

第4章 热喷涂修复技术

柳台夫

第1节 概述

热喷涂是近代各种喷涂、喷熔技术的总称。热喷涂技术是把丝状或粉末状材料加热到软化或熔化状态，并进一步雾化、加速，然后沉积到零件表面上形成覆盖层的一门技术。覆盖层按工况需要，可分别具有耐磨、耐蚀、抗高温氧化等性能。喷涂层与基体的结合虽然有些是显微焊接、显微扩散、原子间金属键的引力作用，但主要还是机械结合，因而结合强度不高，约为 $5\sim 50\text{N/mm}^2$ 。喷熔层与基体的结合虽然基体也不熔，但在覆盖层重熔过程中，与基体互熔、扩散结合，形成完全的冶金结合，由于扩散和熔解作用，结合强度高，约为 $300\sim 700\text{N/mm}^2$ 。

(一) 热喷涂的分类及特点

按熔化喷涂（喷熔）材料所使用的基本能量形式。喷涂方法分为、电弧喷涂、等离子喷涂、火焰喷涂（含爆炸喷涂、超音速喷涂）等；喷熔方法主要有火焰粉末喷熔和等离子粉末喷熔等。喷涂材料有丝状和粉末状。

等离子堆焊，属焊接范畴，目前习惯上称做等离子喷焊，也常用做修复技术。

几种喷涂和喷熔工艺特点比较见表4-1-1和表4-1-2。

热喷涂工艺优点如下：

- 1) 适用材料广。各种金属乃至非金属的表面都可以利用热喷涂工艺获得特定性能的覆盖层。
- 2) 喷涂材料广。金属及其合金、陶瓷材料有机树脂都可以做为喷涂材料。
- 3) 工艺简单、沉积快、生产效率高。
- 4) 被喷涂零件的尺寸不限，不象电镀那样有

表4-1-1 几种热喷涂工艺特点的比较

	火焰喷涂	电弧喷涂	等离子喷涂	爆炸喷涂
典型涂层孔隙率 (%)	10~15	10~15	1~10	1~2
典型粘接强度 (N/mm^2)	7.1	10.2	30.6	61.2
优点	成本低，沉积效率高，操作简便	成本低，沉积速度高	孔隙率低，能喷薄壁易变形件，热能集中，热影响区小，粘结强度高	孔隙率很低，粘接强度极高
缺点	孔隙率高，粘结强度差	孔隙率高，喷涂材料仅限于导电丝材，活性材料不能喷涂	成本高	成本极高沉积速度慢

表4-1-2 火焰粉末喷熔和等离子粉末喷熔的比较

方法 \ 特点	稀释率 (%)	熔敷系数 (kg/min)	单层喷熔的最小厚度 (μm)	优缺点
火焰粉末喷熔	1~10	0.45~6.8	0.8	稀释率低，可喷熔较薄的均匀层，方法简便、灵活，生产率低，劳动强度大
等离子粉末喷熔	5~30	0.45~6.8	0.8	质量好，易实现机械化成本较高

镀槽尺寸的局限。

5) 基体材料变形小。喷涂过程整体零件的温升不太高，一般控制在70~80°C，故变形小。

6) 火焰喷涂设备简单，重量轻，工艺简便，可十分方便地用于现场修复。

7) 涂层厚度从0.05mm至几毫米。另外，喷涂层系多孔组织，易存油，润滑性好。

热喷涂工艺缺点如下：

1) 喷涂层结合强度不很高。但如工艺得当，一般工件经喷涂后均能满足工艺需要。

2) 镀层孔隙多，虽利于润滑但不利于防腐蚀。

3) 喷涂时雾点分散，飞溅损失严重，金属附着率低。

4) 喷涂工艺过程中有毛糙处理工序，会降低零件的强度和刚度。

5) 热喷涂覆盖层的质量主要靠工艺来保证，目前暂无有效的无损检测方法，因而应用受到限制。

(二) 热喷涂在机修中的应用

1) 修复旧件，恢复磨损工件的名义尺寸。如机床主轴、曲轴、凸轮轴轴颈，电动机转子轴，以及机床导轨和溜板等经热喷涂修复后，既节约钢材，又延长寿命，还大大减少备件库存。

2) 修复铸件的缺陷，如修复大铸件加工完毕时发现的砂眼气孔等。

3) 修复或制造减磨材料轴瓦，如在轴瓦上喷一层磷青铜或铝青铜，可大大提高其耐磨性。

4) 增强金属结构件或零部件的耐腐蚀或耐高温等性能，如盐浴容器，燃气轮机等喷涂铝后，寿命大大延长了。

第2节 热喷涂设备及工艺装备

(一) 电弧喷涂设备

电弧喷涂设备主要由直流电焊机、控制箱、空

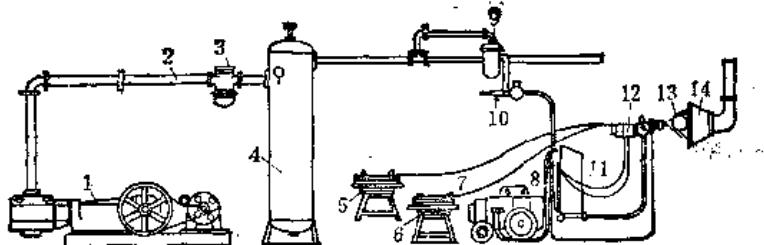


图4-2-1 SCDP-3型电弧喷涂整套设备

1—空气压缩机 2—冷凝器 3—油水分离器 4—储气筒
5, 6—钢丝盘架 7—金属丝 8—电焊机 9—空气过滤器
10—空气压力调节器 11—控制箱 12—电弧喷涂枪
13—工件 14—吸尘斗

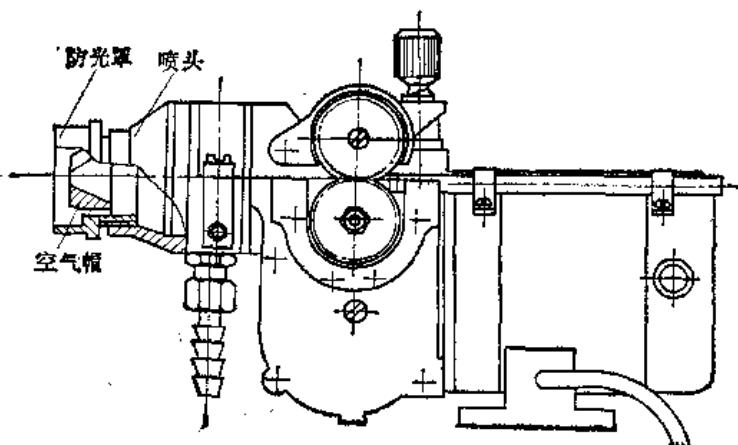


图4-2-2 SCDP-3型电弧喷涂枪

气压缩机及供气装置、电喷枪等组成，见图4-2-1。SCDP-3型电弧喷枪（图4-2-2）的技术规范见表4-2-1。

表4-2-1 SCDP-3型固定式电弧喷枪的主要技术规范

项 目	数 据
型 式	ZCDP-3 固定式
操 作 方 式	固定装置，工作运动
动 力	40/90W、220V 串激普用单相电动机
调速方 式	用可控硅控制电压的大小，对电动机供电，达到无级调速送丝
重 量	喷枪 ≤6kg 成套 ≤40kg
外 形 尺 寸	喷枪 320×104×165mm 成套 434×360×190mm
使 用 金 属 丝 范 围	Φ 1.6~1.8mm (钢或不锈钢)

(续)

项 目	数 据
电流类别	直流
工作电流	100~170A (常用100~120)
工作电压	30~56V, 随上述电流范围的大小而变动
压缩空气工作压力	0.5~0.7MPa
压缩空气消耗量	0.8~1.4kg/min
额定金属丝最高喷镀量	用80号2×φ1.8钢丝时5.5kg/h 用80号2×φ1.6钢丝时4.3kg/h
火花有效角度	≤10°
喷射颗粒直径	5~5.3μm (喷射在水中沉淀后测量)
引力	≥196N

(二) 等离子喷涂设备

等离子喷涂设备主要包括等离子喷涂枪、送粉器、硅整流直流电源、控制系统和水冷却系统等。

表4-2-2 等离子喷涂设备的参数

型 号	数 值	参 数	标 准 功 率 (kW)	输 入 电 压 (V)	额 定 直 流 空 载 电 压 (V)		额 定 直 流 电 流 (A)		电 弧 工 作 电 压 (V)		控 制 电 流 调 节 范 围 (A)		高 频 起 弧 电 压 (V)
					高 压 档	低 压 档	高 压 档	低 压 档	高 压 档	低 压 档	高 压 档	低 压 档	
GDP-35			35		≥165	≥90			150~450	≤100	≤60	0~20	
GDP-50			60				≤500	≤900	≤100	≤55	0~20		≥5000
GDP-80			80	380±10%		≥165			氩80~1000	≤80	0~5		
									氮150~1000				

表4-2-3 各种类型等离子喷涂枪的技术参数

型 号	最 大 功 率 (kW)	电 流 (A)	电 压 (V)	工 作 气 体	控 制 形 式	送 粉 类 型	可 喷 粉 末	功 用	研 制 单 位 及 制 造 厂	备 注
771-AB	40	400~500	80~100	N ₂ 或N ₂ +H ₂ Ar+H ₂		内外送粉			九江等离子喷 涂厂	
781	50	500	90~100	N ₂ 或N ₂ +H ₂ Ar+H ₂	自动控 制装有微 型开关	内外送粉			九江等离子喷 涂厂	
PQ-1S	80	1000	80	N ₂ +H ₂ , Ar+ H ₂ Ar+N ₂			各种粉末	可喷外圆、 平面、型面	航空部625所	手提式
PQ-1J	80	1000	80	N ₂ +H ₂ , Ar+ H ₂ Ar+N ₂			各种粉末	可喷外圆、 平面、型面	航空部625所	
PQ-1N	40	500	80	N ₂ +H ₂ Ar+H ₂			各种粉末	可喷Φ102mm 米以上的内孔	航空部625所	

见图4-2-3。等离子喷涂设备有GDP-2、GDP-3、GDP-35、GDP-50、GDP-80等型号。后三种型号的等离子喷涂设备的参数见表4-2-2。

表4-2-3是各种类型等离子喷涂枪的技术参数。等离子喷涂枪的结构主要有枪体、喷嘴、钍钨电极、气、水、电连接管等，见图4-2-4。

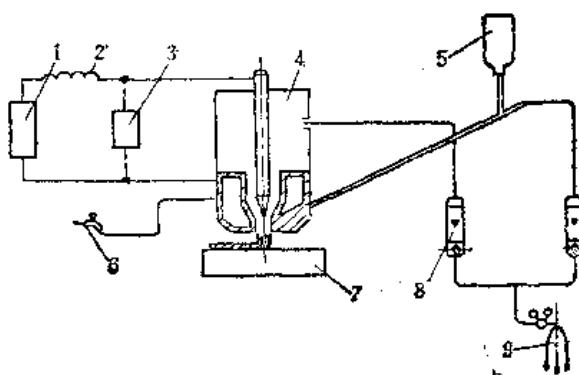


图4-2-3 等离子喷涂设备示意图

1—硅整流直流电源 2—扼流圈 3—高频发生器
4—等离子喷涂枪 5—送粉器 6—冷却水源
7—工件 8—气体流量计 9—气源

(续)

型 号	最大功率 (kW)	电 流 (A)	电 压 (V)	工作气体	控制形式	送粉类型	可喷粉末	功 用	研制单位及 制 造 厂	备 注
PQ-2N	38.5	500	80	N ₂ +H ₂ Ar+H ₂			各种粉末	可喷Φ60mm 以上的内孔	航空部625所	
PQ-3N	40	500	80	N ₂ +H ₂ Ar+H ₂			各种粉末	可喷Φ45mm 以上的内孔	航空部625所	
771B					外送粉	低熔点粉末			江苏泰兴机械厂	
771A					内送粉	高熔点粉末			江苏泰兴机械厂	
3M								可喷大内孔	江苏泰兴机械厂	
78A					内送粉	高熔点粉末			上海喷涂机械厂	
78B					外送粉	低熔点粉末			上海喷涂机械厂	
79Y								可喷内孔	上海喷涂机械厂	
79G									上海喷涂机械厂	固定式
大功率等离子喷枪	80	800~1000	80~100	Ar+H ₂ 气压0.7MPa 流量3m ³ /h			特别适于 喷Al ₂ O ₃ 、 WC等材料	空载电压 210 V	沈阳工业大学	冷却水 压力0.8 MPa 流量30 升/分 L/ min

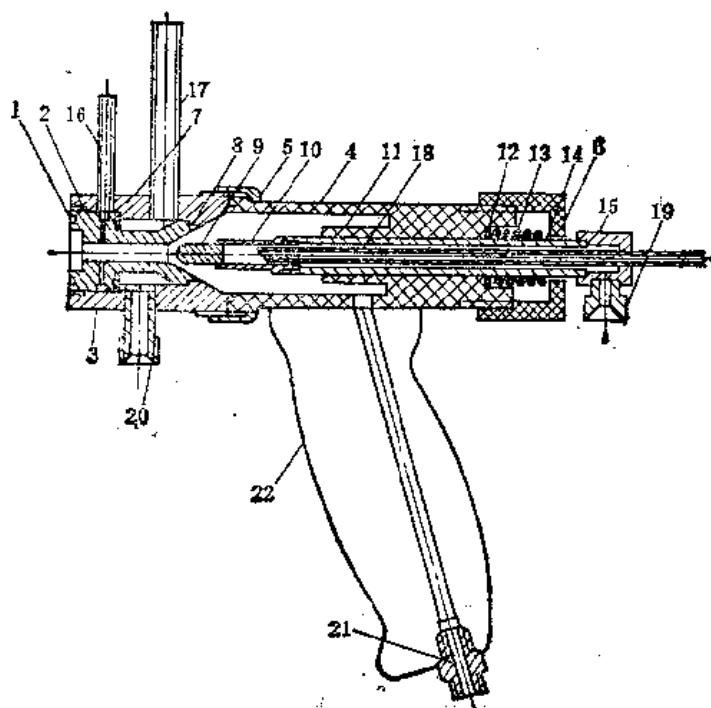


图4-2-4 等离子喷涂枪
 1—压板 2—阳极喷嘴 3—阳极外套 4—喷枪壳体 5—正负极拉紧螺母
 6—阴极调节套 7—喷嘴前密封圈 8—喷嘴后密封圈 9—钍钨棒（阴极）
 10—阴极座 11—阴极杆 12—弹簧垫片 13—调节弹簧 14—弹簧扣环
 15—阴极后座 16—送粉管 17—阳极出水管 18—阴极出水管 19—阴
 极水、电接头 20—阳极水、电接头 21—主气流接头 22—手柄

(三) 丝火焰喷涂设备

丝火焰喷涂装置如图4-2-5示，其原理如图4-2-6。

丝火焰喷涂的关键设备是射吸式气体金属喷涂枪(简称气喷枪)，它分高速、中速两种。喷涂材

料熔点在750℃以上的选用中速喷枪；750℃以下的则用高速喷枪。型号为SQP-1和ZQP-1气喷枪的性能和技术数据见表4-2-4，其结构见图4-2-7和图4-2-8。该类气喷枪必须用瓶装乙炔。可喷涂钢、铝、铜、铝、不锈钢等材料。

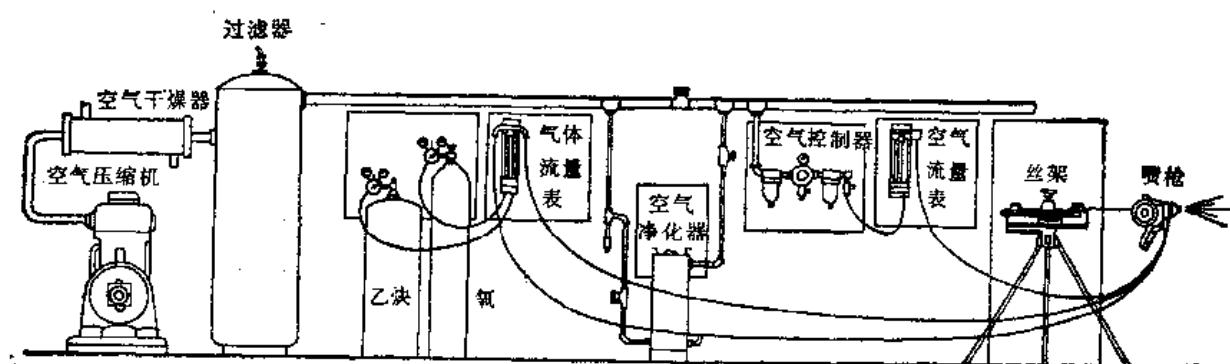


图4-2-5 丝火焰喷涂装置连接示意图

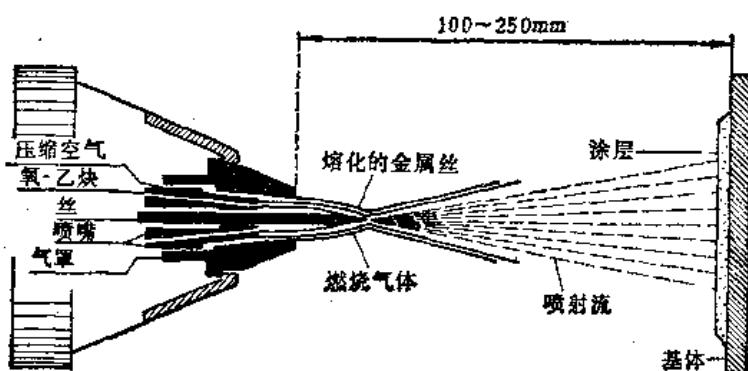


图4-2-6 丝火焰喷涂原理示意图

表4-2-4 两种气喷枪的性能和技术数据

项 目	型 号	
	SQP-1	ZQP-1
操作方式	手持、固定两用	手持、固定两用
动力源	压缩空气吹动气轮	压缩空气推动蜗轮
调速方式	离心力—离合器	离合器
使用热源	氧乙炔焰	氧乙炔焰
重量(kg)	<1.9	<2.5
外形尺寸(mm)	90×130×215	165×122×225
气体表压力(MPa)	氧 0.4~0.5	0.125~0.16
	乙炔 0.04~0.07	0.10~0.11
	压缩空气 0.4~0.6	0.4~0.6

(续)

项 目	型 号	
	SQP-1	ZQP-1
气体消耗量 (m ³ /min)	氧 0.04	0.8~1.2
	乙炔 0.01	1.0~1.55
	压缩空气 1.0	0.6~0.7
金属丝直径 (mm)	φ 2.34 (中速)	φ 2.34
	φ 3.175 (高速)	φ 3.175 (最大) φ 1.47 (最小)
火花束角度	≤4°	3°~6°
喷涂效率 (kg/h)	钢 1.8 (用 φ 2.34 80% 钢丝)	钢 2.7 (φ 2.34 80% 钢丝)
	铝 2.7 (φ 3.0 铝丝)	铝 2.54 (用 φ 3 硬铝丝)
	锌 8.2 (φ 3.0 锌丝)	硬锌 11.2 (用 φ 3 径硬锌丝)

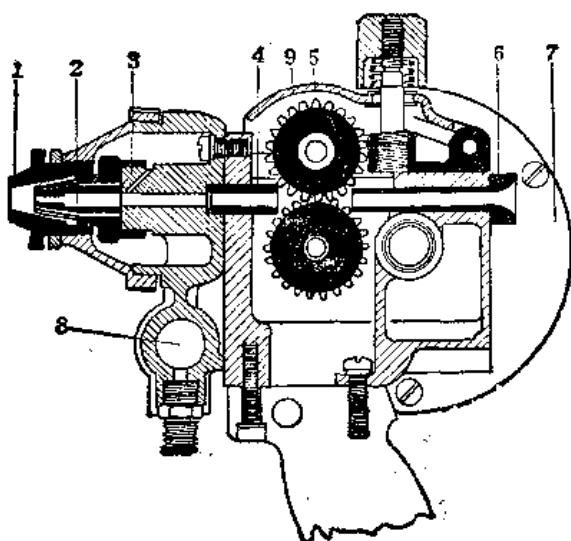


图4-2-7 中速自动调节式气体喷涂枪

1—空气帽 2—喷嘴（中间为金属丝引道，周围有6或8孔为火焰喷道） 3—混合头 4—前导管（金属丝经此送入喷嘴） 5—摇丝轮（夹持金属丝前进） 6—后导管（金属丝在这里引进） 7—汽轮壳（内有高速汽轮和自动调速装置） 8—总阀（氧气、乙炔和空气配气用） 9—压盖

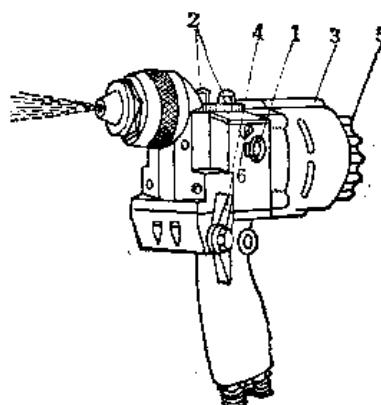


图4-2-8 SQP-1型气喷枪

1—支撑 2—送丝滚轮 3—后导管
4—调杆手柄 5—调速旋盘

(四) 粉末火焰喷涂(喷熔)设备

图4-2-9为粉末火焰喷涂装置示意图，其原理见图4-2-10。

粉末氧炔焰喷涂枪(简称喷涂枪)的结构与气焊用的焊炬类似，只是多一套粉末供给装置(粉罐)，主要型号有QSH-4、SPH-E、SPH-2/h等。几种喷涂枪的技术数据见表4-2-5。

值得指出的是，喷涂喷熔两用枪制造方便、结构简单、操作灵活、适应性强。如QSH-4两用枪即在割炬GH-300基础上改制的。

喷熔枪分有一步法枪和二步法枪。规格有中小型喷熔(俗称喷焊)枪和大型喷焊枪。中小型喷熔枪的产品规格见表4-2-6。大型喷熔枪结构图见图4-2-11，产品规格见表4-2-7。

所谓二步法喷熔即“先喷后熔”。第一步是把

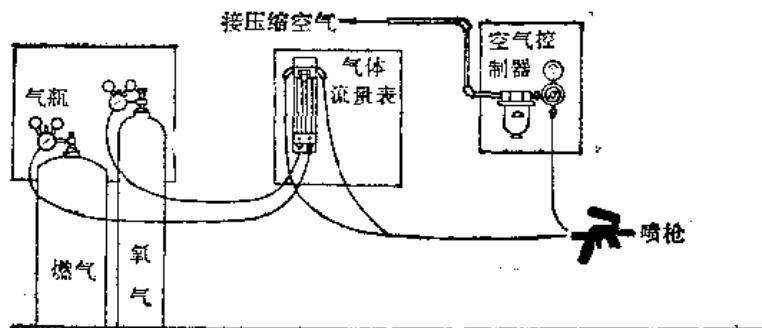


图4-2-9 粉末火焰喷涂装置连接示意图

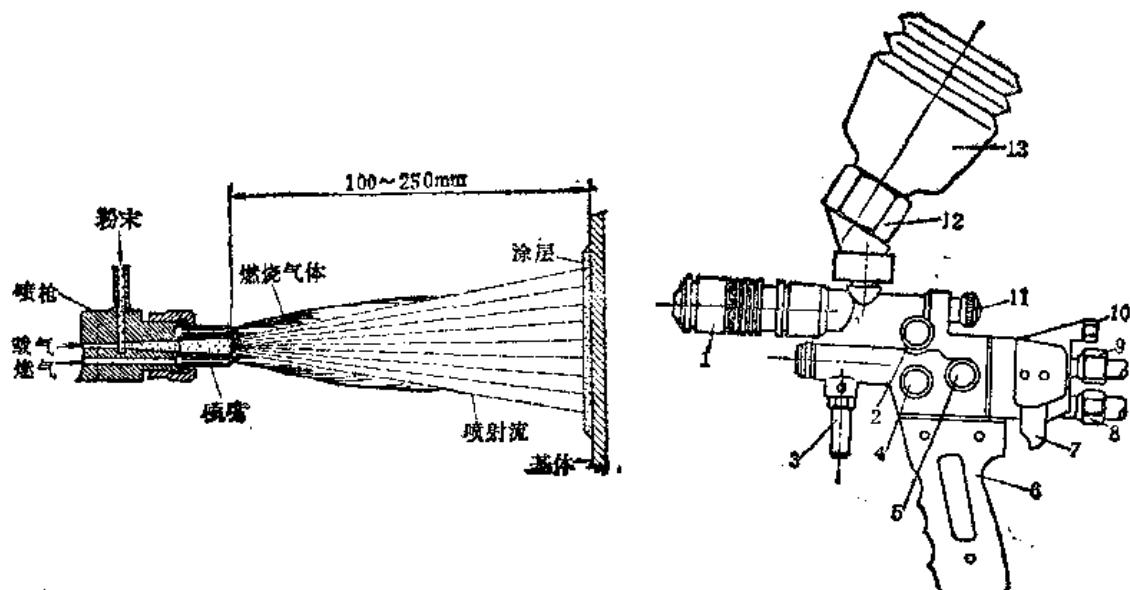


图4-2-10 粉末火焰喷涂原理图

图4-2-11 SPH-E型大型喷熔枪

1—喷嘴 2—送粉气体控制阀 3—支柱 4—乙炔阀
5—氧气阀 6—手柄 7—气体快速关闭安全阀
8—乙炔进口 9—氧气进口 10—补充的送粉气进口
11—粉末流量阀 12—可调方位粉斗座 13—贮粉缸

表4-2-5 粉末氯炔焰喷涂枪的技术数据

型号 参数	气体 使用 压 力 (MPa)		送粉量 (kg/h)	备注
	O ₂	C ₂ H ₂		
SPH-E	0.5~0.6	>0.05	6~8	均为喷涂、喷熔两用枪
SPHT-6/h	0.40~0.5	>0.04	4~6	
SPHT-8/h	0.45~0.55	>0.04	6~8	
QSP-4	0.4	0.01~0.02	2.05~6.35	

表4-2-6 中小型喷熔枪的产品规格

型 号	喷嘴号	气 体 压 力 (MPa)		气 体 消 耗 量 (m³/h)		合 金 粉 末 消 耗 量 (kg/h)	喷 焊 枪 重 量 (kg)
		氧 气	乙 烷	氧 气	乙 烷		
SPH-1/h	1	0.20	0.05以上	0.14~0.15	160~180	0.6~1.0	0.55
	2	0.25	0.05以上	0.22~0.24	260~280		
	3	0.30	0.05以上	0.35~0.37	410~430		
SPH-2/h	1	0.30	0.05以上	0.50~0.65	650~780	1.2~2.0	0.59
	2	0.35	0.05以上	0.70~0.80	800~1000		
	3	0.40	0.05以上	0.90~1.10	1000~1200		
SPH-4/h	1	0.40	0.05以上	1.65~1.75	1800~2000	2.4~4.0	1.10
	2	0.45	0.05以上	1.85~1.95	2100~2300		

表4-2-7 大型喷熔枪的产品规格

喷 焊 枪		喷嘴 形式	孔径及个数		气 压 (MPa)		气 体 消 耗 量 (m³/h)			送粉量 (kg/ h)	总 长 度 (mm)	生 产 的 厂 家
型 号	喷嘴号		预热孔	喷粉孔	氧 气	乙 烷	氧 气	乙 烷	送粉气			
SPHT-6/h	1	环 形	环 形	φ 2.5	0.4	0.04以上	0.9~1.2	0.78~1.0	1.20~1.70	4~6	210	②
	2	梅花形	φ 0.7×12	φ 2.8	0.45		0.5~0.8	0.43~0.70	0.80~1.80			
	3	梅花形	φ 0.8×12	φ 3.0	0.50		1.0~1.3	0.86~1.15	1.30~2.30			
SPHT-8/h	1	环 形	环 形	φ 2.8	0.45	0.04以上	0.9~1.2	0.78~1.0	1.20~2.20	6~8	390	②
	2	梅花形	φ 0.8×12	φ 3.0	0.50		1.0~1.3	0.86~1.15	1.30~2.30			
	3	梅花形	φ 0.8×12	φ 3.2	0.55		1.0~1.4	0.9~1.20	1.30~2.40			
SPH-C	1	—	φ 1.2×5	—	0.50	0.05~0.10	1.3~1.6	1.1~1.4	—	4~6	730~ 780	②
	2	—	φ 1.2×7	—	0.55		1.9~2.2	1.6~1.9	—			
	3	—	φ 1.2×9	—	0.60		2.5~2.8	2.1~2.4	—			
SPH-D	1	—	φ 1.0×10	—	0.50	0.05~0.10	1.6~1.9	1.40~1.65	—	4~6	730 780	②
	2	—	φ 1.2×10	—	0.60		2.7~3.0	2.35~2.60	—			
SPH-E	—	—	—	0.5~0.6	0.05以上	—	—	—	—	6~8	—	①

注：生产厂家数字代号：①——上海喷涂机械厂；②——上海焊割工具厂。

表4-2-8 重熔枪的产品规格

型 号	喷嘴号	喷嘴孔径 (mm)	气 体 压 力 (MPa)		气 体 消 耗 量 (m³/h)		长 度 (mm)	重 量 (kg)
			氧 气	乙 烷	氧 气	乙 烷		
SCR-100	1	0.8×13	0.40	0.05~0.1	1.4~1.6	1.3~1.5	580	0.910
	2	1.0×13	0.50	0.05~0.1	2.7~2.9	2.4~2.6	645	0.940
	3	1.2×13	0.60	0.05~0.1	4.1~4.3	3.7~3.9	710	0.970
SPH-C	大 号	—	0.45	0.07	4500 L/h	2500 L/h	—	—
	中 号	—	0.45	0.05	2620 L/h	1200 L/h	—	—
	小 号	—	0.4	0.05	1200 L/h	534 L/h	—	—

粉末喷涂到基体材料表面上；第二步用另外的热源对喷涂层进行重熔处理。重熔处理用大型焊炬或重熔枪均可。重熔枪 SPH-C 和 SCR-100（上海焊割工具厂产品）的产品规格见表 4-2-8。重熔枪还可用于大面积喷涂前的预热。

（五）热喷涂工艺装备

热喷涂常用的几种工艺方法如前所述，各自专用的工艺装备则不再详述。下面介绍几种工艺方法所通用的工艺装备——工件粗化处理设备，即喷砂机和电火花拉毛机。

喷砂机有吸式和压式两种吸式喷砂机适于小型零件，主要以氧化铝作为磨料。压缩空气压力为 $0.5\sim0.63\text{ MPa}$ 。压式喷砂的压缩空气压力为 $0.14\sim0.28\text{ MPa}$ 。氧化铝砂粒和吸式相同，粒度以 $18\sim24$ 目或 $60\sim80$ 目为宜。

电火花拉毛机主要用于淬硬热处理过的工件粗化处理，实际是一个简单的交流变压器。初级电压 $380/220\text{ V}$ ，电流 $9/15, 5\text{ A}$ ，次级电压 $4\sim9\text{ V}$ ，电流 $100\sim340\text{ A}$ 。铁芯材料选用 D43 热轧硅钢片；磁导体结构选用“日”字型，铁芯厚度 84 mm 。绕组为 $1\text{ V}/匝$ 。初级绕组采用的是 $\phi 2.02\text{ mm}$ 双玻璃丝包线，单根绕 330 匝，层间用 0.1 mm 青壳纸绝缘；次级绕组采用 $3.05\times7.4\text{ mm}$ 双玻璃线三根并绕 2 匝、 3 匝、 4 匝线圈各一只，然后将三只线圈串联，成为一只 9 匝的线圈。三只线圈串接接点即为抽头线。层间采用 0.5 mm 黄纸板绝缘。为便于冷却，线圈和线圈的间隙约 10 mm 。

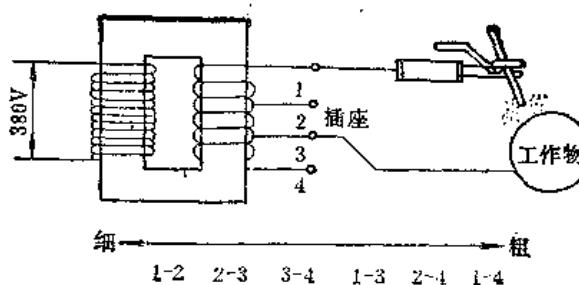


图 4-2-12 电火花拉毛机工作图

工作时，工件接一个电极，另一电极为手持镍条，两个电极接触与分开时产生电火花，并有一部分镍熔融在工件表面上，于是工件便被拉毛，成为被灼烧的凹凸而带有泡沫状的毛糙表面。图 4-2-12 所示即电火花拉毛机的工作图。次级线圈上的四个抽头，1、2 接法电流最小，1、4 接法电流最大。

第 3 节 热喷涂工艺

影响热喷涂涂层质量的因素很多，与喷涂喷熔种类有关。实践证明，只要严格执行工艺操作规程，注意下列工艺因素，涂层质量可以得到保证。

（一）工件表面的准备

1. 凹切

凹切是指为提供容纳热喷涂层的空间在基体材料或零件上车掉或磨掉的尺寸。当轴的磨损不平时，为省工省料，可分步凹切，见图 4-3-1，轴端头按图 4-3-2 和图 4-3-3 的正确方法处理。

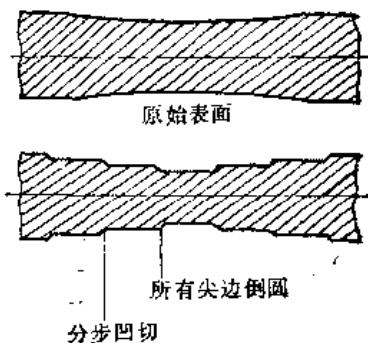


图 4-3-1 分步凹切

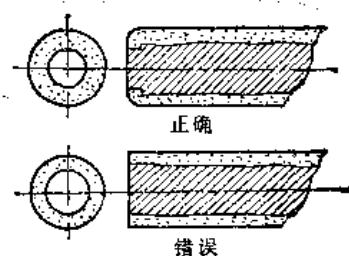


图 4-3-2 通过轴端头的涂层

轴类零件的凹切深度为涂层精加工后的厚度。为满足精加工要求，涂层厚度应为凹切深度加上精加工余量。轴类零件最小涂层厚度见表 4-3-1。精加工余量与加工方法、涂层表面粗糙度及均匀程度有关。车削加工时精加工余量留 $0.3\sim0.6\text{ mm}$ 就够了；磨削加工时，可酌情减少。紧配合件喷涂时，一般不留磨损余量。轴类零件喷涂步骤见图 4-3-4。当零件有气孔或表面缺陷时，应采用一些正确

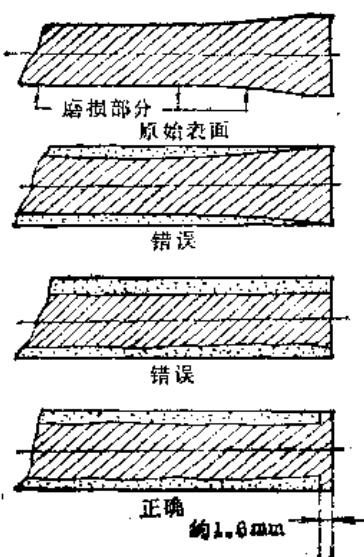


图4-3-3 轴端头的凹切肩部

表4-3-1 普通轴类零件的最小涂层厚度

轴的直径 (mm)	最小涂层厚度 (在半径方向上, mm)
≤25	0.25
25~50	0.37
50~75	0.50
75~100	0.62
100~125	0.75
125~150	0.87
≥150	1.00

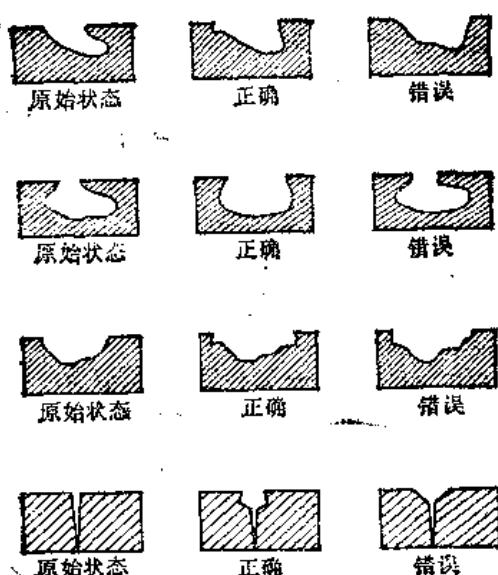


图4-3-5 修补气孔和裂纹的凹切方法

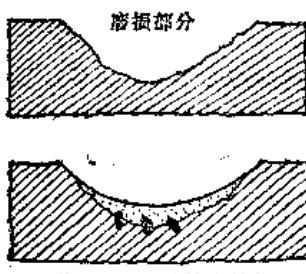


图4-3-6 在磨损的表面上“裁丝”

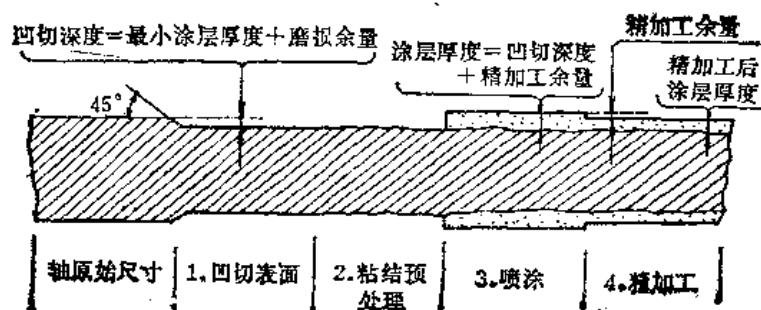


图4-3-4 喷涂轴类零件的四个步骤

的处理方法加以处理，参看图4-3-5。为加强涂层结合力，可采用裁丝法再热喷涂，见图4-3-6。为减少涂层边缘的收缩应力，可在棱角处开槽，槽宽要大于槽深，参见图4-3-7。

此外，为保证喷涂层的粘结性良好，要求被喷涂零件表面有不小于45°的喷涂冲击，为此被喷涂表面的棱角和尖边都应圆滑过渡，倒圆半径不小于

0.8mm。

2. 清理

清理即清除油污、铁锈、漆层，使工件表面洁净。四氯化碳除油效果较好，不会在零件上残留下薄膜，但四氯化碳对人体有害，操作时要谨慎。火焰烘烤除油适合于多孔状铸件的清理，其中，氧炔焰烘烤除油最常用。有时为除油至净，需反复多次烘烤除油，才能获得满意效果。值得注意的是，加热除油后工件表面往往生有氧化皮、锈蚀之类的硬沉积物，所以，除油后工件表面一定要用喷砂或砂纸打光才行。

3. 表面粗化

常用的粗化方法有喷砂、开槽、车螺纹、滚花等，这些方法可单用或并用。

喷砂可用多角铁丸或氧化铝砂。喷砂后应尽快

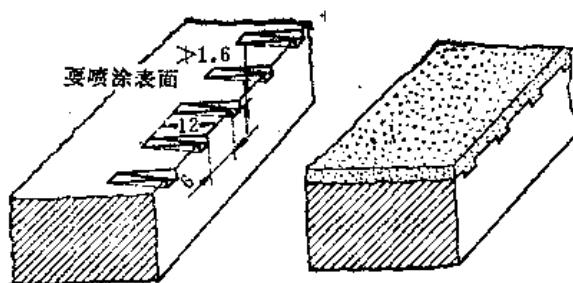


图4-3-7 平面上喷涂时边缘开槽的情况

热喷涂，一般间隔不得超过两小时，活性材料不得超过半小时，在这段时间内零件应置于清洁干燥的环境中。值得注意的是喷砂用压缩空气必须清洁。

开槽、车螺纹、滚花等粗化方法以 $R_a 6.3 \sim 12.5 \mu\text{m}$ 为宜，机加工过程不加润滑剂和冷却液。

硬度较高的工件表面可用电火花拉毛机进行粗化。图4-2-12的1、2接法电流最小，适于细螺纹；1、4接头电流最大，适用于粗螺纹。拉毛时，将镍丝在螺纹上面先作纵向移动，使整个表面全部拉毛，然后在轴的两端、键槽和油孔的边缘用点触方法再拉毛一遍。对薄涂层工件慎用此法。

直接喷钼也是一种粗化方法。此法不削弱原工件的强度，又可以多次喷涂，但钼丝昂贵，且不能与紫铜、黄铜、青铜、镀铬层和氮化钢等基体表面相结合。

4. 非喷涂部位的屏蔽保护

保护零件的非喷涂部位的方法通常有以下几种：

(1) 胶带保护 胶带由不燃的玻璃布或铝箔涂以耐热胶制成。该胶必须保证在喷涂的高温下不流淌、不污染工件。胶带保护法适用于形状复杂、制作夹具进行保护困难的工件。

(2) 化合物保护 该化合物一般为流体状态，便于涂刷，并且事后还应容易除掉。常用的有硅油溶剂、有机硅树脂、水玻璃等。

(3) 机械保护 即用屏蔽材料（玻璃布和石棉布等）将非喷涂部位遮蔽起来。有必要时，应按零件形状制作相应夹具进行保护，注意夹具材料要有一定强度，且不得使用低熔点合金，以免污染涂层。有油孔、键槽的工件，喷涂前要将油孔及键槽用石墨块堵住，堵孔一般至平即可，也可高出基面1.5mm左右。

总之，工件表面的制备必须认真对待。擦伤和

疲劳层必须除掉，油污锈蚀务必除净，此外还要进行相应的粗化处理，才能保证热喷涂质量。喷涂比喷熔的工件表面制备要更严格些，才能获得满意的效果。

(二) 热喷涂的工艺参数

热喷涂按其种类不同，工艺参数也不同，但它们的共同点有以下几个：

(1) 热源 火焰喷涂中，基本不用丙烷、天然气、氢气等作为燃气，因为这些燃气与氧燃烧时火焰温度很低，达不到应有的火焰能率，从而喷射粒子的速度满足不了工艺需要。

氧炔焰喷涂时使用氧与乙炔比例约为1:1的中性焰，温度约3100°C，氧化焰最高温度可达3317°C，但很少达此温度；电弧喷涂最高温度5538~6649°C；等离子喷涂最高温度为11093°C。可见对快速加热和提高粒子传送速度来说，等离子喷涂最佳、电弧喷涂居次、氧炔焰喷涂最差。

(2) 喷涂材料 电弧喷涂和丝火焰喷涂时，喷涂材料金属丝直径与热源功率要匹配，以获得最佳涂层。粉末火焰喷涂和等离子喷涂时，粉末粒度的大小、载气的流量及粉末传送速度都有要求。火焰喷涂时，粉末粒度以不同大小充分混合均匀分布的使用效果最佳。否则，粒子太细则其在飞行过程中速度骤减，沉积效率和涂层密度都较低；粒子太大，则要求较多的热量和较长的加热时间，因而影响喷涂功率和载气的流量。送粉气体（载气）的流量以把粉末送入火焰中心为适度。载气流量小则粉末透过火焰中心落下流失；载气流量大则粉末送不到火焰中心就飞散失。

(3) 喷涂距离 喷枪到工件的距离直接影响喷涂粒子和基体撞击时的速度和温度。火焰喷涂的喷涂距离一般为100~200mm，等离子喷涂取50~100mm；电弧喷涂为180~200mm。

(4) 喷涂角度 喷涂角度即喷射流锥面的中心与基体被喷表面之间的夹角。喷涂角度以90°为最佳，但无论如何，喷涂角度不得小于45°，否则会产生阴影效应，见图4-3-8。

(5) 喷涂的面速度 面速度即基体表面与喷枪的相对速度，一般取30.5~100m/min。喷涂操作中，为防止产生局部热点和表面氧化，应采用较高的面速度。面速度的控制宜自动或半自动化，或喷枪移动或基体移动。大面积喷涂时，每个行程的

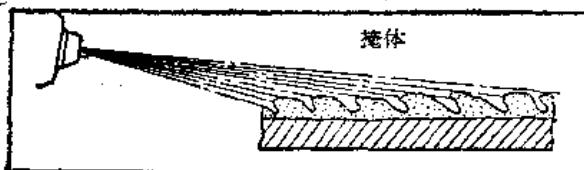


图4-3-8 由于喷涂角度太小而产生的阴影效应

宽度要充分搭接，以保证喷涂层的平坦。

(6) 预热温度 大多数情况下，喷涂前都应对工件喷涂部位稍加预热，旨在除掉基体表面的潮气、降低涂层收缩应力，避免涂层产生裂纹。预热往往用氧炔焰的中性焰或轻微碳化焰进行，温度控制在70~150℃，最高不得超过270℃。

(7) 冷却 为防止过热和较大变形，在喷涂全过程中，基体的整体温度应保持在70~80℃以下。为此，方法有三：1) 控制喷涂面速度；2) 增加冷却介质（如冷却空气流）；3) 间歇喷涂，但间歇时间不太长。

(三) 热喷涂操作

1. 电弧喷涂

(1) 喷涂规范的选择及其要求 喷涂质量的好坏，不仅和粗化、洁净很有关系，而且和材料及各种有关参数都有很大关系。因此，在喷涂加工中，除选用适当的工艺规范之外，操作方法也是很重要的。

1) 材料

① 喷涂用材料一般应考虑喷涂后涂层硬度高一些，且不易碎裂。所用钢丝表面应光洁、无锈、无油，以防止导电不良，影响断弧。因此用于曲轴、直轴的喷涂时，最宜选用碳份高而收缩率小的一种，一般用的是70号或80号高碳钢丝，其直径为 $\phi 1.6\sim\phi 1.8\text{mm}$ 。

② 烘缸滚筒上喷不锈钢选用材料一般为1Cr18Ni9Ti，最理想的是超低碳不锈钢。这和焊接的要求和理论相同。

2) 工件线速度和喷枪的移动量 熔解的金属被压缩空气吹射到工件表面时，金属微粒的温度虽然减低了不少，但仍较高，加上电弧的热气流喷射，所以如果集中地向某一点喷涂，这一点的温度会相当高（甚至会发蓝转到发红）。冷却后，这一点的涂层即行碎裂，而在接邻处将有大量的碳灰和夹杂

物出现，所以，喷涂时喷枪必须具有一定的线速度和移动量。但当工件速度太快时，喷涂点切线处成滑射角如图4-3-9所示，这样对喷涂层附着力有影响，应适当减低速度，同时喷枪的喷射角度应向工件转动方向或一仰角。喷枪移动太快时，涂层产生螺旋线，使最终的涂层产生象螺纹式的夹灰层，并且喷出的涂层厚薄不一，所以移动量应比喷涂的火花宽度略小一些。

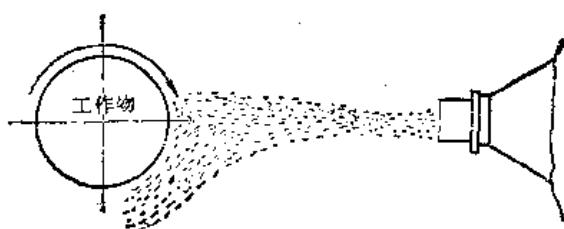


图4-3-9 工件速度太快时的情况

一般 $\phi 70\sim 100\text{mm}$ 轴颈的曲轴直轴的线速度可以选在 $7\sim 12\text{m/min}$ ，喷枪移动量 $5\sim 10\text{mm/r}$ （工件）。 1m 左、右直径的烘缸滚筒喷不锈钢时，工件线速度在 60m/min 左右，喷涂移动在 $18\sim 22\text{mm/r}$ 。

3) 喷涂距离 喷涂距离一般在 $180\sim 200\text{mm}$ 。喷出的金属微粒的温度随枪口与工件表面的距离的增加而减低，距离越近，收缩力越大（对圆的工件则附着强度越高），反之则收缩力越小。所以在圆柱体上喷涂时，工件温度掌握在70~80℃时，可以适当地缩短距离。

4) 空气压力 工作时一般为 0.55MPa 。气流速度越高，喷涂时空气压力越高，喷出的金属微粒越细致，对工件的撞击也越猛烈，这样促使金属涂层相互撞击嵌合越好，喷涂层的附着力也随之增高。但它也有一个缺陷，即空气压力过高时，微粒保持塑性状态时间越短，使涂层和工件与涂层本身之间嵌合作用下降，又将降低附着温度和涂层本身强度。所以在喷涂时若提高空气压力，则同时必须缩短其喷射距离，一般缩短到温度不超过工件温度在(70~80℃)时为宜。

5) 喷涂用电源 用直流电流时电弧焊的飞溅现象较小，电弧也较稳定。而喷涂用的是裸线作电极，要使喷涂连续进行，电弧必须稳定不断。同时铁渣飞溅厉害时，飞溅物易于堵塞喷口，因此喷涂以采用直流电流为宜。

由于各种直流焊机的外特性不同，在喷涂时的

电流、电压规范也不同，取何种数值恰当较难确定（一般焊机的工作电流在100~130A，电压在30~56V之间），须视直流焊机的特性去调整而定：

① 先将焊机上的调流手盘调整到最低档（控制箱上的电压表有低的空载电压）；

② 喷枪送丝速度选择在2m/min（即捲丝轮20r/min）左右，使两根钢丝在喷头前面短路交叉，再关闭电动机，停止送丝；

③ 先转动“连锁开关”至一半处，视空气通路后，空气压力是否高于0.4MPa。当高于0.4MPa时，则可将“连锁开关”全开，这时可见控制箱上电压表降至“0”值，而电流表上指针很高，喷枪上交叉的钢丝未熔化；

④ 立即调整焊机，由最低档向高档处逐渐调整，直到有一束短暂的火花喷出（同时听到一个微弱的爆烈声）将交叉的钢丝熔断，成为断路。这时，电压上升到这台焊机在使用SCDP-3型喷枪时的空载电压；

⑤ 开动电机连续喷射，当喷出的涂层有少许片状亮斑或火花（不是电弧区），白亮刺眼，可稍许将焊机向低档处调整。这样，就可确定这台焊机的工作电流、电压是喷涂时的恰当参数。

6) 钢丝的给进速度的调节 送钢丝速度的快慢虽然不会使两根钢丝的聚焦点有所变动，但太快与太慢会产生两种不良现象。太快，则熔解区域（点）伸出空气帽口的外面太远，受到帽沿口空气的扩散作用使钢丝变粗而不够集中；太慢，则熔解区域缩小入空气帽里，使钢丝提前熔成液体，这样，飞溅到焊缝邻近的钢点也会牢固地粘结在工件上面。此外，还会在空气帽内粘结，造成火花束偏歪，甚至使两根钢丝短路而把头部零件烧毁。调节到两根钢丝的熔解区（点）刚刚在空气帽口的外面或与其齐平，这是保证涂层质量和保护喷头正常使用的要素之一。

（2）喷涂操作

1) 喷涂一般工件时，应先从工件两端开始喷射，然后由一端向另一端往复喷射，如图4-3-10。喷涂大型工件时最好向一个方向移动喷枪，而不是往复来回地喷射。因为往复喷射时会将碳化物很不均匀地带到工件上（涂层表面），使涂层产生夹层，而且工件两端在短时间内受到两次加温，会产生涂层碎裂。

2) 若一次喷涂层太厚，易使涂层应力累积增

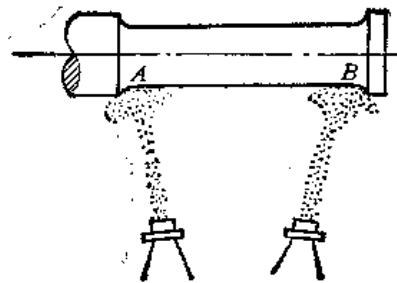


图4-3-10 喷枪移位（从A→B，再从B→A）

加，容易碎裂，可分数次进行喷涂（即采取间隙喷涂法）。但应注意再喷涂的涂层在面的交界处有稍许夹层，它对附着力有些影响，因此停喷时的尺寸范围应在标准尺寸以下，如已到标准和加工余量处，均应一次喷好，不宜间断。

3) 中途断弧或开、关喷枪时，喷枪口不宜对着工件。因开、关喷枪时有粗粒喷出，而在正常喷涂断弧时，如不立即将喷枪离开工件，冷空气会击碎涂层。

4) 喷好的圆柱体工件，应让其继续运转，自行冷却，以防冷却不匀，使涂层碎裂。

5) 喷涂时，如中途转动机械停止，须立即将喷枪移开工件，否则涂层局部迅速堆厚，产生高温，导致碎裂。

6) 操作者应带防紫外线的有色眼镜，且应位于喷枪后面操作。

(3) 喷涂时的故障及其消除方法 列于表4-3-2。

2. 丝火焰喷涂（简称气喷涂）

(1) ZQP-1型丝火焰喷涂

1) 准备工作

① 乙炔、氧气和空气的准备 在使用氧气及乙炔前，应将调节器及橡皮管在接装到喷枪以前空吹一吹，这样可以避免杂物被送到喷枪里去。

压缩空气经过冷凝滤清，确保没有可见的水汽和油雾后用橡皮管接到喷枪上去。

三种气体全部接好以后，将喷枪总阀开足，然后调节气体压力，氧气压力应调到0.12MPa，乙炔压力调到0.11MPa，空气压力调到0.45MPa然后关闭总阀。

② 金属丝的准备 将合乎规格（表面清洁无锈，直径一般为2.3mm，软金属为3mm）的金属

表4-3-2 电弧喷涂时的故障及其消除方法

故 障	产 生 原 因	消 除 方 法
1.电弧不稳定	(1) 由于喷涂用的送裸体金属丝材，电压太低时，金属丝稍一扭动，易于断弧 (2) 电流低时熔解金属丝的热量不够，即行断弧 (3) 前导管出口扩大，失去了强制两根金属丝交叉在指定焦点的作用 (4) 使用金属丝太细（与(3)情况相同） (5) 金属丝有锈斑或有过多的油脂，使导电断续，引弧较困难 (6) 电位器磨损 (7) 直流焊机或电路间短路，钢丝盘架有故障等 (8) 送丝滚丝轮部有磨损，使金属丝打滑 (9) 送丝滚丝轮上有较多油脂或金属屑末，使金属丝打滑 (10) 喷枪上电动机碳刷太短，或弹簧太松太紧	使电弧电压保持在35~40V左右 使电流保持在100~130A左右 将前导管旋转120°再用，或更换新导管 选用Φ1.8或1.7金属丝 擦去锈斑，抹去油脂 换新 检查修理 换新 洗净刷除油脂和屑末 换新，将弹簧调紧
2.火花散乱	(1) 空气帽口扩大或单面烧损 (2) 输送金属丝太快，熔解区（点）在空气帽口外面较远 (3) 空气压力低	换新 将输送速度调慢，使交叉点在空气帽帽口外0.5~1.0mm处或与空气帽口平齐 提高或调整至0.5~0.55MPa
3.火花偏吹	(1) 有金属氧化物结塞在空气帽口的一边 (2) 由于直流“+”、“-”极关系，熔解金属丝有先后。当两根金属丝输送太慢，使熔解区（点）进入空气帽沿口里面，熔解时产生偏斜角	降低电焊机电压电流，或将空气帽向里旋进一点 略增加输送速度，使熔解区（点）与空气帽口齐平或伸出0.5~1.0毫米。同时也可以提高空气压力，使偏斜的微粒被迫约束集中喷射
4.电弧大，金属飞溅	(1) 电压高时，使两根金属丝未接近熔解区（点）即行熔解，电弧光反射大，促使金属微粒乱吹 (2) 压缩空气压力低，使金属微粒无法约束集中，火花四散	降低电压 提高空气压力或将空气帽口向外旋
5.涂层粗糙	(1) 空气压力太低 (2) 金属丝输送太快 (3) 空气帽旋得太近 (4) 喷枪离工件过远	提高压强 减慢速度 将空气帽旋出少许 缩短距离
6.涂层变色	(1) 电流过高 (2) 工件线速度低或喷枪移动慢 (3) 工件小或薄，而喷涂温度超出70~80℃	降低电流在100~110A之间 提高线速度，增加移动量 可采用间隔喷涂或用空气边吹边喷
7.烧毁前导管和喷头	(1) 前导管拉出过多，使两个电极容易短路 (2) 电流太高或电压太高 (3) 空气管路内堵塞或压力太低	调整两根前导管的间距在2.9~3.0mm之间 将电焊机的调节旋钮向低处调整 检查管路或提高压力，必要时加大逆控制箱的空气管路直径

丝或圈地放在金属丝架上。拉出一个头并校直一段，以锉刀挫去毛头。打开喷枪压盖，从后导管将金属丝塞进，经过前导管及喷嘴，伸出空气帽外约10mm。

合上压盖并旋紧制紧钮。

此时喷枪的准备工作已基本完成。

2) 校枪和喷射 在喷射以前，喷枪应试运转一次。当开启总阀时，空气涡轮应该没有任何阻碍地飞转起来，“调节部分”也应能随意调节快慢。单阀扳动时也应感到轻重适中。经过这样的试运转以后，就可进行喷涂了。

3) 点火 将喷枪上的总阀向下开足三秒钟，然后回到45°左右位置，用打火机在喷枪前引火，喷枪正常时，一下就能点着。点火时喷枪不能指向工件，以免有一层黑灰熏在镀层上。

点着后立刻开启全部总阀。

4) 金属丝进给速度的调节和火焰的最后调节这一工序最为重要。它决定着镀层的质量和喷射

的效率。将氧气压力微微提高或减少以得中性火焰，这时立刻发现火花特别浓而集中，颜色呈淡红色。再将调节圈缓慢地顺转，以提高金属丝的进给速度，直到金属丝频于熔解，然后倒转，直到火花浓密集中为止。这就是效率最高、质量最好的现象，也就是可燃气体的热能被充分利用的现象。这样就可向工件进行喷镀，在工件长度内均匀地来回喷射直达要求为止。

5) 技术参数 喷口与工件距离——喷钼，70~80mm；喷钢，100~150mm；喷铝、锌150~200mm；喷其他材料，100~150mm。

一般 $\phi 70\sim100\text{mm}$ 圆柱工件的线速度5~12m/min，喷枪移动量3~10mm/r(工件)。

1米左右直径的烘缸滚筒喷不锈钢的工件线速度在30~60m/min，喷枪移动量5~15mm/r(工件)。

6) 喷涂时的故障及其消除方法 列于表4-3-3。

表4-3-3 丝火焰喷涂时的故障及其消除方法

故 障	产 生 原 因	消 除 方 法
1.点不着火	(1) 氧气表上的读数不可靠，与实际压力有出入 (2) 喷嘴小眼堵塞 (3) 混合室的环形槽不洁 (4) 总阀上的润滑油太多，预先开启的凹槽堵塞 (5) 空气压力太高 (6) 乙炔气内有水份 (7) 混合室内透气孔堵塞 (8) 乙炔或氧气皮管内有外来物的堵塞 (9) 乙炔压力虽有0.11MPa但因皮管太长，中途阻力太大，到喷枪时没有0.11MPa	应用其他表核对一下 清理洁净 清理洁净 清理洁净 降低至0.4MPa或少开总阀，限制空气流量 将乙炔发生器内几个清洗设备拆下清洗烘干 清理透气孔 倒吹皮管或拆下清洗 皮管长度最好不超过5m
2.点火后火焰忽亮忽暗	(1) 氧气压力太低 (2) 金属丝卡住或送进量不均匀	徐徐增加氧气压力，至火花浓而有力为止 金属丝卡住，可左右旋转即能送进。送丝轮上有多量的油渍，宜用细钢丝刷清除之
3.回火	(1) 喷嘴与喷嘴座有外来物阻碍或润滑油已吹去，或螺帽没有压紧(有巨大的爆炸声) (2) 氧气压力太高或太低，太高时有爆炸声发生，太低时先有嘘叫声而后再发生小爆炸声 (3) 金属丝进量太慢，以致混合气体在未出空气帽前已把金属丝熔解，形成尖端氧化，使空气帽内火焰反射，金属丝尖端熔成饼状，覆盖或部分粘着于喷嘴头上，盖没喷嘴小孔	立即关闭总阀，停三、四秒钟。如再点火时仍回火，则需拆下喷嘴研磨，加润滑油再装合，润滑油宜少，调节适当 适当调节氧气 立即关闭总阀，将压盖制紧螺丝松开，抽出金属丝，拆下空气帽，并清理帽内粘着的氧化铁。清理喷嘴可能粘着的金属粒屑，必要时以通针疏通小孔

(续)

故 障	产 生 原 因	清 除 方 法
3.回火	(4) 空气帽旋得太紧，使喷嘴头与空气帽内间隙太小，造成空气不够吹冷喷嘴与空气帽，金属丝也会在内熔解结成饼状	方法与(3)相同，但需将空气帽向外旋出些以增大间隙，至正常为止
4.金属丝送进不畅	(1) 送丝轮油渍太多而打滑 (2) 金属丝锈斑太多 (3) 喷嘴内钢套筒使用日久而缩短缩小 (4) 金属丝弯曲太多	清除油渍 以细砂纸擦拭光亮，并薄薄抹上一层油 以细钢丝抹上些细氧化铬研磨，或更换钢套筒 矫直金属丝

(2) SQP-1型丝火焰喷涂

1) 准备工作 开动空压机，空运行几分钟后，放掉油水分离器和存气筒底部的油水残液，使空气压力保持在0.6MPa。按乙炔发生器的指定方法准备好乙炔和氧气，将喷枪上的阀杆顺转180°，调整乙炔和氧气的压力分别为0.05~0.06 MPa和0.4MPa，然后将阀杆回到0°。

2) 点火前的准备 参见图4-2-8，将支撑1顺转，使一对送丝滚轮2分开。所用线材（例如钢丝、铜丝等）从后导管3塞入，通过喷嘴伸出6~8 mm。逆转支撑1螺钉，使一对送丝滚轮2夹紧线材。

3) 点火 将阀杆手柄4顺时针旋转90°（此时感觉到一个钢珠落入凹槽），用打火枪或其他火种在喷枪前面点火，点着后立即将阀杆手柄4旋到180°位置，见图4-3-11，这时就在喷枪前出现火花（有些材料如铝、锌等不会出现明显火花）。

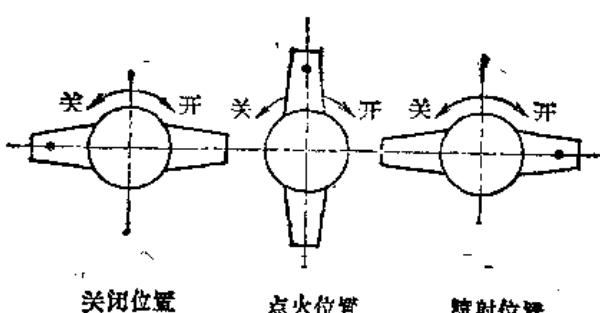


图4-3-11 阀杆手柄在喷涂前后的位罝

4) 调节火花的密集度（即熔融材料的细度）

为了达到最高喷涂效率、最好涂层质量，和充分利用可燃气体的热量，必须进行微细调节（调好后就保持下来，以后一般不再要调节）。

微调时只调氧气压力和线材的输送速度，乙炔

和空气的压力不要调节。

如果火花不够浓密，散火较多（以喷钢为例），应首先将氧气压力微微降低；如发现火花太粗，甚至钢丝只发红而不熔化，那就将氧气压力微微升高到火花浓密为止。然后将调速旋盘左旋或右旋使火花进一步浓密，使角度达到最小为止，这表示气体用量和钢丝输送速度取得平衡，恰到好处，此时即可对工件进行正常喷涂。如停喷15min以上，须将所有气体关闭。

表4-3-4示出了SQP-1型气喷枪故障发生原因及消除方法。

3. 粉末氧炔焰喷涂

氧炔焰粉末喷涂设备简单，操作方便，成本低廉，且劳动条件好，因而广泛用于机修等部门。一般地说，只要能用氧炔焰粉末喷涂的工件，就应优先选用之。

氧炔焰粉末喷涂的操作大部分同于气焊。具体操作过程如下：

(1) 按工件选择喷涂距离和速度 喷涂距离以100~200mm为宜；轴类零件事先要夹持到车床上，按线速度20~30m/min调整车床转速。

(2) 检查喷枪的燃烧系统和送粉系统 燃烧系统的检查即喷枪的射吸能力的检查，这点完全同于割炬焊炬的检查。粉末供给系统的检查方法是：打开送粉氧气，掀起开关手把，按住粉斗接头，这时应有吸力；堵住喷嘴出粉孔，掀起开关手把，这时应有气流从粉斗接头冲出。

检查正常后，按所需氧和乙炔的压力点火，并调整为最大的中性焰，注意焰心不得离开喷嘴端面。

(3) 装上所需喷涂粉末（事先应烘干、冷后过筛）。

表4-3-4 SQP-1型气喷枪故障发生原因与消除方法

故 障	产 生 原 因	消 除 方 法
1.点不着火	(1) 氧气压力过高 (2) 在点火位置时乙炔流量太小,原因是推开密封膜的Φ4弹簧疲劳 (3) 混合室中的氧气喷射嘴四个Φ0.5孔其中有几个孔堵塞使氧气倒吹乙炔 (4) 混合室上面的O形密封圈压扁失去弹性,使三种气体混乱窜气	调整到0.35~0.4MPa 更换新的 用通针清理四个Φ0.5孔 换新
2.能点着火但阀门全开时随着一个小爆声而火焰熄灭	(1) 氧气压力太高 (2) 金属丝在点火时不走,或全开时走得太慢	调整到0.35~0.4MPa 调速手盘放松1~2转
3.点火后,火焰恍惚(约1~6频率/秒一亮一暗)	(1) 氧气压力太低 (2) 金属丝走得太慢 (3) 金属丝卡在喷嘴内	调整到0.35~0.4MPa 调速手盘放松1~2转 用Φ2.3或Φ3.1钻头疏通孔道,并除去金属丝上的多量油脂
4.火花不集中(散火较多)	(1) 氧气压力太低 (2) 金属丝走得太慢	调整到0.4MPa 调速手盘慢慢松开到火花集中为止
5.部分火花向后喷射	(1) 金属丝直径太细	金属丝的直径比喷嘴套管的孔径小0.1mm,喷嘴标准直径为Φ2.3和Φ3mm两种
6.火花偏吹	(1) 空气帽与喷嘴的间隙偏离 (2) 喷嘴套管单边磨损 (3) 空气帽内有部分结渣	微微调节空气帽或将喷嘴和混合室拆下重装 换新或重镶套管 清除结渣
7.金属丝进行不畅	(1) 送丝轮上油垢太多打滑 (2) 送丝轮齿尖磨损 (3) 两个压紧弹簧太松或一紧一松 (4) 金属丝锈斑太多或油垢夹尘土,使喷嘴套管堵塞 (5) 喷铝时,铝丝表面氧化 (6) 刹车片与摩擦圈断油	清洗 翻转送丝轮或换新 调整 清除金属丝上的锈斑和油垢尘土 以布片抹上一层极薄油膜 涂油

(4) 预热 可用焊炬也可用喷涂枪进行预热,但不开送粉开关。

(5) 喷涂打底层 打底层又叫过渡层,主要用来加强涂层结合力,因该粉末价贵,故不宜喷厚。厚度最佳值为0.1mm,最大值为0.2mm。常用打底层粉末产品规格见表4-3-5。其中近年研制的镍包铝、铝包镍、镍铬包铝用得最广,而尤其以后两种工艺性能和结合强度更好些。

(6) 喷涂工作层 薄涂层工件可只喷过渡层。厚涂层工件则应按工艺需要选择合适的工作层粉末(参见表4-3-6)。注意喷涂厚度要留够加工余量。因工作层粉末不是放热型的,喷涂距离可比喷过渡层时稍近些。

对小工件和厚涂层工件,可采用间歇喷涂,以防工件温升过高。无论打底层还是工作层的喷涂,都要将喷涂的面速度控制在合理范围内。

过渡层和工作层粉末的粒度以200目左右为宜,也可不同粒度粉末充分混合后使用。几种不同规格粉末的粒度范围见表4-3-7。

(7) 喷涂层缺陷及其防止措施 见表4-3-8所示。

4. 粉末氧炔焰喷熔

该喷熔工艺分为一步法喷熔和二步法喷熔。

(1) 一步法喷熔的操作 点火前的操作与粉末氧炔焰喷涂相同。点火后调为中性焰或轻微碳化焰(轻微碳化焰适用于钴基、铜基合金粉末)对工

表4-3-5 氧炔焰喷涂常用打底层粉末

材 料	化 学 符 号	名 义 成 分	金 属 间 化 合 物	涂 层 性 能
镍包铝	Ni/Al	83/17	Ni ₃ Al, NiAl	自粘结, 致密, 高温抗氧化, 抗多种金属熔体和玻璃侵蚀
铝包镍	Al/Ni	5/95	Ni ₃ Al	自粘结, 致密, 高温抗氧化, 抗多种金属熔体和玻璃侵蚀, 抗高温性能好
镍铬包铝	NiCr/Al	94/6	含Cr的Ni ₃ Al	自粘结, 致密, 高温抗氧化, 抗多种金属熔体和玻璃侵蚀, 耐热和抗高温氧化性能更好
钼包硅	Mo/Si	61~65/39~35	MoSi ₂	
硅包钼	Si/Mo	61~65/39~35	MoSi ₂	
硅包铬	Si/Cr	15~52/85~48	Cr ₃ Si ₂	
铬包硅	Cr/Si	85/15	Cr ₃ Si ₂	
铬包铝	Cr/Zr	54/47	锆化铬	
钛包铬	Ti/Cr	65/35	钛化铬	
铝包镧	Al/La	25~30/75~70	铝镧化合物	
钼包铬	Al/Cr	38~40/62~60	钼铬化合物	熔点很高, 涂层致密, 具有优异的抗高温氧化能力
铬包铝	Cr/Al		铬铝化合物	

表4-3-6 国产粉末喷涂(熔)合金粉末

类别	牌 号	主 要 组 成 (%)	布氏硬度	特 性 及 用 途
镍基	Ni100	Ni、Cr23%、Si1.2%	100	耐热, 耐高温氧化。用作绝热涂层
	粉111	Ni、Cr15%、Fe7%	(HV) 150	易切削。用于轴承
	Ni180	Ni、Cr14%、Fe7%、Si0.8%、Al0.3%	180	加工性好, 耐摩擦磨损。用于各类轴承面、轴类
	粉112	Ni、Cr15%、Fe7%、Al3%	(HV) 200	涂层致密。用于泵、轴
	Ni222	Ni、Cr14%、Fe7%、Si0.8%、Al15%	222	耐蚀性好。用于印刷辊、电枢轴
	粉113	Ni、Cr10%、B1.5%、Si3%	(HV) 250	耐磨性较好。用于活塞
	Ni320	Ni、Cr14%、Fe7%、B1.5%、Si3%、Al1.6%	320	高硬度、耐磨。用于机床轴、电机、曲轴、轧辊辊颈
铁基	粉115	Ni、WC35%	(HV) 400	耐磨性好
	Fe250	Fe、Cr17%、B1.5%、Si2%、Ni10%	250	韧性、加工性好。用于汽轮机机箱密封面、轴承面
	粉813	Fe、Cr15%、B1.5%	(HV) 250	耐磨性较好。用于轴类

(续)

类别	牌号	主要组成(%)	布氏硬度	特性及用途
铁基	粉314	Fe、Cr18%、Ni9%、B1.5%	(HV) 250	耐磨性较好。用于轴类
	Fe280	Fe、Cr18%、B、Si2.5%、Ni37%	280	硬度高，耐磨，抗压性好。用于各种耐磨件
	Fe300	Fe、Cr13%、B2%、Si3%、Ni37%、Mo4.5%	300	硬度高，耐磨，抗压好。用于各种耐磨件
	Fe320	Fe、Cr15%、B2%、Si1.5%	320	耐磨性好。用于滚筒
铜基	粉316	Fe、C2%、Cr15%、B1.5%	(HV) 400	硬度高，耐磨，抗压性好。用于各种耐磨件
	Fe500	Fe、Cr15%、B3%、Si4.5%、Ni12%	500	易切削。用于轴承
	粉412	Cu、Sn10%、P0.3%	(HV) 80	摩擦系数小，易加工。用于压力缸体、机床导轨及相、部件
	粉411	Cu、Al10%、Ni5%	(HV) 150	同上，且可热喷焊
打底层末	Cu150	Cu、P0.4%、Sn8%	150	具有自粘结作用。用作打底层粉末
	Cu180	Cu、Ni5%、Al10%	180	同上，且可热喷焊
	Cu200	Cu、P0.4%、Sn8%	200	同上，且可热喷焊
	粉511	Ni、Al20%	—	具有自粘结作用。用作打底层粉末
	粉512	Ni、Al18%、Si2%	—	具有自粘结作用。用作打底层粉末

表4-3-7 几种不同规格粉末的粒度范围

粉末规格	粒度范围
粗	-100~+325目(-150~+45μm)
普通	-140~+325目(-106~+45μm)
细	-270目~-+15μm(-53~-+15μm)
很细	-325目~-+5μm(-45~-+5μm)
超细	-25~-+5μm

注：粒度范围中的-100目表示从100目的网孔中漏下。+325目表示大于325目筛网时粉末即不能通过。

表4-3-8 氧炔焰喷涂层常见缺陷及其防止措施

缺陷名称	产生原因	防止措施
涂层剥落与裂纹	工件表面不干净 工件预热不足 打底层太薄 涂层过厚而内应力大	工件表面制备要合格 预热温度要适宜并且紧接着喷涂 打底层控制在0.1mm以上 每次喷涂厚度不超过0.15mm
涂层分离	喷涂间隔太长使工件表面又脏 每次喷涂涂层太厚使内应力增大	控制喷涂间隔时间适度 控制每次喷涂厚度在0.1~0.15mm之间
涂层疏松	喷涂距离太远而粉粒动能小 每次喷粉量太大 乙炔气中含水气多 喷涂角度小 粉粒冲击力太小	喷涂距离<200mm 喷粉量要适中，使粉粒加热充足 除去乙炔中水气，用瓶装乙炔喷涂角尽量接近90° 减小喷涂距离加大火焰能率等

件进行预热及喷敷粉末，然后仍用同一热源对喷涂层进行加热重熔处理，或边喷边熔，使喷熔层与母材达到熔融互溶，形成光洁的结合强度高的喷熔层。由于喷与熔一步完成故称为一步法。

预热温度200~250°C；喷粉时火焰焰芯与工件表面距离约20mm；喷粉厚度约0.2~0.3mm；喷熔时焰芯与工件距离约6~10mm；边喷边熔操作交替进行时速度要适当，速度太快则来不及全部重熔，速度太慢则易过烧和烧损合金元素。一步法喷熔层厚度一般不大于2mm。

一步法喷熔的粉末宜选用共晶型自熔合金粉末。该粉末熔点低，流动性好。粒度宜细（200目）。

一步法喷熔多采用中小型喷熔枪，对工件热输入低，焊层易控制，工件变形小，因此广泛用于小零件或精密件的修复，也可用来对大中零件的边角处及局部修复。

（2）二步法喷熔的操作 点火前同一步法喷熔，所谓二步法即喷与熔分为二步进行即先喷后熔。喷粉前对工件进行预热到250°C，然后用重熔枪或大焊炬进行对喷涂层的重熔整理。喷粉时用二用枪则喷涂距离为200mm左右，每次喷厚0.2~0.3mm，要求涂层厚的切不可一次喷够厚度，进行多次薄喷有利于覆盖层的均匀性。喷的最终厚度应考虑重熔时厚度方面的收缩（约25%）。喷粉停止时应在火焰中明显看不到粉粒后才准继续使用二用枪进行重熔。

重熔是二步法的关键工序，是使孔隙率高的喷涂层变成连续致密的与母材实现冶金结合的喷熔层的重要步骤。重熔的操作要点是必须在热态下进行，一是有效利用热量，二是能有效地防止脱壳。有条件的话，最好用大功率的重熔枪进行重熔，若一把枪不够，可增加辅助的重熔枪或大焊炬。

重熔时也用中性焰，刚开始重熔时，喷枪喷嘴不可对准工件端部或棱角边缘，应距端部边缘30mm左右。重熔时喷嘴与工件距离为40mm左右，薄件应远些，厚大件可近些。重熔温度约1000°C左右，即在喷熔表面出现“镜面”反光时，说明粉层已熔化，重熔温度已达到。重熔的时间越短越好，以免在700°C以上高温阶段停留过长，引起粉末“发渣”，使重熔失败。

重熔后若发现加工余量不够，可在温度达到650°C左右时再喷、再熔。喷熔后工件变形应及时

矫正。注意严禁反复重熔以免烧损合金。

通常情况，紧配合件经喷熔后可不必加工，特殊情况下可进行车削、磨削加工等。

二步法喷熔的喷粉为有较宽熔化温度区间（便于重熔整理）的自熔性非共晶合金粉末。喷粉粒度选择是：中小型喷枪为150目，大型喷焊枪为150~300目。一步法喷熔粉末较二步法喷熔粉末细，二者不能混用，但是国内产的自熔性合金粉末设有按这两种操作工艺进行区分，使用时通过试验才能确定。自熔性合金即指自身能起“熔剂”作用的合金，其产品规格种类见表4-3-9。

关于喷熔层常见缺陷及其防止措施见表4-3-10。

5. 等离子喷涂

等离子能喷涂高熔点的材料，所得涂层致密、结合强度高，可用保护气体喷涂活性材料，由于热量十分集中，母材受热少，涂层稀释率低（<5%），被喷涂工件变形极小，因而常用来喷涂重要零件。操作过程如下

（1）检查电源、送粉器、喷涂枪等至正常。

（2）等离子气体的选择 推荐使用成本较低的氮气或氮氢混合气（H₂: 5%~25% + N₂: 95%~75%）；对易氧化粉末和涂层质量要求高的可选氩气或氦气。氩气纯度不得低于99.94%，氦气纯度不得低于99.99%，氮气纯度不得低于99.9%。

（3）喷涂参数 氮气等离子弧的电流一般为250~400A，电压70~90V；氩气等离子弧的电流一般为400~600A甚至1000A，电压20~40V。等离子气体流量为40~50L/min（以此决定等离子弧温度及弧长）。送粉气体流量常选为15~18L/min。粉末输送量依据设备功率、喷嘴结构和粉末特点决定，金属粉末送粉量一般为80~140g/min。喷涂金属陶瓷粉末时，喷嘴与工件距离100~150mm，喷涂金属陶瓷粉末时，喷嘴与工件距离为60~80mm。

（4）工件表面制备完毕后，即可按下面顺序进行。

1) 开动水泵，检查喷枪无漏水现象时方可起弧。

2) 打开气阀，调整好气体流量。

3) 按下高频开关，调整钨极内缩和同心度，使高频放电火花呈均匀放射状。

4) 起弧电流不应过大，应逐渐递增到正常

表4-3-9 国产自熔性合金粉末成分、性能及用途

类别	牌号	主要组成	硬度 HRC	特性及用途
镍基	Ni-05	Ni、Si2.5%、B1.5%、Fe2.5%	20	用于耐热、耐蚀600℃条件下工作的玻璃模具的修复
	Ni-06H			
	粉103铁	Ni、Cr10%、B1.5%、Si3%	25	易加工。用于玻璃模具、铸铁
	Ni-25	Ni、B1.5%、Si3.5%、Fe6%		
	F103	Ni、Cr10%、B1.5%、Si3.5%、Fe5%	20~30	用于飞机发动机排气网的等离子或火焰喷焊
	Ni-31	Ni、Cr36%、B0.2%、Si2%、Fe5%	25~30	
	粉106铁	Ni、Cr10%、B2%、Si3%	35	易加工。用于汽门、齿轮
	Ni-01	Ni、Cr10%、B2%、Si2.5%、Fe5%	30~35	蝶阀密封面、玻璃模具、汽轮机叶片、金属模具的修理
	Ni-01H			
	Ni-35	Ni、Cr10%、B2.5%、Si3.5%	35	可加工、耐蚀。用于模具冲头、齿轮面、显像管模具、轴类、汽门及阀门等
	粉101 粉121	Ni、Cr10%、B2.5%、Si3%	45	
	粉101铁 粉121铁	Ni、Cr10%、B2.5%、Si3%、Fe10%	45	可加工、耐蚀。用于轴类、汽门及阀门
	Ni-45	Ni、Cr16%、B3%、Si3.5%、Fe15%、Co10%	45	高温耐磨。用于内燃机排气阀密封面
	Ni-21 Ni-21H	Ni、Cr26%、B2.5%、Si3.5%、Fe6%	40~45	
基	F101	Ni、Cr10%、B2.1%、Si3.5%、Fe5%	35~45	用于金属加工模具、链轮、凸轮、排气阀密封面的等离子或火焰喷焊
	Ni-55	Ni、Cr17%、B3.5%、Si4%、Cu3%、Fe15%、Mo3%	55	
	Ni-02 Ni-02H	Ni、Cr15%、B3.5%、Si4%、Fe5%	48~58	内燃机活塞环、阀门、泵、柱塞及其它金属磨损件
	Ni-02B Ni-02BH	Ni、Cr15%、B3.5%、Si4%、Fe10%		
	F102	Ni、Cr16%、B4%、Si4.5%、Fe5%	≥55	用于高磨粒磨损零件、风机叶片的等离子或火焰喷焊
	Ni-03 Ni-03H	Ni、Cr18%、B4%、Si4.5%、Fe5%	≥58	
	Ni-03B Ni-03BH	Ni、Cr18%、B4%、Si4.2%、Fe15%	≥58	高磨粒磨损零件、风机叶片
	Ni-07 Ni-07H	Ni、Cr28%、B4%、Si4.2%、Fe5%	≥58	泵用密封环、金属密封面
	Ni-04B Ni-04BH	Ni、Cr15%、B4%、Si4%、Mo3%、Fe10%	50~58	金属间磨损件和有Cl-腐蚀的零件、耐酸泵的各种轴、密封环、装甲

(续)

类别	牌号	主要组成	硬度 HRC	特性及用途
镍基	Ni-04 Ni-04H	Ni、Cr15%、B4%、Si4%、Mo3.6%、 Fe5%	54~60	车磨损件
	Ni-60	Ni、Cr17%、B3.5%、Si4%	60	用于金属加工模具、链轮、凸轮、 排气阀密封面，以及拉丝模筒、机械 易损件
	粉102 粉122	Ni、Cr16%、B4%、Si4%	60	耐磨。用于模具、轴类
	粉102铁 粉122铁	Ni、Cr16%、B4%、Si4%、Fe15%	50	耐磨。用于模具、轴类
	粉104	Ni、Cr16%、B4%、Si4%、Mo3%、Cu3%	60	耐蚀性好。用于轴类、密封环
	Ni-80 Ni-80H	Ni、Cr20%、Si1.5%	100 (HBS)	耐热零件。用于航空发动机涂层
	Co-03 Co-03H	Co、Ni2.5%、Cr29%、W6%、Si0.8%、 Nb0.5%、Fe5%	30~38	热锻模具、轴承热锻模、热冲模
	Co-01 Co-01H	Co、Cr29%、W6%、Si1.3%、Fe5%	38~45	高温高压阀门、内燃机进排气阀密 封面、链锯导板
	粉203 粉223	Co、Cr21%、W6%、B1.5%	40	耐热、耐蚀。用于阀门
	Co-42	Co、Cr19%、W7.5%、B1.2%、Si3%、 Ni15%、Fe6%	42	用于高温排气阀的等离子及火焰喷 焊
钴基	F203	Co、Cr21%、W5%、B1.8%、Si2%、 Fe5%	42~47	
	F201	Co、Cr26%、W5%、B0.8%、Si2%、 Fe5%	40~45	用于内燃机进排气阀、排风机叶片 的等离子喷焊
	Co-04 Co-04H	Co、Cr27%、W11%、B0.8%、Si0.7%、 Fe余量	≥45	
	Co-02 Co-02H	Co、Cr29%、W5%、B0.8%、 Si1.3%、Fe5%	40~48	高温高压阀门、内燃机进排气阀密 封面、链锯导板高压泵柱塞、切纸机 刀片
	Co-05 Co-05H	Co、Ni27%、Cr20%、Mo5%、B3%、 Si4%、Fe5%	47~52	
	Co-50	Co、Cr19%、Mo6%、Ni27%、B3%、 Si4%、Fe5%	50	耐热，抗氧化。用于阀门、高温模 具、汽轮机叶片
	粉202 粉222	Co、Cr21%、W8%、B2%	50	

(续)

类别	牌号	主要组成	硬度 HRC	特性及用途
铬 基	粉202铁 粉222铁	Co、Cr21%、W8%、B2%、Fe10%	50	耐热，抗氧化。用于阀门
	F202 F204	Co、Cr21%、W5%、B2.2%、Si2%、Fe5%	48~55	等离子及火焰喷焊
基 铁	F204 粉224	Co、Cr21%、W15%、B3%	≥55	
	粉303 轨铁粉	Fe、Cr5%、B1.5%、Si3%、Ni30%	60	耐热、耐磨、耐蚀
铁 基	Fe-30	Fe、Cr13%、B2%、Si3%、Ni28%	26	易加工。用于齿轮、铸件
	Fe-01	Fe、Cr19%、B2.1%、Si3%、Ni22%	28	抗疲劳性好。用于钢轨
	Fe-03	Fe、Cr17%、B2%、Si2.8%、Ni23%	30	耐磨，韧性好。用于制轨球铁阀门
	F312	Fe、Cr18%、B2.3%、Si3%、Ni11%	30~35	堆焊
	Fe-57A	Fe、Cr20%、B1.7%、Si4%、Ni12%、 Mo4%、W0.9%、V0.9%、Nb0.9%	32~35	高中压阀门，不经预热可焊φ350 mm以下口径闸板阀、截止阀及同类
	Fe-57B	Fe、Cr20%、B1.7%、Si4%、Ni12%、 Mo4%、W0.9%、V0.9%	36~40	阀门，不经预热可焊φ350 mm以下口径闸板阀、截止阀及同类
	粉321	Fe、Cr13%	40	阀门，不经预热可焊φ350 mm以下口径闸板阀、截止阀及同类
	粉322	Fe、Cr23%、Ni13%、B1%、Si5%	40	耐热、耐磨。用于阀门
	Fe-04	Fe、Cr15%、B2.2%、Si3.2%、Ni23%	41~46	内燃机进排气阀，φ100mm以下口径闸板阀、截止阀密封面
	Fe-15	Fe、Cr20%、B2%、Si3.2%、Ni23%、 Mo4%	41~46	阀门密封面
基 钢	粉301	Fe、Cr5%、B3%、Si4%、Ni30%	45	可加工。用于轴类的等离子及火焰
	F311	Fe、Cr18%、B2.3%、Si3%、Ni8%、 Mn1.2%、Mo0.7%、V0.5%	45~50	喷焊
	F301	Fe、Cr5%、B4%、Si4%、Ni20%	≥45	耐磨。用于轴类，机床导轨的火焰
	Fe-45	Fe、Cr17%、B3.5%、Si3.5%、Ni7%	45~50	喷焊
	Fe-50	Fe、Cr13%、B4%、Si4%、Ni20%、 W4%	50	耐磨，难切削。用于石油钻杆、工 程机械、矿山、农机具、石油钻杆接 头，扶正器，装甲车磨损件、轴类
	Fe-07	Fe、Cr17%、B3.2%、Si3.5%、Ni6%	51~58	
基 钢	Fe-14	Fe、Cr30%、B2%、Si2%、Ni5%、 Mo3.5%	≥58	农业机械、犁铧、石油钻杆接头、 矿山机械

(续)

类别	牌号	主要组成	硬度 HRC	特性及用途
铁基	Fe-60	Fe、Cr16%、B3.5%、Si3%、Ni11%	50~60	耐磨粒磨损。主要用于石油钻杆接头
	Fe-11	Fe、Cr13%、B3.5%、Si4.2%、Ni22%、W10%	53~60	矿山机械、石油钻杆接头，煤矿机械
	粉302	Fe、Cr5%、B4%、Si4%、Ni30%	55	耐磨。用于轴类、密封环
	粉323	Fe、C3%、Cr27%、Ni4%、B1%	55	耐磨性好。用于冶金矿山
	Fe-55	Fe、C1.2%、Cr15%、B3%、Si4.5%、Ni12%、Mo5%	55	耐磨粒、冲刷磨损。用于风机叶片、螺旋输入器
碳化钨型	F314	Fe、C2.5%、Cr30%、B3%、Si3.5%	≥58	耐磨性好。用于冶金矿山机械等离子喷焊
	粉325	Fe、C4%、Cr27%、B1%	60	
	Fe-12	Fe、C3.8%、Cr7%、B1.6%、Si1%、Ni4%、Mo5%、V1.2%	≥62	农业机械犁铧、矿山机械、挖泥船用铰刀，煤粉机打击板
	Fe-81	Fe、C4.7%、Cr47%、B2.1%、Si1%	63~68	石油钻杆接头、煤矿机械、农业机械
	Fe-81H			
铜基	Fe-65	Fe、C4.5%、Cr50%、B2%、Si1.5%	60~65	用于矿山、石油钻杆接头、破碎机
	粉305	粉302、WC25%	55	耐磨性好。用于犁、耙、铲
	粉105铁	粉102铁、WC35%	60	耐磨性优良。用于风机叶片
	粉125铁	粉122铁、WC35%		耐磨性优良
	粉105	粉102、WC50%	60	耐磨性优良。用于风机叶片
铜基	粉108	粉102、WC80%		
	NiWC25	Ni60、WC25%	基体60	用于风机叶片，螺旋输入器
	NiWC35	Ni60、WC35%	WC70	
	CeWC35	Ce50、WC35%	基体50 WC70	用于风机叶片、螺旋输入器，以及炼油催化装置
	粉422	Cu、Sn10%、P0.3%	(HBS) 80	耐金属间磨损。用于轴承

表4-3-10 喷熔层常见的缺陷及其防止措施

缺陷名称	产生原因	防止措施
喷熔层剥离	(1) 工件表面准备不合乎要求 (2) 重熔时母材温度过低 (3) 重熔较厚的涂层时，火焰移动过快	认真做好工件表面准备工作 重熔时，应将喷熔层接近的母材加热到接近重熔温度 火焰应稍作停留，使涂层表里温度均达到重熔温度

(续)

缺陷名称	产生原因	防止措施
喷熔层剥离	(4) 国产铁基粉末，重熔时“镜面反光”不明显，造成重熔温度不足	多练习，掌握国产铁基粉末的重熔温度
裂 纹	(1) 喷熔前预热温度太低 (2) 喷熔后冷却速度太快 (3) 喷焊层与母材膨胀系数相差太大	提高预热温度 缓冷 预热和缓冷
夹 渣	(1) 重熔时，火焰移动速度太快，熔渣未完全浮出 (2) 合金粉末自熔性差，熔点高，粘度大	降低火焰移动速度 选择自熔性好的粉末
气 孔	(1) 工件表面有铁锈、油污 (2) 母材表面和合金粉末在喷焊前被氧化 (3) 乙炔气中有水分 (4) 重熔温度过高，时间长，引起喷熔层翻泡	认真做好工件表面清理工作 预热温度不要过高，用于二步法的粉末不要过细，不用已被氧化的粉末 乙炔发生器加入电石后，应先将含有水分的乙炔气排掉 掌握好重熔的温度与时间

值。

5) 当各种规范参数调整好后，并且在粉末已均匀输送的情况下，方可将喷枪对着零件喷涂。

6) 允许加5%~10%的氢气调节电功率。

7) 先喷涂凹槽上的拐角处，后喷涂平面。

8) 喷涂方向应尽量与零件表面互相垂直，必要时可采用倾斜喷涂，但倾斜角不应小于50°。

9) 喷涂内圆表面及大面积的外圆表面时，应先用镍包铝打底，底层要薄，一般为0.01~0.015mm。底层材料应均匀连续。若表面有局部较深的沟槽，应先用镍包铝填满。

10) 当需要的涂层厚度超过0.25mm时，应分层进行喷涂，不要一次喷成。

11) 喷涂过程中应控制零件的温升，零件的温度不应超过预热温度。

12) 通过控制零件的转速和喷枪的移动速度尽量使涂层厚度均匀。

13) 停弧时先关闭送粉器，待管道内的残留粉末全部喷完后，采用逐渐减低电流的方法停弧，停弧几秒钟后关闭气体，停弧3min后关闭水泵。

14) 记录每个工件的喷涂规范，记录喷嘴及钨极的使用小时。

15) 零件喷涂后放入烘箱或石棉灰中缓冷。

(5) 质量控制

1) 定期检查送粉量、沉积效率及粉末熔化情况，发现明显变化应及时排除。

2) 应定期在100×1.2的低碳钢片上喷涂试样，然后绕着Φ12.5的圆柱上缓慢进行弯曲，弯曲90°不得有涂层脱落。经检查合格后方可进行生产。

3) 零件喷涂后涂层应均匀，无起泡、凸起、裂纹、大颗粒、挂铜、片状剥落等缺陷。

(6) 涂层加工 可按制造图纸的精度与粗糙度要求进行磨削加工。磨削加工最好在强冷却条件下进行。磨削过程中发现砂轮变钝时，应及时修整。

等离子喷涂用的粉末材料目前已有150余种，使用时应按工况需要进行选择，但通常采用的是复合粉末，以获得相应的耐磨、耐蚀、耐高温氧化的性能。复合粉末的成分及性能参见表4-3-11。

等离子弧喷焊即等离子弧堆焊设备。与等离子喷涂设备大体相同，只是喷枪结构、型号不同。等离子弧喷焊使用联合等离子弧，工艺及操作请参阅有关焊接书籍，于此不再赘述。

表4-3-11 国产复合粉末材料的成分及性能

材 料 名 称	组 成	性 能 及 用 途
镍包铝	Ni/Al-80/20或90/10	放热型自粘结材料，涂层致密，抗高温氧化，抗多种自熔合金熔体和玻璃的侵蚀
钼包镍	Al/Ni-5/95	性能同上，抗高温氧化性能更好，喷涂时烟雾少
镍包石墨	Ni/C-75/25或80/20	具有良好的减磨自润滑可磨削涂层。用于600℃以下
镍包硅藻土	Ni/D.s.-75/25	具有良好的减磨自润滑可磨削涂层，耐高温。用于800℃以下
镍包二硫化钼	Ni/MoS ₂ -80/20	具有良好的减摩性能。可用作无油润滑涂层
镍包氯化钙	Ni/CaF ₂ -75/25	具有良好的减摩性能。用于800℃以下减摩涂层
镍包氧化铝	Ni/Al ₂ O ₃ -80/20, 50/50, 30/70	高硬度、高耐磨性，抗腐蚀涂层。随着Al ₂ O ₃ 含量增高，涂层韧性降低
镍包氧化铬	Ni/Cr ₂ O ₃ -20~25/30~75	耐磨，抗腐蚀，耐高温
镍包碳化钨	Ni/WC-20/80	高硬度，耐磨，耐蚀。用于500℃以下
钴包碳化钨	Co/WC-12/88, 17/83	高硬度，高耐磨性，耐热，耐蚀。用于700℃以下
镍包复合碳化物	Ni/WTiC ₂ -85/15	高硬度，高耐磨性
镍包碳化铬	Ni/Cr ₃ C ₂ -20/80	高硬度，高耐磨性，耐蚀，抗高温氧化
镍铬包碳化铬	Ni-Cr/Cr ₃ C ₂ -25/75	高硬度，高耐磨性，耐蚀，抗高温氧化，耐高温性能更好
镍基自熔合 金包碳化钨	WC20%、C0.6%、Cr14%、B3%、Si3%、Fe≤8%，其余Ni	耐蚀，抗严重磨损。用于600℃以下
镍基自熔合 金包碳化钨	C0.5%、Cr9%~12%、B2.5%~3.5%、Si2%~4%、Fe≤9%、WC35%，其余Ni	耐蚀，抗严重磨损。用于600℃以下
镍基自熔合 金包碳化钨	WC50%、C0.3%、Cr8%~9%、B1%、Si2%、Fe≤6%、其余Ni	耐蚀，抗严重磨损。用于600℃以下。耐磨 性好，适合冲压

(续)

材料名称	组成	性能及用途
铁基自熔合 金包碳化钨	WC20%、C0.5%、Ni6%、Cr13%、B3%、Si3%，其余Fe	用于400℃以下。一般耐蚀，抗严重磨粒磨损
铁基自熔合 金包碳化钨	WC35%、C0.4%、Ni5%、Cr10%、B2.5%、Si2.5%，其余Fe	用于400℃以下。一般耐蚀，抗严重磨粒磨损
铁基自熔合 金包碳化钨	C0.3%、Ni4%、Cr8%、B1.5%、Si2%、WC50%、其余Fe	用于400℃以下。一般耐蚀，抗严重磨粒磨损
镍包金刚石	Ni、金刚石	高硬度，高耐磨性，耐冲刷
钴包氧化锆	Co、ZrO ₂	耐热，耐磨，耐腐蚀，抗氧化
镍包铜	Ni/Cu-70/30, 30/70	耐腐，抗腐蚀
镍包铬	Ni/Cr-80/20, 60/40	耐热，耐蚀抗氧化，耐磨
镍包聚四氟乙烯	Ni/PTFE-70/30	耐腐蚀，减摩自润滑涂层
钼-聚苯酚		摩擦系数极低，减摩自润滑，用于300℃以下

第4节 热喷涂的安全技术

热喷涂工艺中的一般安全问题，如喷砂、乙炔、氧气及喷枪、喷涂材料及通风吸尘方面应参照有关规定执行，特殊安全技术问题如下：

(一) 热喷涂时的金属蒸发气体和粉末

在喷涂铝和铝基合金、镍和镍合金、铬基合金、钛合金及铝合金时，产生的金属蒸发气体，对呼吸气管有严重的伤害性，对皮肤也有中毒可能。当喷涂这类材料时，最好使用一种送入新鲜空气的保护帽盔和衣服。一般要戴上防毒面具和防护衣服。凡是在同一室内或同一工作场所内的辅助人员也同样需要戴用。同时不论在室内和露天操作，还须要良好的通风条件。在喷锌、锌合金和黄铜时，虽然没有以上材料的严重危害性（气体极度浓密时也同样危险），但也必须戴上轻便防毒口罩或多层纱布的口罩。

喷涂时产生的金属粉末对人体也有妨碍，喷涂操作场所须有良好的排尘装置。在周围须定期抽取空气样品，检查其含粉量是否达到危险程度。在8 h内含粉量超过下面的极限时即认为是不符合安技要求，须改进通风条件：

铅——0.15 mg/m³（铅合金以所含铅元素为标准）。

镉——0.10 mg/m³（镉合金以所含镉元素为标准）。

铬合金——0.10 mg/m³（测量含 Cr₂O₃ 的含量）。

(二) 电喷枪的安全技术

1) 始终保持喷枪良好状态，尤其是防止漏气现象。

2) 总阀经常用羊毛脂润滑。

3) 喷枪停止使用15 min以上时，必须关闭氧气和乙炔的调压器。

4) 用打火机点火勿用火柴。

5) 点火时，如发现嘘叫声或在点火及喷涂时发现回火现象，必须立刻关闭总阀，等10 s后空开3 s再点火。如仍有回火现象，不能再点火，应该检查各部分滤器和调压器是否有故障。

电喷枪除遵照一般电动工具（如电钻等）的使用规则和防止紫外线向眼睛和人体照射外，没有其他要求。

(三) 等离子喷涂的劳动保护

等离子弧产生的有害因素有光辐射、有害气体

(臭氧)、粉尘、金属蒸气、噪音、放射性物质、高频电磁场等，因此必须按上述要求严加防范。

- 1) 通风必须良好，最好设专门喷涂间。
- 2) 钨钨极不得直接用手触摸，应尽量改用铈钨极为好。如用钍钨极应有专门存贮铅皮柜，磨钍钨极时要注意收集和集中处理。
- 3) 工作时佩带好面罩、耳罩、防护镜等。
- 4) 注意饭前洗手，注意防火、防爆，防止触电，喷枪的转胎及枪把应绝缘可靠等等。

第5节 热喷涂应用实例

(一) 电弧喷涂修复曲轴

(1) 曲轴的检查

1) 弄清曲轴的基本尺寸，如轴径、曲拐直径、冲程长度和轴颈两端的圆角半径，必要时还要知道总长度和重量，以便考虑下一步车小轴径及喷涂时的运转设备和磨削机床容量是否胜任。

2) 检查磨损的直径是否小于安全限度(这个限度在制造厂的技术资料中有规定)，一般直径小于94%时即认为过小。如情况特殊，须与使用部门联系，尽可能减轻其负荷。

3) 检查是否有碎缝，纵向尚可，轴向碎缝不可喷修。

4) 检查轴的弯曲和扭曲情况。在车床或特别的支架上检查轴的弯曲度。弯曲度在全长上在1/1000以内，装齿轮轴颈的径向跳动在0.06mm以内的可以直接进行下一步工作，超过1/1000的轴须先调直。扭曲限度是以将偏移的轴颈车至圆整时，仍在安全限度94%以内为取舍。

(2) 清洗工作 清洗可在强碱液中加热煮洗，然后在沸水中煮几分钟，任其自干或用压缩空气吹干；也可在汽油中清洗后取出吹干。清洗时须彻底将油孔洗刷清洁，以免在喷涂时油脂渗出，影响涂层的附着强度。清洗后一直到喷钢完毕不能再用手抚摸毛化处，以免沾上油脂。

(3) 缩小轴径 涂层应具有一定厚度，太薄则容易在磨削时单边磨穿。太厚则又削弱了轴颈的强度，一般按经验公式计算：

$$d = D - \frac{D}{25}$$

式中 D —— 原轴径；

d —— 缩小后轴径。

在进行车小或磨小工件轴径时，尽量按原来的内圆角半径加工，如图4-5-1所示。

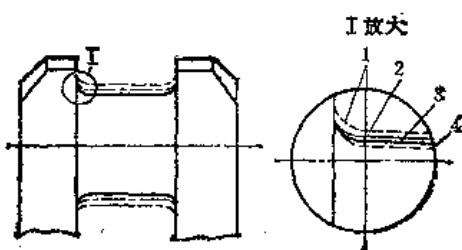


图4-5-1 轴颈车小情况

1—磨出的内圆角应小于原内圆角 2—已磨损的内圆角 3—尽量车成原设计的内圆角 4—喷好后的涂层

(4) 电火花拉毛 采用 $\phi 3\sim 4$ mm镍丝或狭条镍板进行拉毛，在油孔边口及两端内圆角处拉得要密一些，拉毛后用细铜丝刷刷去碳灰。

(5) 塞油孔 用碳精棒堵塞油孔，露头的高度略高于磨光后涂层的厚度，见图4-5-2。

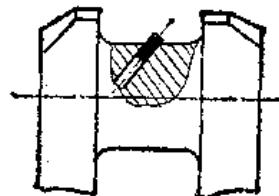


图4-5-2 塞油孔

(6) 喷钢 用70号或80号钢为材料(气喷 $\phi 2.34$ ，电喷 $\phi 1.6$)进行喷涂。开始时，向两端内圆角喷射，尽量避免从配重铁上滑下，见图4-5-3和图4-5-4，喷射约十几秒钟后，将喷枪垂直于曲轴左右移动，随时用卡钳测量，再向两端内圆角喷射，然后再重复向中间垂直喷涂，直至涂层厚度达到要求为止。

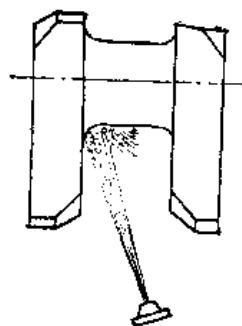


图4-5-3 火花束正对圆角喷射

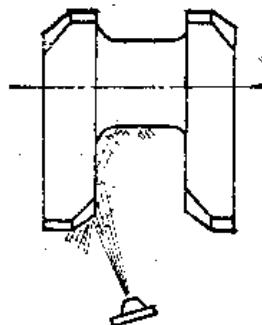


图4-5-4 错误的喷漆

喷涂层的加工余量列于表4-5-1。

表4-5-1 喷涂层的加工余量

工件轴颈 ϕ (mm)	涂层加工余量 (mm)	
	主 轴	曲 轴
<100	0.5~1.0	0.7~1.2
>100	1.0~1.5	1.3~1.5

(7) 渗油处理 工件喷钢完毕后待冷却至40℃左右时侵入油内几小时，让润滑油能较多地渗入多孔性涂层。大型工作涂上二、三层润滑油也能达到类似效果。

(8) 除去虚浮涂层 钳去喷涂时溅在配重铁和轴颈两端平面上的涂层，凿子锋口应高于内圆角消失的地位，见图4-5-5。

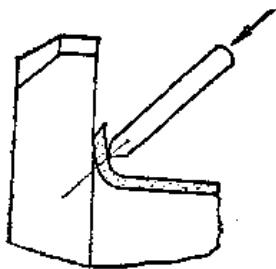


图4-5-5 除去虚浮涂层

(9) 磨光 在曲轴磨床上进行磨光应看作磨一根管子一样。开始用“径向切入法”(图4-5-6)，待磨至大于标准直径0.05~0.10mm时，再作轴向移动(左右移动)到磨出内圆角为止(可以轻微擦着两端平面)。圆角半径可小于原来的，这样不会产生应力集中，并达到整齐美观。应当注意磨削涂层表面不应变色(发黑、发焦)，否则易于产生龟裂。如有变色，应立即停止，重打砂轮，必要时更换砂轮。磨削规范如下：

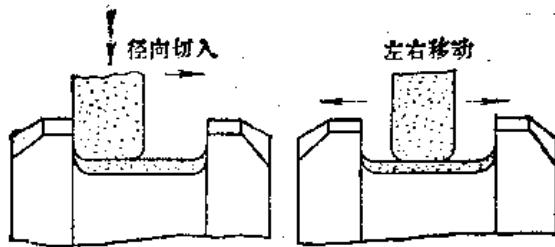


图4-5-6 轴颈磨削切入法

砂轮牌号	TL-46-ZR ₂ (或Z ₁)-A
砂轮线速度	30~35m/s
曲轴线速度	5.2~8.3m/s
砂轮位移	1.6~2mm/r
冷却剂	1:30~50皂化液

(10) 油孔倒角 用适当钻头和电钻将碳精棒钻去，用图4-5-7所示的小砂轮夹持在高速风动钻上面，或用自制的尖头铣刀夹在电钻上将孔口倒喇叭形。

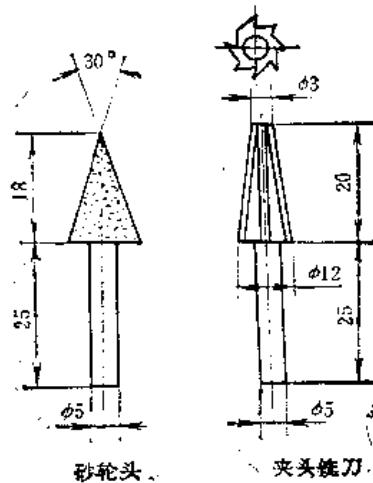


图4-5-7 油孔倒角工具

(11) 彻底清洗 用汽油清洗所有各部，尤其重要的是油孔内壁，否则在运转时存留在内孔的杂质会掉下擦伤轴瓦和涂层。

(12) 上油 清洗后用压缩空气吹干，立刻涂上较厚的润滑油。

(13) 走合工作 轴颈虽经磨光和清洗，但在磨削时总有少量砂轮屑和钢粉嵌入涂层的孔隙，在初期运转时会落下来，造成擦伤等后果。因此，必须在装配后用稀薄的润滑油或煤油，在空载低速下进行20~30min的空运转，然后用汽油冲洗后再装上，再投入正式运转。

表4-5-2 涂层质量事故分析

质量事故	原 因
涂层碎裂	喷涂时一次喷得过厚，或喷枪离工件太近（或移动量太少），温度过高（尤其是喷涂大直径厚涂层时更易碎裂）
在两端内圆角处碎裂	未按上述方法，而是一开始就垂直于曲轴喷涂
涂层脱壳	1.采用氧化铝砂轮磨削，涂层发热膨胀 2.毛糙工作没有做好 3.清洁工作没有做好 4.压缩空气中含油与水
轴瓦和涂层不附着	1.喷涂时喷枪离工件太远，颗粒结合不好，部分颗粒落下，造成擦伤轴瓦与涂层 2.磨削时有大量砂屑嵌入涂层而清洗工作未做好 3.气喷涂时火焰调节得不好 4.金属丝走得太快 5.钢丝含碳量太低，涂层太软
曲轴折断	1.曲轴本身质量问题 2.车小时没有保持原来的圆角，甚至切入，使应力集中而折断

如果不按上述规定进行喷涂和喷后处理，则可能发生各种质量事故，见表4-5-2。

(二) 丝火焰喷涂修复机床导轨

(1) 三角肋和平面边口上缺角时的处理

- 1) 用汽油将缺损处及附近周围进行清洗。
- 2) 用气焊枪或喷灯烘烤缺损处（约80~100℃），使饱含在铸铁组织内的润滑油渗出，然后揩去油渍，如此反复两三次。
- 3) 用手提砂轮机或电钻夹持小砂轮将缺损处磨成鞍形，见图4-5-8所示。
- 4) 为了加强结合，在凹陷处种植二三只M4螺栓，螺栓的顶部低于标准高度1.5~2.0mm，见图4-5-9。

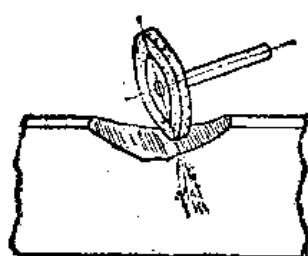


图4-5-8 磨去氧化皮

螺栓，螺栓的顶部低于标准高度1.5~2.0mm，见图4-5-9。

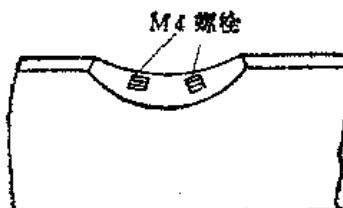


图4-5-9 种植螺栓

5) 用气喷枪以φ2.3mm铅丝为喷涂材料喷涂损坏处，见图4-5-10，作为毛糙表面。喷涂是在中性火焰中进行。乙炔压力0.11MPa，氧气压力为0.12MPa左右（以调节至中性火焰为标准），空气压力0.4MPa（高于0.4MPa，涂层太细，不够毛糙）。钼丝的进给速度调节到火花集中而致密为要求。喷射口与导轨的距离保持在70~80mm，涂层厚度只要0.06~0.08mm就已足够。

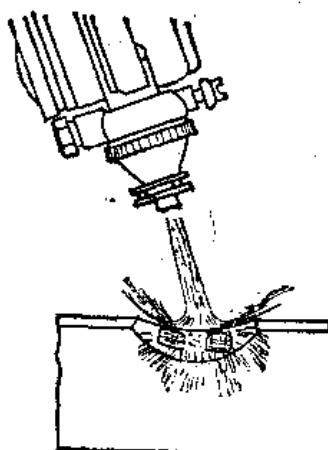


图4-5-10 用气喷枪喷钼

6) 制备比缺损处略小、形状相同的孔板，见图4-5-11。

7) 将孔板架空在缺损处上面约3mm处。

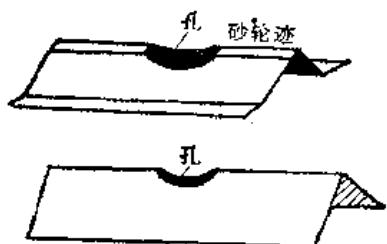


图4-5-11 孔板

8) 用80号钢丝，在同一个喷枪内，用中性火焰穿过孔板的孔向缺损处喷钢（图4-5-12）。乙炔与氧气压力同上，空气压力提高至0.5MPa，喷枪口与机床面的距离为200mm。为了绝对避免机床面过热，喷射3~5s后就要停止片刻后再喷，直至增厚至超过标准0.2~0.8mm为止。因为喷枪不能移动，必须严防过热现象，如果发现涂层变色，就应该仔细检查，用小锤测试，如有哑声，必须凿去重喷铝和重喷钢。

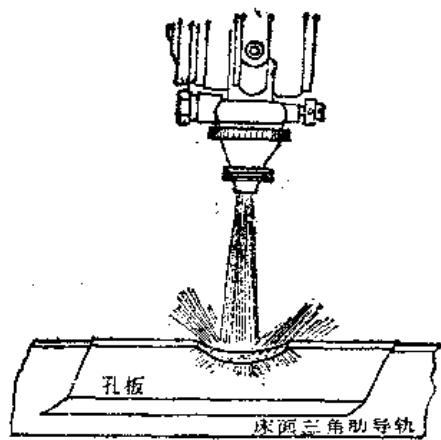


图4-5-12 将孔板架空在导轨上喷钢

9) 刷上温热的（约40℃）润滑油，让它渗入涂层。

10) 用碗形或杯形绿色碳化硅砂轮（玻璃或陶瓷为结合剂）在导轨磨床或精度较高的龙门刨床上磨削至精度要求（图4-5-13）。

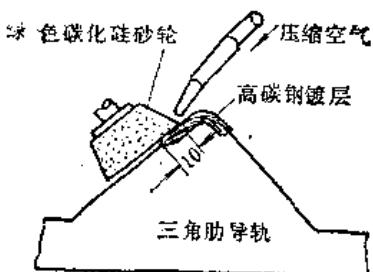


图4-5-13 在导轨磨床上磨削

在磨削的过程中，进给量要小，并且要在冷却液中或在压缩空气吹拂下进行磨削，防止过热。完毕后，用细砂石倒棱角后上油即可。

(2) 严重咬蚀处的修复处理 与上述不同的是缺损处不是磨成鞍形而在边沿上用凿子凿成方口槽形（图4-5-14）。

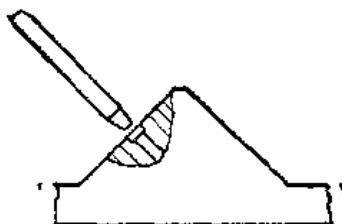


图4-5-14 凿成方口槽

喷射不用孔板，喷枪的移动要迅速，喷铝速度约300mm/s，喷钢速度约150~300mm/s，其余均与上例相同。

(三) 粉末氧炔焰喷涂

(1) 1000 t 摩擦压力机主轴的修复 1000 t 摩擦压力机主轴的轴承挡材质40Cr，磨损后不能正常工作，用粉末氧炔焰喷涂法修复之，用镍包铝0.1mm打底层，工作层用Ni180(Ni-Cr-Fo)粉末喷涂，喷涂层总厚度0.7mm，硬度达170HBS，修复工时少，修复费用仅为换新件费用的15%。

(2) 电动机端盖磨损的修复 电动机端盖材质为灰铸铁，因长期的咬合磨损，使之轴承挡发生松动，过去采用滚花法修复，但修复后使用周期较短。现用粉末氧炔焰喷涂法修复，用铝包镍0.15mm打底层，工作层用Ni222(Ni-Cr-Fe-Al)粉末喷涂，喷涂厚度为1.5mm，修复后使用周期是用滚花法修复的8~10倍以上，并且方法简便，修复时间短。

(3) 给水泵叶轮的修复 给水泵叶轮材料为45钢，用粉末氧炔焰喷涂法修复磨损了的叶轮，用镍包铝打底层0.15mm，工作层用Cu150(Cu-Sn-P)粉末喷涂，喷涂厚度为1.2mm，修理费用为换新件费用的10%，而且耐磨性也得以成倍的提高。

(四) 等离子喷涂修复实例

(1) 内燃机车柴油机气缸套的修复 某机务段使用由法国进口的内燃机车柴油机，气缸套备件已经用完，机车已被迫处于超差运行，后来用等离子喷涂工艺在旧气缸套上喷涂Mo+Ti50粉末，机车运行了15.6万公里仍可继续使用，解决了备件供应问题。法国进口的新缸套每10万公里平均磨损0.11mm，而喷涂修复的缸套每10万公里平均磨损0.02mm，可见，喷涂缸套比法国的新缸套耐磨性提高5.5倍。

(2) 水轮机叶片的修复 某河流含泥沙量很大, 为了解决水轮机叶片磨损快、寿命短的问题, 曾用铸铁叶片、35号铸钢叶片、包覆不锈钢叶片、搪瓷叶片、等离子弧喷涂镍基合金叶片等六种材质进行试验, 结果表明, 等离子弧喷涂镍基合金叶片的效果最好, 使用寿命长达3000~3500 h, 比原设计的铸钢叶片的使用寿命(1000~1500 h)提高了3倍。

(3) 深井泵叶轮轴的修复 某食品厂的深井泵, 井深300多米, 泵头伸下70 m, 每小时抽水40多吨, 24小时连续工作。深井泵叶轮轴与橡胶瓦相配, 因井下无法润滑, 且又有水的浸蚀, 又有泥砂

磨料, 因此, 叶轮轴磨损较快。叶轮轴原为镀铬件, 使用寿命为半年。采用等离子喷涂NiCrBSi涂层后, 使用寿命可达两年之久。

(4) 冲模的修复 汽车皮带轮由1.5 mm厚的低碳钢板冲压而成, 冲模材料原为T10号钢, 虽经淬火处理, 但寿命只能冲压几十件到几百件。后来在45号钢模具体的表面上先用镍包铝打底, 而后喷涂WC35% + CoCrWB65%, 涂层厚度0.5 mm, 加工之后涂层余0.3 mm, 表面粗糙度 R_a 0.4~0.8 μm, 冲压了6000件仍可使用, 寿命提高了10倍。