

# 航空发动机包容试验研究综述

陈国栋, 刘 闯, 王洪斌, 张昕东, 刘正峰

(中国航发沈阳发动机研究所 辽宁省航空发动机冲击力学重点实验室 沈阳 110015)

**摘要** :从试验目的、试验方法、研究内容 3 个方面对航空发动机研制过程中的机匣及机匣模拟件打靶试验、试验器旋转状态下的包容试验以及整机包容试验进行详细阐述,介绍了包容试验过程的复杂非线性瞬态动力学特征,总结了国内外研究进展情况与差距,依据包容试验的特征和测试目的综述了试验所需关键技术的研究进展,并对关键技术进行总结与分析,指出国内目前关键技术发展的不足之处,简要论述了中国航空发动机包容试验技术的发展重点。

**关键词** :包容试验;叶片飞断;响应测量;机匣;航空发动机

中图分类号:V232.5

文献标识码:A

doi:10.13477/j.cnki.aeroengine.2019.03.014

## Review of Aeroengine Containment Test Research

CHEN Guo-dong, LIU Chuang, WANG Hong-bin, ZHANG Xin-dong, LIU Zheng-feng

(AECC Shenyang Engine Research Institute, Key Laboratory of Aeroengine on Impact Dynamics, Liaoning Province, Shenyang 110015, China)

**Abstract**: During the development of aeroengine, the test purpose, test method and research content were described in detail for the target shooting test of casing and its simulant parts, the containment test under rotating state of the tester and the containment test of the whole engine. The complex nonlinear transient dynamics characteristics were introduced in containment test process. The research progress and gap at home and abroad were summarized. Research progress of key technologies for testing was summarized based on characteristics and purpose of containment test, and key technologies were summarized and analyzed. Inadequacies in the development of key technologies in China at present was pointed out. The development emphasis of containment test technology was briefly discussed for Chinese aeroengine.

**Key words**: containment test; blade breaking; response measurement; casing; aeroengine

## 0 引言

对于燃气涡轮发动机,旋转件失效时产生的高能碎片会使发动机本身、飞机、操作舵面、燃油箱以及飞行员处于危险之中<sup>[1]</sup>。一旦发动机出现非包容现象就会使飞机受损,轻则飞行功能损失,重则机毁人亡。文献[2]给出了依据美国波音公司和美国联邦航空局统计数据绘制的航空发动机非包容事故曲线,曲线数据显示,随着新材料、新工艺、新技术的推广与验证工作的开展,航空发动机非包容事故的发生率不断下降,但随着空中交通运输量逐年增大,每年发生的非包容事故的总次数仍在增加。

世界范围内的军、民用燃气涡轮发动机规范都无一例外的对包容性提出要求,内容基本相同,概括地说就是单个叶片在榫头以外截面断裂后应被包容,或者对整体叶盘必须至少单个叶片的 80% 破损并且被包容,由此引起的发动机损坏不能对飞机产生任何危险性影响<sup>[3-8]</sup>。

一般来说,发动机规范要求要在 1 台运转的发动机上验证风扇叶片的包容性,同时也提供结构极限强度的验证。然而这种试验的费用极高,所以,在进行这种试验前,要完成多项部件(或零件)级试验,以验证叶片、机匣及其他承力结构的强度设计。包容试验从简单到复杂分为机匣及机匣模拟件的打靶试验、单个叶

收稿日期:2018-11-12 基金项目:航空动力基础研究项目资助

作者简介:陈国栋(1980)男,硕士,高级工程师,从事航空发动机转子强度试验、鸟撞试验及包容试验工作,E-mail:feitian\_box@sina.com。

引用格式:陈国栋,刘闯,王洪斌,等.航空发动机包容试验研究综述[J].航空发动机,2019,45(3):82-90.CHEN Guodong, LIU Chuang, WANG Hongbin, et al. Review of aeroengine containment test research[J]. Aeroengine, 2019, 45(3): 82-90.

片飞出后的完整性验证试验(不安装机匣)、试验器条件下的风扇单元体包容试验、试验器条件下安装主要发动机结构的包容试验以及整机包容试验<sup>[9]</sup>。

本文对各类包容试验研究进展以及其关键技术进行综述,并提出国内包容试验技术的发展重点。

## 1 机匣及机匣模拟件的打靶试验

机匣及机匣模拟件的打靶试验一般在发动机机匣研制的早期进行,以降低整机包容试验的风险。打靶试验一般使用滑膛式火炮或气炮作为发射装置,试验中的发射物为球形、板条形等金属弹体以及真实叶片,打靶试验能够从材料动态响应以及高速冲击损伤等方面研究各种材料、机匣结构的抗冲击特性。

美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室(Lawrence Livermore National Laboratory)最早使用打靶试验方法研究机匣的包容性,并且发展了用于冲击力学的数值仿真软件 LS-DYNA<sup>[10]</sup>,RR 公司拥有 1 台气炮作为发射装置的打靶试验设备,发射物从直径为 25.4 mm 的轴承滚珠到质量为 5.5 kg 左右的立方 8 面体等,速度大约为声速,用来验证高速冲击对单层、多层和钎焊结构的影响,也广泛用于确定 Kevlar 织物的抗冲击特性<sup>[9]</sup>;2002~2009 年美国航空航天局(NASA)的 Roberts 等<sup>[11-12]</sup>分别用楔形钛合金弹体以及明胶与酚醛树脂微珠的混合物对玻璃纤维/树脂基复合材料以及 3 轴编制复合材料进行冲击试验,评估复合材料受到冲击时的动态响应特性与损伤模式;2003 年 NASA 格林研究中心的 Mohan 等<sup>[13]</sup>通过打靶试验比较 Al (2024-T3)与多层夹心混杂复合材料 Glare-5 在不同结构下的抗冲击特性,试验中使用气炮长 2 m、外径 2.54 cm、内径 1.28 cm,弹体材料为 Ti-6Al-4V,弹体为长 2.54 cm、直径 1.27 cm 的圆柱体;2005 年美国联邦航空局 Lundin 等<sup>[14]</sup>对 2024-T351 铝合金、Ti-6Al-4V 钛合金、Inconel625 高温合金以及复合材料进行弹道冲击试验,试验数据主要用于发展“未包容的发动机碎片损伤分析模型”(Uncontained Engine Debris Damage Analysis Model, UEDDAM);2009 年美国亚利桑那州立大学的 Naik 等<sup>[15]</sup>与 NASA 合作,分别对环形结构 Kevlar-49、Zylon-500D、Zylon-1500D 进行了 14 次、9 次、6 次由内向外的弹道冲击试验,弹体为 102 mm×51 mm×8 mm 的条形不锈钢 304 L,质量为 314.8~320.9 g,撞击速度为 105~280 m/s,试验结

果表明 Zylon 可吸收的能量显著高于 Kevlar 的;2016 年美国密歇根州立大学的 Andrew<sup>[16]</sup>使用长 4.7 m、直径 105 mm 的气炮对不同复合材料平板及风扇机匣进行弹道冲击试验,以比较不同材料的抗冲击特性,并使用 3 种不同结构的叶片进行冲击试验,发现使用预先弯曲的叶片进行打靶试验时,可以获得与旋转叶片飞断后撞击平板相似的损伤模式。

在国内,2002 年黄英等<sup>[17]</sup>使用气炮发射球形钢弹丸以及带球头的圆柱体弹丸对 Kevlar 织物增强复合材料层合板进行冲击试验,得出 Kevlar 层合板的损伤模式为分层与穿透,分层区域近似为椭圆形,且向受冲击背面呈现喇叭形放大;2006 年范志强等<sup>[18]</sup>为了验证航空发动机机匣包容性破坏势能法,使用气炮驱动模型叶片对模型机匣进行了 20 次打靶试验,试验结果表明所用模型机匣的非包容失效模式主要是剪切破坏;2010 年杨双林<sup>[19]</sup>利用空气炮进行了单层及双层模拟金属机匣在中温下的打靶试验,得到了靶板的穿透临界速度及花瓣形失效的损伤模式;2012 年杨乐<sup>[20]</sup>对加筋铝合金板进行冲击试验,分析了冲击过程、断口、临界速度及应变响应,分析结果表明加强筋可以有效提高靶板的抗冲击性能;2012 年张涛等<sup>[21]</sup>为研究 TC4 钛合金机匣的包容性能,分别使用 100 mm×40 mm×6 mm 以及 80 mm×35 mm×6 mm 的 2 种不同尺寸的 TA11 条形平板弹体对平板和弯曲的模拟机匣进行了打靶试验,试验结果表明,平板和弯曲的模拟机匣的失效模式相似,整体失效模式是有塑性形变引起的凹陷,而局部失效模式包括弹坑、剪切冲塞失效以及花瓣式失效;2014 年段玥晨等<sup>[22]</sup>利用滑膛炮试验系统对航空发动机真实机匣的包容性开展 6 组打靶试验,验证应用显示动力分析软件 LS-DYNA 进行的数值仿真结果具有较好的准确性;2018 年刘璐璐等<sup>[23]</sup>应用气炮发射材料为 TC4 的矩形叶片弹体对 Kevlar 织物/环氧树脂层合板进行弹道冲击试验,得出了靶板随撞击速度增加的破坏模式变化,并且试验结果表明,当复合材料靶板厚度提高 20%时,可吸收的极限能量提高约 92%,叶片偏转撞击时靶板的抗冲击特性有所提高。

在国外,政府机关、科研机构、高校以及发动机厂商普遍开展针对各种机匣及机匣模拟件的打靶试验,为新材料、新结构的研制与仿真分析提供试验数据。在国内,打靶试验多在高校进行,主要用于研究损伤

模式、验证数值仿真分析方法。

## 2 试验器条件下叶片包容试验

在国外,1968年 Martino 等<sup>[24]</sup>在 NASA 转子破裂防护计划的资助下,在立式旋转试验器上开展机匣包容性试验研究,为轻质包容系统设计提供试验数据,研究内容包括被包容转子的动力学特性以及影响包容性的重要参数;进行了包括单个叶片撞击机匣、相邻叶片影响下断裂叶片撞击机匣以及轮盘破裂碎片撞击机匣等 3 种类型共 21 次金属机匣包容性试验;在试验中用预制裂纹的方法控制叶片飞断转速以及轮盘破裂模式和转速,建立了包括冲击应变响应测量、高速影像记录以及转速测量的测试系统,并制定了试验器条件下进行机匣包容试验的试验标准。1981 年 Stotler<sup>[25]</sup>在立式旋转试验器上进行了 11 次风扇叶片包容试验,叶片为 2 种,1 种是标准的 TF34 叶片,另 1 种是混杂结构叶片,通过炸药使单个叶片飞断或 180° 对称的 2 个叶片同时飞断,单个叶片飞断的试验转子安装全叶片,2 个叶片同时飞断的试验转子在飞断后方(旋向为正)各安装 3 个叶片,如图 1 所示;试验数据用于先进的轻质机匣结构设计及复合材料机匣设计。

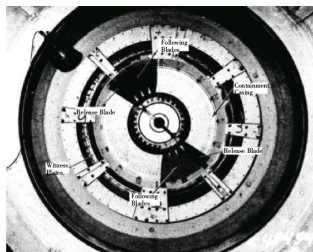


图 1 180°对称的 2 个叶片同时飞断试验<sup>[25]</sup>

关于试验器条件下的叶片包容试验,国外公开资料较少,文献[9]给出的试验器条件下叶片包容试验分为 3 种,分别为不安装机匣验证叶片飞断后对其他叶片完整性影响的基础试验、安装机匣与转子组件的单个叶片飞断包容试验、安装主要转子和配套的附属件以及发动机整个承力框架的单个叶片飞断包容试验。这些试验由简单到复杂依次进行,以降低整机包容试验的风险。安装机匣与转子组件的包容试验照片如图 2 所示,安装主要转子及承力框架的包容试验如图 3 所示。

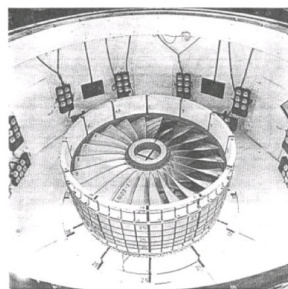


图 2 安装机匣与转子组件的包容试验<sup>[9]</sup>

在国内,1992 年龚梦贤等<sup>[26]</sup>首次在浙江大学立转试

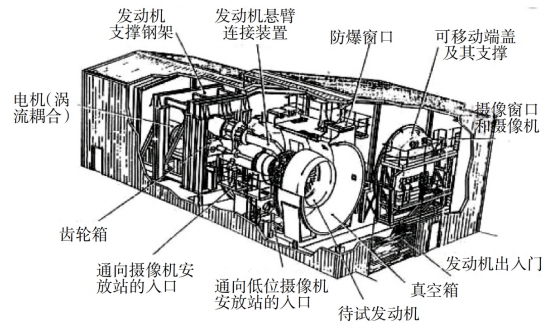


图 3 安装主要转子及承力框架的包容试验<sup>[9]</sup>

验器上进行了旋转状态下单个模型叶片撞击模型机匣的试验,分析了机匣与断裂叶片的损伤模式,并进行包容性计算,验证了斯贝 MK202 发动机应力标准(EGD-3)中的单个压气机叶片包容曲线可作为类似单个压气机叶片(仅叶身)包容性计算的依据。2002 年,浙江大学蒋劲松<sup>[27]</sup>利用立转试验器进行了高速旋转平板叶片撞击圆筒壳体的试验,依据试验结果分析给出了理论预估值的方法。2005~2006 年浙江大学宣海军、张晓锋、张伯熹等<sup>[28-30]</sup>进行了旋转状态下模型件包容试验,试验结果表明平板叶片撞击包容环后,形成 2 个撞击点,第 2 个撞击点更容易发生破坏,在撞击过程中平板叶片最终塑性弯曲成 U 型;在撞击点处包容环的径向变形随初始撞击动能的增大而呈线性增大。2006 年范志强等<sup>[31]</sup>在浙江大学立转试验器上进行了模型机匣的包容性试验,试验用叶片为平板式模型叶片,机匣为等厚度圆柱金属壳体,试验得出机匣非包容失效模式为剪切破坏和拉伸破坏;同年,范志强等<sup>[32-33]</sup>完成了国内首次带全套压气机以及转子真实叶片的真实机匣包容性试验,试验测得叶片断裂甩出时的转速、断裂叶片撞击机匣的应变响应和拍摄撞击过程的高速摄像照片,试验结果表明断裂叶片与机匣碰撞了 2 次,第 2 次撞击时在未断裂叶片作用下断裂叶片击穿机匣,机匣的失效模式主要是剪切破坏,使用包容曲线法的计算结果与试验结果吻合良好。2012 年浙江大学何庆<sup>[34]</sup>完成了某型发动机第 1 级风扇机匣单叶片、3 叶片包容试验,以及第 2、3 级风扇机匣全叶片包容试验,通过试验与仿真分析,对涡轮机匣/叶片、风扇机匣/叶片的包容机理进行详细分析,研究了叶片之间相互作用和转速对包容过程的影响。2013 年浙江大学刘璐璐等<sup>[35]</sup>进行了高速离心飞断撞击复合材料机匣的包容试验,试验结果表明机匣内壁失效模式主要为纤维剪切失效与基体破裂失效



造成的矩形缺口,机匣外壁失效模式为纤维拉伸断裂与分层失效引起的区域性分层损伤,另外随着机匣壁厚增加,叶片弯曲变形愈严重,复合材料机匣可吸收的断裂叶片能量随壁厚增加呈指数倍增加。

与国外相比,国内在旋转试验器上进行的机匣包容试验起步较晚,主要集中在浙江大学,试验结果主要用于验证包容性计算方法及机匣失效模式,而用于提升包容性正向设计能力及降低整机包容试验风险的试验开展较少。

3 整机包容试验

包容性试验不是简单地要求机匣可以防止碎片飞出,还必须考虑机匣的过度变形可能破坏到连接螺栓,机匣严重变形后会与剩余叶片发生碰摩,可能造成这些叶片损坏或断裂,这又可能导致大量叶片飞出,使承力结构受到无法承受的不平衡载荷,导致发动机发生更严重破坏。用整机进行包容试验最具代表性,整机包容试验在露天试车台上进行,由发动机提供推力,并使用与在飞机上完全相同的系统和安装节,通过整机包容试验是取得适航许可证的关键因素之一。

近年来,公开资料显示国外航空公司已完成多项整机包容试验。RR 公司在 20 世纪 90 年代完成了 Trent 800 发动机整机条件下的风扇叶片包容试验,长达 1030 mm 的风扇叶片飞断后被包容在机匣里<sup>[36]</sup>;2003 年 8 月 RR 公司成功完成了 Trent 900 发动机风扇叶片整机包容试验<sup>[37]</sup>;2007 年 RR 和 GE 公司分别完成了 Trent 1000 发动机以及 GEnx 发动机的整机包容试验<sup>[38]</sup>。文献[39]介绍了国外的 PX-8 涡扇发动机风扇叶片的整机包容试验方法及试验程序,PX-8 发动机整机包容试验程序见表 1。该程序已经被一些发动机制造商用于许多发动机的包容试验,并且已被证明能够正确地满足管理机构的要求。

国内目前未见航空发动机整机包容试验的文献披露。

4 包容试验关键技术

4.1 叶片飞断技术

在包容试验中,试验参数控制的最大挑战来自于叶片飞断转速的精度控制,飞断转速直接影响试验结果,因此必须被准确地控制,特别是针对成本巨大的整机包容试验。在国内外开展的包容试验中,叶片飞

表 1 PX-8 发动机整机包容试验程序

序号	内容
1	校准所有记录设备;
2	移除所有设备的自动跳闸装置;
3	检查摄像机;
4	安装炸药;
5	发动机加速至慢车并稳定运转 5 min(在该时间段将记录设备设置为低采样率);
6	用时 1min 加速至要求的 $N_1$ 转速;
7	手动触发起爆炸药;
8	确认叶片飞断后,开始倒计时 15 s;15 s 内不准移动油门杆,如果发动机由电控单元关闭,允许发动机降速;发现无风扇转速或高压转速指示后,立即通过手动控制关闭燃油;
9	叶片飞断 15 s 后关闭燃油,允许发动机降速;
10	评估发动机状况,按工程要求对发动机拍照;
11	分解、检查发动机。

断技术主要采用预制缺口、预制缺口与快速加热结合以及爆破技术。

4.1.1 预制缺口法

预制缺口法采用线切割在飞断截面预制缺口,缩小叶片飞断截面面积,使其在要求的离心载荷作用下率先被拉断。这种方法因实施简单被广泛采用,国外早期曾在包容试验中使用该方法飞断叶片。目前国内开展的绝大多数包容试验即采用预制缺口方法飞断叶片,但由于受到材料分散性、加工误差及切口敏感性的影响,预制缺口法的飞断转速控制精度较低,在实际应用中通常会保守地预制缺口,导致试验需多次上下台,试验的成功率难以保证。

4.1.2 预制缺口与快速加热结合方法

预制缺口与快速加热结合的方法是在叶片榫头处钻孔安装电加热棒,通过滑环给电加热棒供电,使榫头处局部温度快速升高,叶片拉伸强度随温度升高而降低,直至离心力将叶片拉断<sup>[40]</sup>。该方法(如图 4 所示)相比于预制缺口法具有更高的转速控制精度,但只适合拉伸强度对温升敏感的金属材料,另外在部件级及整机包容试验中应用也

面临布线困难的问题。该方法未在国外有关包容试验的公开资料中提及,国内仅有浙江大学使用其开展了极少数的包容试验。

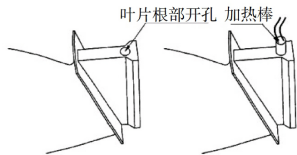


图 4 预制缺口与快速加热结合的方法<sup>[40]</sup>

### 4.1.3 爆破技术

对于试验成本巨大的部件级、整机风扇叶片包容试验,采用预制缺口以及预制缺口与快速加热结合的方法飞断叶片难以满足试验需求,因此发展了能够在一定范围内准确控制叶片转速的爆破技术。

在叶片爆破飞断方面国外航空发动机公司技术成熟,应用爆破技术完成大量部件级包容试验及整机包容试验的叶片飞断<sup>[9]</sup>,Trent 900、Trent 1000 及 GEnx 发动机的包容试验均采用爆破技术飞断叶片。文献[39]介绍了 PX8 发动机在进行包容试验时采用的爆破方案,用于爆破飞

断的 PX8 发动机风扇叶片改装如图 5 所示。在榫头处沿轴向钻孔放置炸药,在孔两侧的外部预制缺口,起爆系统放置于风扇轴内部,包括电池、电容器、触发电路。

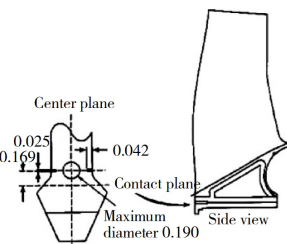


图 5 PX8 发动机风扇叶片改装<sup>[39]</sup>

国内在将爆破技术应用于叶片飞断的研究方面,张国静<sup>[41]</sup>、郭明明<sup>[42]</sup>、吕登洲<sup>[43]</sup>等率先开展使用线性聚能切割器切割 TC4 合金平板的数值仿真分析及静止与旋转状态下的切割验证工作,验证了使用聚能切割器在静止与旋转状态下切割叶片的可行性,但设计的聚能切割器为外置型,而在实际发动机包容试验要求的榫头断裂位置没有足够的布置空间,外置型聚能切割器不能直接应用于发动机部件级及整机包容试验。

国外叶片飞断采用的爆破方式为接触爆破,在国内接触爆破多用于工程爆破拆除<sup>[44-45]</sup>、采矿工程以及岩土爆破<sup>[46-47]</sup>等,这些应用场合包装药量比较大,一般不要求规整的破坏断口。采用接触爆破飞断叶片,由于爆轰压力没有方向性,需要工艺的保证及试验验证,否则可能会增加叶片向外飞出的额外动能,从而影响试验结果。

国内所选择的线性聚能切割技术由于能够很好地控制切割方向,并且不增加叶片向外飞出的动能,更适用于包容试验中的叶片飞断控制。线性聚能切割器为 1 种在 V 型罩线性装药结构,能够产生线性金属射流,广泛用于工程爆破切割的聚能射流结构<sup>[48]</sup>。线性聚能切割器的 1 种简单制作工艺是拉拔式制作工艺,如图 6 所示。该工艺制作的聚能切割器外壳与药型罩一般为同材料金属,通过多次拉拔增加炸药密

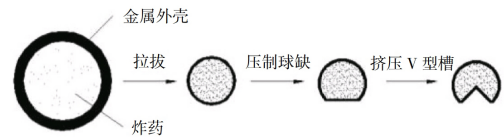


图 6 线性聚能切割器的拉拔式制作工艺

度,拉拔完成后压制球缺,最后挤压 V 型槽。其他线性聚能切割器,如 V 型聚能切割器(如图 7 所示),其制作工艺较复杂,直径较大。因此,针对真实发动机榫头部位的切割,应优先选择拉拔式工艺制作的线性聚能切割器开展叶片爆破切割试验。

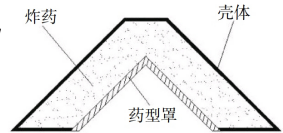


图 7 V 型聚能切割器

### 4.2 响应测量技术

包容事件是非常复杂的非线性瞬态动力学问题,飞断叶片撞击机匣并受到后续叶片撞击、挤压而发生破裂,持续冲击机匣,叶片飞断后转子不平衡力瞬时增大,使转子运行轨迹发生变化,撞击机匣并对机匣产生摩擦扭矩,同时转子轴及轴承载荷急剧加大,由转子向静子转移的能量造成整个发动机结构之间发生复杂的动态载荷传递<sup>[49-51]</sup>。在试验中的响应测量对于试验结果与仿真分析以及结构优化是十分必要的,但由于结构及载荷传递的复杂性增加了响应测量方案设计与实施的难度。在包容试验中会出现材料的塑性变形、大的位移、各结构间的高速碰摩、撞击<sup>[52]</sup>,响应测量主要为撞击过程的影像记录以动态载荷响应测量。

#### 4.2.1 过程影像记录

撞击过程采用高速摄像技术进行记录,高速摄像是用很高的帧频和很短的曝光时间进行拍摄的方式。20 世纪 70 年代,胶片高速摄像机已用于科研,20 世纪末至 21 世纪初,随着电子技术、计算机技术、新型传感器和大容量存储技术的发展,数字式高速摄像机发展迅速<sup>[53]</sup>。目前国际上主要机型包括 WEINBERG 公司的 Visario、VRI 公司的 Phantom 以及 REDLAKE 公司的 100K 等高速摄像系统<sup>[54]</sup>。

国外在 CFM56-5B1/-5B2/-5B4 发动机的包容取证试验中共使用了 21 台摄像机,其中高速摄像机 12 台,6 台帧频设置为 2000~6000 的高速摄像机用于发动机进口拍摄,4 台帧频设置为 800 的高速摄像机用于机匣外部垂直拍摄,2 台帧频分别设置为 800 和 1000 的摄像机用于尾部拍摄。国内首次在试验器上进

行的真实机匣包容性试验选用的高速摄像机为美国 REDLAKE 公司制造的 HG-100K 型数字高速摄像机。

在包容试验中使用高速摄像机进行撞击过程记录,需要设置适合的拍摄参数以及触发方式。拍摄参数设置主要是帧频设置,高的拍摄帧频能记录更短事件内发生的细节,但会缩短拍摄时间、降低画质以及提高照度要求,因此需要根据记录需求设置拍摄帧频,不能折衷时需要增加高速摄像机数量。为保证拍摄到完整的叶片飞断及撞击机匣过程,需要设计专门的高速摄像触发系统。在国外的包容试验中,设计了1种“黑箱”式的旋转触发系统,通过设置精确时钟控制高速摄像触发时刻<sup>[25]</sup>,在国内的包容试验中,将直径为0.3~0.4 mm的触发线圈缠绕粘贴在机匣内壁,当飞断叶片切断触发线圈时高速摄像系统被触发<sup>[29,33-34]</sup>。

#### 4.2.2 动态载荷响应测量

文献[55]给出了国外整机包容试验中机匣应变、支点轴承载荷以及轴心轨迹的测试结果,并与仿真结果进行对比分析,分别如图8~10所示,但未介绍具体的测量方法。

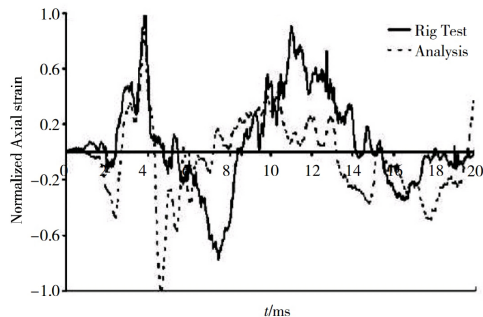


图8 机匣轴向应变测量结果<sup>[55]</sup>

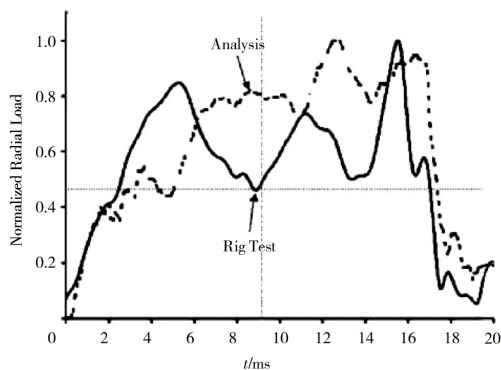


图9 1 支点轴承载荷<sup>[55]</sup>

在国内,在试验器条件下的包容试验中,2013年何庆等<sup>[56]</sup>在某型发动机风扇机匣叶片包容试验中进行了机匣撞击区域的动态应变测量及仿真分析,在机

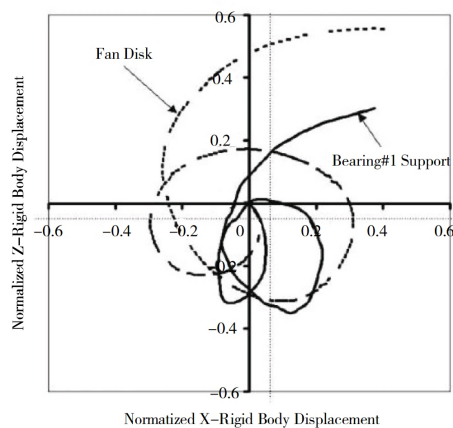


图10 风扇盘与1 支点轴承的轴心轨迹<sup>[55]</sup>

匣外壁周向均布8个测点,每个测点沿周向和轴向粘贴2个应变片,2号应变测量结果与仿真结果的对比如图11所示。2014年叶冬<sup>[57]</sup>、宣海军等<sup>[58]</sup>在浙江大学ZUST6D型高速旋转试验台上进行模拟叶片飞失后的转子轴心轨迹测量与限位轴承的载荷测量,轴心轨迹由相隔90°的2个电涡流传感器测量,数采带宽为350 MHz,采样频率为1 MHz,采样时间为10 s。轴承载荷由加速度传感器配合LMS Test Lab测试分析系统测量,测试前标定不同力值对加速度的响应。

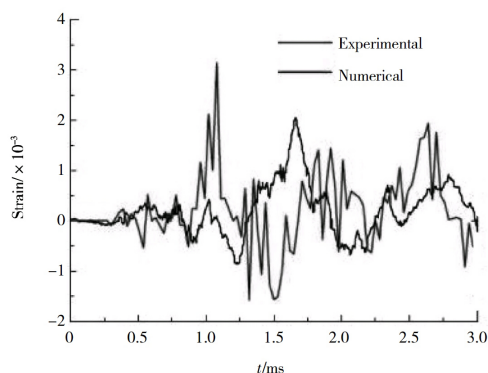


图11 2号应变片测量与仿真结果<sup>[56]</sup>

目前国内尚未开展整机包容试验动态响应测试工作,但已开展动态响应分析以及缩比简化模型式的整机包容试验测试与仿真分析工作。2014年洪杰等<sup>[59-60]</sup>针对叶片飞断激励下的整机动态响应问题,分析了机匣、转子、支撑系统以及安装节在内的整机结构系统的物理过程和力学行为,并进行了响应特征的计算和分析,在2018年,基于结构/力学特征等效原则建立了高速柔性悬臂转子系统试验器,对突加不平衡及持续碰摩所产生激励下转子系统振动响应进行试验测试,试验中的转子振动响应采用电涡流位移传感



器进行测量, 承力框架的响应采用应变片和振动传感器进行测量, 结果表明试验过程具有显著冲击效应, 并存在转子横向模态振动及谐波振动频率成分。2016~2018年, 刘璐璐、吴建林等<sup>[61-62]</sup>参考 CFM56 发动机的结构设计了缩比的飞断叶片包容试验台, 如图 12 所示, 通过分别布置在风扇机匣正上方、中介机匣正上方、涡轮机匣水平方向以及 60° 方向风扇支板的 4 个振动加速度传感器测量模拟机匣受到的冲击载荷以及载荷传递变化规律, 共进行了 8 次叶片飞断试验, 试验测试结果较好地反映了叶片飞断情况下的基本物理现象以及变化规律, 为建立和验证仿真分析方法提供了基本数据。

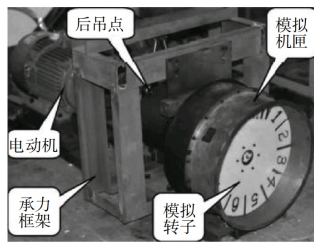


图 12 飞断叶片包容试验台实物<sup>[61]</sup>

在动态载荷响应测量方面, 目前国内已发展了较成熟的试验器条件下包容试验的响应测量技术, 但在整机包容试验的动态载荷测量方面开展的研究仍较少, 测试技术尚不成熟。

## 5 结束语

为满足航空发动机适航条例关于包容性的要求, 必须开展必要的包容试验验证, 在整机包容试验之前, 需要从简单到复杂进行各类包容试验验证, 并结合数值仿真为结构设计和改进以及最终通过包容性取证试验提供数据支撑。

近 20 年国内包容试验研究工作发展较快, 开展了大量的打靶试验以及单级转子的机匣包容试验, 并掌握了较成熟的试验器条件下包容试验的测试技术, 但与国外研究进程相比, 在参研单位范围、试验数量方面存在明显差距, 对于包容性正向设计的支撑不足, 应加大试验研究的广度与深度。

国内尚未开展安装主要转子、承力框架的包容试验以及整机包容试验, 针对整机包容试验的叶片飞断、响应测量等关键技术还不成熟, 为满足整机包容试验的需求, 应重点发展叶片爆破切割技术以及整机包容试验动态响应测量技术。

### 参考文献:

- [1] 陈光. 航空发动机结构设计分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006: 548-551.
- CHEN Guang. Analysis of aeroengine structure design[M]. Beijing: Bei-

- jing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2006: 548-551. (in Chinese)
- [2] 陈光涛. 几种典型机匣结构的包容性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- CHEN Guangtao. Research on the containment of several kinds of typical casing structures [D]. Hangzhou Zhejiang University, 2014. (in Chinese)
- [3] Federal Aviation Administration. FAR33 air-worthiness standards: aircraft engines [S]. United States Federal Aviation Administration, 2007: 70-71.
- [4] United States Air Force. MIL-STD-1783B Engine structure integrity program[S]. United States: Department of Defence, 2002: 106-108.
- [5] European Aviation Safety Agency. Certification specification for engine [S]. Germany: European Aviation Safety Agency, 2010: 71-72.
- [6] Ministry of Defense. Defense standard 00-970 design and airworthiness requirements for service aircraft part 11-engines [S]. Britain: Ministry of Defense, 2006: 68-69.
- [7] 中国民航总局. 中国民用航空规章 CCAR33-R1 航空发动机适航规定[S]. 北京: 中国民用航空总局, 2005: 104-105.
- Civil Aviation Administration of China. CCAR33-R1 airworthiness standards: aircraft engine [S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2005: 104-105. (in Chinese)
- [8] 中国人民解放军总装备部. 航空涡轮喷气和涡轮风扇发动机通用规范[S]. 北京: 中国人民解放军总装备部, 2010: 25-26.
- The General Armament Department of the PLA. Engine, aircraft, turbojet and turbofan, general specification for [S]. Beijing: The General Armament Department of the PLA, 2010: 25-26. (in Chinese).
- [9] Horsley J. The Rolls-Royce way of validating fan integrity [R]. AIAA-93-2602.
- [10] 刘璐璐. 二维三轴编织带缠绕碳纤维复合材料机匣包容性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- LIU Lulu. Research on the containment of 2D carbon fiber triaxial braided tape wound composite casing [D]. Hangzhou Zhejiang University, 2014. (in Chinese)
- [11] Roberts G H, Revilock D M, Binienda W K. Impact testing and analysis of composite for aircraft engine fan cases [J]. Journal of Aerospace Engineering, 2002, 15(3): 104-110.
- [12] Roberts G H, Goldenberg R K, Binienda W K et al. Characterization of triaxial braided composite materials properties for impact simulation [R]. NASA-TM-2009-215660.
- [13] Mohan G H. Impact resistance of lightweight Hybrid structure for gas turbine engine fan containment application [J]. JMEPEG, 2003, 12: 470-479.
- [14] Lundin S J, Mueller R B. Advanced aircraft materials, engine debris penetration testing[R]. FAA, DOT-FAA-AR-03-37, 2005.
- [15] Naik D, Sankaran S, Mobasher B et al. Development of reliable modeling methodologies for fan blade out containment analysis-part: experimental studies [J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(1): 1-11.
- [16] Andrew J V K. Experimental impact testing and analysis of composite fan cases[D]. East Lansing: Michigan State University, 2016.
- [17] 黄英, 刘晓辉, 李郁忠. Kevlar 织物增强复合材料层合板冲击损伤

- 特性研究[J].西北工业大学学报,2002,20(3):486-491.
- HUANG Ying, LIU Xiaohui, LI Yuzhong. On improving bulletproof properties of keclar wove- fabric reinforced composite laminated plate [J].Journal of Northwestern Polytechnical University,2002,20(3):486-491. (in Chinese)
- [18] 范志强,高德平,覃志贤,等.机匣包容性破坏势能法的试验验证[J].燃气涡轮试验与研究,2006,19(2):26-29.
- FAN Zhiqiang, GAO Deping, TAN Zhixian, et al. Experimental study and numerical analysis of the modeled casing containment[J].Gas Turbine Experiment and Research,2006,19(2):26-29. (in Chinese)
- [19] 杨双林.双层金属机匣模拟包容性试验及数值分析[D].南京:南京航空航天大学,2010.
- YANG Shuanglin. Simulated containment test and numerical simulation of double-layered metal casing[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2010. (in Chinese)
- [20] 杨乐.加筋铝合金板抗冲击性能研究及结构优化[D].南京:南京航空航天大学,2012.
- YANG Le. Investigations on the impact resistance and structure optimization of stiffened aluminum plate [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2012. (in Chinese)
- [21] ZHANG Tao, CHEN Wei, GUAN Yupu, et al. Study on titanium alloy ballistic penetration resistance part ballistic impact tests[J].Chinese Journal of Aeronautics,2012,25(3):388-395.
- [22] 段玥晨,章定国,陈思佳,等.航空发动机机匣包容性打靶试验与仿真研究[J].计算机仿真,2014,31(4):106-109.
- DUAN Yuechen, ZHANG Dingguo, CHEN Sijia, et al. Targeting experimental and simulation research on casing containment of aero-engine[J].Computer Simulation,2014,31(4):106-109. (in Chinese)
- [23] 刘璐璐,赵振华,陈伟,等.航空发动机复合材料机匣弹道冲击特性[J].航空动力学报,2018,33(1):30-38.
- LIU Lulu, ZHAO Zhenhua, CHEN Wei, et al. Ballistic impact behavior of aero-engine composite casing [J].Journal of Aerospace Power,2018,33(1):30-38. (in Chinese)
- [24] Martino A A, Mangano G J. Rotor burst protection program initial test results[R].Naval Air Propulsion Test Center, No.NAPTC- AED- 1869, 1968.
- [25] Stotler C L. Development of advanced lightweight systems containment final report[R].NASA- CR- 1981- 165212.
- [26] 龚梦贤,王旅生,曹凤兰.叶片包容性试验研究[J].航空动力学报,1992,7(2):144-146.
- GONG Mengxian, WANG Lyusheng, CAO Fenglan. Experimental research on blade containment [J]. Journal of Aerospace Power,1992,7(2):144-146. (in Chinese)
- [27] 蒋劲松.高速旋转平板叶片撞击同心圆筒壳体试验的研究[J].爆炸与冲击,2002,22(3):267-272.
- JIANG Jinsong. Experimental studied on rotating plate impacting concentric columnar shell [J].Explosion and Shock Waves,2002,22(3):267-272. (in Chinese)
- [28] 宣海军,洪伟荣,吴荣仁.航空发动机涡轮叶片包容试验及数值模拟[J].航空动力学报,2005,20(5):762-767.
- XUAN Haijun, HONG Weirong, WU Rongren. Aero-engine turbine blade containment tests and numerical simulation [J].Journal of Aerospace Power,2005,20(5):762-767. (in Chinese)
- [29] 张晓峰,宣海军,吴荣仁.航空发动机叶片包容模拟试验与数值仿真研究[J].航空发动机,2005,31(4):39-42.
- ZHANG Xiaofeng, XUAN Haijun, WU Rongren. Experimental investigation and numerical simulation of aeroengine blade containment[J].Aeroengine,2005,31(4):39-42. (in Chinese)
- [30] 张伯熹,宣海军,吴荣仁.航空发动机涡轮叶片包容模拟试验研究[J].机械工程师,2006,10:114-116.
- ZHANG Boxi, XUAN Haijun, WU Rongren. Research on aero-engine turbine blade containment experiment [J].Mechanical Engineer,2006,10:114-116. (in Chinese)
- [31] 范志强,高德平,姜涛,等.模型机匣的包容性试验和数值模拟[J].南京航空航天大学学报,2006,38(5):551-556.
- FAN Zhiqiang, GAO Deping, JIANG Tao, et al. Experimental study and numerical simulation of model casing containment [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,2006,38(5):551-556. (in Chinese)
- [32] 范志强.航空发动机机匣包容性理论和试验研究[D].南京:南京航空航天大学,2006.
- FAN Zhiqiang. Theory and experimental study on aeroengine casing containment[D].Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2006. (in Chinese)
- [33] 范志强,高德平,覃志贤,等.航空发动机真实机匣的包容性试验[J].航空动力学报,2007,22(1):18-22.
- FAN Zhiqiang, GAO Deping, TAN Zhixian, et al. Experimental study of real casing containment [J].Journal of Aerospace Power,2007,22(1):18-22. (in Chinese)
- [34] 何庆.航空发动机机匣包容性机理及数值仿真方法研究[D].杭州:浙江大学,2012.
- HE Qing. Research on the mechanism and simulation methodology development for aeroengine casing/blade containment [D]. Hangzhou: Zhejiang University,2012. (in Chinese)
- [35] 刘璐璐,宣海军,张娜.航空发动机复合材料机匣叶片包容性研究[J].工程力学,2013,30:314-319.
- LIU Lulu, XUAN Haijun, ZHANG Na. Investigation on blade containment of aeroengine composite case [J].Engineering Mechanics,2013,30:314-319. (in Chinese)
- [36] 白水,高达800型风扇叶片包容试验成功[J].国际航空,1994,4:64.
- BAI Shui. The fan blade containment test of Trent800 engine was finished successfully [J].International Aviation,1994,4:64. (in Chinese)
- [37] 梁春华.RR公司完成TRENT900发动机的叶片包容试验[J].航空发动机,2003,29(3):44.
- LIANG Chunhua. Rolls-Royce finished blade containment test of Trent900 engine[J].Aeroengine,2003,29(3):44. (in Chinese)
- [38] 宣海军,陆晓,洪伟荣,等.航空发动机机匣包容试验综述[J].航空动力学报,2010,25(8):1860-1870.
- XUAN Haijun, LU Xiao, HONG Weirong, et al. Review of aero-engine case containment research [J].Journal of Aerospace Power,



- 2010 25(8) :1860- 1870. (in Chinese)
- [39] YANG Bin. Blade containment evaluation of civil aircraft engines[J]. Chinese Journal of Aeronautics.2013 26(1) 9- 16.
- [40] 郭明明.航空发动机风扇机匣包容试验叶片爆破飞脱方法研究[D].杭州 浙江大学 2016.
- GUO Mingming. Research on blade exploding out methods in aero-engine fan case containment test [D].Hangzhou Zhejiang University , 2016. (in Chinese)
- [41] 张国静.航空发动机风扇叶片爆破飞脱技术研究[D].杭州 浙江大学 2014.
- ZHANG Guojing. Research on aeroengine fan blade exploding out technology[D].Hangzhou Zhejiang University 2014. (in Chinese)
- [42] 郭明明,吕登洲,洪伟荣,等.航空发动机机匣包容试验叶片飞脱方法[J].航空发动机 2016 42(2) :73- 76.
- GUO Mingming , LYU Dengzhou , HONG Weirong , et al.Blade out methods of aeroengine case containment test [J].Aeroengine 2016 42 (2) :73- 76. (in Chinese)
- [43] 吕登洲.航空发动机风扇机匣包容试验中叶片爆破飞脱技术研究 [D].杭州 浙江大学 2017.
- LYU Dengzhou. Research on explosive blade- off test in containment evaluation of aero- engines [D].Hangzhou Zhejiang University 2017. (in Chinese)
- [44] 黄龙华.110m 烟囱及皮带走廊控制爆破拆除[J].工程爆破 2009 ,15 (4) :54- 57.
- HUANG Longhua. Demolition of 110m chimney and belt corridor by controlled blasting [J].Engineering Blasting 2009 ,15 (4) :54- 57. (in Chinese)
- [45] 成永华,张光寿,林伟锋.炼铁高炉高温炉瘤爆破[J].爆破 2014 31 (4) :103- 106.
- CHENG Yonghua , ZHANG Guangshou , LIN Weifeng. Demolition of high temperature linker in iron and steel furnace[J].Blasting 2014 31 (4) :103- 106. (in Chinese)
- [46] 杨洪新.采矿工程中爆破技术的进展[J].黄金 ,1993 ,14(5) 25- 28.
- YANG Hongxin.Advance in blasting technique of mining engineering [J].Gold ,1993 ,14(5) 25- 28. (in Chinese)
- [47] 张乐,颜景龙,张宪玉,等.露天采矿岩分离爆破技术探索[J].工程爆破 2011 ,17(3) :77- 80.
- ZHANG Le , YAN Jinglong , ZHANG Xianyu , et al. Blasting technology research for ore and rock separation in open- pit mine[J].Engineering Blasting 2011 ,17(3) :77- 80. (in Chinese)
- [48] 荀 扬,晏麓晖,曾首义.聚能成型装药技术研究进展综述[J].科学技术与工程 2008 8(15) :4251- 4257.
- XUN Yang , YAN Luhui , ZENG Shouyi.Process of the shaped charge technique [J].Science Technology and Engineering 2008 8 (15) : 4251- 4257. (in Chinese)
- [49] Yigit A S ,Ulsoy A G ,Scott R A. Spring- dashpot models for the dynamics of a radially rotating beam with impact[J].Journal of Sound and Vibration ,1990 ,142(3) 515- 525.
- [50] Sinha S K. Non- linear dynamic response of rotating radial Timoshenko beam with periodic pulse loading at the free- end[J]. International Journal of Non- linear Mechanics 2005 40(1) :113- 149.
- [51] Sinha S K. Combined torsional- bending- axial dynamics of twisted Timoshenko beam with contact- impact loads at the free- end[J].International Journal of Applied Mechanics 2007 74 506- 523.
- [52] Cosme N ,Chevrolet D ,Bonini J. Prediction of engine loads and damages due to blade- off event[R].AIAA- 2002- 1666.
- [53] 赖鸣,兰山,黄广炎.数字式高速摄像测试技术及其应用[J].实验技术与管理 2012 29(6) :51- 54.
- LAI Ming , LAN Shan , HUANG Guangyan. Metrical technique of digital high speed photography and its application [J].Experimental Technology and Management 2012 29(6) :51- 54. (in Chinese)
- [54] 李慕阳,陈松,谢明,等.高速摄像技术在材料科学研究中的应用和发展[J].贵金属 2014 35(S1) :175- 180.
- LI Muyang , CHEN Song , XIE Ming , et al. Application and development of high- speed video technology in materials science[J].Precious Metal 2014 35(S1) :175- 180. (in Chinese)
- [55] Sinha S K ,Dorbala S. Dynamic loads in the fan containment structure of a turbofan engine [J].Journal of Aerospace Engineering 2009 22 (3) 260- 269.
- [56] HE Qing , XUAN Haijun , LIU Lulu , et al. Perforation of aero- engine fan casing by single rotating blade[J].Aerospace Science and Technology 2013 25 234- 241.
- [57] 叶冬.高速柔性转子突加大不平衡响应研究[D].杭州 浙江大学 , 2014.
- YE Dong. Dynamic response of high speed flexible rotor due to sudden large unbalance [D].Hangzhou Zhejiang University 2014. (in Chinese)
- [58] XUAN Haijun , LUO Ling , GUO Xiaojun , et al. Dynamic response of a high speed flexible rotor due to sudden large unbalance [C]/Proceeding of the 9th IFToMM International Conference on Rotor Dynamics. Milan Springer International Publishing 2015 :1977- 1990.
- [59] 洪杰,郝勇,张博,等.叶片丢失激励下整机力学行为及其动力特性[J].航空发动机 2014 40(2) :19- 23.
- HONG Jie , HAO Yong , ZHANG Bo , et al. Mechanical behaviors and dynamic characteristics of turbofan engine due to fan blade off[J]. Aeroengine 2014 40(2) :19- 23. (in Chinese)
- [60] 洪杰,陈成,王永锋,等.突加大不平衡激励下高速柔性转子系统振动试验[J].航空动力学报 2018 33(1) :15- 23.
- HONG Jie , CHEN Cheng , WANG Yongfeng , et al. Vibration test of high speed flexible rotor due to the sudden- unbalance [J]. Journal of Aerospace Power 2018 33(1) :15- 23. (in Chinese)
- [61] 吴建林.航空发动机叶片丢失激励下整机响应分析[D].南京 南京航空航天大学 2016.
- WU Jianlin. Analysis of whole engine response due to blade out load of aeroengine[D]. Nanjing Nanjing University of Aeronautics and Astronautics 2016. (in Chinese)
- [62] 刘璐璐,赵振华,陈伟,等.叶片丢失后发动机整机响应模拟试验与仿真[J].航空动力学报 2018 33(2) 290- 298.
- LIU Lulu , ZHAO Zhenhua , CHEN Wei , et al. Simulated test and numerical simulation of aero- engine whole engine response during blade out event[J].Journal of Aerospace Power 2018 33(2) 290- 298. (in Chinese)

(编辑:刘 静)