传爆(火)序列传爆可靠性安全性的评估^[32]。本节将主要介绍变组分法和裕度法评估传爆序列界面传爆性能的使用方法。

7.6.1 变组分法评定传爆序列界面传爆性能

1. 变组分法基本原理、步骤^[32]

变组分技术是改变受主炸药的类型或组成,从而改变受主炸药的冲击起爆感度,通过小样本模拟试验,统计评估某一界面上爆轰传递概率的一种技术。它是恶化条件试验的发展。用变组分法评估可靠性时,使用比设计炸药钝感的变组分炸药进行实验,其使用范围是传爆序列中的雷管—导爆药及导爆药—传爆药等两个界面的爆轰传递,也就是说,爆轰中断只认为发生在界面而非火工品内部,且传爆机理应该是冲击起爆。

用变组分法确定爆轰传递概率的步骤是:第一,确定施主的起爆能力。用变组分炸药代替设计炸药放入既定的传爆序列做实验,记录成功与失败次数,并求出 95% 置信水平下的传爆概率单侧下限值 P ,并采用增长性分布求出分位数 $u_p = \ln \frac{P}{1-P}$ 。假设 X_{50} 和 g 为变组分炸药的冲击波感度及偏差,则施主的起爆能力为 $W_0 = X_{50} + u_p g$;第二,确定起爆受主炸药所需的起爆能力,即设计炸药的冲击波感度 X'_{50} 和 g' ;第三,确定起爆余量,即 $\Delta X = W_{50} - X'_{50}$;第四,确定设计受主炸药的分位数 u'_p ,即 $u'_p = \Delta X / g'$;

第五,求出此分位数对应下的概率。

2. 变组分法应用条件^[33]

1) 设计炸药冲击感度偏差 g' 的确定

从计算步骤可以看出,设计炸药冲击感度偏差 g' 对计算出的传爆概率有决定性的影响。而由 $go/no - go$ 方法得到的冲击感度通常比较准确,但其偏差的准确性较差。因此,由准确性较差的感度偏差来决定传爆概率将会造成计算结果不可信。

通过对许多炸药感度数据分析,正常感度试验条件得到的感度偏差范围为 $0.02\text{dBg} \sim 0.20\text{dBg}$ ^[38]。感度偏差值大于 0.20dBg 的感度试验主要有如下特点:第一,炸药密度小于理论密度的 85% 或感度值较小;第二,炸药密度大于理论密度的 95% 或感度值较大;第三,在非正常温度下试验,如 $-192.8^{\circ}\text{C} (-315^{\circ}\text{F})$ 。也就是说,炸药密度过高或过低和试验工艺控制性差(如炸药密度、试验温度)都可能造成感度偏差大于 0.20dBg 。在实际传爆序列中,由于要兼顾威力和感度两方面,一般作导爆药和传爆药的设计炸药感度适中,其密度介于理论密度的 $85\% \sim 95\%$ 之间。所以,为使评估结果更保守些,计算传爆概率时做如下规定:第一,将设计炸药的感度偏差值 g' 取为 0.20dBg ;第二,根据变组分药的传爆试验结果,当计算出的增长性分布分位数 $u_p > 0$ 时,取变组分药的感度偏差值 g 为 0.02dBg ;而当 $u_p < 0$ 时,取变组分药的感度偏差值 g 为 0.20dBg 。常用火工药剂的冲击波感度见表 7.16 所列。

表 7.16 常用传爆药的冲击波感度和密度

	PETN			A-5	CH-6	INS-1	DATB	
密度 $/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	1.44	1.58	1.71	1.66	1.66	1.62	1.52	1.66
冲击波感度 $/\text{dBg}$	2.47	2.63	3.55	4.14	4.26	5.32	7.37	8.03

2) 变组分炸药的选择

用变组分炸药代替设计炸药进行传爆实验时,要根据传爆的成功与失败次数求出 95% 置信水平下的传爆概率单侧下限值。如果变组分炸药选择过于钝感,传爆成功次数为 0,那么将无法进行

评估;如果变组分炸药选择过于敏感,传爆全部成功,那么评估出的可靠性就可能小于实际系统的可靠性。因此,选择的变组分炸药应使传爆试验出现既有传爆成功又有传爆失败的结果(当然,传爆全部成功也可,只是评估结果较为保守而已)。同时考虑到传爆序列的传爆可靠性较高,所选择的变组分炸药的冲击波感度与设计炸药冲击波感度之差值应介于 $2.00\text{dBg} \sim 3.50\text{dBg}$ 之间。

2. 变组分法评估界面爆轰传递概率举例

已知引信传爆序列的导爆药为 $1.62\text{g}/\text{cm}^3 \sim 1.66\text{g}/\text{cm}^3$ 的 CH-6 炸药。使用标准小隔板试验得到 $1.66\text{g}/\text{cm}^3$ 密度下的感度 X'_{50} 为 4.55dBg 。选择密度为 $1.53\text{g}/\text{cm}^3$ 的 DATB/2Ytel(95/5) 为变组分炸药进行了 4 发传爆试验,传爆成功率为 50%。该变组分炸药的冲击波感度 X_{50} 为 8.05dBg 。引信传爆序列爆轰传递概率计算如下。

1) 雷管的起爆能力

根据传爆试验结果,95% 置信水平下的传爆概率单侧下限值 P 为 9.77%, 采用增长性分布求出分位数 $u_p = \ln \frac{P}{1-P} = -2.30$ 。由于 $u_p < 0$, 所以,取变组分炸药的冲击波感度偏差值 g 为 0.20dBg 。则雷管的起爆能力为

$$W_0 = X_{50} + u_p g = 8.05 + (-2.30 \times 0.20) = 7.59\text{dBg}$$

2) 确定起爆受主炸药所需要的起爆能力

设计炸药 CH-6 的密度为 $1.62\text{g}/\text{cm}^3 \sim 1.66\text{g}/\text{cm}^3$, 以感度低的密度计算,即 $1.66\text{g}/\text{cm}^3$ 密度下的感度 X'_{50} 为 4.55dBg , 也就是说,起爆受主炸药所需要的起爆能力为 4.55dBg 。

3) 起爆余量计算

$$\Delta X = W_{50} - X'_{50} = 7.59 - 4.55 = 3.04(\text{dBg})$$

4) 确定设计受主炸药的分位数 u'_p

取设计炸药的感度偏差值 g' 为 0.20dBg , 则 $u'_p = \Delta X / g' = 3.04 / 0.20 = 15.2$ 。

5) 界面爆轰传递概率

设计受主炸药分位数为 15.2 时的传爆概率为

$$P' = \frac{e^u}{1 + e^u} = \frac{e^{15.2}}{1 + e^{15.2}} = 99.99997\%$$

7.6.2 裕度法评估传爆序列界面传爆性能

1. 火工品可靠发火的极限输入能量^[8]

正态分布下,考虑纠偏系数时的可靠发火能量的外推公式可写为

$$u(p) = u_{50} + k(p) \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (7.6.1)$$

同样,可靠不发火能量(即安全能量)的外推公式则为

$$u(p) = u_{50} - k(p) \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (7.6.2)$$

式中 ϵ ——纠偏系数;

$k(p)$ ——发火率 p 对应的正态分位数;

u_{50} ——发火率为 50% 下的发火能量;

$u(p)$ ——发火率 p 对应的发火能量。

考虑到火工品输入能量为零时,火工品肯定是安全的这一极限条件,即有

$$u_{50} - \left(\frac{k}{\epsilon} \right)_{\max} \sigma \geq 0 \quad (7.6.3)$$

即

$$\left(\frac{k}{\epsilon} \right)_{\max} \leq \frac{u_{50}}{\sigma} \quad (7.6.4)$$

将式(7.6.4)代入式(7.6.1)就得到火工品可靠发火(可靠度 \rightarrow 1)时的极限输入能量为

$$u_{L.M} \leq u_{50} + \left(\frac{k}{\epsilon} \right)_{\max} \sigma = 2u_{50} \quad (7.6.5)$$

式(7.6.5)的物理意义是:当火工品输入能量是临界发火能量的 2 倍时,火工品就能可靠发火,而无需为了提高可靠性再提高输入能。

2. 传爆序列界面传爆可靠性

从火工品可靠发火的极限输入能量计算可知,当把传爆序列受主药当作一个火工品元件对待时,只要来自传爆序列受主的输入能是其临界起爆能量的 2 倍时,就可以认为传爆可靠。分别以冲击波传爆和破片能量传爆两种模式说明。

1) 冲击波传爆模式举例

榴—5 引信传爆序列为 3 号火焰雷管通过 1mm 钢隔板起爆钝化太安导爆药。利用综合法对榴—5 引信传爆序列可靠性的评估步骤如下:第一,通过升降法求出 50% 传爆时的隔板厚度为 3.10mm;第二,测出该隔板厚度下的压力作为导爆药的临界起爆压力 P_L ;第三,假设正态分布下,推算出 0.999 发火时的起爆压力 P_J ;第四,测出传爆序列使用状态(钢隔板厚度为 1mm)下的压力,将最小值记为 P_M ;第五,比较 P_J 和 P_M 确定作用裕度,当 $P_M/P_J \geq 2$ 时,可认为传爆可靠。压力测试结果见表 7.17^[34] 所列。

表 7.17 榴—5 引信传爆序列界面压力测试结果

	1	2	3	4	5	6	均值	偏差
临界状态压力 /GPa	2.01	2.12	2.16	1.83			2.03	0.11
使用状态压力 /GPa	6.73	7.29	10.46	6.56	7.72	5.52	7.38	1.14

根据表 7.15 中的数据推算出 0.999 发火时的起爆压力 P_J 为 $2.03 + 3.09 \times 0.11 = 2.37(\text{GPa})$,所测使用状态下的最小压力为 5.52GPa,可得 $P_M/P_J = 2.33$ 。由于作用裕度大于 2,所以,该引信传爆序列传爆可靠。

2) 破片传爆模式举例

假设有一导爆管—传爆管界面,其中导爆管内装 HNS—II 药剂,不锈钢底壳厚度为 0.254mm,导爆管爆炸后利用不锈钢破片起爆传爆管的 A4 装药,A4 装药的临界起爆能量 E_L 为

$1.110\text{J}/\text{mm}^2$ 。传爆管可选用 0.254mm 厚的钢或铝作盖片。利用综合法对该传爆序列可靠性的评估步骤如下:第一,测出导爆管爆炸后的底壳速度;第二,计算两种盖片下进入传爆管装药的破片起爆输入能量 E_0 ;第三,比较输入能量和临界起爆能量,确定作用裕度。当 $E_0/E_L \geq 2$ 时,界面传爆可靠。

实验测出导爆管爆炸后的底壳速度为 3.18km/s ,根据 7.4 节计算得到使用 0.254mm 钢和铝作传爆管密封盖片时,进入传爆管装药的破片起爆输入能量分别为 $1.620\text{J}/\text{mm}^2$ 及 $3.617\text{J}/\text{mm}^2$,对应的作用裕度分别为 1.45 和 3.24。所以,用 0.254mm 铝作传爆管密封盖片时,界面传爆可靠。

7.7 传火序列安全性设计

依应用的武器系统不同,传火序列一般有火炮传火序列和导弹传火序列等两种基本结构。火炮传火序列通常由底火、点火管和发射药组成,主要用于火炮发射药筒内的点传火;而导弹传火序列通常由点火具、推进剂组成,主要用于燃气发生器及固体发动机中的点传火。

7.7.1 火炮传火序列基本结构与要求

1. 点火方式与射击安全性^[35]

火炮射击的击发通常使底火发火,底火输出火焰引燃火药床中的点火药,而点火药燃烧产生高温高压的燃气和灼热的固体微粒,使靠近点火源的发射药首先点燃。而后,点火药和发射药的混合燃气逐层地点燃整个火药床。点火开始时会在膛内产生初始的压力梯度,随着火焰的传播,火药床不断被点燃,压力梯度逐渐加强,形成一个由膛底向弹底的压力波阵面的传播过程。该压力波阵面使火药床逐层受压,在火药床中产生了颗粒间应力,形成的应力波以固相声速向弹底方向传播。颗粒间应力增大时,部分火药颗粒发生破碎,造成燃烧表面突然增加,因而引起气体生成速率急剧增

大,膛内压力产生异常,严重时,将产生灾难性的膛炸事故。所以,膛内压力波直接影响着火炮的射击安全性。

大量实验表明,点火方式是影响膛内压力波最显著的一个因素。在早期的火炮兵器设计中,一般膛压和初速都比较低,其药室的长度和装填密度也小,所以,压力波现象也不明显,常规的底部直接点火就能满足弹道性能的要求。随着武器装备对弹丸高初速的发展要求,增加了火炮药室的长度和装填密度,致使药床的透气性下降,常规的局部点火将造成膛内压力波增强、弹道性能反常和膛炸事故频繁出现。因此,为抑制膛内压力波及提高射击安全性,需要点火结构能使发射药床的轴向点火具有一致性。

2. 火炮传火序列基本结构^[36]

点传火系统的一般要求是:首先要能提供点燃装药所需的能量;其次,要能实现对装药的均匀而分散的点火,即要有足够的燃气,以便穿透装药层,且要采取最快方式,把能量尽可能同时地传输给整个装药;最后,点火性能要具有良好的重现性,否则弹道性能跳动就大。

目前,国内外的火炮装药点传火体系有两大类:一是以美式弹药为代表的“底火—中心点火管”序列;另一类是以苏式弹药为代表的“底火—辅助点火药包—基本药包或火药束”序列。一般而言,长的管状或带状药组成的装药适合于底部辅助点火药(黑药)包点火,其原因是火焰可通过药管(条)之间和药孔的空隙从轴向迅速传至整个装药。中大口径榴弹炮、加榴炮和大口径加农炮具有高初速、变装药的特点,其装药多采用长管药束(或药管)加附加药包结构,通过附加药包数量的增减达到变装药的目的。所以,它的点火结构适合采用底火—辅助点火药包结构。而当炮弹的全装药和减装药都采用粒装药时,用中心点火管点火结构较为有利。

7.7.2 火炮装药中心点火管设计^[35]

使用中心点火管的目的是,在于把点火药通过中心点火管,置于装药的中心部位,从而保证火焰能在管内迅速传播。所以,其结构

是在底火上加一个长的点火管深入到发射药内部,点火管内装点火药。与膛底局部点火不同,中心点火管作为一种轴向配置径向点火方式,其内装点火药被底火引燃后,先在密闭或半密闭的空间中燃烧,达到一定压力后才冲破内衬,经过传火孔或炸裂点火管喷射到药床去,这种结构传火速度快、强度大,能在药床内部点燃发射药,从而改善点火的一致性,减弱膛内压力波的强度。中心点火管一般有金属点火管和可燃点火管两类,前者由于燃烧时管内压力较高被称为高压点火管,而后者由于燃烧压力较低被称为低压点火管,主要配合可燃药筒用于绝大多数坦克炮。

1. 金属点火管设计

火炮中心点火药筒一般由底火、中心点火管、发射药床、药筒等4部分组成,其结构如图7.13所示。图中 L_d 为点火管长度, h_1 为点火管第一排孔的高度。

金属点火管影响点火过程的因素主要有点火管的结构设计和点火药装药设计等两类。现分别介绍如下。

1) 金属点火管结构设计

金属点火管壳体一般多用20号~25号无缝钢管制造,点火管的结构设计主要包括点火管的内径 D_d 、长度 L_d 、传火孔径 d 及其传火孔的分布。

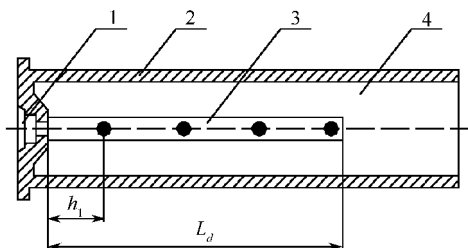


图 7.13 火炮中心点火药筒示意图

1—底火及底火座; 2—药筒; 3—中心点火管; 4—发射药床。

一般情况下,点火管长度为 $L_d = (0.6 \sim 0.9)L$,其中 L 为发射药床的长度;点火管的细长比(内径与长度之比)为 $1/25 \sim 1/45$ 。

当细长比过小时,点火管内气体流动的阻力就大,妨碍了管内火焰的传播,点火药本身也不容易同时点燃,同时点火管内底部的压力也比较高,即点火管内的压力波动比较大,可能会诱发主装药床大幅度的压力波出现。对于粒状火药床,传火孔分布多采用4排孔交错分布;对于带状火药床,传火孔分布在点火管两端较为有利。点火管传火孔集中在点火管前端有可能降低大幅值的压力波,把传火孔集中在药室前端,能在膛内形成弹底、膛底对称的点火结构。传火孔径 d 一般为 $2\text{mm} \sim 6\text{mm}$,其取值随点火药粒度变化,点火药粒度较小时, d 取小值。传火孔径小时,点火火焰短;传火孔径大时,点火药粒容易喷出点火管。单位点火药质量的传火孔总面积一般为 $11\text{g}/\text{cm}^2 \sim 21\text{g}/\text{cm}^2$,它是影响管压的另一个重要因素,对于装填密度大的火药床,难以点火,管压可取得大一些,即内衬结构不变,但传火孔总面积可小一些。

点火管第一排孔的高度 h_1 对点火传火性能有着显著的影响,它是控制管内压力变化规律的重要因素,管压随着 h_1 增大而提高,即当 h_1 较小时,则点火过程中第一排孔的破孔时间就早,管内压力上升就减慢,而当 h_1 较大时,则点火过程中第一排孔的破孔时间就迟,管内压力上升就加快。就中心点火管结构而言,点火管排气孔打开压力不能过高,否则会使火药燃烧转变为爆轰,产生灾难性后果,国内外均出现过这方面的例子。

为了减少底火燃气对管内点火药的强大点火压力,一般在底火与点火药装药之间留有一空位。这样底火燃烧气体排到药室后有一个较大的空间,底火施于点火药的相对缓和,可防止底火猛度过大。

2) 金属点火管装药设计

中心点火管对点火药的主要要求是点火能力强。常用的点火药有黑火药、多孔性硝化棉以及奔奈药条。硝化棉的燃烧反应热比黑火药大,但黑火药在燃烧过程中除产生高温高压气体外,还产生大量的灼热固体颗粒(约占60%),它能以极高的速度在发射装药中传播,形成多点点火,并使发射药迅速被点燃。除使用奔奈药条

外,中心点火管的点火药一般选用黑火药。此外,点火药的粒度对火焰传播和点火持续时间都有很大的影响。粒度大时,点火管内透气性好,有利于火焰的传播,从而达到均匀一致的点火;粒度越大,点火持续时间越长。粒度过小,会造成点火过猛现象,就会造成膛内局部压力上升,产生大幅度压力波。所以,一般火炮中心点火管多选 2 号大粒黑火药做点火药,且管内装填密度不能高^[36]。

2. 可燃点火管设计

1) 可燃点火管材料及结构设计

可燃点火管的特点是它能随着管内点火药燃烧和燃气释放的过程而燃烧,其燃气作为点火能源的一部分点燃主装药。可燃点火管的主要成分是硝化棉 80%、牛皮纸浆 18%、二苯胺 1% 和古尔胶 1%,另外,也有采用聚氨基甲酸酯塑料作可燃点火管的报道。为了同时具有金属点火管和可燃点火管的优点,已出现了一种金属可燃点火管,它是用可以燃烧的金属铝和镁代替钢作管壁材料。试验表明,这种金属可燃点火管可以使火炮达到使用钢制点火管时同样的弹道性能,火炮发射后 90% 以上的铝和镁能燃烧掉。

可燃点火管的管体强度是影响点火过程的重要因素,它不像金属点火管那样具有较高的强度。由硝化棉纸卷制成的可燃点火管,其管体强度只能达到 5MPa,所以在点火过程中,点火管很快被撕裂,使点火药气体轴向快速流动受到了影响。使用可燃点火管达到点火一致性的条件是:在点火初期,可燃点火管能承受底火气体压力的冲击,而在传火完成后又能很快地破碎。为此,设计上一般采用在可燃点火管的膛底端加上一段金属支管,用以承受来自底火的冲击,并在可燃点火管装点火药段开一些孔,以削弱其强度。另外,在管壳制造过程中,对硝化棉材料进行多次浸涂处理,不仅可以提高管壳强度,也能进一步提高管壳的燃烧性能。

可燃点火管的通气面积 S_T 也是影响点火性能的重要参数。当可燃点火管中装填奔奈药条时,其截面为

$$S_j = \frac{\pi}{4} n(D^2 - d^2) = \frac{W_B}{L\delta} \quad (7.7.1)$$

式中 n ——药条根数；
 D 和 d ——分别为药条外径和内径；
 W_B ——点火药质量；
 δ ——点火药密度；
 L ——药条长度。

实验表明,其通气面积取 $S_T = 1.5 S_j$ 时比较理想。即

$$S_T = 1.5 \frac{W_B}{L\delta} \quad (7.7.2)$$

从中可知,点火药量越大,则通气面积也应越大,这是保证可燃点火管低压传火的必要条件。在管体强度、底火猛度和药量基本确定时,可通过改变点火药形状尺寸和点火管直径来调整通气面积。

2) 可燃点火管装药设计

由于可燃点火管的管体强度远低于金属点火管,所以,要求可燃点火管的点火药必须有更高的燃烧热值。与黑火药相比,奔奈药条首先具有燃烧热值高的特点,所以对于在低温下难以点燃的硝基胍三基药的点燃就显示出较大的优越性;其次,奔奈药条的传播速度快,奔奈药条在传火管内成束状,减少了管内的轴向气体阻力,其传播速度约是黑火药的4倍,点燃发射药一致性好;最后,奔奈药条的吸湿性比黑药小,这样在弹药储存、运输和使用过程中,就减少了环境对弹药性能的影响。因此,可燃点火管的点火药多采用奔奈药条,其基本配方是硝化棉45%、黑火药55%及外加1%的中定剂。在高初速弹药中,点火药奔奈药条越来越得到广泛应用^[37]。

7.7.3 火炮装药中心点火的新概念技术^[35]

以可燃点火管和金属点火管为代表的轴向中心点火结构已被成功地应用到各类火炮的点火中,这两种点火管在使用当中均能对膛内压力波产生较好的抑制作用。然而,随着武器对火炮内弹道性能的要求提高,期待在点火管的传火速度、点火稳定性和一致性

方面有进一步的改进,因此,近年来,出现了一些新概念技术,大致分三类:一是对点火结构和工艺改进,如双管点火管;二是使用快燃速传火介质,如快速传火点火管、低速爆轰点火装置(LVD)及爆炸网络点火装置;三是,使用新的点火能量传递方式,如激光多点点火系统。目的都是通过提高传火速度来增加点火的同步性,对发射药床实施均匀点火。

1. 新点火结构 —— 双管点火管

双管点火管装置如图 7.14 所示,它由同轴的内外管组成,为加快火焰在点火管中的传播,内管一般为呈收敛型的喷管,其管长可大于外管长度的一半。点火药集中于点火管的前半部,外管前半部的传火孔可多开一些,而后半部的传火孔则较为稀疏。底火激发产生的高温燃气能通过内管快速达到点火管的前端,点燃管内的点火药,再由点火药燃气破孔点燃发射药。破孔的顺序是由前向后进行。这种点火机制避免了产生底部点火的可能性,使火药床在前半部先点燃,燃气向火药床两端流动,减少了火药床受挤压的程度,达到比较均匀一致的点火,与底部直接点火相比,压力波的传播路径大大减小,因而能有效地抑制压力波的增强。

双管点火管中的点火药装药结构对点火的均匀一致性有一定的影响。图 7.14 中点火管的管体材料为黄铜,全长 380mm,点火管在前部近一半长度上有 8 排孔径为 4.5mm 的传火孔,每排 9 个孔,孔距 18mm,起主要的点火作用;在靠近底座一端约 140mm 长度上有 4 排孔径为 4.5mm 的传火孔,每排 4 个孔,孔距 36mm,主要起喷火后平衡管压作用。图 7.14(a) 中使用高密度药饼串结构,药饼串由 20 个药饼组成,每个黑火药药饼 2.80g,密度 $1.80\text{g}/\text{cm}^3 \sim 1.90\text{g}/\text{cm}^3$ 。图 7.14(b) 使用散装的 2 类黑火药结构,密度为 $1.65\text{g}/\text{cm}^3 \sim 1.78\text{g}/\text{cm}^3$ 。两种结构的装药量相同,均为 56g,装药容积相同。对其进行发火试验,测压点选上、中、下三个部位的特征孔进行测压。测试的最大压力 P_m 和最大压力建立时间 t_m 见表 7.18 所列。

表 7.18 两种装药结构的双管点火管测试结果

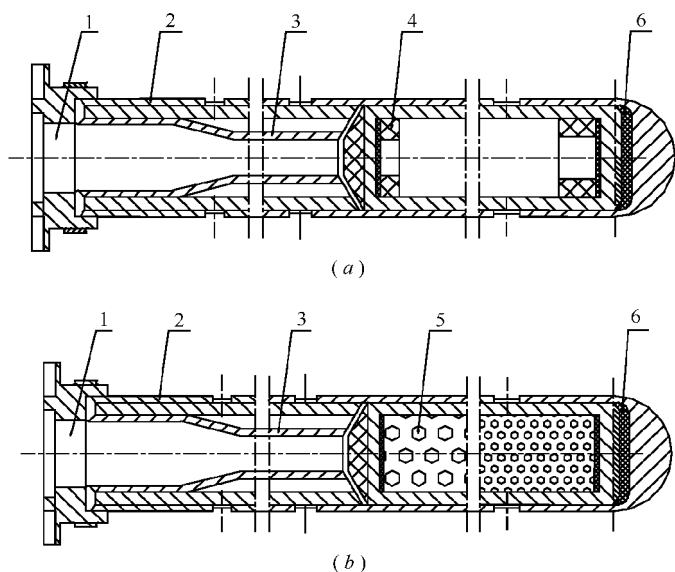


图 7.14 两种装药结构的双管点火管

1—底火；2—外管；3—内管；4—药饼串；5—散装黑火药；6—垫片。

装药结构	测试部位	1		2		3		均值	
		P_m/MPa	t_m/ms	P_m/MPa	t_m/ms	P_m/MPa	t_m/ms	P_m/MPa	t_m/ms
药饼	上	2.00	0.52	2.60	1.60	3.47	1.52	2.67	1.21
	中	4.16	0.83	3.53	1.32	2.91	1.26	3.53	1.13
	下	2.61	0.99	4.00	0.65	2.54	1.56	3.05	1.07
散装	上	2.33	1.96	2.93	0.48	0.60	0.69	1.95	1.04
	中	4.89	1.35	4.89	0.31	4.89	0.27	4.89	0.65
	下	8.30	0.33	8.30	0.26	8.30	0.26	8.30	0.28

从表 7.18 所列可知,采用散装药结构时,三个部位之间的测试值跳动较大,且压力上升很快,最大压力建立时间较短;而采用药饼结构时,则测试值跳动较小。散装黑火药起始燃烧面积较大,猛度也大,燃烧时具有很强的减面性,所以,一开始压力突升,其下

端点火压力较高,此处点火火焰传播快,点火猛烈集中,而上端点火压力低得多,火焰穿透能力差。这种输出点燃发射药床时,会使药床局部燃烧剧烈,易造成膛内压力不均匀。高密度药饼串结构是以一定的几何形状压制成型,有序地排列于点火装置管体内,并通过内管固定,底火火焰不会使点火药发生窜位和移动,其本身密度基本稳定,不易产生冲击应力而使点火药破碎,产生压力波动。另外,这种模块点火药的燃烧变化有序化,气固两相流体的产生按一定规律进行,点火延迟时间和点火初期的气体生成率可以通过点火药模块的几何形状调整。这种模块化点火药装药特别适合于大口径弹药的点火^[35]。

2. 新传火介质

当中心点火管中的传火物质是点火药时,由于点火能量是以火焰波的形式从点火管底部向端部传播,所以,发射药床的点火顺序也是从膛底到弹底。而点火药中火焰波的速度与发射药床中的火焰波的速度是同一量级,所以,对一些高装填密度、高膛压和长药室的火炮而言,常规中心传火管的传火性能偏低,不能保证火药床轴向点火的同时性和瞬时性。一般而言,爆轰波传火速度要远大于点火药。因此,采用爆轰波方式传火是提高传火速度的一种有效方法。

爆轰波是带有化学反应的冲击波,由于冲击波阵面较窄,因此,要使黑火药达到迅速点燃,必须提高冲击波强度。但是,强冲击波对黑火药有破坏作用,甚至会导致冲击起爆。因此,仅弱爆轰波适合于点火。弱爆轰波是由宽度很窄的冲击波、宽度较宽的化学反应区及爆轰产物区组成,形成的高温介质作用于黑火药表面的时间远比冲击波长,所以点火主要靠化学反应区及爆轰产物区来完成。

新传火介质主要包括两方面:一利用炸药高爆速的特点,使用线性微型炸药条的弱爆轰或低速爆轰来快速引燃点火药。这里的线性微型炸药条包括导爆索、导爆管及半约束的爆炸网络装药条,其特点是约束弱、径向威力小;二是使用高燃速点火药,完成对发

射药床的点火。

1) 快速传火点火管(RIP)^[36]

快速传火点火管结构如图 7.15 所示。它主要由底火、激发体、导爆索、高燃速点火药组成,导爆索放在中间,其四周装填高燃速点火药。底火发火后,引爆激发体,后又引爆导爆索,导爆索再引燃

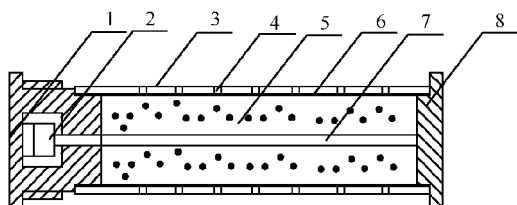


图 7.15 快速传火点火管

1—底火；2—激发体；3—点火管壳体；4—传火孔；

5—高燃速点火药；6—衬纸；7—导爆索；8—堵头。

高燃速点火药。导爆索是芯药为六硝基芪的铅壳导爆索,其爆速为 6100m/s,对于金属多孔传火管而言,高燃速点火药采用铝/过氯酸钾烟火药;而可燃点火管的高燃速点火药采用多面体硼烷铯盐/硝酸钾混合物,其配比为 $\text{Cs}_2\text{B}_{10}\text{H}_{10}/\text{KNO}_3 = 25/75$ 。这两种高燃速点火药的传火速度可达 3500m/s ~ 6000m/s,实际上是一种缓爆燃烟火剂。在被快速传火点火管所点燃的发射药床中,由于高速爆轰波作为传火载体和高燃速点火药气体的快速轴向传播,所以,发射药中火焰的传播基本上是径向现象。应用快速传火点火管使点火更加均匀一致,大大减小了火药床初始运动对弹丸的冲击,从而提高了装药安全性。

如果将图 7.15 中的导爆索用几根半约束的微通道炸药药条(典型尺寸为 1.0mm×1.0mm)代替,而用一个激发体通过爆炸网络实现这些药条的同时起爆,同样能实现快速传火。

2) 低速爆轰(LVD) 点火装置

LVD 中心点火装置如图 7.16 所示。它由底火、激发体、LVD 管及辅助点火药组成。当底火被激发后,产生高温燃气将激发体中钝感点火药激发而产生较弱的冲击波,由此引爆 LVD 管。LVD 管是实现低速爆轰的有效载体,管体由含能材料制成,在管体内芯通过中心线附着一定量的混合炸药粉末。当冲击波沿管内芯传播时,在冲击波作用下,炸药粉末与空气混合并点燃,形成气相爆轰。气相爆轰属于低速爆轰,这种低速爆轰波能点燃黑火药。在爆轰过程中,冲击波向前传播,随后是爆炸产物,并沿径向扩散。LVD 管沿轴向的传火速度约为 2500m/s ,爆炸产物压力约为 10MPa ,温度高于 700K (高于黑火药着火温度),因此,可在 LVD 管内传播爆轰波的温度足以点燃 LVD 管体,并在传播过程中,使 LVD 管体相继碎裂,形成大小不等的燃烧碎片,以此点燃辅助点火药(铝粉表面敏化的黑药),继而将整个火药床点燃。LVD 点传火装置的点火序列为:常规底火—激发点火药—LVD 管—辅助点火药—发射药。实验证明,使用 LVD 管条件下,火炮膛内压力波受到明显的抑制。

3. 点火能量新传递方式——激光多点点火

用激光光纤传递点火能量的最突出优点是它能在发射药床中构成安全的、同步性高的多点点火系统。激光不仅可以容易地使点火药及黑火药实现点火,且通过光纤传输能量时,传输速度极快(光速),且柔性好,因此,能容易地放置在火炮药室的任一部位,极大地适应于各种装药设计。另外,与电、机械等能量传递方式相比,激光多点点火系统对静电、机械冲击、电磁脉冲等意外刺激钝感,

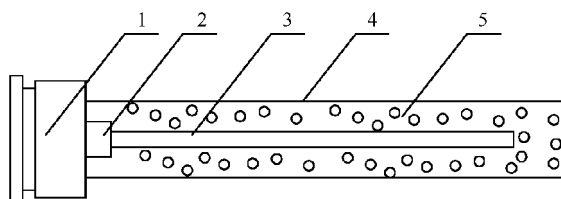


图 7.16 LVD 中心点火装置

1—底火; 2—激发体; 3—LVD 管; 4—传火管壳; 5—辅助点火药。

具有安全性好的特点。火炮的激光多点点火系统一般采用多根光纤多点点火(如图 7.17 所示),即通过光纤网络安装在药筒发射药内部,实现多点点火,光纤网络的各个输出端都连接一个激光点火器。由于光纤以光速传输能量,其速度远高于火工药剂的爆速或燃速,可以认为位于药床中的各个点火器同时点燃。激光多点点火可以更可靠地实现点火的同时性和均匀性,能有效地减少药室内的压力梯度,抑制压力波的形成。激光点火器设计详见第 8 章。

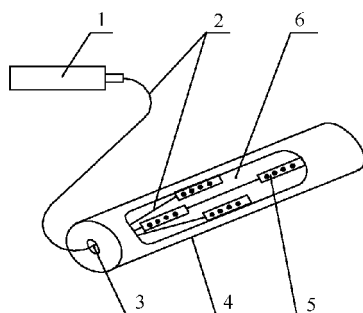


图 7.17 火炮激光多点点火系统

1—激光器;2—光纤;3—光学窗口;4—火炮药筒;
5—激光点火器;6—发射药床。

值得注意的是:激光多点点火技术在原理上是可行的,但实际应用时有较大难度,它需要把火炮系统中传统的击发点火改成激光输出装置,火炮的击发机构必须彻底改造并配置专门的适合实战条件的小型激光器。^[40]

7.7.4 导弹传火序列安全性设计

在燃气发生器及固体发动机点火系统中,电点火具点燃推进剂是最常用的点火序列(见图 7.18)。固体推进剂外表面通常在采用硅橡胶软包覆后,自由装填于壳体内,电点火具与推进剂之间有一自由空腔。电点火具输出药端面通常设计有开孔挡药板。当挡药板开孔数目少、孔径大时,将有许多点火药(黑药)被打出,起不到阻挡作用;当数目少、孔径小时,压力曲线极陡,黑火药接近爆

轰,属于冲击加压,不太适合点燃固体推进剂药柱;当数目多、孔径小时,有利于固体推进剂药柱的点火。当点火具点火后,会使推进剂形成端面逐层平行燃烧。但点火界面设计不当时,也会使固体推进剂端面和侧面同时燃烧,压力陡然上升,导致点火具或转接器在高压下飞出,燃气发生器解体。这样的安全事故已多次出现。

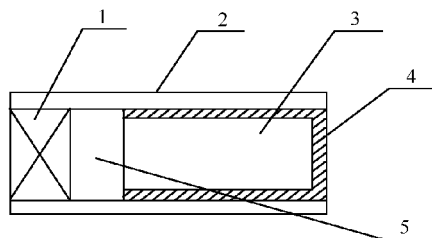


图 7.18 点火序列示意图

1—点火具；2—外壳；3—推进剂；4—包覆层；5—自由空腔。

出现推进剂非正常燃烧的原因主要是：在点火具破膜瞬间的建压过程中，形成的高温高压燃烧产物冲击推进剂装药端面，当端面上的推进剂与包覆层粘接界面被冲刷打开后，很快产生“界面效应”，使侧面的包覆层大面积脱粘，推进剂燃烧面瞬间扩大，形成燃烧室压强急增，导致燃气发生器解体。推进剂包覆层的粘接面脱粘主要与点火具挡药板开孔与包覆层粘接界面的相对位置有关，当粘接界面正对点火具挡药板最外圈的开孔位置时（即点火具外径与推进剂装药直径相近时，如图 7.19 所示），点火具的燃烧产物将直接冲刷推进剂与包覆层的粘接界面，造成脱粘。因此，彻底解决这一安全性问题的惟一方法是对粘接界面实施保护。最简单的措施是在包覆层端面加一加固罩（不锈钢、玻璃钢等材料），即保护了装药界面又防止了包覆层的变形（见图 7.20）。实践证明这种措施非常有效。

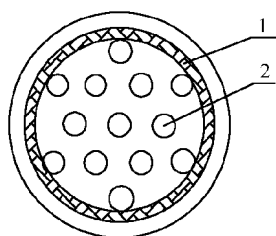


图 7.19 挡药板开孔与包覆层
相对位置

1—推进剂包覆层；
2—点火具挡药板开孔。

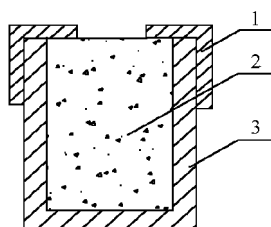


图 7.20 带加固罩的药柱
1—加固罩；2—推进剂；3—包覆层。

参 考 文 献

- 1 陈福梅译. 弹药爆炸系列的原理与设计. 北京:国防工业出版社,1979
- 2 王凯民等. 典型引信传爆序列发展特点分析及设计思考. 探测与控制学报,2001(2):14~18
- 3 王雨时等. 现代引信导、传爆药的发展历史和现状. 现代引信,1994(3):33~40
- 4 叶英. 引信的新概念和引信在武器系统中的地位. 现代引信,1983(2):1~5
- 5 马宝华. 引信构造与作用. 北京:国防工业出版社,1984
- 6 MIL-HDBK-777. Fuze Catalog Procurement Standard and Development Fuze Explosive Components,1985:91~95
- 7 陈继业. 对组合火工品的展望. 火工品,1997(4):38~43
- 8 王凯民. 传爆序列界面能量传递技术研究. 北京:北京理工大学博士论文,2002
- 9 周钢,王凯民等. 传爆序列长通道冲击起爆的数值模拟. 爆炸与冲击,2001(4):297~301
- 10 北京工业学院. 爆炸及其作用(下册). 北京:国防工业出版社,1979. 260~262
- 11 卢斌. 引信传爆序列优化设计的有效途径. 火工品,1999(4):40
- 12 太原机械学院四系. 引信传爆序列,1985. 106
- 13 王雨时等. 现代引信导、传爆药的发展历史和现状. 现代引信,1994(3)
- 14 冯国田. 我国传爆药研究情况简介. 火工品,1999(2)
- 15 王晓峰. 钝感传爆药 JHB-1 的配方设计. 火工品,2002(2)
- 16 曹柏桢等. 飞航导弹战斗部与引信. 北京:宇航出版社,1995. 455~457
- 17 王凯民. 火工品“三化”研究. 总装炮兵防空兵装备技术研究所,2003
- 18 蔡瑞娇. 火工品设计原理. 北京:北京理工大学出版社,1999. 266~268
- 19 Wang Kaimin. The Flyer Plate Impact Shock Initiation Theory in Fuze Train. Proceeding of 2001 International Propellant, Shaoxing; Explosive and Pyrotechnics Seminar,2001
- 20 Austing J L. The Shock Initiation of Covered Explosive and Pyrotechnic Charge by Flyer Plate Impact Across an Air GapI; Theory and Computations. 14th International Pyrotechnics Seminar,1989
- 21 Langley R W. Analytical Relationships for Estimating the Effects of X-Rays on Materials. AFRPL-TR-74-52,1974
- 22 Walker F E. Critical Energy for Shock Initiation of Heterogeneous Explosives. Explosivesoffe,17(9),1969
- 23 Spahn P F. Embedded Can Booster. AD-A15407,1992
- 24 康建毅等. 一种新型传爆药柱装药结构. 火工品,2001,(3):10

- 25 Snyder W H. Ordnance Design Consideration for Decreased Sensitivity to Unplanned stimuli. Proc. Sym. On I. M. Tec. ,1992
- 26 北京工业学院. 爆炸及其作用(上册). 北京:国防工业出版社,1979
- 27 李向东. 目标毁伤理论及工程计算. 南京理工大学博士学位论文,1996
- 28 Cooper P W. 炸药 CJ 压力的估算. SAND-89-0320C
- 29 王凯民等. 引信传爆序列隔离安全转角的工程设计. 探测与控制学报,2004(1)
- 30 蔡瑞娇等. 火工品小子样评估方法. 第 11 届火工烟火年会,2001;5
- 31 Liu Yucun. Safety and Reliability Analysis of a Typical Fuze Explosive Train. Beijing:Proceeding of Symposium on Pyrotechnics and Explosives,1987
- 32 Ayre J N. The Concept and Methodology of Varicomp to Determine Safety and Reliability of Detonation Transfer in Explosive Trains. 8th Symposium on Explosive and Pyrotechnics,1974
- 33 王凯民. 评估传爆序列爆轰传递概率的变组分法的应用条件研究. 火工品,1993(2):1~6
- 34 王凯民. 榴-5 引信传爆序列界面压力传递过程研究. 火工品,1992(2):6~13
- 35 金志明等. 火炮装药设计安全学. 北京:国防工业出版社,2001
- 36 李昼堂. 火药与内弹道. 北京:兵器工业出版社,2001
- 37 王安仕. 国内外炮药点火结构研究概述. 火工品,1983(2):34~41
- 38 李海庆. 点火管装药结构研究. 火工品,1997(3):43~45
- 39 East J L. Solution to Ignition-Related Problems in Navy Guns Via a Rapid Ignition Igniter. 14th JANNAT Combustion Meeting, 1977
- 40 王丽琼等. 有限空间内爆炸和点火的理论与实验. 北京:北京理工大学出版社,2005

第8章 新型火工品设计技术

近20年来,国内外火工品技术获得了长足的发展,出现了许多与常规火工品不同的新型火工品,如半导体桥起爆点火技术、直列式爆炸箔起爆点火技术、激光起爆点火技术、爆炸逻辑网络技术及MEMS火工技术等,其中前4种火工品的概念由来已久,但近年来技术上才获得突破,并开始在各类武器中应用,最新发展的MEMS火工品在相当程度上还处于概念化阶段,但它可能会对将来火工品向信息化和微型化方向发展起到推动作用。

8.1 半导体桥起爆点火技术

武器弹药的发展对电火工品的要求主要是三方面:其一是安全可靠,即防静电、防射频、可靠发火;其二是发火能量和尺寸越小越好;第三是高瞬发,作用时间短。对于靠多个推冲器修正弹道的弹药而言,低能量下的高瞬发发火同火工品的安全可靠具有同样的重要性。常规金属桥丝(含膜桥)火工品的发火机理是热起爆,其高瞬发和高安全性是以发火能量高、外形尺寸大为代价的。金属膜桥火工品虽解决了发火能量低与高安全性要求的矛盾,但使用低发火能量很难获得高瞬发度。

从20世纪80年代起,非常规的半导体桥(SCB)的出现为解决火工品低能与高瞬发、高可靠与高安全之间的矛盾提供了一条途径。

8.1.1 半导体桥火工品结构与特点

1. 半导体桥火工品结构^[1]

半导体桥火工品的结构与常规电火工品基本相似,主要区别

是常规电火工品以焊在电极塞上的金属丝或带为桥,而半导体桥火工品则是以硅基片或蓝宝石基片上的细的重掺杂硅条为药剂的发火桥。这种重掺杂硅桥统称为半导体桥。半导体桥膜用互补金属氧化物半导体技术制成,即在陶瓷电极塞内的蓝宝石或硅基片(面积约为 2mm^2)上沉积生长一层厚度约为 $2\mu\text{m}$ 的 N 型重掺杂多晶硅层,经氧化、光刻、掩模、洗蚀工序形成预定形状的半导体桥;之后,在其上沉积一层厚度 $1\mu\text{m}$ 的铝层,再经光刻、掩模、洗蚀工序形成具有铝焊盘的成品半导体桥;最后,采用超声波焊接方法将铝线焊在铝焊盘与电极塞内脚线柱之间。典型结构如图 8.1 所示。典型半导体桥膜呈“H”形,尺寸约为 $100\mu\text{m}$ (长) $\times 380\mu\text{m}$ (宽) $\times 2\mu\text{m}$ (厚),体积约为 $7.6\times 10^{-8}\text{cm}^3$,约为镍铬桥丝的 $1/35$ 。

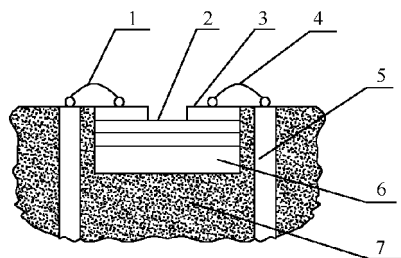


图 8.1 半导体桥火工品结构图

1—铝线；2—多晶硅层；3—铝焊盘；

4—铝线；5—脚线柱；6—硅基片；7—陶瓷电极塞。

2. 半导体桥火工品基本特点

半导体桥火工品有如下特点。

(1) 半导体桥火工品所装药剂与半导体桥及其硅衬底紧密接触,硅衬底具有良好的散热性,所以,增大了散热面积,有利于提高安全电流。

(2) 半导体桥材料的电阻温度系数为负值,有利于低能量发火。当输入脉冲电流温度上升时,由于电阻温度系数为负值,温度越高电阻越小,通过的电流急剧增加,有利于低能量发火。

(3) 半导体桥热容小,同样有利于降低发火能量。半导体桥有

较小的质量,约为钨丝的 $1/10$,当快速脉冲作用时,可近似认为其热容相当于钨丝的 $1/10$,即对同一药剂而言,起爆能量也仅相当于钨丝电火工品的 $1/10$ 。

(4)半导体桥对药剂的发火机理属等离子微对流作用机理,有利于提高瞬发度。当向半导体桥施加一快速电脉冲时,具有负电阻温度系数的桥材料将使电流急剧增加,导致半导体桥区迅速气化,接着电流通过硅蒸汽产生热等离子体,并以微对流的方式渗入起爆药中使之起爆。这种热交换方式具有更高的效率,可导致发火能量降低和作用时间缩短。

几类电雷管的发火性能对比见表 8.1 所列。

表 8.1 几类电雷管的发火性能对比

	常规桥丝雷管	钝感桥丝雷管	金属膜桥雷管	半导体桥雷管
发火能量/mJ	10	10	10	1
瞬发度/ μs	10~100	100~1000	10~100	10~100
安全指标	$<1\text{A}1\text{W}$	1A1W	1A1W	$>1\text{A}1\text{W}$

8.1.2 半导体桥火工品设计^[2]

半导体桥火工品的设计与桥丝式火工品基本相同,区别主要在于半导体桥的设计和半导体桥封装结构设计。

1. 半导体桥设计

半导体桥基片通常由硅片上外延多晶硅制得。由于电火工品的发热量与电阻成正比,半导体桥的低电阻对提高火工品的不发火性能较为有利,但太小又不利于发火,所以,一般取半导体桥电阻为 1Ω 左右。但要得到这样小的电阻,必须对采用对半导体桥基片进行高掺杂(浓度约为 7×10^{19} 个原子/厘米³),该浓度接近掺杂极限浓度,工艺易控制。半导体桥电阻率大约为 $7.6 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 。

半导体桥尺寸是半导体桥设计的关键之一。如果桥尺寸过大,提供给桥的电能不能足以气化硅,不易使火工品作用;如果桥的

尺寸过小,因气化并形成等离子体的硅量小,而不能达到火工品的临界发火能量。所以,半导体桥横截面要适中。实验证明半导体桥厚度增加有利于点火,但太厚时会产生龟裂现象,所以,一般厚度取 $2\mu\text{m}$ 为宜。在确定半导体桥掺杂浓度和厚度后,要保证其电阻为 1Ω ,就应使其长宽比(L/W)为 $1:3.8$ 左右。国内外半导体桥的典型尺寸为 $100\mu\text{m}\times 380\mu\text{m}\times 2\mu\text{m}$ 。

半导体桥的形状不同对半导体桥火工品的性能会有较大影响。常规的半导体桥形状是长方形,当电流通过时,在整个桥宽范围内,电流密度均匀分布,桥面均匀加热,临界发火能量较大;而图 8.2 所示的几种半导体桥形状桥中间或两端较窄,通电时缺口处电流密度大,气化容易从中部开始。与常规长方形桥形状相比,这几种桥形状的发火能量较低。其中由于图(b)是图(a)和图(c)的综合,所以,其发火能量最低。

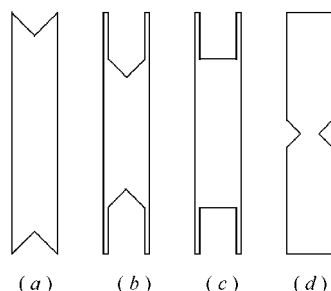


图 8.2 几种半导体桥形状

2. 半导体桥芯片加工工艺和封装结构设计

1) 半导体桥芯片加工工艺

制造铝电极半导体桥芯片的工艺流程为:第一,对单晶硅衬底进行表面抛光及清洁处理后,将衬底表面进行高温氧化,厚度近 $1\mu\text{m}$,形成绝缘衬底,然后,在氧化层上外延一层 $2\mu\text{m}\sim 3\mu\text{m}$ 的厚度一致的多晶硅,并采用无氧多晶硅扩散掺杂工艺对其进行磷掺杂;第二,光刻腐蚀出多晶硅台阶,并蒸镀铝层,然后再反刻蚀金属层。在做铝薄膜层之前,为防止多晶硅薄膜表面生长天然 SiO_2

层,就需要设计将半导体表面与大气相隔离,即给清洗干净的多晶硅薄膜层表面沉淀化学离子膜层,在设定的工艺条件下去掉化学离子层,制作铝薄膜层。这样制作出来的芯片电阻一致性好。此外,若采用先刻蚀芯片台阶后掺杂的工序和铝电极包覆掺杂多晶硅的结构,则所制芯片能进一步降低接触电阻和半导体桥火工品的临界发火能量。

2) 半导体桥封装结构设计

半导体桥的封装最初多采用陶瓷封装,即先将芯片用环氧树脂粘接在陶瓷塞上端面的脚线间,然后用超声波将金属脚线焊接在芯片上的铝焊接区上。但这种工艺往往存在陶瓷破裂和焊线断开或接点松动问题。为此,通过将 SCB 芯片安放在绝缘电极塞的凹槽内,以保证在压药时芯片不被压碎,焊丝也不被压断。同时,电极塞材料也改用耐压性和导热性好的陶瓷,且采用多股焊丝利用超声波焊接。此种改进型封装结构简单,牢固可靠。

8.1.3 半导体桥火工品应用

原则上,所有应用常规桥丝式电火工品的系统都可以使用半导体桥火工品。由于半导体桥火工品具有发火能量低、不发火能量高和发火时间短等特点,且可以把定时与安全电路直接植入半导体桥路,因而能满足现代战争对火工品的特殊要求,有广泛的应用前景。

1. 半导体桥推冲器

对弹药实施弹道或姿态修正,使其对固定目标有较高的命中精度,从而能提高压制武器、反导武器的远程精确打击能力。美国反战术导弹系统增程拦截弹在末制导段环状配置了 180 个推冲器用于弹道修正。俄罗斯更重视对无控弹药的弹道修正,并形成弹道修正迫弹、榴弹等系列产品,其中 240mm 迫弹装有 4 排 24 个推冲器。而实施“弹道修正”的重要途径之一是通过阵列脉冲推冲器逻辑点火技术完成弹道的二维修正。这种应用要求推冲器发火能量低、发火时间短且安全钝感。而使用半导体桥的推冲器是实现

快速响应点火且满足钝感的安全要求的最佳元件。当装药为 $\text{THKP}(\text{TiH}_{1.65}/\text{KClO}_4)$ 时,桥丝式和半导体桥推冲器性能对比见表 8.2 所列。

表 8.2 桥丝式和半导体桥推冲器性能对比^[3]

	桥尺寸 / μm	发火能量 / mJ	5 分钟不发 火电流/ A	静电放电试 验(25kV)	作用时间 / μs
热桥丝推冲器	$\phi 48 \times 1000$	32.6	1.1	通过	3400
半导体桥推冲器 1	$100 \times 380 \times 2$	2.72	1.39	通过	60
半导体桥推冲器 2	$47 \times 140 \times 2$	0.45	1.3	通过	100
半导体桥推冲器 3	$23 \times 67 \times 2$	0.23	1.0	通过	150

典型半导体桥推冲器结构如图 8.3 所示。它由点火元件、外壳、波形簧、发射药及挡板等组成。点火元件包括管壳、药管、带半导体桥的陶瓷塞、点火药等,用低能量(3mJ)、短脉冲($20\mu\text{s}$)的电流可以使其快速响应点火($60\mu\text{s}$)。半导体桥正常作用要求快速电流脉冲(上升时间约 100ns),才能使桥气化成等离子流^[4]。

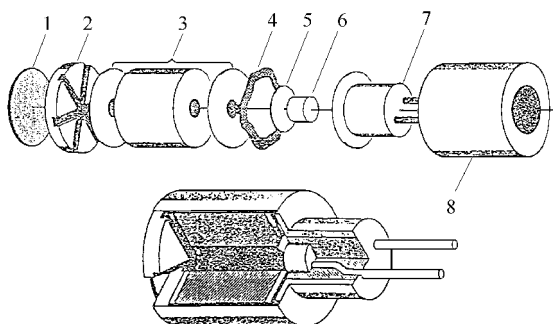


图 8.3 半导体桥推冲器

1、5—密封盘；2—挡板；3—发射药柱；4—波形簧；
6—点火药柱；7—电极塞；8—外壳。

2. 半导体桥雷管

半导体桥的起爆药雷管一般由半导体桥芯片、电极塞、脚线、氮化铅等组成,当发火能量为 2mJ 时,作用时间将小于 $5\mu\text{s}$,不发火电流达到 1.5A ,并能通过静电放电试验。美国桑迪亚实验室报

道了一种集发火控制装置、半导体桥、装药为一体的“灵巧半导体桥元件”(见图 8.4)^[5],主要由管壳 9、装药 2、半导体桥 3、电阻 4、电容器 8、可控硅整流器开关 10、电源输出正脚线 7、负脚线 6、光电编码电压信号输入脚线 5 和密封盖 1 组成。管壳选用不锈钢材料,装药为氮化铅、太安,药量在 30mg~180mg 之间。电容器 8、可控硅整流器开关 10 和三个脚线构成了低压电容放电发火装置。该发火装置只有在接通充电电路,并向可控硅整流器门极输入 4V 编码信号后,才能导通向半导体桥输入电能的通路。它具有控制发火、精确延期、防射频防静电等功能。这种半导体桥雷管具有体积小、低激发能、作用快、安全可靠等特点,能与保险、发火和开关等微电子电路集成于一体,适应于多点起爆系统,可作为一种“灵巧”元件直接用于高技术弹药系统。

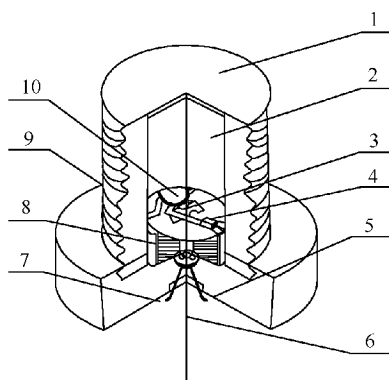


图 8.4 灵巧半导体桥雷管

- 1—密封盖; 2—装药; 3—半导体桥; 4—电阻; 5—光电编码电压信号输入脚线;
6—负脚线; 7—正脚线; 8—电容器; 9—管壳; 10—可控硅整流器开关。

3. 光电半导体桥火工系统

尽管半导体桥火工品本身具有优越的防静电防射频性能,但由于电导引线的存在,它仍不能彻底摆脱电磁环境的潜在威胁。用光纤取代电导线是解决这一问题的根本措施。激光半导体桥火工系统是将半导体起爆与激光光纤相结合的一种钝感而低起爆能

量的光电一体化火工品。该系统是控制系统通过激光器和光纤向爆炸装置发送编码光信号,爆炸装置中的光电转换装置通过信号识别,控制半导体桥火工品发火^[6]。光电半导体桥火工品示意图如图 8.5 所示。

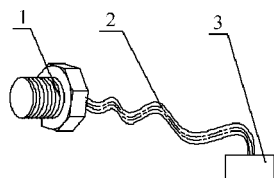


图 8.5 光电半导体桥火工品

1—爆炸装置; 2—光纤; 3—控制系统。

光电半导体桥火工品作用原理是使用火工品内部的微型电路和光电转换装置,将来自光纤的光能转换成半导体桥使药剂点火所需的低能量。这种装置由于是通过电绝缘光纤联接而使火工品与环境实现了隔绝,只要保证火工品外壳的完整,就能经受极其恶劣的电磁环境。光纤的输入能量可使用激光二极管作能源。激光二极管的驱动完全依赖于外部的指令和控制系统。20 世纪 90 年代,美国 Thiokol 公司将这一设计发展成小型化的光起爆电发火系统^[7]。该系统是通过一光纤向终端发送一组编码光信号,终端再通过各个分支光纤将信号送到每个起爆器。每个起爆器内部装有译码、定时、光电转换及控制电容器放电的固态微型电路。接收的激光信号先通过光电二极管向电容器充电,但直到收到一正确编码的发火信号时,电容器才放电使半导体桥火工品发火。这一系统可用于运载火箭等多级系统中多个有次序事件的控制。当用于二级运载火箭的二次点火和一次分离时,其质量、体积和输入能量分别相当于热桥丝系统的 15%、20%、和 10%。该系统的优点主要有:系统的每个动作都可以有独立的保险/解除保险装置;系统具有钝感化、质量轻等特点;能控制多个有次序事件的作用且作用迅速;满足直列式点火系统的安全性要求等。它是新一代武器、航天、航空等领域中可以广泛应用的采用多种能源集成、完全防静

电、射频和电磁辐射的安全钝感多功能起爆系统。

8.2 直列式爆炸箔起爆点火技术

8.2.1 直列式爆炸箔起爆系统组成^[8]

从 20 世纪 60 年代起,随着核武器的发展,对起爆系统的安全性提出了极高的要求,推动了具有固有安全性的爆炸箔起爆技术的诞生,而之后出现的灵巧弹药、侵彻弹药等各类战术武器对起爆系统高可靠性、高安全性、抗冲击及纵向尺寸小的要求,则进一步促进了直列式爆炸箔起爆系统的研究和工程应用。

与桥丝热起爆不同,爆炸箔起爆(EFI)是通过金属箔或桥在高能快速脉冲下发生电爆炸,由此产生的等离子体迅速膨胀、剪切及驱动一薄塑料片(冲击片)高速撞击高密度炸药,使之迅速完成起爆,所以,爆炸箔起爆器又称为冲击片雷管。它的主要特征有:第一,起爆阈值能量高(数千伏),具有固有的安全性,对静电、杂散电流、射频等意外干扰钝感,能适应战争中复杂的电磁环境,适用于构成直列式传爆序列,可简化引信的保险机构;第二,不含起爆药和松装猛炸药,炸药的密度较高,且发火元件桥箔与受主猛炸药被绝缘层和空气间隙完全隔开,适应于高的冲击过载和机械冲击环境;第三,电爆炸箔起爆器耐高温、低温等自然环境,作用时间小于 $1\mu\text{s}$,能满足各种战术应用要求,尤其适用于多点起爆系统,作用同步性的偏差最小为 2ns ;第四,电爆炸箔起爆器中关键部件即桥箔是印刷电路元件,可以大批量自动化生产,制造成本低。到目前为止,美国的爆炸箔起爆器已经商品化和通用化,全自动生产,不但尺寸大为减小,最低发火能量也从开始时的 $3.2\times 10^4\text{J}$ 降低到目前的 0.12J ($0.1\mu\text{F}$ 、 1.5kV)^[9]。据报导,美国已将直列式爆炸箔起爆系统应用于 BLU105/B 型战术机场袭击弹、Fog. M. 光纤制导导弹、“爱国者”改进型导弹、“陶”—2B 重型反坦克导弹、“标枪”反坦克导弹等战术导弹中。1996 年,美国的一篇论文透

露,美国年生产冲击片雷管约 1×10^4 套^[10]。

由于冲击片雷管起爆能量及起爆电压均较高,要求有专门的起爆线路,因此,它通常以起爆系统的形式出现,例如,冲击片雷管与储能电容器、起爆开关、升压电路等集成一个整体,构成爆炸箔起爆系统;而爆炸箔起爆系统再与电子安全保险系统构成直列式爆炸箔起爆系统,如图 8.6 所示。其工作原理是电子安全与解除保险装置解除保险后,脉冲功率源装置给储能电容充电至起爆电压时,触发脉冲开关,冲击片雷管的箔桥起爆后形成等离子体推动飞片撞击 HNS—IV 炸药,使之起爆^[11]。

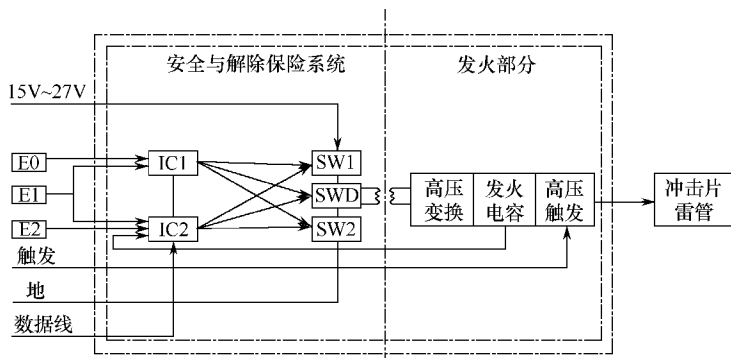


图 8.6 直列式爆炸箔起爆系统原理框图

1. 电子安全与解除保险控制系统

对直列式起爆系统而言,最有效的控制系统是全电子安全系统。冲击片雷管虽然有很高的安全性,但由于它与下一级装药处于对正状态,没有机械隔离装置,控制系统一旦错误地发出了起爆指令,必然会导致弹药起爆,因而对控制系统的要求更为严格。电子安全与解除保险系统是采用阈值、顺序、时间窗、举手表决、动态校核、实时监控等控制策略研制的安全系统,是对环境信号接收、分析处理、阈值判断并控制起爆系统是否动作的电子控制中心。其工作原理是:供电后辅助控制器和主控制器首先进行自检与初始化,并以计时起点信号作为时间基准,由主控制器和辅助

控制器分别对传感器提供的两个环境信号进行识别,只有当环境信号全部符合预定要求且达到安全距离后,动态开关才能工作,使高压变换器对高压电容器充电。当接收到目标信号时,高压开关闭合,电容器快速放电,使冲击片雷管起爆,从而起爆战斗部^[12]。

2. 脉冲功率源系统

在以冲击片雷管为基础的直列式传爆序列中,技术难点集中在能量与质量体积这一对矛盾上。冲击片雷管起爆需要高压大电流,即高压毫微秒脉冲系统。而满足这一系统的电池、电容器、开关元件、升压器的体积和质量必须要小型化。这些才是爆炸箔起爆系统实用的基础。脉冲功率源是对直列式爆炸箔起爆系统体积影响最大的一个部分,系统的体积决定了它能否应用于常规武器。1997年,美国研制的起爆系统体积为 21cm^3 ,2000年降低为 12cm^3 。爆炸箔起爆器工艺设计的主要问题是如何提高能量的利用率,即在降低对脉冲电流能量要求和使电源体积缩小的同时,减小爆炸箔起爆系统体积,降低成本,以实现在常规武器上的广泛应用。

脉冲功率源主要由高压变换、发火电容和高压触发等三部分组成。这三部分对脉冲功率源体积的影响都比较大。高压变换部分主要是变压器体积,而影响变压器体积的主要因素则是工作频率和能量转换效率。发火电容体积与容量和额定电压有关。高压触发部分主要是触发管体积。利用高频开关电路,震荡频率 20kHz 时,在输入电压 27V 和适当的磁芯材料情况下,次级线圈也需数千匝。考虑到武器系统要求发火电容充电时间越快越好,次级线圈电流应更大一些。同时,数千匝线圈会绕成许多层,层间寄生电容和整个线圈的分布电容会达到数千皮法,该电容相当于接在高压输出端上,单位时间内给此电容充放电的能量将会非常大。虽然该能量没有全部损耗掉,但却使初级的开关三极管产生很大损耗和噪声。使用整流式高压电路时,会出现稳压电路部分发热及效率不高等问题,而采用共振式高压电源时,上述问题可得到解决。

3. 冲击片雷管

冲击片雷管是直列式爆炸箔起爆系统的核心部件,其结构简

单,主要元件有桥箔基片、桥箔、飞片、加速腔及起爆炸药柱等(见图 8.7)。桥箔是由绝缘介质基片上的覆铜箔蚀刻制成,飞片通常是粘在桥箔上的一块聚酰亚胺薄膜,飞片上部有一 $\phi 0.76\text{mm} \times 0.76\text{mm}$ 的加速腔,加速腔上部是带有铝约束套的炸药柱。冲击片雷管的作用过程是:当强大的电流脉冲通过金属桥箔时,桥箔爆炸后产生的等离子体迅速膨胀,并使从加速腔中心孔中剪切下的飞片加速,飞片经过加速腔加速后高速撞击炸药柱,当飞片撞击炸药产生的入射能量大于炸药的冲击起爆临界能量时,炸药将会起爆^[13]。

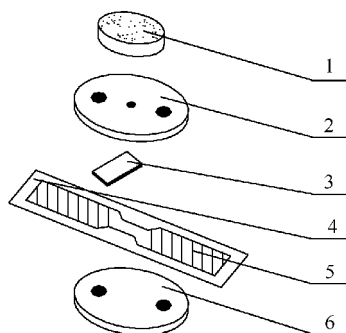


图 8.7 冲击片雷管元件分解图

1—起爆炸药柱；2—加速腔；3—飞片；4—桥箔基片；5—桥箔；6—反射片。

8.2.2 冲击片雷管设计^[8,9]

1. 桥箔

1) 桥箔材料及厚度

桥箔是冲击片雷管的核心元件,桥箔的材料和尺寸直接影响电爆炸箔起爆器的性能。原则上,任何能够形成薄膜的导电材料(金属、半导体)均可作为桥箔材料。由于铜具有良好的电爆性能,且加工方便,可与基片制成一体的柔性复合片,所以,常用的桥箔材料为铜。另外,对铜箔材料质量的要求很高,如致密性好、无针孔、表面光亮,无微细裂纹等。

桥箔材料确定后,厚度是很关键的参数,通常厚度为 $4\mu\text{m}\sim 75\mu\text{m}$ 。太薄的金属箔不能提供足够的膨胀力将较厚的飞片驱动到所需的速度。

2) 桥箔结构形状

在飞片形成过程中,由于桥箔的宽度和厚度比大约是 100 : 1,当桥箔爆发时,在飞片宽度上的压力恒定,且垂直作用于飞片并将其加速到高速,所以,边缘效应通常不予考虑。为使桥箔均匀受热,控制拐角处加热速度过快于比中心处的现象,桥箔设计时应将拐角处设计为圆弧形(最佳圆弧半径为 0.178mm),且应光滑,不能有毛刺^[14]。桥箔加热越均匀,飞片就越平整,在加速腔中的飞行就越平稳。典型的桥箔形状如图 8.8 所示。

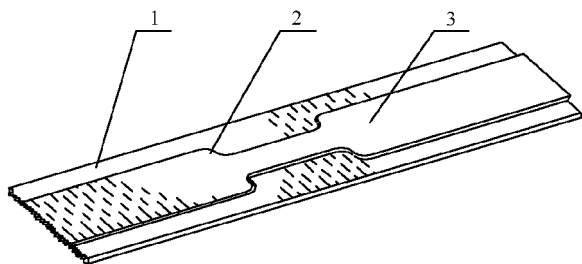


图 8.8 典型桥箔形状

1—塑料基片；2—桥箔；3—扁平电缆。

3) 桥箔尺寸

桥箔尺寸设计的原则是桥宽等于桥长,面积的大小要与飞片的质量相匹配。桥区的宽度对桥带的电阻影响较大。而电阻对冲击片雷管的起爆可靠性有较大影响。另外,连接桥区的带状线的电感和电阻也应尽可能低。

2. 飞片材料及厚度

飞片材料一般为绝缘材料,它在整个系统中起绝缘、安全和形成飞片等作用。绝缘作用是指桥箔与相邻元件之间的绝缘,飞片与反射板一起将电流限定在箔桥厚度范围内;安全作用是指隔离作用,导体与炸药之间除有空气间隙外,还有绝缘层,因而可以防

静电。在形成飞片方面,力学特性特别是剪切特性起着主要作用。从能量角度来看,飞片材料与桥箔贴合得越紧,材料阻止桥箔放电的效率越高,桥箔爆炸后所形成的等离子体切割和推动飞片的能量利用率也就越高。所以,飞片材料的力学性能决定飞片形成过程中的能量损耗,同时还决定着等离子体能够形成的最大压力。

冲击片雷管的飞片材料可使用玻璃、陶瓷、聚酰亚胺膜、各种普通塑料及绝缘介质与金属的夹层结构等,但试验结果表明聚酰亚胺膜较为理想。聚酰亚胺的力学性能、耐热性能、绝缘性能、放电阻抗及与桥箔的贴合性能等方面均符合作为飞片材料的条件。另外,其起爆特性较好,也容易实现自动化生产,生产成本较低。

经加速膛边缘切割形成的飞片,其直径的大小由加速膛的直径决定。因为飞片直径越大,速度越低,所以,这也决定了飞片的速度。

飞片厚度决定飞片与炸药的作用时间大小,飞片越厚,其作用时间越长,但飞片太厚时,又会导致飞片速度降低。另外,厚度不均匀时,不平稳的飞片飞行将会影响起爆效果。因此,飞片的厚度及厚度的均匀性是飞片设计时的两个重要参数。在设计时,由于飞片受桥箔爆炸的等离子体膨胀驱动,所以,飞片厚度与桥箔厚度有一定的匹配关系。通常,飞片厚度约为桥箔厚度的 5 倍~10 倍。

3. 加速膛

在飞片/桥箔组合件与炸药柱之间必须有一个加速膛,其主要作用是在等离子体的作用下将聚酰亚胺片剪切成与其内径相等的圆片,并在膛内加速。在设计加速膛时,要考虑材料、直径和长度等 3 个因素。

1) 加速膛材料选择

加速膛一般采用绝缘材料或半导体材料,如玻璃纤维、陶瓷、乙酸丁酯纤维、有机玻璃、石英玻璃及蓝宝石等。采用蓝宝石作加速膛材料时,能将加速膛制得很圆,使之均匀剪切飞片,有助于对准受主炸药柱,达到较好的起爆效果^[8]。

2) 加速腔尺寸

加速腔设计时,一般取其直径为桥箔宽度的 1.5 倍。这一方面提高了能量利用率,另一方面对它在桥箔/飞片上的位置要求不很严格,便于装配定位,所形成的飞片直径与桥箔的宽度较接近。加速腔的直径大小决定了飞片的质量,因此,在设计中一般结合飞片厚度综合考虑。

加速腔的长度决定了飞片撞击目标以前运动的距离。如果加速腔过短,飞片在撞击炸药时就可能达不到其极限速度。加速腔的长度要保证飞片能够加速到最大速度的 90% 以上。冲击片雷管加速腔最佳长度为桥箔厚度的 50 倍~100 倍。

4. 反射片

反射片位于冲击片雷管的桥箔基片背面,其质量远大于桥箔质量和飞片质量。反射片有以下作用:第一,防止爆发气体膨胀进入自由空间而造成能量损失;第二,桥箔爆炸时的大部分能量将在反射片表面被反射回来,而不是通过反射片材料传播出去,这有利于提高飞片的速度;第三,便于组装。反射片材料影响其性能的因素主要有密度、表面光洁度、厚度和硬度等。对反射片材料的要求是致密绝缘,且靠近桥箔基片的表面必须光滑。

常用的反射板材料有聚四氟乙烯、聚酰亚胺、玻璃、云母、陶瓷等。从密度来看,聚四氟乙烯密度为 $2.0\text{g}/\text{cm}^3$,聚酰亚胺密度为 $1.4\text{g}/\text{cm}^3$,玻璃的密度为 $2.16\text{g}/\text{cm}^3$,因此,聚四氟乙烯应该比聚酰亚胺有更好的反射性能,但聚四氟乙烯外观暗淡,有明显的粗糙表面,给桥箔爆发等离子体的膨胀留出了空间,因此,其反射性能较差。采用玻璃和陶瓷作为反射片时性能较好,起爆炸药需要的能量较低。玻璃和陶瓷反射片能使系统最大效率地完成电能向飞片加速度的转换^[15]。

5. 起爆炸药

冲击片雷管用起爆炸药应选择爆轰成长期短、满足传爆药安全性要求、冲击片起爆阈值能量较低的炸药。它一般选用 HNS 炸药,其使用密度介于最大理论密度的 90%~95%,典型尺寸为

$\phi 4\text{mm} \times 3\text{mm}$, 这样有助于保持药柱的强度, 便于装配且耐冲击。

6. 工艺设计

冲击片雷管的反射片、桥箔和飞片的组合一般有两种结构: 一是将桥箔与飞片做成一体, 即聚酰亚胺覆铜箔, 这种结构在材料、桥箔加工中曾出现过许多问题, 导致了冲击片雷管的一致性差、可靠性低; 其二是反射片与桥箔做成一体, 反射片使用氧化铝陶瓷, 它具有表面光洁、硬度高、韧性好、价格低等特点, 而桥箔采用 $4\mu\text{m} \sim 10\mu\text{m}$ 的铬—铜—镍—金复合膜, 这种复合薄膜采用集成电路加工较容易。实验表明, 这种复合膜的效果比单一导体膜要好, 即桥箔爆发电流密度大。爆发电流密度大表明能量密度大, 即可以用很小的发火能量获得很高的电流密度, 从而提高了能量利用率^[16]。

8.2.3 直列式点火技术与冲击片点火管设计

由于引信要随同弹丸经受发射过载的冲击, 所以, 长期以来, 人们对弹药中引信传爆序列的安全性较为重视, 而忽视了点火系统的安全性。但事实是, 在运输、装填、发射等情况下, 点火序列存在的意外发火的可能性要高于引信的传爆序列。所以, 在引信安全性有了较大的改善之后, 人们已开始关注点火序列的安全性^[17]。1992年, 美国军标 MIL-STD-1901《火箭弹和导弹发动机点火系统设计准则》规定了弹药推进系统解除保险和发火使用的设计安全准则, 首次提出了直列式点火系统的概念。直列式点火系统就是火工品与推进装药对准、点火序列无需隔断的点火系统。1992年在美国尤马国家靶场通过了用于火箭发动机点火的直列式安全点火系统靶场鉴定试验^[18]。这说明直列式安全点火系统在美国已进入了实际应用阶段。

在导弹和火箭弹发动机中, 虽然目前使用的钝感电点火器虽有一定的安全性, 但仍存在安全隐患, 不能完全解决射频危害问题, 如不能抗闪电及高空电磁脉冲等。而直列式点火系统能简化传统“隔断式”点火序列的设计, 改变其装药结构, 提高武器系统的安全性。与直列式起爆系统类似, 直列式点火系统也是近年来冲击片起

爆技术和全电子安全保险技术迅速发展的产物。两个系统的组成基本相同,惟一的区别是将起爆炸药换为钝感点火药。所以,直列式爆炸箔点火系统的设计主要就是冲击片点火管的设计^[19,20]。

1. 结构设计

传统的热丝点火管都是柱状结构,密封性较好。为适应点火系统的结构,冲击片点火管也应设计成柱状结构(见图 8.9),用铜插针将发火线引出。

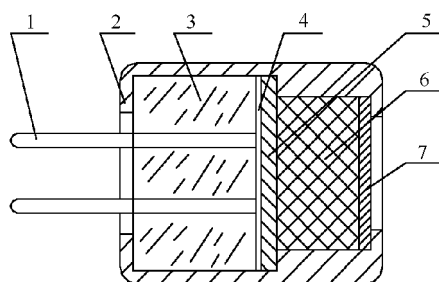


图 8.9 冲击片点火管结构

1—脚线；2—外壳；3—反射片；4—桥箔；5—加速腔；
6—点火药；7—硝化棉软片。

2. B/KNO₃ 点火药设计

与热桥丝点火机理不同,冲击片点火管是采用冲击波能量点燃点火药。美国军标 MIL—STD—1901 明确提出的惟一的直列式许用点火药是 B/KNO₃,当采用其他点火药时,必须证明其感度低于 B/KNO₃ 的感度。这里的感度主要指机械感度和冲击波感度。

1) B/KNO₃ 点火药的感度

不同的粒度机械感度不同。当氧化剂 KNO₃ 粒度为 8.0 μ m 时,用不同粒度还原剂 B 混合的 B/KNO₃ 的机械感度见表 8.3 所列^[21]。

表 8.3 B/ KNO₃ 点火药的机械感度

B 粉粒度/ μ m	10.15	2.65	0.94	备 注
摩擦感度/%	100	66	98	摆角 80°,表压 3.43MPa
撞击感度/%	4	12	12	锤重 2kg,落高 50cm

有关实验表明, B/KNO_3 发生明显分解反应的冲击波临界压力为 1.52GPa, 密度为 1.59g/cm^3 下的 Hugoniot 关系式为 $D_s = 1.683 + 1.773u_s$ 。常用 2# 黑药的冲击波临界压力为 2.74GPa。

2) 压药密度对发火能量的影响

B/KNO_3 装药密度对 50% 发火能量有影响。密度过大或过小, 都会导致发火能量高。对一定粒度的药剂而言, 压药压力过大, 会出现“压死”现象; 而密度过小时, 药剂过于疏松, 飞片撞击到药柱表面, 药粒相对滑动会造成能量损失。试验表明: 用冲击片点燃密度为 1.60g/cm^3 的 B/KNO_3 药柱时, 其点火效果较好。

3) B 粉纯度和粒度对发火能量的影响

为提高 B/KNO_3 点火药的冲击波感度, 在提高 B 粉纯度的同时, 还需对其进行细化处理, 以增大它的比表面积。冲击片点火的可靠性与 B/KNO_3 点火药中 B 粉的纯度和粒度有关。在一般情况下, 纯度高低影响药剂的反应历程和点火温度, 纯度高时, 发火能量较低(见表 8.4)。使用时, 可以将点火药直接压入管壳中, 也可以先压成点火药柱, 然后再把药柱装入管壳。

表 8.4 B 粉纯度和比表面积对发火能量的影响

B 粉纯度/%	B 粉比表面积/ $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	冲击片发火阈值/J	压药密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
>90.0	20	1.50	1.75
>90.0	20	1.48	1.60
>90.0	35	1.08	1.60

冲击片点火管用 B/KNO_3 点火药的要求概括为: B 粉纯度为 91.0%, 比表面积为 $35\text{m}^2/\text{g}$, 粒度为 $1.4\mu\text{m}$; B/KNO_3 的粒度小于 $15\mu\text{m}$, 压药密度为 1.60g/cm^3 。

3. 系统其他参数设计

(1) 加速膛设计。加速膛的长度对 B/KNO_3 的发火率有影响, 因为飞片从加速到形成最高速度需要一定的距离。试验结果表明, 用冲击片点燃 B/KNO_3 时, 加速膛的最佳尺寸为 $\phi 0.5\text{mm} \times 1.0\text{mm}$ 。

(2) 桥箔宽度设计。因为点火时要求的加速膛较长及飞片较

厚,需要更多的等离子体驱动飞片,所以,点火需要较宽的桥箔。对于冲击片点火而言,当桥箔尺寸为 $0.6\text{mm} \times 0.5\text{mm}$ 时,发火能量较低。

(3)桥箔带状线长度。桥箔电感和电阻随桥箔带状线长度的增加而增大。由于桥箔爆发时初始电流上升速率取决于电感,所以,为使桥箔电感尽量低,则在保证其使用长度下,应尽量减少桥箔的带状线长度。另外,圆柱形点火管用桥箔的电感比扁平式结构减少了近 10 倍,电阻也降低了 3 倍。所以,将冲击片发火桥箔及其他元件放入柱状壳体内,既能保证原来的桥区尺寸,又能大幅度降低其电感和电阻,使冲击片点火管发火能量降低,系统体积减小。

8.3 激光点火与起爆技术

随着战场的电磁环境不断恶化,常规的金属桥丝电火工品越来越显露出其弊端,造成了大量的意外发火事故。无线电技术在生活中的广泛应用,也增加了电火工品在生产、储存和运输中的危险性。另外,自然界的放电如闪电等也容易引起电火工品的意外事故。这种不安全的因素绝大部分存在于电火工品结构本身,即当外界电磁场较强时,很容易在桥丝和脚线中产生电流,从而引发药剂意外点火。因此,20 世纪 60 年代激光器一问世,通过使用光纤代替导线而实现含能材料与电系统的隔离,即能从根本上解决火工品电磁干扰能力的激光点火与起爆技术就成为重点的研究方向,国内外均投入巨大努力进行了研究和应用。

8.3.1 激光点火技术及其系统组成

1. 激光点火技术发展及应用

1) 激光点火机理分析^[22]

激光点火主要是利用激光的高强度对药剂产生热作用使之点火。当激光作用于药剂表面时,一部分光能被反射,另一部分光能入射到药剂表面,并且在极薄的表面药层(约几个微米)内被吸收,

这种吸收和反射主要取决于药剂表面的光学性质。由于光热效应,药剂将所吸收的激光能量转化为热量,使其表面温度上升,发生热分解,甚至出现不可逆的燃烧化学反应。从激光与含能材料的作用过程来看,激光点火过程将经历如下几个阶段:第一,含能材料吸收入射激光能量,因为光热转换作用使得激光作用区域的含能材料表面被加热;第二,含能材料因被加热,发生凝聚相的化学反应,温度继续升高;第三,不仅在药剂的表面发生凝聚相化学反应,而且在表面上方也存在气相化学反应,这一阶段被认为点火已经发生。

2) 激光点火技术发展与应用状况^[24]

几十年来,国内外对激光点火技术投入巨大努力,主要在于它有固有的安全性。另外,以固态激光器或激光二极管和点火元件构成的激光点火系统可以制造成直列式点火系统,能极大地适应全电子保险与解除保险装置。1992年,美国军标 MIL-STD-1901《火箭弹、导弹发动机点火系统安全设计准则》中,将激光直列式点火系统推荐用于火箭弹和导弹等点火系统。

激光点火技术可能的应用领域主要包括陆军弹炮系统、空军飞机逃生系统、火箭弹和导弹的直列式点火系统等。美国陆军在20世纪80年代末提出 LIGHT 研究计划,其近期目标是利用激光能源代替点火序列中的火帽或底火,而远期目标是利用激光束直接点燃火药床,代替整个点火系统,并将这些设想用于 20mm 无壳弹药、先进加榴炮系统(AFAS)及先进坦克武器加农炮(AT-ACS)系统的点火装置。激光点火技术已成为美国陆军未来战斗系统主战炮采用的重要技术之一。

实用型激光点火系统的发展较为迅速。美国军方资助研制的机械式激光点火系统已经推荐用于 V-22 飞机的紧急出口系统、B-1B 飞机救生系统、F-16 飞机的紧急出口系统。对于武器/导弹系统而言,已经或正在研究的可能应用有:小型洲际导弹、新型空-空导弹、“德尔塔”火箭系统和新型火箭系统。美国匡梯克公司已研制出几种激光点火系统,如为美国地面拦截工程研制出 16 输出的

点火系统原理样机,并与韩国公司合作研制出激光解除保险与发火装置,其尺寸与“海尔法”导弹所用相同,目前已开始在导弹发动机中试验。1995年,为美国航空航天局研制的激光二极管点火系统计划在卫星的释放装置上验证,并推荐将其用于航天飞机、不回收的运载火箭及卫星。

2. 激光二极管点火系统的组成^[23]

激光二极管点火系统主要由保险与解除保险装置、激光驱动电源、激光器、光纤以及激光点火器 5 部分组成(见图 8.10)。工作原理是:当解除保险以后,由激光二极管驱动电源为激光二极管提供合适的脉冲或连续驱动电流,使激光二极管产生足够功率和持续脉冲的激光,通过光纤传输到点火药,实现点火。



图 8.10 激光二极管点火系统示意图

1) 保险与解除保险装置

由于激光二极管用低压启动,其本身存在安全问题,为确保激光器不发生意外启动,因而需要在激光二极管驱动电源之前安装一个保险装置。原则上,爆炸箔起爆器使用的全电子保险装置也适用于激光点火系统。1991年,美国 B. A. Stoltz 等人发明了一种适应于激光二极管点火系统的保险与解除保险装置^[25]。该装置除具有电子保险装置的功能之外,还考虑激光系统需要现场测试的光路完整性要求,而增加了光路连续性自检回路。保险与解除保险控制电路采用全电子固体件,具有完成三种功能的三个回路:第一,预解除保险回路,由来源于两个环境传感器的两个独立物理参量对一金属氧化物半导体场效应管开关作用,完成保险解除;第二,连续性检测回路,使电源通过一限流自检装置驱动激光二极管,产生低于起爆阈值的光能,光信号被起爆器反射回光纤,并由与耦合器连接的探测器探测,最后将信号反馈于控制电路中;第三,含有一发火回路,当目标传感器信号使场效应管开关关闭

后,电源驱动激光二极管使之产生高于起爆阈值的能量,以起爆装置,完成整个系统的功能。

2) 驱动电源^[26]

驱动电路为激光二极管提供预定幅值和脉冲宽度的恒定电流,是激光点火系统的发火控制部件。当激光二极管输出功率大于 1W 时,需要的驱动电流为安培级,且电流的稳定性要高,波纹系数要小。

3) 激光器

固体和气体激光器的特点是输出功率或能量较高,光发散角小,寿命长,价格低,但明显的缺点是能量效率低,而且这些激光器及其配套电源的体积和质量都比较大,不利于武器系统的小型化,也限制了激光点火系统在小型战术导弹等小型武器上的应用。

小体积、轻质量且能效高的激光二极管的诞生,将大大拓宽激光点火系统在整个武器系统中的应用领域。随着激光技术的迅速发展,激光二极管的功率不断提高,目前激光二极管的功率已达 1.5W 左右。目前,通过采用多异质结、量子阱及二极管列阵等技术,新一代激光二极管的功率及特性已能较好地满足点火及实用的要求,最高功率已达 10W。用激光二极管作为激光源的点火和起爆研究也得到了不断发展。随着激光二极管输出功率和能量的提高,其在激光点火与起爆技术领域将占有越来越重要的地位。

4) 光纤和光纤接头

光纤作为传输激光的载体在激光二极管点火系统中具有重要的作用。目前使用的多是石英光纤,它通常有阶跃光纤和梯度光纤等两类。在阶跃光纤中,纤芯的折射率是常数,而在梯度光纤中,纤芯折射率由光纤轴心沿径向方向向外逐渐减少,因此这种光纤具有自聚焦的特性,可以提高激光输出的功率密度,而这对激光二极管的点火十分有利。实验发现,使用梯度光纤时药剂的点火能量阈值比使用阶跃光纤要下降 30% 左右^[27]。

光纤接头是用来连接激光器输出光纤与点火光纤的重要部件,在激光器的尾纤和点火光纤的激光输入端各带有一个光纤接

头,二者通过一个法兰连接在一起,共同完成激光传输任务。为了获得较高的激光功率密度,激光二极管点火系统所用光纤的芯径较小($100\mu\text{m}\sim 200\mu\text{m}$),这样在通过法兰对接时,很难做到两根光纤截面的完全重合,致使从激光器尾纤输出的激光不能全部到达点火光纤,而造成了较大的功率损失。因此,需要进一步完善光纤—光纤对接工艺,以提高能量利用率,这一点对于本身输出功率较低的激光二极管来说极为重要。

5) 激光点火器

激光点火器的设计关键在于光纤密封及光纤与药剂的耦合。它一般有光纤尾结构、光纤脚结构和光学窗口结构等三种结构形式(见图 8.11)^[28]。光纤尾结构是将与激光器相连的光纤直接密封进点火器,光纤与药剂的耦合方式为直接接触;光纤脚结构是预先将一段短光纤封装到点火器,然后通过光纤连接器与激光器的尾纤连接,与药剂耦合方式也是直接接触;光学窗口结构是预先将一个具有较好的强度和透光性能的材料作为窗口封装进点火器,激光器的尾纤通过连接器与其连接。

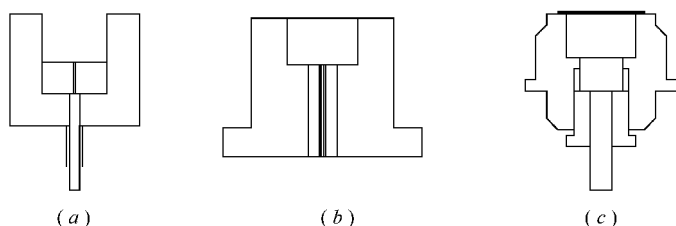


图 8.11 光纤与激光点火器的耦合结构类型

(a) 光纤尾式; (b) 光纤脚式; (c) 光学窗口式。

8.3.2 激光点火器设计^[29]

1. 激光点火器结构设计

激光点火器结构通常采用光纤尾结构和光学窗口结构。光纤尾这种耦合方式是先将与激光器相连的光纤直接用有机玻璃塞密封进壳体,然后再压药。其优点是激光能量能直接输入到药剂,其

缺点是由于受到管壳的空间限制,使光纤端面不易加工,且装药工艺比较复杂。光学窗口结构是先将药剂压入点火器中,然后再进行光纤与光学窗口的连接。其优点是由于火工品在压药过程中不带光纤尾,可简化光纤端面加工及药剂的装配工艺,操作简单,但缺点是由于药剂与光学窗口间留有空隙,导致了光束发散,降低了光斑的功率密度,另外,光学窗口材料对激光功率有衰减作用。因此,激光点火器的光学窗口材料要求具有良好的透光性且与药剂的相容性能好。目前常用的两种光窗材料是赛璐珞片和云母片,其透光性都比较好,但由于云母脆性较大,易被压力挤碎而出现瞎火现象,所以,通常使用一片赛璐珞片作窗口材料。

对压药压力为 100MPa 的 B/KNO_3 (33/67) 进行了两种结构的发火对比试验。为了解密封性对药剂点火性能的影响,也进行了输出端在不同密封强度下的对比试验,其中一种是末端不加盖片,只在点火器末端涂上厚度约为 0.2mm 的一层胶进行低强度密封;另一种则是在管壳末端加上盖片,然后涂上一层厚度约为 1mm 的环氧树脂胶保证高强度密封和约束。实验所用的激光器最高输出功率为 1.5W,波长为 808nm,固定脉宽为 20ms。实验结果见表 8.5 所列。

表 8.5 不同结构下药剂的激光点火特性

结 构	输出端	功率阈值/W	作用时间/ms	标准偏差/ms
光纤尾结构	无盖片,涂胶		14.52	6.01
	有盖片,涂胶		3.90	
	有盖片,收口	0.21	3.60	1.38
光学窗口结构	有盖片,收口	0.98	33.0	

从表 8.5 中可以看出,与光纤尾结构相比,激光窗口结构的激光点火功率阈值和延迟时间明显较大。而随着点火器输出端密封强度的增加,延迟时间很快缩短,并且密封强度提高以后,标准偏差也大大减小。因此,激光点火器的结构适合采用光纤尾结构,且输出端应加盖片后进行收口密封。

2. 激光点火器装药设计

在美国军标 MIL-STD-1901 中, B/KNO_3 是直列式点火系

统惟一的许用点火药剂。所以,激光点火器中的点火药也应首选 B/KNO_3 。这里所谓的装药设计主要包括点火药的配比、压药压力、粒度及掺杂等。

1) B/KNO_3 装药配比设计

不同配比可能有不同的化学反应热和燃速,对药剂的激光点火感度和点火延迟时间均产生影响,所以,配比是混合药装药设计的基础。不同配比下 B/KNO_3 的激光感度和点火延迟时间见表 8.6 所列。

表 8.6 配比对 B/KNO_3 感度和延迟时间的影响

压药压力 /MPa	配比 /W %	掺杂 /W %	功率阈值 /W	激光点火时间 /ms	桥丝点火时间 /ms
100	24 : 76		0.19	6.8	28
100	33 : 67		0.21	3.6	15.3
100	43 : 57		0.25	4.4	15.6
100	33 : 67	3% 碳黑	0.16	2.5	

从表 8.6 中可以看出,随着 B 含量的增加,药剂的功率阈值增大,而对应的激光点火时间与桥丝点火时间都呈先缩短后延长趋势。其原因主要在于适当增加可燃剂含量能够增大反应体系的燃速,但可燃剂含量过大时,反应体系会因为供氧不足而导致燃速降低。在大气环境进行燃烧反应时,由于有空气中的氧气补充反应所需要的氧,所以燃速最大时的 B 含量高达 40%~50%。而在点火器内的密闭条件下,由于反应物进行化学反应需要的氧完全由氧化剂提供,所以 B 含量为 33% 时燃速达到最大。从激光感度和点火时间两方面考虑,配比为 33 : 67 的 B/KNO_3 的综合性能较为理想。

激光点火药的掺杂能够改变烟火药的光学特性,因此,适当的掺杂能够提高药剂的激光感度及缩短点火时间。试验表明,碳黑作为一种极为有效的激光吸收剂,在激光吸收性能较差的药剂(如

氮化铅、斯蒂芬酸铅等)中掺入碳黑,能大大提高药剂对激光的吸收率。而在颜色较深、对激光有较好吸收的药剂(如 B/KNO_3)中掺杂碳黑时,降低点火功率阈值的效果并不显著。

2) B/KNO_3 装药粒度和压药压力设计

B/KNO_3 配比为 33 : 67 时,药剂粒度和压药压力对点火时间的影响见表 8.7 所列。

表 8.7 药剂粒度和压药压力对点火时间的影响

压药压力/MPa	12.5	37.7	100	
粒度/ μm	0.8/20	0.8/20	0.8/11.5	0.8/20
阈值功率/W	0.46			0.29
0.8W 时点火时间/ms		3.7	3.4	3.6

从表 8.7 中可知,药剂粒度和压药压力对点火时间的影响都较小。从燃烧理论上讲,药剂粒度的减小,能够同时增大可燃剂或氧化剂受激光照射的表面积,因而能够增强其对激光的吸收。另外,粒度减小能够增大药剂之间接触的比表面积,因此能够加快化学反应速度。激光点火系统所用光纤芯径一般在 $100\mu m \sim 200\mu m$ 之间,远大于试验所用可燃剂或氧化剂的粒度,所以,对点火时间的影响未能表现出来。

压药压力影响烟火药的装药密度,它将通过改变烟火药与光纤接触程度、导热率、热容、孔隙率和燃烧热等因素而影响点火过程。在弱密封条件下,增大装药密度有利于热点形成,从而使点火功率阈值降低。而在强密封条件下,由于点火器本身就具有很好的密封作用,因此,压药压力对点火时间的影响较小。

3) 其他点火药的激光点火特性

$C/S/KNO_3$ (黑药)、 $Pb_2[Fe(CN)_4]/KClO_4$ 、 $Zr/KClO_4$ 是点火器中常用的点火装药,其中 $Zr/KClO_4$ 是美国航空航天局激光标准点火器推荐用药,它具有储存寿命长、压力上升快、产气少等特点。这些点火药的激光点火感度与点火时间见表 8.8 所列。

表 8.8 常用点火药的激光点火感度与点火时间

药 剂	压力/MPa	激光点火感度/W	点火时间/ms
C/S/ KNO_3	70	0.086	5.47
$\text{Pb}_2[\text{Fe}(\text{CN})_4]/\text{KClO}_4$	45	0.282	0.42
Zr/ KClO_4	80	0.27	1.84

从表 8.8 中可知,这些药剂均具有较高的激光感度,其中黑药的感觉度最高,其功率阈值仅为 0.086W,主要原因是其黑颜色对激光有很强的吸收能力。另外,三种药剂的激光点火时间都较短。因此,采用激光点火具有可行性。

8.3.3 激光点火系统参数对点火特性的影响^[30]

1. 激光功率、波长和脉宽对点火特性的影响

药剂表面的激光功率密度是影响药剂激光点火特性的关键因素,而在激光束尺寸一定条件下,功率则成为影响药剂激光点火特性的重要因素。功率大,则表示单位时间内激光器传递给药剂表面的能量就多,药剂表面的得热速率较大,因而能够缩短药剂的激光点火时间,但随着功率增大,药剂存在一个最小的点火时间。

与普通的加热方式不同,激光器波长对药剂激光点火特性有较大的影响,其原因是药剂的激光吸收性能有较强的波长选择性。光的能量是以光子的形式被物质吸收,而光子能量与光的频率成正比,与光的波长成反比,因此,较短波长的激光应该比较长波长的激光更有效地提高分子的振动能级。例如,分别用波长为 808nm 和 980nm 的激光器进行 B/ KNO_3 药剂的激光点火,对应的功率阈值分别为 0.32W 和 0.67W。功率阈值随激光波长增大而显著增大。

如果点火时间小于激光的脉冲宽度,则脉宽的长短对点火时间没有影响;但如果延迟时间大于激光器的脉宽,则脉宽的长短就会影响点火时间,脉宽较长时,点火时间较短。总之,脉宽对于药剂的激光二极管点火特性影响不大,但合理选择脉宽,对于保证药

剂可靠点火同时又避免激光能量的浪费具有重要的意义。

2. 能量损耗对激光点火系统的影响

对于利用光纤传输能量的激光点火系统而言,激光能量传输损耗的形式包括激光器—光纤耦合损耗、光纤传输损耗、光纤—光纤耦合损耗、光纤输出端面质量造成的损耗等。由于激光器—光纤耦合损耗和光纤传输损耗主要取决于激光器件和光纤的制造水平,所以,激光点火系统设计时应重点考虑光纤—光纤耦合损耗及光纤输出端面质量造成的能量损耗对药剂激光点火性能的影响。

在光纤—光纤的耦合过程中,法兰的使用是造成激光能量损耗的重要原因。法兰是激光传递过程中不可缺少的重要元件,它是通过与两根光纤端部的接头分别连接而将两根光纤连接在一起,以完成激光传输的任务。在连接的过程中,存在着两根光纤端面的同心度、反射性以及光纤模式的匹配性等问题,从而造成激光点火系统中的能量损失,因此,在将两根光纤对接时,一定要注意光纤与光纤以及接头与接头的匹配性。

光纤端面质量包括光纤端面的平整度、清洁度、垂直度和圆整度等方面。它们均对激光传输有一定的影响。经过显微镜观察,证明未经切割的光纤的端面质量确实与切割后的光纤有很大差别。因此,在将光纤耦合进点火器之前,应首先使用光纤刀对光纤仔细切割,然后用酒精棉将其表面的碎片和杂物擦洗干净,最后在显微镜下观察,保证其端面达到一定的平整度、清洁度和圆整度。实验证明,光纤端面质量对药剂的激光点火功率阈值和点火时间都有一定的影响,这种影响虽并不十分显著,但对功率阈值的标准偏差影响却较大,因此,提高光纤端面质量是提高精度的质量保证措施,但不是影响感度和点火时间的重要因素。

3. 光纤直径对点火特性的影响^[31]

选用直径为 $100\mu\text{m}$ 、 $200\mu\text{m}$ 、 $400\mu\text{m}$ 、 $600\mu\text{m}$ 的梯度石英光纤对 B/KNO_3 点火药进行激光点火试验,其点火阈值和点火时间结果见表 8.9 所列。实验用钽玻璃激光器的输出参数为 $1.06\mu\text{m}$ 、脉宽 2.4ms 。

表 8.9 不同直径光纤的点火阈值和点火时间

光纤直径/ μm	点火阈值/mJ	能量密度/ $\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$	点火时间/ms	偏差/ms
100	19.40	247.13	26.03	3.54
200	42.98	136.88	25.58	3.35
400	105.72	84.17	34.49	4.67
600	235.86	83.42	32.72	4.74

从表 8.9 中可以看出,激光点火阈值随光纤直径的增加而增大,随激光能量密度的增大而减小,而激光能量密度的提高可以通过增大激光功率和减小光纤芯径的途径来实现。由于小直径光纤具有较小的截面积,所以,点火过程中作用于光纤的压力峰值也较小,因此,采用小芯径光纤能实现高强度设计。实验证明:光纤直径最小以 $100\mu\text{m}$ 为限,当平均功率相同时,梯度光纤中心的峰值功率强度要大于阶跃光纤的平均功率强度,所以,使用梯度光纤也能降低其点火阈值。

4. 激光点火系统可靠性裕度确定^[23]

实际使用时,通常要求激光点火系统可靠度大于 0.999。而根据国内外经验,高可靠度下的刺激量确定是采用裕度系数来保证的。对激光点火装置而言,当裕度系数为 2 即发火能量为点火阈值的 2 倍时,就可认为激光点火器就能可靠发火。对激光点火系统而言,尚需考虑系统的光纤损耗、接头损耗、耦合损耗、点火器作用裕度之后,才能得到系统作用可靠的激光器能量。对此可做如下估算:激光器凹口与光纤耦合最大损耗取为 3.0dB(折合能量系数为 2);激光器寿命期内随时间、温度、热、机械等环境衰耗取为 3.0dB(折合能量系数为 2);激光器与接头之间、接头与点火器之间的两段光纤的能量损耗各取 0.1dB(折合能量系数为 1.01),接头损耗取为 0.8dB(折合能量系数为 1.2);激光点火器作用裕度系数为 2。则激光器功率约为点火器点火阈值的 10 倍时,激光点火系统才能保证可靠作用。

5. 激光点火与桥丝点火性能的比较^[29]

虽然激光二极管点火与桥丝点火同属于热起爆机理,但是药剂对于激光的吸收远快于普通的桥丝加热,因而激光二极管点火时间较短。几种点火药的激光二极管点火时间与桥丝点火时间的实验结果见表 8.10 所列。

表 8.10 药剂的激光二极管点火时间与桥丝点火时间的比较

药 剂	Pb[Fe(CN) ₄]/KClO ₄	Ti/KClO ₄	B/KNO ₃	B/BaCrO ₄
激光点火时间/ms	0.42	1.2	2.8	38
桥丝点火时间/ms	4.16	4.16	31.2	20

从表 8.10 中可以看出,除 B/BaCrO₄ 外,其他几种药剂的激光二极管点火时间都明显短于其桥丝点火时间,这说明对于大多数药剂来说,激光引燃药剂确实是一个相当快速的过程。即使对于 B/BaCrO₄,如果在改善其对激光的吸收能力之后,其激光二极管点火时间也会短于桥丝点火时间,这是激光二极管点火比桥丝点火具有优越性的一个重要方面。另外,对于类似 Ti/KClO₄ 和 B/KNO₃ 等钝感药剂而言,当用桥丝直接点火时会出现大量的断桥瞎火现象,点火成功率往往只有 20%。但使用激光二极管点火时则不存在这种现象。

8.3.4 激光起爆技术

多用途、快速作用和高可靠安全性引信的需求推动了激光起爆技术的研究。高能炸药的激光起爆通常有三种形式:第一,激光直接与高能炸药作用,这一方式与桥丝式电雷管作用类似;第二,激光通过炸药表面的薄金属膜的快速加热而作用,这一方式与 EBW 式电雷管作用类似,其激光能量使用效率较低,不适合作起爆之用;第三,激光通过烧蚀一金属箔产生一高速飞片撞击高能炸药而作用,这一方式与 EFI 的作用过程类似。三种结构不同,其作用机理也不相同。

1. 激光直接起爆炸药技术^[32]

与激光点火器相比,激光直接起爆炸药的雷管结构和装药要复杂得多。使激光雷管实现爆轰输出的两种途径是:第一,用激光点燃起爆药完成爆燃转爆轰,这类似于目前的电桥丝雷管。尽管这种方法比较容易实现,但敏感的起爆药会增加激光雷管的感度,从而在一定程度上削弱了激光雷管的优势。第二,采用全猛炸药的爆燃转爆轰结构,尽管工艺比较复杂,但它维持了激光雷管钝感的特点,有益于生产和使用。实现爆燃转爆轰首先要保证激光点燃点火药后,形成高温高压气体,并同时保证点火后的器件不泄漏,具有结构完整性。所以,激光雷管通常采用窗口式结构。

窗口式结构激光雷管通常由窗口、点火药(高密度 HMX)、约束片、转化药(低密度 HMX)等四部分组成(见图 8.12)。雷管的作用过程分为点火和爆燃转爆轰两个阶段。点火药的前端由密封窗口约束,后端用约束片约束。吸收激光能量后的点火药将在约束环境中燃烧,生成高温高压气体,直至约束片破裂。破裂的约束片将对转化药快速压缩,形成冲击波并实现爆燃转爆轰。

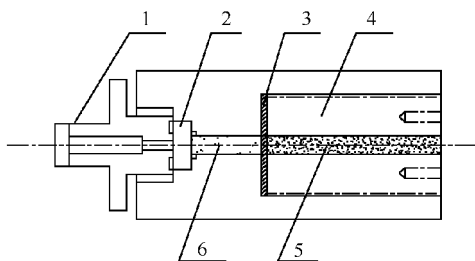


图 8.12 激光雷管示意图

1—光纤接头；2—蓝宝石窗口；3—约束片；4—转化药套筒；

5—转化药柱；6—掺碳黑的点火药柱。

1) 窗口材料选择及窗口密封工艺

激光雷管中密封封接窗口的目的是保证高强度约束,但是,随着窗口厚度的增加,窗口强度将增加,而光通过窗口时产生的发散也越大,这将会使含能材料作用面的光点尺寸增大,从而降低了激

光的能量密度。光分散的幅度取决于窗口厚度和窗口材料的折射率。另外,窗口材料热导率也直接影响着起爆阈值的大小,而它的热膨胀系数对其密封工艺有显著影响。窗口材料的选择主要基于窗口材料的折射指数、雷管所需密封强度、窗口材料热导率、窗口与壳体之间的热膨胀关系等 4 个参数。

激光雷管使用的窗口材料通常有蓝宝石和 P 玻璃两种。由于蓝宝石具有高强度和优越的透光性,所以早期的窗口都使用蓝宝石,但蓝宝石极高的热导率将使激光雷管的热损失增大,并导致起爆阈值相对较高,另外,使用蓝宝石做窗口材料时,封接工艺相对较复杂,主要原因是不锈钢壳体的热膨胀系数远大于蓝宝石窗口,封接完成后,经常能观察到由于残余热应力所产生的裂缝。目前,使用较多的是另一类具有低熔点、高热膨胀系数的 P 玻璃窗口。P 玻璃热导率比蓝宝石小 80 倍,折射率也小于蓝宝石,可大大降低激光通过后的发散程度及含能材料的热损失。而 P 玻璃的强度也能满足激光元件窗口的要求,密封相对容易,对其表面做简单的抛光处理就能具有良好的透光性。

2) 爆燃转爆轰阶段装药研究^[33]

密封型激光雷管的爆燃转爆轰过程主要由点火段和转化段两步完成。该雷管全部使用 HMX 猛炸药,其中使用比表面积为 $7460\text{cm}^2/\text{g}$ HMX 掺入 3% 质量比碳黑的混合物,作为点火段装药。对吸收和传递激光而言,点火药的空隙度不宜太大,一般选用的密度为 $1.55\text{g}/\text{cm}^3$ 。另外,雷管中重要的一个元件是位于点火段和转化段之间的约束片。约束片有两种作用,首先是对点火药约束,使之完全燃烧成高温高压气体。其次,它起加速片作用,一旦被点火段的高温高压气体切断,该约束片将快速进入转化段药中,其压缩作用将形成冲击波,并使爆轰成长区缩小。因此,约束片材料必须具有高强度、轻质量的性能。由于 0.25mm 厚的钛合金可以对点火段提供足够的约束,同时质量较小,有益于形成高速飞片,比较适合于爆燃转爆轰的转换。所以,约束片应采用 Ti-6Al-4V 钛合金。转化段的作用是形成冲击波后快速完成冲击波向爆

轰波的过渡转换。根据爆轰理论,当药剂具有较大空隙度时,有利于热点形成,因此,转化段必须选择低密度装药。例如,使用密度为 $1.16\text{g}/\text{cm}^3$ 的 HMX 粗粒药剂(平均粒径为 $150\mu\text{m}\sim 200\mu\text{m}$)。

3)降低雷管作用时间研究^[34]

用激光二极管完成 HMX 的点火和起爆的作用时间一般都在毫秒量级。实际应用时,作用的迅速性是可靠完成所需功能的基本要求,同时这也是替代桥丝电爆装置的一个重要条件。为此,进一步将激光雷管作用时间降低到 $50\mu\text{s}$ 以下至关重要。

激光能量密度的大小决定着作用时间的高低,因此,提高能量密度是降低作用时间的关键。由于固态激光器的输出远大于激光二极管的输出能量,因此它可作为引爆激光雷管的光源。目前可供选择的激光器有钕—玻璃激光器、钕—YAG 激光器和钛—蓝宝石激光器。由于要求作用时间小于 $50\mu\text{s}$,激光器在这一时间内的初始输出才是有效的能量,因此,首先要了解几种激光器初始阶段传输能量(见表 8.11)。从表 8.11 中可知,由于钕—玻璃激光器早期能量沉积少,不能满足要求。这样降低雷管作用时间时只能使用钛—蓝宝石和钕—YAG 激光器。

表 8.11 几种激光器初始阶段输出能量

激 光 器	不同时段传输能量/mJ			
	E($5\mu\text{s}$)	E($10\mu\text{s}$)	E($20\mu\text{s}$)	E($40\mu\text{s}$)
钕—玻璃	6.9	10.5	34.2	110.0
钕—YAG	15.1	29.7	56.9	95.4
钛—蓝宝石	54.8	81.2	95.0	95.0

影响雷管作用时间的第二个参数是点火药的长度。直接光起爆雷管所用光纤基本上都是 $400\mu\text{m}$ 光纤。假设约束片的剪切强度为 $2100\text{kg}/\text{cm}^2$,则点火段的作用时间就是激光输入到点火段压力达到约束片破裂强度的时间。整个点火段作用时间分为输入时间和压力上升时间两部分。输入时间是指激光入射到点火药开始

作用时间,这里泛指达到 $21\text{kg}/\text{cm}^2$ 压力水平的时间;而压力上升时间则是指点火药点火燃烧直到剪切约束片的时间。两类激光器对不同长度的点火药的作用时间和输入时间测量见表 8.12 所列。

表 8.12 不同点火药长度的作用时间和输入时间

激 光 器	钕—YAG			钛—蓝宝石		
点火药长度/mm	2.6mm	5.2mm	8.0mm	2.6mm	5.2mm	8.0mm
输入时间/ μs	3.8~4.0	7.8~8.0	8.0~10.8	3.2~4.6	5.8~7.2	7.0~9.0
作用时间/ μs	16~20	28~35	62~68	12~27	25~37	56~67

从表 8.12 中可知,点火药的作用时间和输入时间随其长度的增大而增大。但这些测量值的散布范围较大,其原因是 HMX/石墨混合药柱的非均匀性而导致了光的吸收不同。尽管如此,点火药长度减小能降低作用时间的趋势是明显的,但当点火药量较小即无法使约束片得到持续的高速度时,则反而会使爆燃转爆轰成长区间增大。

不同厚度的钛合金约束片对作用时间的影响见表 8.13 所列。其中点火药使用了长为 8.0mm 的药柱,虽然作用时间较长,但较大质量的点火药能有效地剪切约束片,并将其推进到转换药中。显然,约束片厚度较大时,作用时间较长,其原因是厚约束片将在较高压力下破裂,因此,点火段的作用时间也较长。另外,试验证明,剪切后的破裂圆片是完整的。这说明爆燃向爆轰转变是由加速进入转换药内的完整破片形成的。

表 8.13 约束片厚度不同时的作用时间

激 光 器	钕—YAG			钛—蓝宝石	
约束片厚度/mm	0.38	0.50	0.66	0.38	0.66
作用时间/ μs	45.6	52.0	110.4	45.2	65.4

总之,利用钛—蓝宝石激光器和钕—YAG 激光器都能使激光

雷管的作用时间降低到 $50\mu\text{s}$ 以下。研究表明,通过降低点火药柱长度和约束片厚度还能使使用时间更小些,对药剂和密封严格控制也能降低作用时间及其散布值。

2. 激光飞片雷管原理及设计^[24]

激光飞片雷管如图 8.13 所示。它与 EBW 式结构类似,但是炸药与金属膜之间使用空气隙隔离。当强度为 $10\text{GW}/\text{cm}^2$ 级的激光束辐照在玻璃窗口后表面的金属膜时,激光能量将烧蚀金属膜前表面部分并产生等离子体驱动金属膜的其余部分形成一定速度的飞片。高强度激光束与金属膜作用的趋肤深度依赖于激光波长和目标材料。当用 $1.06\mu\text{m}$ 波长辐射金属铝膜时,趋肤深度约为 $5\mu\text{m}$ 。而使金属膜离子化,且将小飞片加速到一定动能所需的激光能量约为 10mJ 。因此,当使用远小于 1mm 的光点尺寸和小于 10ns 脉宽进行 GW/cm^2 级激光束辐射时,金属膜会迅速形成一个强度极强的高温等离子体。这种烧蚀的等离子体绝热膨胀并对剩余的目标材料提供了类似火箭一样的推动力。随着激光脉冲接近峰值,飞片速度将逐渐增大。

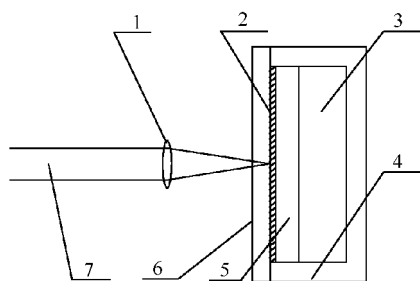


图 8.13 激光飞片雷管示意图

1—聚焦透镜；2—金属膜；3—炸药；4—容腔；5—空气隙；
6—窗口；7—激光束。

1) 激光驱动飞片速度影响因素

影响激光飞片雷管飞片速度的主要因素是激光窗口上产生飞片的金属膜厚度及其约束程度。实验表明,当飞片厚度小于

66 μm ,直径小于 1mm 时,在辐射能量大于 10J/cm² 时,飞片速度与飞片厚度的平方根成反比。而对产生飞片的金属膜的辐射表面实施强约束将会使所产生的压力从 1GPa 上升到 10GPa,并能增大压力脉冲的持续时间,这能使飞片推进到较高的速度。例如,使用钕玻璃激光器(波长 1.06 μm 、脉宽 16ns、辐射强度为 11GW/cm²)照射厚 66 μm 铝膜时,飞片速度可达到 2.5mm/ μs ,这样的飞片足以使密度 1.6g/cm³ 的细粒 HNS 起爆。但如果在激光石英窗口上物理汽相沉积 10 μm 金属膜,形成强约束装填,则飞片速度可高达 5mm/ μs ,且仍具有高度的平整性。

2) 复合薄膜设计

在实际设计中,通常采用复合薄膜代替单一铝膜以控制真实的飞片厚度和提高飞片速度。这种复合薄膜是在金属沉积层之间再沉积一介质层(小于 0.25 μm),构成一层铝膜、一层 Al₂O₃ 膜和一层铝膜的复合结构。当激光照射时,激光烧蚀将会在介质层上停止,从而准确地控制飞片厚度。这一 Al₂O₃ 介质层虽不能阻止金属膜材料的熔化和等离子体穿透,但能极大地延迟热扩散效应,从而提高飞片加速所需的能量。实验证明,这种复合薄膜可使激光能量转化效率达 50%(飞片动能/激光能量)。在中、低入射能量下,复合薄膜能一致地使高能炸药起爆。

3) 激光飞片雷管应用前景

在直列式传爆序列规定的许用炸药中,A-5、PBXN-5、PBX-9407 等药剂的冲击波感度与撞击感度呈同一趋势,但 HNS 药剂却是个例外,即撞击感度低时,其冲击波感度却较高,因此,它是激光飞片雷管最适合的药剂。在激光起爆炸药的三种方式中,只有激光驱动飞片方式能迅速起爆 HNS,所以,它是惟一满足现代引信快速响应及钝感化要求的技术。但目前的激光器的尺寸、成本和能量等诸方面性能均不能适用绝大多数武器系统,未来的激光器发展将会确保激光起爆技术成为一个实用的技术。将来具体选用激光飞片雷管还是冲击片雷管,这依赖于特定的引信要求。

8.4 爆炸网络设计技术

8.4.1 爆炸网络概述^[35]

爆炸网络是一种由爆炸元件构成、通过爆轰信号传递起爆指令的火工系统。爆炸元件是指能够传递和调制爆轰信号的装药体或装药结构,不仅包括雷管、导爆索等常规火工品,还包括线装药、歧路及具有布尔运算功能的装药结构。依载体不同,爆炸网络通常分刚性爆炸网络和柔性爆炸网络等两类,前者是指在刚性基板上刻制的沟槽式爆炸网络,而后者则是利用柔性导爆索制成的爆炸网络。依据功能不同,爆炸网络又可分为爆炸逻辑网络、同步起爆网络和异步起爆网络,其中爆炸逻辑网络和刚性同步爆炸网络应用比较广泛。刚性同步爆炸网络是指在刚性基板上刻制的沟槽式爆炸网络,按输出点的几何分布状况可分为面网络和线网络。

爆炸网络位于引信引爆控制系统与爆炸做功系统之间,其输入端与引爆信号发生器相连,输出端与起爆器相连。引爆信号发生器(如电雷管)是一种能量转换装置,是将电信号或机械信号变成爆轰波信号并输入给爆炸网络。起爆器是一种爆轰信号放大装置,它接收爆炸网络传递的爆轰信号,并将其放大以起爆爆炸做功系统(如战斗部装药)。

爆炸网络起爆技术是20世纪60年代为满足核武器和空间武器发展而最先研究的技术,于20世纪70年代趋于成熟,并已用于多种常规空空导弹。推动爆炸网络起爆技术向常规武器应用的主要原因有:第一,提高常规武器战斗部威力。采用面同步起爆网络只需很小的空间便可精确地控制起爆波形,从而显著提高常规战斗部的威力。定向战斗部从起爆方位的选择到主装药的定向同步起爆以及两次起爆的延期均由爆炸网络实现。第二,采用爆炸网络点火系统则可以消除因导线接收干扰而失效或误动的隐患^[36]。此外,爆炸网络还可能使导弹发动机的点火、动力源做功系统及战

斗部起爆的安全控制实现一体化,避免不符合直列式要求的电点火器的使用。

8.4.2 爆炸逻辑网络设计技术基础

1. 爆炸逻辑网络特点与类型

爆炸逻辑网络是由零门和其他爆炸线路组成的具有逻辑判断和运算功能的爆炸网络,它采用类似电路的方法实现了爆炸的逻辑功能,其特点有:第一,自选择性,用内部逻辑的判断实现输出方式的选择。第二,少输入可产生多选择输出,可以减少保险机构的数量。第三,抗干扰性,炸药通道不受外界电磁环境的影响。

爆炸逻辑网络主要有“单输出”爆炸逻辑网络和“多选一输出”爆炸逻辑网络等两类。前者由基于多个输入端的爆炸“与门”构成,当所有输入端口按规定的顺序和窗口输入起爆信号时,输出端口就会有爆轰波输出。最常见的是“二入一出”和“三入一出”爆炸逻辑网络。其主要功能是程序安全控制,可用于引信安全控制系统、S&A 装置、火箭发动机安全点火系统等。而后者则由多种复杂的爆炸逻辑元件构成,通过对少量输入端口输入模式的控制,实现在多个输出端中选择一个端口输出。如“四入八出”爆炸逻辑网络就是通过对 4 个输入端的输入模式的控制而实现在 8 个输出端中选择对应的端口输出,从而实现对起爆方位的选择,完成定向战斗部的定向起爆。

2. 微通道爆轰波传播原理^[37]

1) 拐角效应

当爆轰波从小尺寸装药向大尺寸装药传播时,由于离散而使爆轰波在部分区域内产生偏离正常爆轰的状态,在拐角处发生绕射,产生一个不稳定的爆轰区,这一区域内有不爆区和弱爆区,如图 8.14 所示,这种现象称为拐角效应。由此可知,在一定装药尺寸下,来自大直径装药的爆轰波可以通过直角引爆小直径装药,而来自小直径装药的爆轰波则不能通过直角引爆大直径装药。以图 8.15 所示为例,当 EC 装药直径小于等于 AE 时,来自 AE 的爆轰

波可以通过直角引爆 EC 装药,但来自 CE 的爆轰波则不能引爆 EA 装药。

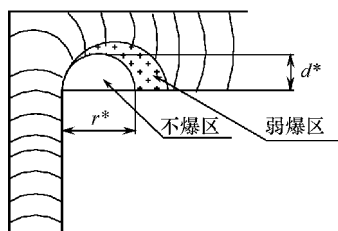


图 8.14 拐角效应原理

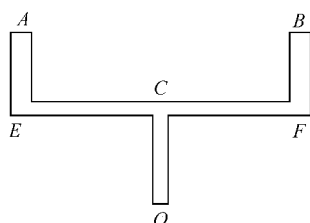


图 8.15 拐角效应和聚波效应示意图

2) 聚波效应

以图 8.15 所示为例,在 EC 或 FC 装药直径小于 OC 时,只有从 A 和 B 两点来的爆轰波分别经拐角同时到达 C 点时,才会在 C 点发生会聚,压力陡增,引爆 OC 装药。而从 B 或 A 点单独来的爆轰波均不能引爆 OC 装药。同步与门就是以此为原理设计的。

3. 爆炸零门结构设计

爆炸零门是指能够切断或破坏爆轰通道装药,从而关闭爆轰传爆通道的爆炸逻辑网络元件。它是最简单和最基本的爆炸逻辑网络元件,是构成爆炸逻辑网络的基础元素。复杂的逻辑网络往往是由两个或多个爆炸逻辑零门组成的。爆炸零门通常为 T 字型结构,通常有拐角效应零门、接触零门和间隙零门等三种类型^[38]。

1) 拐角效应零门

拐角效应零门的原理是小尺寸装药爆轰波传播的拐角效应,它由两个装药尺寸相同且相互垂直的通道构成(图 8.16),其中 AO 和 BC 两通道的爆轰波需稳定传播, AO 通道的爆轰波不能绕过拐角传播到 B 或 C 端,反之亦然。

2) 接触零门

接触零门的原理与拐角效应零门相同,其结构如图 8.17 所

示。接触零门是在交叉处设置一段比正常尺寸小的通道 DO 。该尺寸小于爆轰波稳定传播的临界尺寸,首先保证了 BC 通道的爆轰波不能绕过拐角传播到 A 端,同样 A 端的爆轰波也不会传播到 C 端。而当 A 端的爆轰波传播到 D 处时,则变成冲击波在 DO 中传播,并能破坏 BC 通道的装药结构。

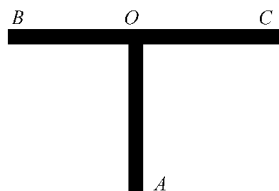


图 8.16 拐角效应零门示意图

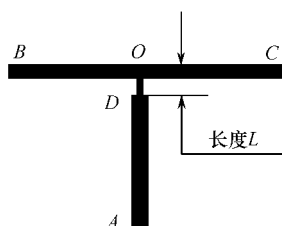


图 8.17 接触零门结构示意图

3) 间隙零门

间隙零门是使用较早的零门之一,其作用原理是小尺寸装药爆轰波传播的间隙效应。其结构如图 8.18 所示。它是在交叉处设置一段非爆炸性材料的间隙,而当 A 端的爆轰波传播到 D 处时,在间隙 DO 中产生冲击波,并破坏 BC 通道的装药结构。 DO 的长度 L 便成为控制能否破坏 BC 装药的特征参数。为提高作用可靠性,通常在 O 交叉节点前打一 $4\text{mm} \times 2\text{mm}$ 的长方形槽,槽与网络构槽间有一 0.1mm 宽的距离,因 O 处有泄爆方槽,在 AD 方向冲击波的作用下,使 BC 处的装药更容易切断,且断开的距离比较宽。

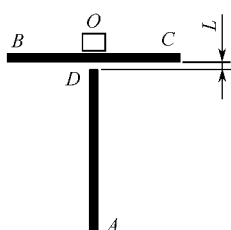


图 8.18 改进间隙零门的结构示意图

4. 其他爆炸逻辑元件的结构类型^[38]

用爆炸零门可以实现逻辑网络中最基本的开关设计,而开关零门的叠加和不同组合可以构成其他逻辑元件,如二极管、爆炸整流器等。破坏性十字通路、爆炸同步与门是另一类基本元件,与爆炸零门一起可以构成含有逻辑与的其他元件,如与/非门等。爆炸逻辑元件的结构类型、代表符号、逻辑方程及真值表见表 8.14 所列。

表 8.14 基本爆炸逻辑元件明细表

名称	结 构 原 理	代 表 符 号	逻辑方程	真 值 表																								
爆炸 零门			$B \leftrightarrow C$	<table> <tr> <th colspan="2">输入</th> <th>输出</th> </tr> <tr> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> </table>	输入		输出	A	B	C	1	1	0	1	0	0	0	1	1									
输入		输出																										
A	B	C																										
1	1	0																										
1	0	0																										
0	1	1																										
破坏性 十字 通道			$A \leftrightarrow B$ $C \leftrightarrow D$	<table> <tr> <th colspan="2">输入</th> <th colspan="2">输出</th> </tr> <tr> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> <th>D</th> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> </table>	输入		输出		A	B	C	D	1	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1
输入		输出																										
A	B	C	D																									
1	1	0	0																									
1	0	1	0																									
0	1	0	1																									
0	0	1	1																									
爆炸 或门			$A + B = 0$	<table> <tr> <th colspan="2">输入</th> <th>输出</th> </tr> <tr> <th>A</th> <th>B</th> <th>O</th> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> </table>	输入		输出	A	B	O	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0						
输入		输出																										
A	B	O																										
1	1	1																										
1	0	1																										
0	1	1																										
0	0	0																										
同步 与门			$A \cdot B = 0$	<table> <tr> <th colspan="2">输入</th> <th>输出</th> </tr> <tr> <th>A</th> <th>B</th> <th>O</th> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> </table>	输入		输出	A	B	O	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0						
输入		输出																										
A	B	O																										
1	1	1																										
1	0	0																										
0	1	0																										
0	0	0																										

(续)

名称	结构原理	代表符号	逻辑方程	真值表														
爆炸二极管		 	$D \rightarrow A$	<table> <tr> <th>输入</th> <th>输出</th> </tr> <tr> <td>$\frac{A}{1}$</td> <td>$\frac{D}{0}$</td> </tr> <tr> <td>$\frac{D}{1}$</td> <td>$\frac{A}{1}$</td> </tr> </table>	输入	输出	$\frac{A}{1}$	$\frac{D}{0}$	$\frac{D}{1}$	$\frac{A}{1}$								
输入	输出																	
$\frac{A}{1}$	$\frac{D}{0}$																	
$\frac{D}{1}$	$\frac{A}{1}$																	
爆炸整流器(异步与门)			$A \cdot E = D$	<table> <tr> <th>输入</th> <th>输出</th> </tr> <tr> <td>$\frac{A}{1}$</td> <td>$\frac{D}{1}$</td> </tr> <tr> <td>$\frac{E}{1}$</td> <td>$\frac{D}{1}$</td> </tr> <tr> <td>$\frac{A}{0}$</td> <td>$\frac{D}{0}$</td> </tr> <tr> <td>$\frac{E}{0}$</td> <td>$\frac{D}{0}$</td> </tr> <tr> <td>$\frac{D}{1}$</td> <td>$\frac{A}{1}$</td> </tr> <tr> <td>$\frac{D}{0}$</td> <td>$\frac{E}{0}$</td> </tr> </table>	输入	输出	$\frac{A}{1}$	$\frac{D}{1}$	$\frac{E}{1}$	$\frac{D}{1}$	$\frac{A}{0}$	$\frac{D}{0}$	$\frac{E}{0}$	$\frac{D}{0}$	$\frac{D}{1}$	$\frac{A}{1}$	$\frac{D}{0}$	$\frac{E}{0}$
输入	输出																	
$\frac{A}{1}$	$\frac{D}{1}$																	
$\frac{E}{1}$	$\frac{D}{1}$																	
$\frac{A}{0}$	$\frac{D}{0}$																	
$\frac{E}{0}$	$\frac{D}{0}$																	
$\frac{D}{1}$	$\frac{A}{1}$																	
$\frac{D}{0}$	$\frac{E}{0}$																	

8.4.3 爆炸逻辑网络组网及模块化设计^[38]

单输出爆炸逻辑网络结构原理比较简单,爆炸整流器就是一个“二入一出”爆炸逻辑网络,通过爆炸零门对其输入端的控制,就可以设计成“n入一出”爆炸逻辑网络。

1. 桥式零门型爆炸逻辑网络设计

桥式零门是由“T”字型装药的普通爆炸零门改进而成,从而由单一方向的切断关闭功能变成两个方向的相互切断关闭功能,其装药通道为十字交叉型。图 8.19 所示是一个“二入三出”爆炸逻辑网络逻辑结构图,它是由一个爆炸整流器和两个桥式零门构成的与/非与元件。 $A_o B_o$ 端的输出是靠 A_i 、 B_i 同时输入实现。“二入三出”爆炸逻辑网络的逻辑关系表见表 8.15 所列。

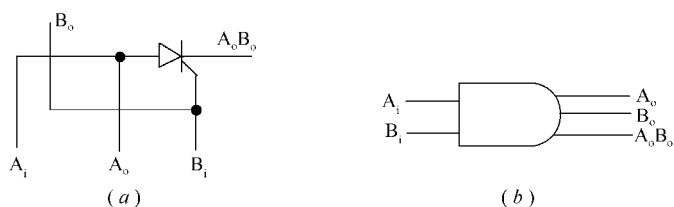


图 8.19 “二入三出”爆炸逻辑网络逻辑结构示意图

(a) 逻辑线路图; (b) 代表符号。

表 8.15 “二入三出”爆炸逻辑网络逻辑关系及真值表

逻辑方程	真 值 表				
	输入		输出		
	A_i	B_i	A_o	B_o	$A_o B_o$
$A_i (B_i = 0) = A_o$	1	0	1	0	0
$B_i (A_i = 0) = B_o$	0	1	0	1	0
$B_i \cdot A_i = A_o B_o$	0	0	0	0	0
	1	1(先)	0	0	1

“二入三出”爆炸逻辑网络要求 B_i 端爆轰波到达与门的时间早于 A_i 端, 提前量只有下限要求, 无上限要求, 因此也称无窗口输入爆炸逻辑网络, 对起爆器瞬发度的要求不高。以“二入三出”爆炸逻辑网络为基本模块可以设计“多选择一输出”爆炸逻辑网络, 如可以用 4 个“二入三出”爆炸逻辑网络为模块构成的“三输入七输出”爆炸逻辑网络。

在由“二入三出”爆炸逻辑网络叠加构成的复杂网络中, 由总输入数 n 构成了一个集合, 从中任取同时输入数 r 进行组合, 由于同时输入端数与排列顺序无关, 可归纳为无重集的组合问题, 最多可产生的输出端数 N 可由基本的数学组合公式加和后计算得到。

由 n 个元素构成的集合, 从中任取 r 个进行组合, 构成的组合数为

$$C(n, r) = \frac{n!}{r!(n-r)!} \quad (8.4.1)$$

$$N = \sum_{n=1}^{n=r} \frac{n!}{r!(n-r)!} \quad (8.4.2)$$

式中 n ——总输入数;

r ——总输入数中可同时输入的最多数量;

N ——网络最后的总输出数。

可见,复杂爆炸逻辑网络在构成上可以采用模块化设计方法。这种设计方法只需要单路输入或同时输入即可产生大量输出,消除了时间延迟的需要,增加了可靠性,降低了爆炸通道基板和网络设计的复杂性。

2. “通道转换器”型爆炸逻辑网络设计^[38]

“通道转换器”由两个爆炸零门及爆炸传输线路组成,其基本结构如图 8.20 所示, A 、 B 为爆轰波输入端, N_1 、 N_2 为爆炸零门, O_1 、 O_2 为爆轰波输出端。当只有 A 端输入时,没有爆轰波输出,当只有 B 端输入时,只有 O_1 端爆轰波输出,当 A 、 B 按一定的时序要求输入时,只有 O_2 端爆轰波输出。由通道转换器可以构成最基本的“二入四出”爆炸逻辑网络(见图 8.21)。表 8.16 所列为二输入四选择输出网络爆炸逻辑关系表。

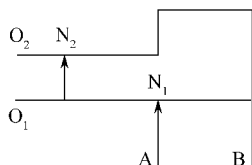


图 8.20 通道转换器结构示意图

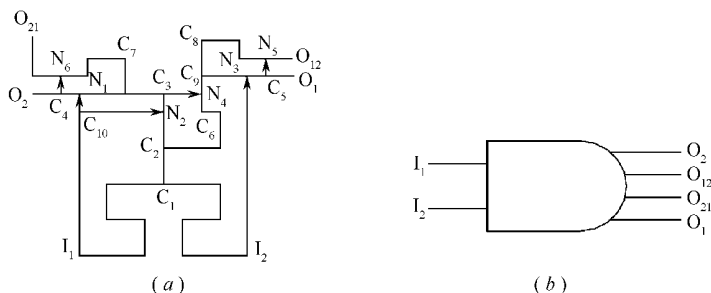


图 8.21 “二入四出”爆炸逻辑网络关系示意图

(a) 爆炸逻辑网络线路图；(b) 代表符号。

表 8.16 “二入四出”爆炸逻辑网络爆炸逻辑关系表

输 入		输 出			
I_1	I_2	O_1	O_2	O_{12}	O_{21}
1	0	1	0	0	0
0	1	0	1	0	0
1	1(滞后 I_1 在时间窗口内起爆)	0	0	1	0
1	1(提前 I_1 在时间窗口内起爆)	0	0	0	1
其他		0	0	0	0

以“二入四出”爆炸逻辑网络为基本模块可以进行复杂的爆炸逻辑网络设计,例如利用 2 个“二入四出”爆炸逻辑网络构成“三入七出”爆炸逻辑网络;利用 3 个“二入四出”爆炸逻辑网络构成“三入九出”爆炸逻辑网络等。

爆炸逻辑网络设计首先要充分研究网络构成的基本要素;其次,应选择一最基本的、可靠性高的爆炸逻辑网络模块为基本元件进行组网。从图 8.19 和图 8.21 所示可以看出,两种设计原理各有所长。“二入三出”爆炸逻辑网络线路比较简单,网络较小,可以用来设计很复杂的网络,但桥式零门实现起来比较困难,高可靠性不易实现。“二入四出”爆炸逻辑网络虽然线路比较复杂,但有可能实现较高的可靠性,其缺点是网络较大,不易于设计比较复杂的网络。

8.4.4 面中心同步起爆网络设计^[39]

在进行沟槽型爆炸网络设计时,所用炸药的临界尺寸是确定沟槽装药尺寸的重要依据。为提高爆炸网络的作用可靠性,应采用裕度设计法进行设计,一般按 1.2 倍~1.5 倍的临界尺寸设计爆炸网络的沟槽通道尺寸。如对 RDX/聚丁橡胶=93/7 的橡皮炸药,其爆轰波侧向三通传播的临界尺寸为 0.95mm^2 ,在进行爆炸网络设计时,其沟槽通道尺寸就应设计为 $1.24\text{mm}^2 \sim 1.43\text{mm}^2$,以提高网络传爆可靠性。因此,如果沟槽深度设计为 1 mm,则沟槽宽度就可设计为 $1.24\text{mm} \sim 1.43\text{mm}$ 。

面中心同步起爆网络是输出点均匀分布在平面上而输入点位于输出点阵的几何中心。其主要作用是对主装药端面实施平面多点起爆,输出平面爆轰波,提高装药的利用率。目前,面中心同步起爆网络多用对称性设计法。由于战斗部主装药截面一般为圆形,所以该方法将面同步起爆网络的输出端设计为正方形点阵,由“工”字形网络通道相连至输入端,网络中所有拐角均为直角(见图 8.22)。在该结构中,任一输入端到输出端的拐角数量、装药通道长度都相同,同步输出时间精度更容易控制。

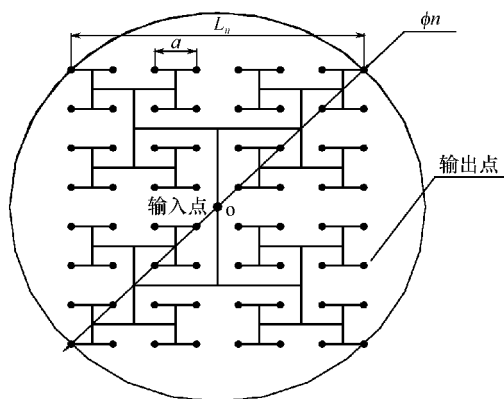


图 8.22 中心式面同步起爆网络结构示意图

1. 面中心同步起爆网络的特征参数

爆炸网络的级数 n (或输出点数 N)、相邻点间距 a 是面中心同步起爆网络的两个特征参数,也是两个相互独立的设计参数。若构成正方形点阵,输出点数应为 4 的幂次。设输出端数为 N , n 为大于 1 的正整数,则有

$$N = 4^n \quad (8.4.3)$$

式中 n ——同步起爆网络的级数。

当 $n = 1$ 时, $N = 4$, 为“一入四出”的一级中心式面同步起爆网络;当 $n = 2$ 时, $N = 16$, 为“一入十六出”的二级中心式面同步起爆网络;其余依次类推。在实际应用中,通常使用的是二级和三

级面同步起爆网络。

令 a 表示面同步起爆网络相邻输出点间距, 则正方形点阵的边长为

$$L_n = (2^n - 1)a \quad (8.4.4)$$

由图 8.22 所示的结构可知, L_n 也是每个输出点与中心起爆端的距离。设外接圆直径是面同步起爆网络能够起爆的最小装药直径, 则正方形点阵的外接圆直径 ϕ_n 为

$$\phi_n = \sqrt{2}(2^n - 1)a \quad (8.4.5)$$

2. 面中心同步起爆网络设计

给定了外接圆的尺寸, 就可由爆炸网络装药的特征参数确定相邻点间距 a , 进而设计相应的面同步起爆网络。

1) 级数 n 的确定

根据给定的被起爆装药截面直径 ϕ 值和相邻输出点的最小间距 a_{\min} 值, 由式 (8.4.5) 确定一个最大可能的 n_{\max} , 即

$$n_{\max} = \ln\left(\frac{\phi}{\sqrt{2}a_{\min}} + 1\right) / \ln 2 \quad (8.4.6)$$

一般情况下 n_{\max} 不是正整数, 因此取小于并接近 n_{\max} 的整数作为 n 值, 即

$$n = [n_{\max}] \quad (8.4.7)$$

式中 n ——所设计的同步起爆网络的级数。

2) 参数 a 的确定

根据 ϕ 值和 n 值由式 (8.4.5) 可得到 a 值, 即

$$a = \frac{\phi}{\sqrt{2}(2^n - 1)} \quad (8.4.8)$$

按上式设计的网络, 必有 4 点在外接圆上。由于位于被起爆装药的边界, 故这 4 点没有实际意义, 因此, 在面同步起爆网络设计中要将其删除, 网络的实际输出点数应为

$$N' = 4^n - 4$$

结合战斗部提出的具体要求和装药特性, 可以按上述结果设计起爆网络。

8.4.5 中心式直线同步起爆网络设计^[40]

中心式直线同步起爆网络的输出点分布在直线上,而输入点位于输出点阵中心。中心式直线同步起爆网络是由“一入二出”起爆单元逐级对称叠加组合而成,其结构如图 8.23 所示。其中 a 表示相邻两输出点间距; b 表示网络布线宽度; L_n 表示起爆点分布长度; W_n 表示网络的宽度; W 表示直线起爆器的宽度; L 表示直线起爆器的长度,也是被起爆装药的长度。

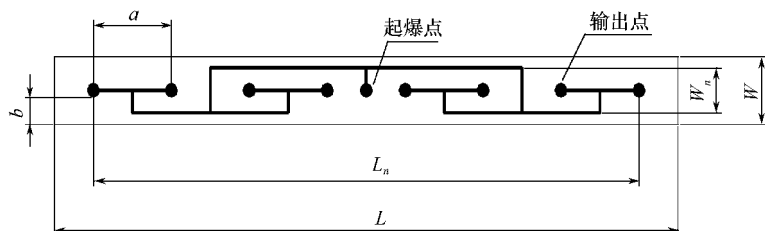


图 8.23 中心式直线同步起爆网络结构示意图

1. 中心式直线同步起爆网络的特征参数

起爆点数 N 、起爆点分布长度 L_n 和起爆器宽度 W 是直线同步起爆网络的 3 个特征参数。这 3 个特征参数由网络级数 n 、相邻两输出点间距 a 、网络布线宽度 b 3 个变量决定,因此, n 、 a 、 b 为直线同步起爆网络的设计参数。从图 8.23 可知,若构成线性多点起爆,则输出点数应为 2 的幂次。设输出端数为 N , n 为大于 1 的正整数,则有

$$N = 2^n \quad (8.4.9)$$

式中 n ——同步起爆网络的级数。

当 $n = 1$ 时, $N = 2$, 为“一入二出”一级直线同步起爆网络,两点同时起爆;当 $n = 2$ 时, $N = 4$, 为“一入四出”二级直线同步起爆网络,4 点同时起爆;其余依此类推。

从图 8.23 可知,直线同步起爆网络的起爆点分布长度 L_n 为

$$L_n = (2^n - 1)a \quad (8.4.10)$$

在工程设计中,为充分利用起爆器的允许宽度,网络的通道边缘与起爆器边界之间的间距通常控制在 $d/2$ 以内,因此起爆器的宽度 W 与网络设计参数之间的关系可用下式表示:

$$W = b(n-1) + nd + \phi_{\text{节点}} \quad (8.4.11)$$

式中 d ——装药通道的宽度,依装药的临界宽度 d_c 而定,在设计线同步起爆网络时该值为已知量。

2. 中心式直线同步起爆网络设计

中心式直线同步起爆网络设计是指在给定起爆器长度 L 、起爆器宽度 W 和输出节点尺寸的条件下,设计起爆网络的 b 、 n 及 a 值。其中, b 值由爆炸网络装药特性决定。

1) 参数 b 的确定

直线起爆器的宽度一般受到严格的尺寸限制,因此 b 值应尽量小。 b 值的选定依据是沟槽装药通道的最小允许间隔 δ_{\min} 。 b 的最小取值为

$$b_{\min} = \delta_{\min} \quad (8.4.12)$$

从网络小型化设计考虑,并兼顾爆轰波输出时间同步性,一般取 $b = b_{\min}$ 。

2) 级数 n 的确定

根据式(8.4.11)、式(8.4.12),由起爆器的宽度确定网络的最大级数 n_{\max} 值,表达式为

$$n_{\max} = \frac{W - \phi_{\text{节点}} + b_{\min}}{b_{\min} + d} \quad (8.4.13)$$

若 n_{\max} 不是正整数,则 n 值取小于并接近 n_{\max} 的整数,即

$$n = [n_{\max}] \quad (8.4.14)$$

3) 参数 a 的确定

按照线性对称起爆的原则,直线同步起爆器的长度与起爆点的分布长度的关系应为

$$L = L_n + a = 2^n a \quad (8.4.15)$$

将式(8.4.14)代入式(8.4.15),便得到 a 值,即

$$a = L/2^{[n_{\max}]} \quad (8.4.16)$$

设计网络时,可根据所选网络装药的特性及战斗部给定的信息等,通过以上的计算求得网络设计参数。在线同步起爆网络的设计和使用过程中,有时可能输入点并不在网络的中心,有时要求的输出点也可能不是偶数,这时网络的设计原理不变,但网络布线要复杂一些。如当线起爆网络要求从端点输入时,可以采取在网络上增加一条爆轰波输入通道,采取多层结构的方式,将爆轰波从端点引入中心输入点,或者在起爆网络的侧面增加一条装药通道,以输入爆轰波。

8.5 MEMS 火工技术介绍

8.5.1 MEMS 火工技术概念及应用^[41]

基于 MEMS(微机电系统)的火工技术是利用微机电系统的先进制造和集成思想,采用微机电系统制造技术,如掩膜、沉积和腐蚀的细微加工技术、微烟火技术和微型装药技术等,将机械系统、微电子系统和化学能源系统集成成为具有功能化的火工系统模块的技术。这一技术使得在具有厘米或毫米尺寸的火工系统芯片上能完成火工动力源、矢量推动、引信爆炸序列的安全与保险等功能。由于 MEMS 火工系统技术采用了先进的加工和集成技术,所以,制造的火工系统芯片具有高精度的特点,被称为是继敏感火工品和钝感火工品之后出现的第三代火工品(即火工集成)。目前国内外均将弹道修正弹药、微型弹药和微型卫星作为弹药和信息战的重要发展方向之一。这些智能化弹药都需要能修正弹道和姿态控制的微型火工品列阵和微型传爆序列技术。

8.5.2 MEMS 火工品在研产品介绍^[42]

MEMS 火工品实际上是以微型起爆序列和微型点火序列的形式用于武器系统,前者以含 MEMS 器件的微型传爆序列为典型代表,后者以基于 MEMS 工艺的微型火箭列阵为典型代表。

1. 微型火箭列阵

微型火箭技术是由美国国防先进技术预研局资助的微机电系统计划中的一项预研项目,其项目应用背景是微型卫星姿态修正、天线动力源及微型战场传感器(机器人)的推进。该项目从1997年开始,1998年完成了微型火箭(推冲器)列阵芯片的研制和实验,2000年2月成功地完成了微型卫星的飞行实验。项目的最终目标是演示含104个到106个微型推冲器的列阵的行为和功能。图8.24为微型火箭列阵芯片的结构图。

微型火箭列阵芯片具有3层结构,其中第1层为点火电极层,第2层为装药及药室层,第3层为喷孔层。装药采用斯蒂芬酸铅和HTPB复合推进剂。微型火箭列阵芯片是通过不同单元火箭(推冲器)的脉冲推力完成卫星的状态修正和天线等的伸展运动。

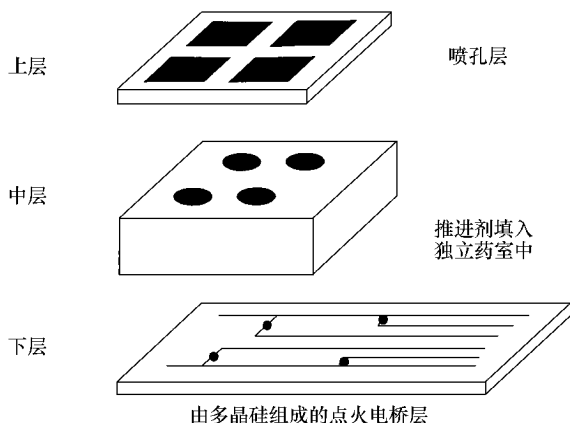


图 8.24 微型火箭列阵芯片结构图

2. 微型传爆序列

微型化传爆序列和微机电系统引信安全和保险装置项目是由美国国防先进技术预研局资助的微机电系统计划中的另一项预研项目,其目的是将微机电系统技术引入军事用途。最初目标是针对下一代鱼雷的引信安全保险装置,并且研究各类型的微机电系统传感器;最终目标是研究与微机电系统引信的安全保险装置(MEMS F/S&A)和微小尺寸弹头相匹配的通用型小型化传爆序

列。利用微机电系统技术已经发展了与 MEMS F/S&A 相容的第二代冲击片雷管,即在飞片加速腔内增加一个可动的机械隔断装置,实现对冲击片雷管的安全控制。与全电子安全系统相比,这种含机械保险件的安全系统结构简单,价格便宜,技术成熟,较为实用。这种起爆系统已在新一代深潜反鱼雷型鱼雷上成功地进行了演示验证。2002 年,美国已将 MEMS 微型起爆系统用于单兵作战系统的 20mm 榴弹。

3. 火工集成制造工艺

火工集成制造工艺采用的方法与制造集成电路和制造微机电装置的方法基本相同。制备火工芯片采用的工艺为:在玻璃、硅片或其它基片上重复进行光刻、掩膜、蚀刻、镀膜和微型注装等。例如,在制造图 8.24 所示的推动器列阵芯片时,首先是在硅片或其它基片上沉积具有 Ni—Cr 合金或在硅片上掺杂 P 形成具有点火作用的桥,并将点火桥悬空,以便点火桥可以埋入推进剂中;然后,采用约束电化学腐蚀或约束光化学腐蚀的细微加工方法,在石英玻璃片等基片上制造有一定深度和容腔的推进剂药室;最后,在硅或 SiC 基片上通过掩膜和离子腐蚀或化学腐蚀的方法制造具有密封结构的喷孔。装药采用真空或沉积方法向药室注装推进剂。考虑小尺寸下的燃烧稳定性,推进剂选择具有快速点火和燃烧能力的药剂,如斯蒂芬酸铅。

将 MEMS 技术应用于火工系统,会极大地降低目前火工装置和系统的尺寸及能源需求,从根本上改变原有的设计观念,赋予火工系统数字化的功能。

参 考 文 献

- 1 兵器工业科学技术词典编辑委员会. 火工品与烟火技术. 北京:国防工业出版社, 1998:14~99
- 2 祝逢春. 半导体桥点火数值模拟与试验研究. 南京:南京理工大学博士论文, 2004

- 3 Bickes R W. Semiconductor Bridge Igniter Studies I : Comparison of SCB and Hot Wires Pyrotechnic Actuators. 13th International pyrotechnics Seminar ,1988
- 4 Bicks R W. An Overview of SCB Applications at Sandia National Laboratoies. DE95011877,1995
- 5 Bicks R W. Smart Semiconductor Bridge Igniter for Explosives. 3rd Canadian Symposium on Mining Automation,1988
- 6 Benson D A. An Electro—Optic Explosive Igniter. DE88—004728,1988
- 7 Lucy M. Report on Alternatives Devices to Pyrotechnics on Spacecraft. N19960054342,1996
- 8 杨振英等. 冲击片雷管参数的设计. 火工品,1996(1):31~35
- 9 袁士伟等. 新型冲击片雷管设研究. 火工品,2002(2):5
- 10 Ron V. Electric Detonator; EBW and EFL. Propellants. Explosive, Pyrotechnics. V. 21,1996,(3).
- 11 曾庆轩等. 直列式起爆系统的安全性评价. 第 11 届火工年会, 2001: 436~440
- 12 党瑞荣. 直列式爆炸序列控制技术. 火工品,1999(4):1
- 13 曲秀杰. 电引爆安全技术中的惟一性原则. 火工品, 2002(1):1
- 14 Richardson D D. An Exploding Foil F lying Plate Generator. MRL, 1988.
- 15 杨振英等. 爆炸箔起爆器的设计及影响因素试验. 火工品,1999(4):18
- 16 曾庆轩等. 新型电爆炸箔系统电压对爆发电流影响的实验研究. 火工品,2002(1):41
- 17 王雨时等. 弹药爆炸序列中直列爆炸元件火炸药装药的感度问题. 现代引信,1997(3):54~61
- 18 许碧英. 直列式点火系统. 火工品,1994(2):40
- 19 杨振英. 冲击片点火技术探讨. 火工品,2000(1):5~9
- 20 杨振英. 冲击片点火管. 火工品,2000(3):17~21
- 21 吕巧莉. 直列式用 B/KNO₃ 点火药的制备及粒径对药剂性能的影响. 第 11 届火工年会,2001
- 22 项仕标. 激光二极管点火若干研究. 北京:北京理工大学博士论文,1999
- 23 王凯民. 激光点火系统的可靠性检测与安全性分析. 第 10 届引信年会,1997
- 24 Yong L d. Laser Ignition of Explosive Pyrotechnics and Propellants; a Review. AD—A 299465. 1995.
- 25 Stoltz B A. Laser Diode Apparatus for Initiation of Explosive Devices. USP5204490,1993
- 26 李继峰. 激光二极管点火系统驱动电源设计与计算. 北京:北京理工大学硕士学位论文, 2004
- 27 Ewick D W. Ignition Testing of Low—Energy Laser Diode Ignited Components.

MLM—MU—90—64—0003, 1990

- 28 Kramer D P. Development of Hermetic Sealing Processes for Use in the Fabrication of Laser—Ignited Energetic Components. AIAA 95—2983, 1995
- 29 张惠卿等. 药剂配比对半导体激光点火感度和延迟期的影响. 火工品, 2002(1): 22
- 30 张惠卿. 激光二极管点火技术. 北京: 北京理工大学硕士论文, 2002
- 31 崔卫东. 光纤对激光起爆系统的影响. 火工品, 2000(3): 13
- 32 王凯民. 激光点火系统的设计. 火工品, 1996(2): 31
- 33 Ewick D W. Feasibility of A Laser Ignited HMX Deflagration — to — Detonation Transition Device for the US Navy LITES program. DE91015210, 1991
- 34 Setchell R E. Prompt Laser Ignition and Transition in a Secondary Explosive. CONF—9404141
- 35 温玉全. 爆炸网络若干应用研究. 北京: 北京理工大学博士学位论文, 2000
- 36 郭美芳. 弹药发展的特点和趋势. 弹药信息, 1998(10): 20~28
- 37 贺树兴. 逻辑爆炸网路. 火工品, 1982(1): 45
- 38 吉利国. 爆炸逻辑网络技术及其应用研究. 北京: 北京理工大学博士学位论文, 1997
- 39 温玉全, 焦清介等. 刚性面同步起爆网络的设计及其起爆同步性分析. 兵工学报, 2001(1): 46.
- 40 温玉全, 焦清介等. 刚性线同步起爆网络的设计及其起爆同步性分析. 火工品, 2000(1): 1
- 41 沈瑞琪. 基于微机电系统的火工技术. 2002 年火工品药剂讨论会, 2002
- 42 沈瑞琪. 数字化火工技术的概念与应用. 火工品, 2002(2): 36

内 容 简 介

本书以武器弹药和航天工程为主要应用背景,阐述了火工品在武器系统中的地位与作用、分类及设计研制程序,在调研国内外火工品领域的文献资料的基础上,归纳提出了各类武器装备使用火工品的特点与主要技术战术指标,重点突出了在各类新式武器发展的需求牵引下发展的新型火工品的设计技术,例如高敏感针刺雷管、高精度延期雷管、组合火工品、低能电雷管、半导体桥火工品、钝感电火工品、电撞两用底火、传爆与点火序列、直列式起爆与点火技术、激光起爆与点火技术、爆炸逻辑网络、MEMS 火工技术、航天用点式和线形分离类火工装置、各类动力源火工品及非电起爆系统等新产品。

本书主要供从事军用火工品设计、生产和使用的工程技术人员参考使用,同时也可供火工品、引信、弹药、武器系统设计、航天工程等相关专业高校教师、研究生及本科生参考。

According to application requirement of the weapon system and aerospace, this book expatiated on action status of initiators & pyrotechnics in weapon systems. On basis of many technical papers and author's research fruit of years, it generalized features and main technical indexes of IP, wrote center design technology of a lot of initiators & pyrotechnics that developed by new weapons, such as high sensitivity stab detonator, time

delay stab detonator, flexible stab detonator, high sensitivity electric detonator, insensitivity electric initiator, explosive train and ignite train, exploding foil initiating system, laser igniting system, explosive logic network and micro—electromechanical initiating system and so on.

In addition to design technology, a large number of application examples are collected in this book. That is useful to weapon system engineers and initiators & pyrotechnics engineers. This book may serves as a reference book to the teachers and undergraduate students for pyrotechnics, gun, projectile, fuse and aerospace.