

第3篇 热喷涂(焊)

主 编 陈惠国 (高工 机械工业部武汉材料保护研究所)

编写人 陈惠国 (高工 机械工业部武汉材料保护研究所)

马小雄 (教授级高工 机械工业部武汉材料保护研究所)

詹祖保 (高工 机械工业部武汉材料保护研究所)

黄庆云 (教授级高工 中国农业机械化研究院)

伍建华 (高工 机械工业部武汉材料保护研究所)

熊钟书 (高工 机械工业部武汉材料保护研究所)

周利军 (工程师 机械工业部武汉材料保护研究所)

主 审 徐滨士 (中国工程院院士 教授 装甲兵学院)

毕 顺 (教授级高工 机械工业部武汉材料保护研究所)

责任编辑 武 江 (高工 机械工业出版社)

王兴垣 (高工 机械工业出版社)

第 1 章 热喷涂的原理和方法

随着当代科学技术的发展,热喷涂技术已成为一项综合性的高技术。它不仅是表面工程技术的一个重要组成部分,而且将成为直接制造具有特殊性能、特殊形状的零部件和产品的工艺技术手段;现阶段的热喷涂技术已突破了传统的热喷涂技术的概念。通过对热喷涂“热源”的研究和发展,从普通氧-乙炔焰发展到多种的燃气源如丙烷焰、丙烯焰、石油液化气焰和其他碳氢化合物焰,电源的发展也从电弧到等离子体、激光、电子束作为热喷涂技术的热源,尤其是等离子体作为热源的发展更为多样,形成等离子喷涂的气体有氮气和氢气的混合物,氩气或氩氢气的混合物,发展到采用空气和水稳定的等离子焰。对热喷涂速度的研究,以提高颗粒的飞行速度来达到提高涂层质量的目的。从几十米/秒提高到高速火焰喷涂(HVAF)的数百米/秒爆炸喷涂的颗粒喷射速度近1000m/s。从对普通材料研究到使喷涂材料之间的反应产生的化学能转变为热能来制造涂层的方法;综上所述通过对热喷涂的热源喷射颗粒的速度研究,能量转换的研究,导致各种各样热喷涂方法和先进热喷涂设备的出现,而且涌现了许多新的奇特的热喷涂材料。热喷涂制造的涂层也不再是传统的机械结合涂层,它有扩散形成合金化的结合,钎焊结合甚至达到冶金结合。

1 热喷涂技术原理

热喷涂技术是一种复合技术,它利用各种不同的热源,将欲喷涂的各种材料如金属、合金、陶瓷、塑料及其各类复合材料加热至熔化或熔融状态,借助气流高速雾化形成“微粒雾流”沉积在已经预处理的工件表面

面形成堆积状,与基体紧密结合的涂层,称之为喷涂层。而将某些喷涂层在喷涂的同时或随后进行重熔处理形成的冶金结合特征的涂层称之为喷熔层或重熔层。原理示意图见图 3.1-1。

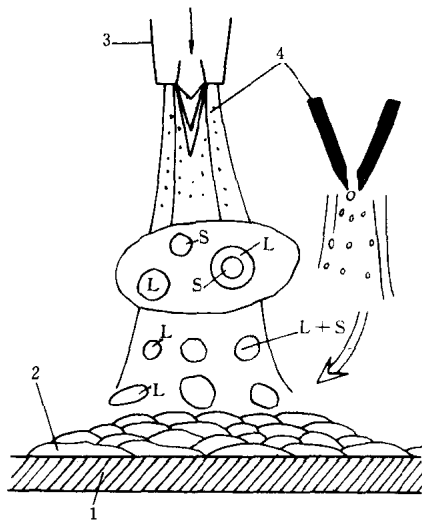


图 3.1-1 热喷涂原理示意图

1—基体 2—涂层 3—热源 4—热喷涂材料
(线、棒、粉) L—熔体 S—固体

1.1 热喷涂方法分类

热喷涂方法随技术的进步在不断扩展,目前热喷涂按所选用的热源和选用材料的形状分类。其分类见图 3.1-2。

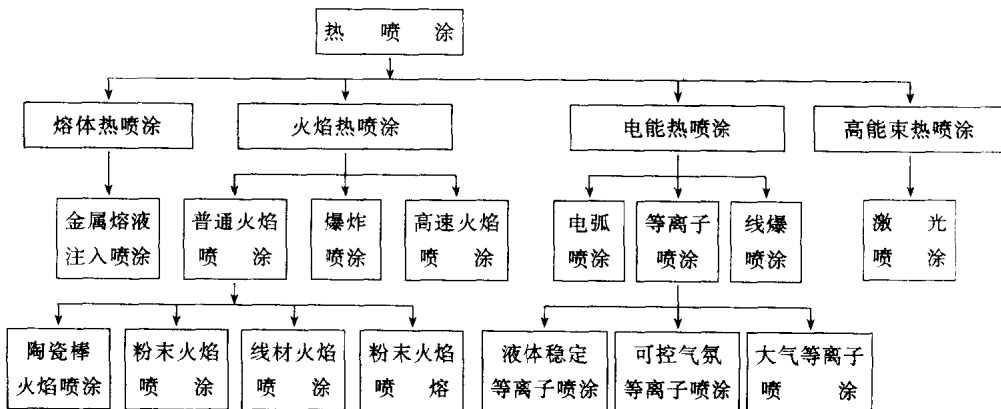


图 3.1-2 热喷涂方法分类

1.2 各种热喷涂方法的技术特性（见表 3.1-1）

表 3.1-1 热喷涂方法的技术特性

热喷涂方法	粉末火焰喷涂	线材火焰喷涂	陶瓷棒火焰喷涂	线材电弧喷涂	粉末等离子喷涂	低压真空等离子喷涂	水稳等离子喷涂	高速（超音速）火焰喷涂	线爆喷涂	粉末爆炸喷涂
热源	燃烧火焰	燃烧火焰	燃烧火焰	电弧	压缩电弧	压缩电弧	压缩电弧	燃烧火焰	电容放电	爆炸燃烧火焰
喷涂粒子飞行速度 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	30~50	50~150	50~150	160~240	200~350	200~350	500~600	500~1000	400~600	700~1200
喷涂材料	金属 陶瓷 复合材料	金属 复合材料	陶瓷	金属 复合材料	金属 陶瓷 复合材料	活泼金属 MCrAlY 碳化物	陶瓷	金属 碳化物	金属	金属 陶瓷 碳化物
喷涂量 / $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$	1.5~2.5 （陶瓷） 3.5~10 （金属）	2.5~3 金属	0.5~1.0	9~70	3.5~10.0 （金属） 6.0~7.5 （陶瓷）	5~15	30~56	2.0~11.0 （金属） 2.0~7.0 （碳化物）		2~10.0
结合强度 /MPa	10~30	6~30	5~10	10~50	40~60	>80		60~80	30~60	70~160
孔隙率（%）	5~20	5~20	<5	5~15	3~15	<1 (MCrAlY)		<2	2.0~2.5	<2

2 热喷涂方法

2.1 熔体金属注入喷涂

这是早期发展的热喷涂工艺，其原理如图 3.1-3 所示。它主要是喷涂低熔点的金属。用电阻加热的方法，使熔化金属漏入雾化罐内，喷射到基体表面形成涂层。

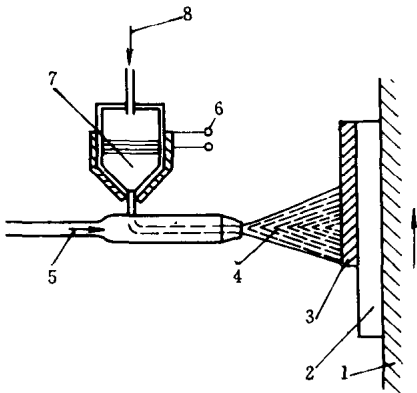


图 3.1-3 熔体注入喷涂法

1—工件移动部分 2—基体 3—涂层 4—喷涂束
5—气体喷头 6—电加热器 7—熔体金属 8—惰性气体

层，由于其他热喷涂方法的出现，此方法很长一段时间内未得到发展。

2.2 线材火焰喷涂

这种工艺方法是目前国内最常用的热喷涂技术，主要喷涂铝、锌、锌铝合金材料，用于大型钢结构件的长效防腐蚀，也可喷涂各类钢丝，作耐腐涂层用。随着复合丝、塑料包覆柔性丝，管状复合丝的出现，在制备耐磨涂层方面的应用不断扩大。其原理如图 3.1-4 所示。

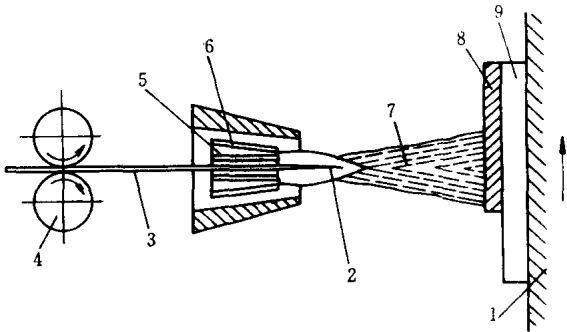


图 3.1-4 线材火焰喷涂

1—工件移动部分 2—熔化金属尖部 3—线材
4—送丝轮 5—混合气体 6—压缩气体
7—喷涂束 8—涂层 9—基体

示,通过调节压紧滚轮的旋转速度,调节线材进入氧-乙炔火焰的速度,在环状压缩空气的作用下将熔化的线材雾化成金属熔滴沉积到工件表面上,形成涂层的方法。

2.3 陶瓷棒火焰喷涂

此喷涂方法原理与线材火焰喷涂相同,只是喷涂材料为 $\phi 6 \times 600\text{mm}$ 的陶瓷棒材,为美国诺顿公司发明,也常称诺顿(RoHide)喷涂法。

2.4 粉末火焰喷涂

此方法工作原理,如图 3.1-5 所示,即喷涂粉末从

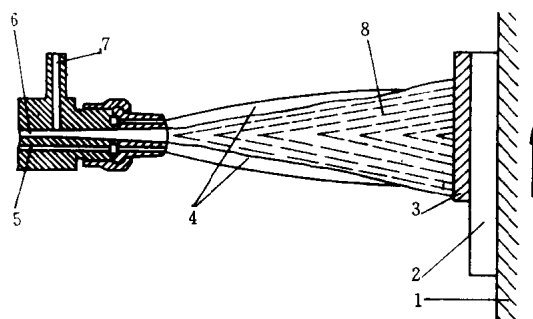


图 3.1-5 粉末火焰喷涂

- 1—工件移动部分 2—基体 3—涂层 4—火焰
及粉末束 5—混合气体 6—送粉气
7—送粉通道 8—喷涂束

火焰中央喷出后被火焰加热至熔融态喷射到基体表面,通过更换喷嘴及加速、压缩的风环,此喷涂方法可以喷涂各种金属及合金粉末,并可以喷涂熔点低于 $2600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的陶瓷粉末和塑料粉末,是应用最广泛的一种热喷涂方法。

2.5 粉末火焰喷熔

这是一种将粉末喷涂到工作表面后,立即进行熔融处理的热喷涂方法,使用的喷涂材料为各种自熔性合金粉末,主要用于制备耐磨、耐腐蚀的涂层,因为涂层是通过硼、硅元素润湿作用熔合于基体表面,要求基材的熔点要高于喷涂自熔合金粉末的熔点,而且基材表面能与硼、硅元素有较好的润湿效果。这种喷熔层无孔隙,结合强度约为 $150\sim 200\text{MPa}$,具有较好的耐冲击性能。

2.6 爆炸喷涂

这是一种将燃气和助燃气按一定比例进行混合后,送入燃爆室内,点燃爆炸产生的高温、高速气流将粉末喷射到工作表面形成涂层的方法,原理如图 3.1-6 所示。主要使用氧气、乙炔气和氮气。其喷涂层有很高的结合强度(金属粉末涂层可达 155MPa ,陶瓷粉末涂层可达 70MPa)和致密度(可达 99%)。但是该方法喷涂时产生很大的噪音(约 150dB)目前多采用计算控制机器人进行操作。

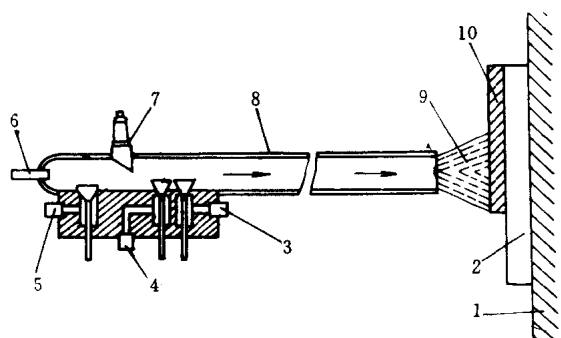


图 3.1-6 爆炸喷涂

- 1—工件移动部分 2—基体 3—氧气 4—乙炔气
5—氮气 6—粉末送入管 7—点花塞
8—枪管 9—喷涂束 10—涂层

2.7 高速火焰喷涂

这是近几年出现的热喷涂新工艺方法,目前正得到迅速发展和应用。这种喷涂方法由于燃烧火焰约束在枪体内部,与传统的火焰喷涂相比较,火焰温度高,

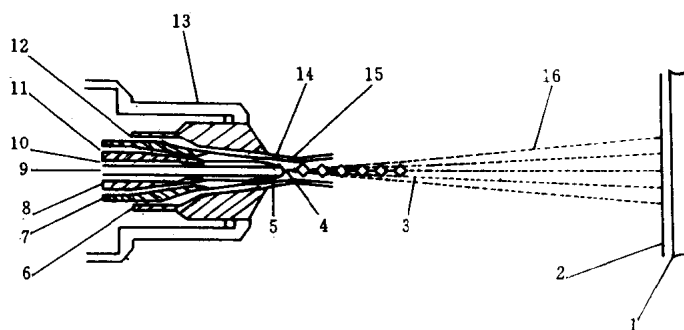


图 3.1-7 高速燃气火焰喷涂

- 1—基体 2—喷涂层 3—钻石点 4—焰芯 5—燃烧室 6—空气帽
7—喷嘴外套 8—喷嘴内套 9—送粉管 10—压缩气体 11—氧燃
气体 12—压缩气体 13—压紧帽 14—压缩气体环幕
15—钻石激波火焰 16—喷涂束

对粒子加热时间长,焰流速可达1050m/s。因此涂层甚至比等离子喷涂层更细密,氧化物含量更低,涂层结合强度约为70MPa。高速火焰喷涂有两种基本形式,其原理如图3.1-7和图3.1-8所示。目前在喷涂如碳化钨之类的高耐磨材料得到很好应用。

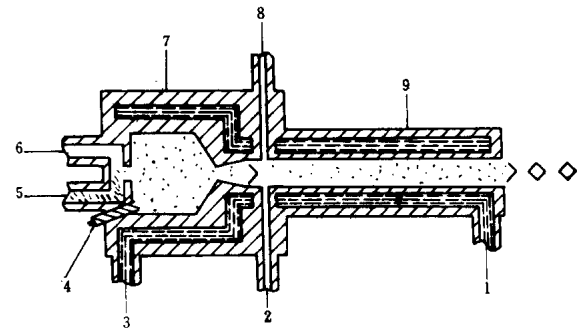


图 3.1-8 高速燃油火焰喷涂

- 1—冷却水出口 2—粉末 3—冷却水进口
4—点火塞 5—燃油 6—氧气 7—燃烧室
8—粉末入口 9—喷嘴管

2.8 电弧喷涂

电弧喷涂原理,如图3.1-9所示。二根送入的通电金属丝相交时产生电弧,由电弧热熔化的金属丝被压缩空气雾化成颗粒,喷射到工件表面形成涂层。这种喷涂方法比线材火焰喷涂具有更高的喷涂效率和好的涂层质量,电弧喷涂效率可达50kg/h 锌。电弧喷涂的另外特点是应用两根不同材料的金属丝,制备“假合金”涂层。

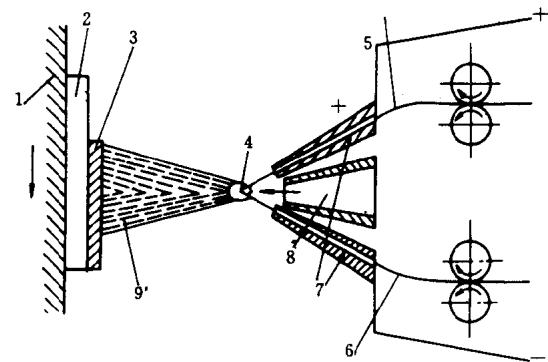


图 3.1-9 电弧喷涂原理

- 1—工件移动部分 2—基体 3—涂层
4—电弧 5—喷涂线材 6—送丝轮
7—导电管 8—压缩气体 9—喷涂束

2.9 等离子喷涂

等离子喷涂是热喷涂技术最重要的一项工艺技术和方法。目前热喷涂粉末材料几乎都可以通过此法制备成涂层。等离子喷涂正在应用的有大气等离子喷涂,可控气氛等离子喷涂和液体稳定等离子喷涂方法,处于研究状态有脉冲、射频、感应耦合等几种等离子喷涂方法。大气等离子喷涂的原理,如图3.1-10所示。它用氩气、氮气、氢气作为离子气、经电离产生等离子高温射流。将输入地材料熔化或熔融喷射到工作表面形成涂层的方法。主要用于制备金属陶瓷,金属和陶瓷涂层。在这种喷涂装置上,对喷涂枪和电流进行改进而发展了超音速等离子喷涂,它的等离子焰流能量密度更高、焰流速度更快,提高了涂层质量。

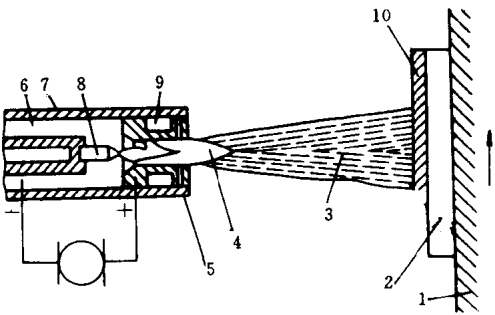


图 3.1-10 大气等离子喷涂

- 1—工件移动部分 2—基体 3—喷涂束 4—等
离子焰 5—阳极 6—送粉入口 7—离子气体
8—阴极 9—冷却水 10—涂层

可控气氛等离子喷涂的原理,如图3.1-11所示。即等离子喷枪置于密封舱室内,由机械手进行操作。将

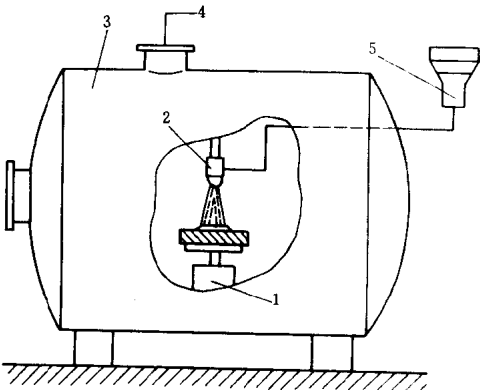


图 3.1-11 可控气氛等离子喷涂

- 1—工件夹具 2—等离子喷枪 3—腔室
4—真空泵 5—送粉器

仓室抽至真空状态即为真空等离子喷涂 (VPS), 仓室为低压状态时称为低压真空等离子喷涂 (LPSS) 仓室的气氛也可以为惰性气氛或其他保护性气氛。这种工艺特点由于低压或气氛可控, 等离子焰流加长, 粒子加热更充分, 氧化减少, 涂层的质量得到明显改善, 并且扩大了热喷涂在沉积金刚石膜, 超导体氧化物涂层方面的应用。

液体稳定等离子喷涂原理, 如图 3.1-12 所示。该喷枪采用水、乙醇、甲醇作为稳定液体。相应地产生氧化、中性或还原性的等离子体。水作稳定液时, 使喷嘴的冷却更为有效, 而且电弧柱强烈紧缩使等离子焰流有极高的热焓。这种等离子喷涂的功率很大, 达 200kW 以上, 特别适合喷涂高熔点的陶瓷材料, 而且喷涂效率高, 成本低。

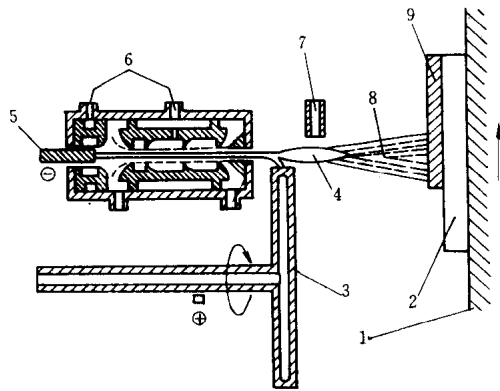


图 3.1-12 液体稳定等离子喷涂
1—工件移动部分 2—基体 3—旋转阳极
4—等离子焰 5—阴极 6—液体（入口）
7—送粉管 8—喷涂束 9—涂层

2.10 反应等离子喷涂

反应等离子喷涂工艺是一种独特的利用等离子体的化学过程制造复合材料、陶瓷、金属间化合物等材料的涂层方法, 如 TiAl、Ti-TiC、Ti-TiN, Mo-MoSi₂, MoSi₂-SiC 等。图 3.1-13 是典型的反应等离子喷涂成形工艺示意图。喷涂成形工艺: 在热等离子源中, 反应物 (粉末状颗粒) 和反应气体进入等离子焰流中, 并在喷射向基体的过程中, 颗粒表面形成化合物, 到达工件表面和其他材料的颗粒产生化学反应形成涂层。尽管在等离子焰流中, 反应物停留时间短, 温度梯度大, 但在反应喷涂其间用气体和固体可以合成碳化物, 硼化物以及氧化物, 使产品的质量和均匀性都能达到冶金方法的水平。已证实用该方法能合成难熔金属碳化物、硼化物和氧化物, 尺寸为 0.005~0.5 μ m 的微小颗

粒的固体薄膜。反应等离子喷涂工艺采用的气体有甲烷、丙烯、氮气、氧气、硅烷或硼烷。这种方法刚开始研究, 但不久将用于生产。

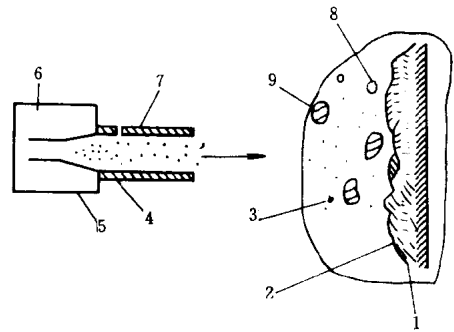


图 3.1-13 反应等离子喷涂
1—反应生成的化合物涂层 2—混合物 3—离子化的颗粒 4—反应气体入口 5—粉末颗粒入口
6—等离子加热器 7—等离子反应器
8—混合物 9—金属及金属材料

2.11 线爆喷涂

线爆喷涂是热喷涂方法一种比较特殊的方法。图 3.1-14 为此喷涂法的放电回路基本原理。当贮存在电容器的电能以高能密度的大电流通过作喷涂材料的导线放电时, 一部分丝材气化爆炸, 其熔融的金属液滴被喷射到工件表面上。此方法的特点:

- 1) 所有金属丝包括难熔的 W、Mo、Ta 等均能进行喷涂。
- 2) 爆炸喷射的颗粒很细, 粒度均匀, 温度很高, 接近沸点。
- 3) 熔滴喷射速度高, 达 500~600m/s, 一次放电爆炸可获得 4~7 μ m 厚的涂层, 而且涂层平整、光滑、致密、结合强度高。

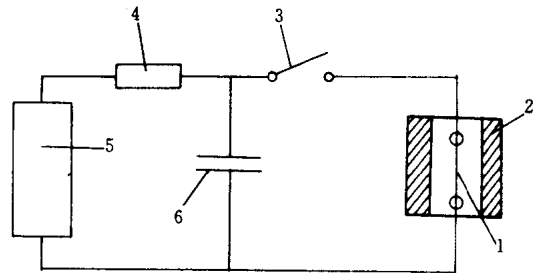


图 3.1-14 线爆喷涂放电回路基本原理图
1—喷涂丝材 2—工件 3—开关
4—电阻 5—充电器 6—电容

4) 不仅在平面上可以进行喷涂,而且更适合中空内表面喷涂。可喷涂工件内径甚至小于 10mm。

2.12 激光喷涂

这是利用高能束激光来加热熔化喷涂材料并喷射到工件表面形成涂层的方法,原理如图 3.1-15 所示。

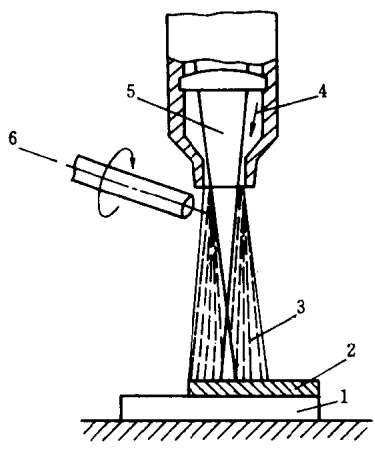


图 3.1-15 激光喷涂
1—工件 2—喷涂层 3—喷涂束 4—保护气体
5—激光束 6—粉末送入管

它通常由激光发生器,喷涂材料供给装置,高压气体供给装置组成,此方法的特点是利用高温度,高能密度的激光作热源,利用高温使喷涂材料与喷涂气氛的气体进行反应来制作非金属涂层。由此可获得三种类型涂层:(1)金属或非金属涂层。(2)复合涂层。(3)特别的复合涂层。这种涂层成分在厚度方向上连续变化。

3 涂层形成和裂纹产生过程

热喷涂涂层一般为典型的层状结构(喷熔层和重熔层除外)。涂层的质量及性能与许多因素有关。表 3.1-2 列出了部分影响涂层的因素。

表 3.1-2 影响涂层性能的部分因素

因素主体	因素因子
喷涂设备	输出功率、焰流速度、温度、环境状况
喷涂材料	硬度、熔点、导热性、收缩系数、粒度、形状、粒度分布
喷涂工艺参数	距离、角度、送粉量、喷枪移动速度
喷涂工件	工件预处理方法,表面形貌,状态、组织、温度、膨胀系数
涂层后处理	涂层封闭方法,涂层冷却速率
涂层的机械加工	加工方法、加工工具材料,加工参数
结合层	自粘结材料,性能、厚度

喷涂颗粒撞击基体时由变形到凝固的时间非常短暂,约为 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ s。撞击到基体表面的第一批颗粒,可以认为相互是独立,撞击时颗粒发生变形,首先在基体表面形成平薄圆片,后续颗粒再不断撞到先前颗粒变形的圆片上,堆积形成涂层。可以认定热喷涂层的形成过程主要为颗粒变形成薄片过程和薄片之间相互结合的两个过程。

处于熔态或软化态的喷涂颗粒,以一定速度撞击基体表面时,粒子的冲击动能,使粒子在撞击变形时,粒子温度进一步上升,加剧了粒子在基体表面的变形程度。但粒子在基体表面的铺开扩展程度,通常取决于粒子材料的表面张力,粒子速度、基体表面形状和温度等几项因素。减少喷涂材料的熔态表面张力,提高粒子温度和速度,提高基体的表面温度,粗糙度和活化程度,都能提高涂层粒子在基体表面的铺开扩展程度和涂层的结合强度。

虽然喷涂粒子由熔态到完全凝固的时间非常短,在瞬间的冷却过程中,粒子边缘与心部温度的不一致性,而使扁平薄片产生收缩和卷曲,这种现象使涂层中产生裂纹状孔隙,后续的喷涂粒子对这些孔隙只能掩盖而不能完全填实。粒子薄平片的收缩和卷曲在喷涂层形成过程中,往往受周围粒子薄片的约束,并不能使单粒子薄片中的热应力完全释放,众多粒子中的残余应力的积累,使涂层产生很大的残余应力,从而大大降低了涂层的自身强度和涂层与基体的结合强度。

涂层内微裂纹是否延展,取决涂层内残余应力的状态和高低。当内应力为拉应力状态时,随着涂层厚度的增加,残余拉应力将增加使微裂纹扩展延深,最终导致涂层的开裂或剥离。大部分热喷涂涂层内应力为拉应力状态,这使涂层的厚度受到限制。但是某些喷涂材料采用高速火焰喷涂工艺,制备的涂层内应力则为压应力,其涂层厚度可达十几毫米。另外当涂层受外力,外界环境影响时,也会诱发微裂纹的扩展,如机械加工,使用时急冷急热温度变化等。

4 热喷涂技术和其他表面技术相互渗透的联合应用

4.1 用化学热处理的方法改善喷涂涂层性能

例 1 用电解渗硼法改进火焰喷涂 NiCr 合金涂层的耐磨性和耐蚀性:在钢上喷涂 NiCr (80-20) 合金涂层,随后在 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 熔盐中进行电解渗硼,可得到 140 μm 厚的渗硼层,渗硼层的平均硬度为 1095HV 是 NiCr 涂层的 4 倍,并在 50℃、50%硫酸中腐蚀率仅为原 NiCr 涂层的 1/6。

例2 为了改进普通火焰喷涂 Ni 基自熔合金涂层耐磨料磨损性能,在其熔融处理范围内对涂层进行等离子渗碳处理,使得多孔喷涂态涂层几乎完全消失,形成均匀致密的涂层。等离子渗碳在靠近涂层生成含有少量含 Mo 和 Fe 的 Cr_3C_2 的碳化物。经磨损试验证实,其耐磨粒磨损性能与高速燃气火焰喷涂制备的 Cr_3C_2 涂层相当。

4.2 用电镀和热喷涂工艺技术的结合来改善喷涂层的性能

例用电镀技术对热喷涂层进行封孔处理,提高涂层的耐磨性,或在电镀层上进行喷涂相同的电镀材料,随后进行热处理,使金属扩散到镀层中以提高喷涂层的结合强度等技术。

4.3 用激光束重熔喷涂层提高涂层的耐磨性

例 用共晶合金粉末喷涂在零件表面,其厚度为 $0.04 \sim 0.06\text{mm}$,然后用激光束对其涂层进行激光扫描重熔,其能量密度为 $10^7 \sim 10^8\text{J/mm}^2$,扫描速度为 $100 \sim 60\text{mm/s}$,经此处理可以大大提高涂层的耐磨性。

5 热喷涂在工业中的应用

热喷涂技术近年来,尤其在能源、汽车和钢铁冶金工业方面的应用获得较大的发展。如在三峡钢铁结构采用热喷涂铝制造长效防腐涂层,预计将达 2000 万吨钢材,20 米长的液压柱塞也将采用热喷涂技术,汽车工业采用热喷涂技术已经或将用来制造下述部件:活塞环、柱塞传感器、燃料喷油嘴、活塞顶、发动机内壁、气缸盖、同步环和排气阀等;在钢铁冶金工业中如:喷涂 ZrB_2 涂层来制造热电偶保护套,用于连续测量熔化的钢和铁的温度,用涂层制造和修复炉内用辊、轧辊、导辊及支承辊,以及用于修复风机、槽、锅炉管道及模具等;热喷涂技术在其他行业如航天、飞机、造船、化工、纺织、油田装置等也都占有重要地位。

热喷涂技术的应用要获得成功,获得好的效果。应了解机械零件服役的工况条件和损坏机理,选择最佳的涂层体系材料,制定最佳的工艺方案及保证最佳的设备工作环境,才能制造出良好的涂层。作者认为成熟稳定的热喷涂技术要在工艺上获得广泛的应用,掌握工艺控制技术和模拟诊断技术是今后应用的主要方向。

5.1 工艺控制

热喷涂工艺技术要获得成功,提高到一个崭新的阶段,必须通过自动化操作,工艺监测工艺模型或模拟

工艺诊断,才能保证工艺的稳定性,减少操作者的人为因素影响,自动对工艺过程进行监测和控制。目前,国外先进的热喷涂设备制造厂家都能提供测量、监测、记录和控制喷涂工艺输入参数的控制台。利用微机和程序逻辑控制器存贮喷涂操作过程的档案维持对整个喷涂工艺过程的控制。喷涂操作机器人已获得了应用,这种高度自动化系统提高了涂层质量和可靠性。

统计工艺管理 (SPC) 方法和试验方法的设计正不断用于热喷涂工艺自动化,提高其自动化的程度;控制系统装置和 SPC 功能的一部分被用于数据记录,以便建立统计过程数据库,把喷涂涂层的性能和喷涂工艺参数联系起来。几家外国公司正在进行热喷涂试验的设计和 SPC 计划,这些方法的工艺数据的迅速增加,将技术知识基础不断改进工艺。对重要涂层和结构如飞机发动机部件的涂层和结构,采用智能工艺控制,依赖这种统计工艺知识反馈到正在研究的工艺模型,控制规则系统和传感器反馈。智能控制装置的实现需要汇集生产工艺资料和制造工艺模拟器的分析方法。特别对等离子喷涂系统更需要这种智能控制装置。

为了保证涂层和质量的可靠性,高效生产系统需要可靠的无损检测 (NDT) 和传感器反馈系统。与热喷涂有关的传感技术如电视成像、高温测定法和激光诊断以及厚度遥测计已取得进展,尤其是用于热喷涂射流中粉末颗粒飞行轨迹成像,光谱仪和远红外辐射高温计等都开始用在实际生产中的工艺控制。超声波检测与计算机扫描方法结合在一起以探测在喷涂过程的脱落和大的涂层缺陷;用涡流电流测量和监测厚度,以及利用热液力和红外探测器绘出热示波图象来探测喷涂过程中涂层和基体的热传导,发现涂层热传导的不连续性证实有涂层形成的变化反馈到智能控制装置以调整喷涂工艺。

5.2 模拟与诊断

其他行业工艺技术的工艺模型,在过去的 20 年里已逐渐的形成。热喷涂工艺技术要相应研究的是焰流对喷涂材料颗粒喷射粒子的“加热”和“加速”,以及颗粒运动的轨迹,变形沉积到基体表面形成的过程。焰流、粒子和基体相互关系和相互作用对涂层形成过程的复杂影响,以建立喷涂工艺模型。

测量和诊断是验证基本模型和推断趋势的关键,测量包括电弧动力学、射流和颗粒的视频监测、火焰喷涂的燃烧温度和光谱学及激光诊断。在工艺控制过程中,传感器将测定关键的涂层参数。如厚度、瞬时密度等并将这些信息送到一个专家系统,与标准进行比较,如果测量值偏离允许值,工艺将自动调整。

第2章 热喷涂涂层材料

1 热喷涂工艺对涂层材料的基本要求

- (1) 涂层材料必须满足设计特性
- 被喷涂的材料必须满足对热喷涂涂层使用功能特性的基本要求，如耐磨、耐蚀、耐高温、抗氧化、可磨耗密封、自润滑、热辐射、导电、绝缘及超导等。
- (2) 涂层材料在加热过程中，具有良好的化学稳定性和热稳定性，不会产生有害的化学反应及有碍涂层使用的晶型转变。
- (3) 涂层材料具有良好的物理性能，与基体或结合底层有良好的性能匹配。
- (4) 涂层材料应满足工艺及设备的要求，如线材应具有一定强度、径值均匀、表面光洁无污染，粉末材料必须有足够的流动性，应干燥清洁、无污染。
- (5) 涂层材料应是无毒性和无产生爆炸的可能性。

2 热喷涂涂层材料分类

热喷涂涂层材料可以依据材料的形状、种类和使用功能进行分类，详见表 3.2-1。

表 3.2-1 热喷涂涂层材料分类表

按形状分类	粉末材料	非复合型粉末、复合型粉末
	丝材、带材	拉拔丝材、拉拔复合丝材、填充芯料复合丝材、塑料包覆柔性丝材
	棒材	
按种类分类	金属及合金	铁基合金，镍基合金，钴基合金，铜基合金，锌、铝及其合金，其他金属及其合金
	金属陶瓷	金属+碳化物，金属+氧化物，金属+硼化物，金属+玻璃，金属+石墨
	陶瓷	碳化物，氧化物，硼化物，硅化物，氮化物
	塑料及有机物	热固性塑料，热塑性塑料，金属塑料，有机涂料
	其他	玻璃、釉料、炉渣，其他非金属材料

(续)

按功能分类	耐磨损	自润滑与减摩，抗粘着磨损，耐磨粒磨损，硬面及纤维磨损，腐蚀磨损及微动磨损
	耐热、抗氧化	耐热，绝热、高温封严
	耐腐蚀	耐环境气氛腐蚀，耐淡水，海水腐蚀，耐化学介质浸渍腐蚀，耐高温燃气冲蚀，耐熔融金属及炉渣腐蚀
	电磁性	导电、超导、半导体、介电、电磁屏蔽
	能量转换	波长吸收，反射，热辐射
	其他功能	催化，辐射屏蔽，生物功能，装饰与工艺

3 热喷涂线材

热喷涂线材是热喷涂技术应用最早的热喷涂材料。大部分可拉拔成丝状的金属材料，基本上都可用于热喷涂。近些年随着复合丝，管丝及塑料包套的柔性喷涂丝的开发，热喷涂线材已从原有的单一金属丝，合金丝发展成金属陶瓷、陶瓷等类型。

对热喷涂线材的基本要求是化学成分和喷涂工艺性能。后者包括丝材的实际尺寸及公差要求，因为线材的直径和圆度影响其输送和可喷涂性。线材直径应与喷嘴孔径相符，误差为（+0.0、-0.1mm）。误差过大则会使送丝困难，太小会发生燃气倒流和回火，造成喷嘴损坏。线材表面应光滑，无刮削缺口及飞边，表面粘着的污物、油脂、氧化皮及其他腐蚀产物，都会使涂层的质量下降。

线材一般以丝卷成盘绕形式供应，并有足够的延展性及硬度，以适合持续热喷涂作业。

线材热喷涂一般都具有沉积速率高、成本低、结合强度较高、设备简单、操作方便等优点，特别适合大批量和大面积的现场喷涂，可用于喷涂各种大型户外钢结构的高效防护涂层和各种机械零部件的耐磨、耐蚀、减摩涂层和尺寸恢复。新型复合丝的发展，更扩大了应用范围。

3.1 锌、铝、锌铝合金及低熔点合金丝

以锌、铝、锡、铅为主要成份的合金丝，主要是利用

它们对钢铁具有良好保护作用,通常用作大气、淡水环境中长效防护涂层,其材料的各种性能详见表 3.2-2。

表 3.2-2 锌、铝、锌铝合金及低熔点合金材料性能

材料名称	牌号	熔点 /℃	主要化学成分 (质量分数)(%)	涂层物理性能	涂层的特性	主要应用
纯锌丝	Zn-1 Zn-2	419	Zn≥99.99 Pb0.003 Fe0.003 Cd0.003 Zn≥99.90 Pb0.03 Fe0.02 Cd0.02	标准电极电位 -0.763V有良好的导电性,导电率 16.7s/mm ² 对电磁波有相当高的反射率,涂层与水泥、石膏、木材、塑料有高的粘附能力	涂层与钢基体的结合强度一般约为 6MPa,孔隙率约为 8%~10%,涂层厚度大于 0.3mm,涂层基本无贯通针孔。锌中含杂质质量越低,涂层的耐蚀性越好 注意:热喷涂锌时,烟雾、粉尘有毒,需防护	主要用于 pH 值为 6~12 的环境中的钢结构长效防护,如大气、淡水中的水闸门、铁塔,喷涂 0.3mm 的锌涂层外加有机涂装,对钢铁的有效保护期已达 25 年。 用作电磁波干扰屏蔽涂层时能提供 60~120dB 的高能衰减屏蔽效应 可用作非金属基体上的喷涂层的过渡底涂层
纯铝丝	LG ₁ L ₁	660	Al≥99.85 Al≥99.7	标准电位 -1.662V 密度 2.70g/cm ³ ,面心立方晶体结构铝与空气中的氧的亲合力极高,能在表面形成坚固的致密的氧化膜涂层与钢表面结合强度应达到 10MPa,致密度应达到 2.45g/cm ³ ,厚度小于 160μm 时应进行封孔处理和表面涂装	铝的耐蚀性取决于氧化膜在介质中的化学稳定性,在各种大气、海水、硝酸中有很高的耐蚀性。铝丝中铜、铁和硅等杂质,会降低铝的耐蚀性 注意:铝粉尘聚集引起的燃烧、爆炸事故	1. 用于含 SO ₂ 的大气、淡水、海水及 pH4.5~8.5 溶液及其他氧化性境中的耐蚀涂层 2. 铝涂层表面有较大的摩擦系数,可用作钢结构强力螺栓连接外的摩擦涂层和舰船甲板的防滑涂层 3. 碳钢表面喷铝涂层、加高温涂料封孔处理后,经高温扩散处理,提高碳钢的高温抗氧化性能
锌铝合金丝	ZnAl15	352~450	Al14~16 Mg0.02~0.04 Zn 余量	这种涂层即有锌涂层的阳极保护效果,且对点蚀和裂纹不敏感的特点和耐环境腐蚀的优点	涂层呈银白色,熔点和锌铝含量比例不同有差异	主要用于户外钢结构的长效保护涂层
铝-硅合金丝	LT ₁	621	Si4.5~6.0 Fe0.6 杂质总量 0.9 铝余量	火焰喷涂层的宏观硬度 96HB	这种合金具有自溶性,涂层颗粒小,致密,硬度高于纯铝涂层,但耐蚀性低于纯铝涂层	1. 适用于喷涂机械零件,修复磨损的铝部件和修补铝铸件的砂眼 2. 用于含盐气氛中的耐蚀涂层 3. 玻璃上的热反射和光反射涂层
锡丝	Sn-1 Sn-2	232	Sn≥99.9 Sn≥99.8	涂层呈白色,硬度为 10HB	涂层非常容易粘附石膏和玻璃表面 注意:热喷涂时,严格控制火焰的能量,否则锡烧损严重,并产生大量有害烟雾	1. 用作食品容器的耐蚀涂层 2. 非金属表面热喷涂时的粘附底涂层

(续)

材料名称	牌号	熔点 /℃	主要化学成分 (质量分数)(%)	涂层物理性能	涂层的特性	主要应用
锡-锌合金丝	70Sn/ 30Zn	270~ 325	Sn70 Zn30	涂层致密、晶粒细小, 几乎无孔隙, 硬度 30~40HB		主要用在电子元器件表面的焊接导线涂层
锡基巴氏合金丝	CH-A10	约 354	Sb7.5、Cu3.5 Pb0.25、Sn 余量	涂层致密	火焰喷涂层有良好的吸附油膜和储油能力、摩擦系数小, 导热性好, 有良好的相容性和嵌入性	特别适合高速低负荷轴承、制备滑动轴承涂层和压缩机、鼓风机、汽轮机、船用内燃机轴瓦的修复
铅丝	Pb-1 Pb-2	328	Pb≥99.994 Pb≥99.99	具有良好的防 X-射线等辐射的能力	特别耐硫酸腐蚀, 也耐盐酸、磷酸、铬酸和氢氟酸腐蚀, 不耐硝酸	主要用作耐蚀涂层
铅基巴氏合金丝	PbSb6		Sb5.5~5.6 Pb 余量	注意: 含铅的材料, 烟雾极其有毒, 需认真防护		主要用作低速, 低负荷或静载下工作的轴承涂层

1

3.2 镍及镍基合金丝

镍是一种白色金属,其性质类似铁,但具有更好的抗氧化,耐热和耐蚀性,韧性好,强度高。添加铬元素的镍铬合金丝,是著名的耐热抗氧化电炉丝材料。镍-铬-钛合金丝则具有优异的抗高温燃气冲蚀性能。镍-铜合金,即所谓的“蒙乃尔”合金,具有很好耐蚀性能特别是耐氟化氢和耐海水腐蚀性能。镍及镍基合金丝

的性能详见表 3.2-3。

3.3 铁基合金丝

钢是工业广泛应用的工程材料,是铁和碳的合金。随着碳含量的增加,钢的硬度和强度增高,耐磨性提高,但延展性和韧性降低。加入铬、镍等合金元素,可制成不锈钢,耐热钢或合金工具钢。各种铁基合金丝的性能见表 3.2-4。

表 3.2-3 镍及镍基合金材料性能

材料	牌号	熔点 /℃	主要化学成分 (质量分数)(%)	其他物理性能	涂层特性	适用范围
纯镍丝	GB3120—88 N6	1453	Ni+99.5 C≤0.1、Si≤0.1 Fe≤0.1、S≤0.05 Cu≤0.06	密度 8.9 (g/cm ³) 宏观硬度 58Rb	有一定硬度和耐蚀性,在水、还原性酸、还原性气氛和各种化学药品中有很强的耐蚀性,镍溶于硝酸和王水,并能缓溶于盐酸、硫酸。360℃以下有磁性	主要用作耐腐蚀涂层,如泵活塞,旋转轴、密封环等
镍铬耐热合金丝	GB3120—88	1420	Ni77~79 Cr19-21 杂质 Fe、Mn、 S、C、Si≤4	电阻率 (20℃) 108 (μΩ·cm)	合金组织为 Ni、Cr 奥氏体固溶体,在高温有优良的抗起皮、抗氧化性能、耐酸、碱,但不宜含硫酸气氛的燃烧废气,易受盐酸、醋酸的侵蚀	在高达 1200℃氧化性气氛中耐氧化用作低碳钢、低合金钢基体在 980℃以下的抗热耐氧化涂层,用作耐高温陶瓷涂层的粘结底层

(续)

材料	牌号	熔点 /℃	主要化学成分 (质量分数) (%)	其他物理性能	涂层特性	适用范围
镍铜合金丝	GB3113—80 NCu28- 2.5-1.5	1300 ~ 1350	Cu29, Fe0.9 Al<0.5, Mn1.1, Co.1, Si0.05, S0.35		这种合金有优良的耐蚀性。耐非氧化性酸的腐蚀,对氢氟酸的耐蚀性非常好,耐热碱。不耐氧化性酸,熔盐,含硫高温气体的腐蚀。在锡盐、汞盐中腐蚀迅速	用于腐蚀环境中使用的机械零部件的耐蚀涂层 如:海洋环境用的各种泵的柱塞杆、轴、氢氟酸环境用轴类
镍铬钛合金丝	TAFALOY 45CT (美)		Cr43.0 Ti<4.0 Fe<0.1 Ni 余		喷涂层与钢管基体能形成牢固的结合,热膨胀率与碳钢接近,韧性好,不易产生裂纹和剥离,在 400~800℃具有优异的抗硫化物,高温燃气腐蚀性	主要用于锅炉管道的耐热,抗含硫燃气腐蚀的涂层
镍铬铝合金丝			Cr15~17 Al5~7 Ni 余	涂层显微硬度 58~62RA	涂层具有自粘结性能,有优良的抗高温氧化,耐燃气侵蚀性能,使用温度可达 1000℃	直接用作抗高温氧化和燃气侵蚀的高温保护涂层
镍铬铁合金丝	GB1234—88 Cr15Ni60	~ 1425	Ni60 Cr15 Fe 余		这是一种耐热,耐腐蚀性能优良的电热丝,在 1066℃温度以下具有良好的抗氧化性能,在含硫量较小的腐蚀气体中,能保护钢铁基体耐 870~982℃高温	主要用作耐高温抗氧化涂层

表 3.2-4 铁基合金材料性能

材料	牌号	熔点 /℃	化学成分 (质量分数) (%)	其他物理性能	涂层特性	适用范围
低碳钢丝	GB343—88 GB344—88	1500 ~ 1520	Co.09~0.15 Si0.12~0.3 Mn0.25~0.5 P≤0.045 S≤0.055	硬度 140~200HB 线膨胀系数 (100℃) (10 ⁻⁶ /K) 12.19	其涂层易于切削加工,价格低,比同类材质的整体低碳钢制件的耐磨性好 注意:涂层厚度大于 0.75mm 时,工件表面需开沟槽	用于滑动磨损部件及轴承面,超差件修复,铸件孔隙填补
中碳钢丝	GB345—88 45 [#]	1490	Co.42~0.50 Si0.17~0.37 Mn0.5~0.8 P≤0.004 S≤0.04	硬度 200~280HB 线膨胀系数 11.2 (10 ⁻⁶ /K)	喷涂层比相同硬度值的中碳钢部件有更好的抗粘差磨损能力,涂层厚度不受限制	用于轴类零件的喷涂和修复内孔表面涂层

(续)

材料	牌号	熔点 /℃	化学成分 (质量分数)(%)	其他物理性能	涂层特性	适用范围
高碳钢丝	GB543—88 80 [#]	1420	C0.77~0.85 Si0.17~0.37 Mn0.5~0.8 Ni≤0.25 Cu≤0.25 P≤0.040	硬度 >280HBS 线膨胀系数 11.11 (10 ⁻⁶ /K)	涂层硬度相当高,耐磨性好,最好采用磨削加工	用于各种轴类零件喷涂耐磨涂层,如曲轴轴颈、缸套等
碳素工具 纲钢丝	YB543—88			硬度 >500HB	涂层有很高硬度,比高碳钢丝涂层有更好的耐磨性,其粘聚强度亦比高碳钢涂层高	用于制备高耐磨涂层,如泥浆泵柱塞,石油钻机柱塞
高碳铬轴 承钢丝	YB245—88 GCr15		C0.95~1.05 Si0.15~0.35 Mn0.2~0.4 P≤0.027 S≤0.02 Cr1.3~1.65 Ni≤0.3 Fe余	实体硬度 63HRC	特性与碳素工具纲丝涂层相似,其涂层的韧性、硬度略高于前者,机械加工最好采用磨削	主要用于表面硬化耐磨涂层
高碳高铬 不锈钢丝	GB4240—88 2Cr13	1450 ~ 1510	C0.16~0.24 Mn≤0.6 Cr≤12~14 Si≤0.6 Fe余	硬度 33HRC 线膨胀系数 11.0 (10 ⁻⁶ /K)	涂层组织为马氏体,具有较高的硬度和耐磨性,涂层收缩性小,能够喷涂厚涂层,可以切削加工	主要作于耐磨耐蚀硬面涂层
18-8型 奥氏体 不锈钢丝	GB4240—88 1Cr18Ni9Ti	1370 ~ 1400	C≤0.03 Si≤1.0 Mn≤2.0 P≤0.035 S≤0.030 Cr17~19 Ni8~11 Ti0.8 Fe余		涂层组织主要为奥氏体,在多数腐蚀性较强的介质中有化学稳定性,但耐磨性一般,喷涂层收缩性大,易开裂,作耐蚀涂层需进行封孔处理	主要用于耐蚀涂层
低碳高锰 奥氏体 不锈钢	GB4240—88 1Cr18Mn8Ni5N	1400 ~ 1450	C≤0.1, Si≤1.0 Mn7.5~10 P≤0.08 S≤0.03 Cr17~19 Ni4~6 N0.15~0.25 Fe余		性能同上,但涂层硬度提高,耐蚀性和收缩性减小,涂层不易开裂	主要用于耐蚀且有一定耐磨的场合

3.4 铜及铜合金丝

铜及铜合金具有良好的导电,导热性,且有良好的韧性和可锻性。

除了氨以外,铜不受碱的侵蚀,在磷酸和氢氟酸中几乎是惰性,但受硝酸和盐酸的快速侵蚀。

铜和铜合金丝,在热喷涂中,被用于喷涂导电,耐

蚀,装饰涂层和用作减摩轴承涂层,其各类铜合金的性能见表 3.2-5。

3.5 钼丝

钼是一种难熔金属,熔点为 2615℃,是热和电的良好导体,热膨胀系数低,在边界润滑条件下,有很好的耐磨性能。

表 3.2-5 铜及铜合金材料性能

材料	牌号	熔点 (℃)	化学成分 (%)	其他物理性能	涂层特性	适用范围
紫铜丝	GB3109—88 T1 T2	1083	Cu≥99.95 Cu≥99.9	硬度 96HB	涂层由于氧化作用,韧性下降,厚涂层需控制涂层温度	导电、导热和装饰涂层
黄铜丝	GB3110—88 HSn62-1	940	Cu67 Zn33	硬度 110~140HRB 电导率 15.66×10 ⁶ (s/m)	喷涂时沉积效率高,涂层致密且较硬,但喷涂时易发生锌烧损现象,同时烟雾有毒,需防护	喷涂修复黄铜铸件的砂眼以及耐海水腐蚀部件等
铝青铜丝	QA19-2		Al18~10 Mn1.5~2.5 Fe≤0.5 Zn≤1.0 Sn≤0.1 Pb≤0.03 P≤0.01 杂质≤1.7 Cu 余		铝青铜喷涂时,雾化颗粒较粗大,但涂层致密,容易加工,电弧喷涂时,涂层表现出自粘结性能	适用于各种青铜工件的喷涂,也可以做铜基体上的过渡层
锡青铜丝	GB3124—88 QSn4-3		Sn3.5-4.5 P<0.03 Zn2.7-3.3 Fe<0.06 杂质<0.2, Cu 余		涂层有较高的力学性能,减摩性能和耐蚀性,无磁性	用于各种青铜件及轴承涂层,如:衬套、轴套、抗磁元件
磷青铜丝	GB3124—88 QSn7-0.2		Sn6~8 P0.1~0.25 杂质<0.15 Cu 余量		涂层呈淡黄色,在大气、淡水和海水中耐蚀,易于焊接和钎焊,碰击时无火花	用于需要一定耐粘着磨损性能,负荷承载能力高的滑动轴承,轴套等场合,也用作装饰涂层

钼在常温下呈化学惰性,200℃开始氧化,400℃时迅速氧化,生成 MoO₃ 急剧升华,使其氧化进一步加剧。在高于 440℃的温度下,钼与硫发生反应,生成 MoS₂ 固体润滑剂,具有良好的自润滑性能。在 2000℃高温下,钼能与硅生成 MoSi₂,它在 1500℃以下具有优异的抗高温氧化能力。因此,在喷钼底层上喷涂硅,再进行扩散热处理,就可以获得耐高温氧化的 MoSi₂

涂层。
在热喷涂工艺中,钼除直接用作耐磨涂层外,最重要的应用是作自粘底层材料。除铜及铜合金、铬板、氮化表面和硅铁外,钼和高钼合金的熔体,能够粘结到大多数金属及合金的平滑、干净的表面上,产生自粘效应。火焰喷钼涂层的宏观硬度 40HRC,涂层的结合强度在预处理的碳钢表面可达 50MPa。

铝涂层主要用作边界润滑条件下的耐磨涂层，如汽车变速器同步锥环、机床轴，特别适于喷涂薄涂层。作自粘底层、适用于普通钢、不锈钢、蒙乃尔合金、铸铁、铸钢、镁合金、铝及铝合金、陶瓷和玻璃等表面。

3.6 镍铝复合喷涂丝

这是由镍和铝组对成的包复型自粘结复合丝材，适用于可燃气体火焰喷涂。在火焰喷涂过程中，当丝达到一定温度时，镍与铝发生剧烈的铝热反应，生成镍铝金属间化合物并放出大量的热，喷涂到干净的金属基体表面，能产生自粘结效应。在某些金属表面微区产生扩散可获得部分冶金结合，而且喷涂层表面粗糙，是随后喷涂其他涂层材料比较理想的粗糙表面，因而广泛用于涂层的自粘底涂层。

镍铝复合丝涂层具有一定的耐磨性、涂层的宏观硬度约22HRC，涂层的结合强度约30MPa，涂层密度约6.0g/cm³。在815℃以下具有优异的抗高温氧化能力，但不耐酸、碱、盐等溶液的腐蚀。

镍铝复合丝对喷涂工艺参数变化的适应性优于铝

丝，重复性好，涂层性能比相应的镍铝复合粉末涂层更好。

3.7 一步法耐磨涂层用复合丝

这是一种由镍、铝、铁、铬等元素组成的自结合不锈钢型复合丝。它的特点是：含有较高的增效组对元，喷涂时能产生放热反应，可提高涂层的结合强度。另外含有形成耐磨相结构的组元，可使涂层具有较高的耐磨性，足够的镍、铬组元，又使涂层具有不锈钢的耐蚀性和抗高温氧化能力。在427℃以下，有良好的抗氧化性能。喷涂层的硬度约30HRC，结合强度可达22MPa，涂层收缩率适中，可一次完成较厚涂层的喷涂，可磨削出良好的表面。主要应用于硬面轴承及轴颈，如磨耗或加工超差的工件的修复。耐气蚀及冲蚀磨损件的修复，如各种轴、硬面轴承，柱塞、拉丝绞盘、机床导轨等。

3.8 陶瓷棒

陶瓷棒是美国诺顿公司开发的火焰喷涂材料，是将微细的氧化物粉末粘合压制烧结而成。陶瓷棒的规格、成分及性能见表3.2-6。

表 3.2-6 陶瓷棒的规格、成分及性能

商标牌号 ^①	组 成 (质量分数)(%)								
	ZrO ₂	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Na ₂ O	CaO	Cr ₂ O ₃	MgO
Rokide A (R-A)	—	98.55	0.58	0.10	0.04	0.31	0.19	—	0.23
Rokide C (R-C)	—	3.16	8.39	0.78	0.16	0.28	1.28	82.94	2.96
Rokide Z (R-Z)	94.57	0.63	0.33	0.33	0.39	0.02	3.73	—	—
Rokide ZS (R-ZS)	64.12	1.42	33.22	0.14	0.19	0.07	0.57	—	—
Rokide MA (R-MA)	—	66.8	2.9	0.04	0.02	0.02	0.69	—	29.5

① 美国 Norton 公司商标牌号。

陶瓷棒喷涂的主要特点是陶瓷棒端部在氧-乙炔火焰中停留时间较长，接近焊条熔化方式，使陶瓷棒端部充分熔化后，再用射流雾化成微滴喷射到工件表面

形成涂层。从而克服了粉末喷涂时，由于陶瓷熔点高，在热源中加热时间短，熔化不充分而产生“生粒”现象。

陶瓷棒喷涂层的热性能见表3.2-7。

表 3.2-7 喷涂层的热性能数据

性能 类型	晶格类型	密度 /g·cm ⁻³	显微硬度 (努氏)	孔隙率 (%)		结合强度 (对钢) /MPa	摩擦系数 μ	喷涂态最小 表面粗糙度 ^④ Ra/μm
				总	开孔			
R-A	γ型	3.3	2000	8	7	6.89	0.10 ^②	5.1~7.6

(续)

性能 类型	晶格类型	密度 /g·cm ⁻³	显微硬度 (努氏)	孔隙率 (%)		结合强度 (对钢) /MPa	摩擦系数 μ	喷涂态最小 表面粗糙度 ^④ R _a /μm
				总	开孔			
R-C	六方	4.6	1900	4	3	6.89 ^①	0.11 ^③	5.1~7.6
R-Z	立方	5.2	1000	8	7	—	0.10 ^②	5.1~7.6
R-ZS	立方	3.8	1000	8	4	6.89 ^①	0.10 ^②	5.1~7.6
R-MA	立方	4.52	—	6	4	—	—	—

- ① 对非金属基体为 4kPa。
② 对摩材料为铬 17 型高铬不锈钢 (440)。
③ 对摩材料为黄铜。
④ 磨削后表面粗糙度 0.76~0.127μm, 抛光后表面粗糙度 0.435~0.114μm。

4 热喷涂粉末材料

4.1 热喷涂粉末主要特性

(1) 粉末形状 热喷涂粉末必须具有良好的流动性, 以利于连续、均匀、流畅地送入喷射焰流中。热喷涂粉末的形状最好呈球形或近似球形, 金属及合金粉末的霍尔流速一般为 20~50s/50g。球形粉末的比表面积最小, 其表面在热源温度下受氧化及其杂质污染程度比不规则粉末要小, 且各向受热均匀, 有利于提高涂层的性能。

(2) 粉末的粒度 粉末的粒度直接影响着粉末的输送、粉末的受热状态和涂层的密度。粒度的选择取决于使用的热源种类, 喷涂材料的熔点、热导率、比热容和密度等。更重要的是要保证粉末材料粒度的“可喷涂性”和获得沉积效率较高、涂层结合强度高的喷涂层。

(3) 粉末的粒度分布 指某一类型的粉末其不同粒度粉末所占有的比率。粉末粒度分布宽, 在喷涂过程中会出现细小粉末易“结珠”, 而粒大粉末则飞溅等现

象。合理的粉末粒度分布能保证涂层的质量、工艺的确定和最佳的沉积效率。

(4) 粉末的松装密度 指粉末松装不振时, 单位容积粉末的质量, 单位为 g/cm³。松装密度是粉末体的一个综合性能, 受材料的种类和成分、粉末的形状、粒度分布、粒度、粉末内含气体的量及粉末表面干燥程度等表面状态诸因素的影响。松装密度与粉末的呈球形状、材料的真密度、粉末表面干燥程度, 粉末粒度分布成正比。与粒度, 粉末内含气量成反比。

(5) 粉末的表面质量 粉末材料有极大的表面积, 粉末表面的含氧量或有其他污染物, 对喷涂层的质量产生影响。提高粉末的抗氧化能力和去除粉末表面吸附的潮气, 或对粉末进行还原, 净化处理, 都能改善喷涂层的质量。

4.2 金属及合金粉末

大部分金属及合金材料, 通过适当的制粉方法都可制成粉末。由于粉末的比表面远高于实体材料, 热喷涂时要特别注意防止粉末表面的过度氧化。表 3.2-8 列出了常用金属及合金粉末的性能。

表 3.2-8 常用金属粉末的性能

材料	牌号	化学成分 (质量分数)(%)	粉末性能	涂层特性	适用范围
铝粉		Al>99.0	熔点 650℃ 粒度-88~+44μm	硬度 40~50HRB 涂层密度 2.35~2.84g/cm ³ 涂层表面粗糙度 R _a 16.5~20.3μm	1. 导电涂层 2. 电磁波屏蔽涂层 3. 铝、镁合金件修复
铝硅合金粉末	QFAlSi-02	Si11~13 Mn<0.15 Fe<0.8 Cu<0.3 Zn<0.2 Mg0.1 Al 余	熔点~650℃ 粒度-149~+44μm	涂层密度 2.4~2.5g/cm ³ 涂层硬度 96HRB 涂层表面粗糙度 R _a 15~20μm 涂层厚度<2.5	铝、镁合金的喷涂及修复