

热喷涂技术概述

众所周知，除少数贵金属外，金属材料会与周围介质发生化学反应和电化学反应而遭受腐蚀。此外，金属表面受各种机械作用而引起的磨损也极为严重。大量的金属构件因腐蚀和磨损而失效，造成极大的浪费和损失。据一些工业发达国家统计，每年钢材因腐蚀和磨损而造成的损失约占钢材总产量的10%，损失金额约占国民经济总产值的2-4%。如果将因金属腐蚀和磨损而造成的停工、停产和相应引起的工伤、失火、爆炸事故等损失统计在内的话，其数值更加惊人。因此，发展金属表面防护和强化技术，是各国普遍关心的重大课题。

随着尖端科学和现代工业的发展，各工业部门越来越多地要求机械设备能在高参数(高温、高压、高速度和高度自动化)和恶劣的工况条件(如严重的磨损和腐蚀)下长期稳定的运行。因此，对材料的性能也提出更高要求。采用高性能的高级材料制造整体设备及零件以获得表面防护和强化的效果，显然是不经济的，有时甚至是不可能的。所以，研究和发展材料的表面处理技术就具有重大的技术和经济意义。而表面处理技术也在这种需求的推动下获得了飞速的发展和提高。

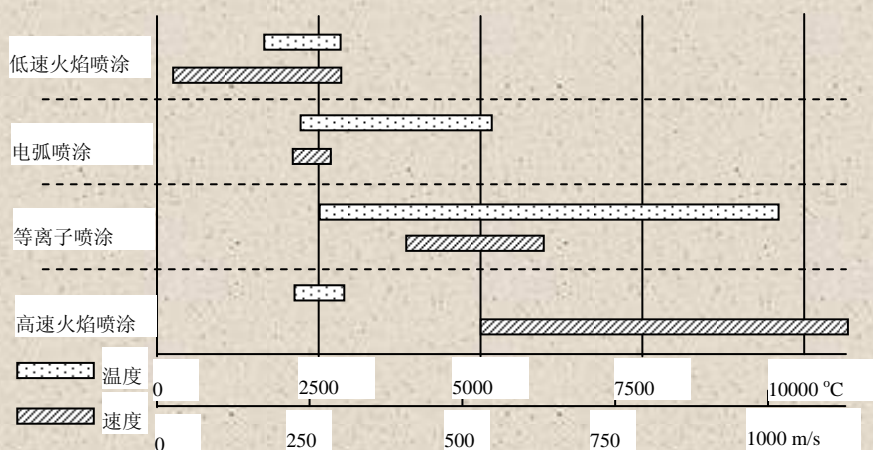
热喷涂技术就是这种表面防护和强化的技术之一，是表面工程中一门重要的学科。所谓热喷涂，就是利用某种热源，如电弧、等离子弧、燃烧火焰等将粉末状或丝状的金属和非金属涂层材料加热到熔融或半熔融状态，然后借助焰流本身的动力或外加的高速气流雾化并以一定的速度喷射到经过预处理的基体材料表面，与基体材料结合而形成具有各种功能的表面覆盖涂层的一种技术。

一. 热喷涂技术的分类

根据热源的种类热喷涂技术主要分类为：

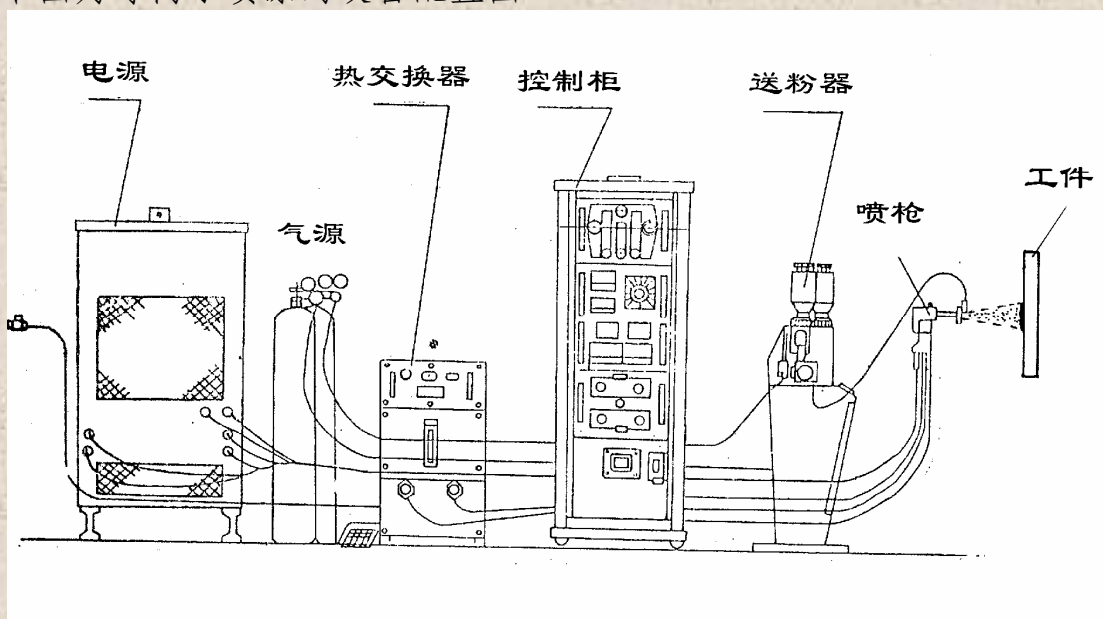
热 源	温 度 ℃	喷 涂 方 法
火 焰	约 3000	粉末火焰喷涂(焊)
		丝材火焰喷涂
		陶瓷棒材火焰喷涂
		高速火焰喷涂(HVOF)
		爆炸喷涂(D - GUN)
电 弧	约 5000	电弧喷涂
等 离 子 弧	10000 以上	大气等离子喷涂(APS)
		低压等离子喷涂(LPPS)
		水稳等离子喷涂

各种热喷涂方法的热源温度和流速



二. 热喷涂设备

虽然因热喷涂的方法不同其设备也各有差异,但依据热喷涂技术的原理,其设备都主要由喷枪、热源、涂层材料供给装置以及控制系统和冷却系统组成.下图为等离子喷涂的设备配置图.



三. 热喷涂工艺

热喷工艺过程如下:

工件表面预处理 → 工件预热 → 喷涂 → 涂层后处理

1. 表面预处理

为了使涂层与基体材料很好地结合,基材表面必须清洁及粗糙,净化和粗化表面的方法很多,方法的选择要根据涂层的设计要求及基材的材质、形状、厚薄、表面原始状况以及施工条件等因素而定.

净化处理的目的是除去工件表面的所有污垢,如氧化皮、油渍、油漆及

其他污物，关键是除去工件表面和渗入其中的油脂。净化处理的方法有，溶剂清洗法、蒸汽清洗法、碱洗法及加热脱脂法等。

粗化处理的目的是增加涂层与基材间的接触面，增大涂层与基材的机械咬合力，使净化处理过的表面更加活化，以提高涂层与基材的结合强度。同时基材表面粗化还改变涂层中的残余应力分布，对提高涂层的结合强度也是有利的。粗化处理的方法有喷砂、机械加工法(如车螺纹、滚花)、电拉毛等。其中喷砂处理是最常用的粗化处理方法，常用的喷砂介质有氧化铝、碳化硅和冷硬铸铁等。喷砂时，喷砂介质的种类和粒度、喷砂时风压的大小等条件必须根据工件材质的硬度、工件的形状和尺寸等进行合理的选择。对于各种金属基体，推荐采用的砂粒粒度约为 16 - 60 号砂，粗砂用于坚固件和重型件的喷砂，喷砂压力为 0.5 - 0.7Mpa，薄工件易于变形，喷砂压力为 0.3 - 0.4 Mpa。特别值得注意的一点是，用于喷砂的压缩空气一定要是无水无油的，否则会严重影响涂层的质量。喷涂前工件表面的粗化程度对大多数金属材料来说 2.5 - 13 μmRa 就够了。随着表面粗糙度的增加涂层与基体材料的结合增强，但是当表面粗糙度超过 10 μmRa 后，涂层结合强度的提高程度便会减低。

对于一些与基材粘结不好的涂层材料，还应选择一种与基体材料粘结好的材料喷涂一层过渡层，称为粘结底层，常用作粘结底层的材料有 Mo、NiAl、NiCr 及铝青铜等。粘结底层的厚度一般为 0.08 - 0.18 μm 。

2. 预热

预热的目的是为了消除工件表面的水分和湿气，提高喷涂粒子与工件接触时的界面温度，以提高涂层与基体的结合强度；减少因基材与涂层材料的热膨胀差异造成的应力而导致的涂层开裂。预热温度取决于工件的大小、形状和材质，以及基材和涂层材料的热膨胀系数等因素，一般情况下预热温度控制在 60 - 120 $^{\circ}\text{C}$ 之间。

3. 喷涂

采用何种喷涂方法进行喷涂主要取决于选用的喷涂材料、工件的工况及对涂层质量的要求。例如，如果是陶瓷涂层，则最好选用等离子喷涂；如果是碳化物金属陶瓷涂层则最好采用高速火焰喷涂；若是喷涂塑料则只能采用火焰喷涂；而若要在户外进行大面积防腐工程的喷涂的话，那就非灵活高效的电弧喷涂或丝材火焰喷涂莫属了。总之，喷涂方法的选择一般来说是多样的，但对某种应用来说总有一种方法是最好的。

预处理好的工件要在尽可能短的时间内进行喷涂，喷涂参数要根据涂层材料、喷枪性能和工件的具体情况而定，优化的喷涂条件可以提高喷涂效率、并获得致密度高、结合强度高的高质量涂层。

4. 涂层后处理

喷涂所得涂层有时不能直接使用，必须进行一系列的后处理。

用于防腐的涂层,为了防止腐蚀介质透过涂层的孔隙到达基材引起基材的腐蚀,必须对涂层进行封孔处理.用作封孔剂的材料很多,有石蜡、环氧树脂、硅树脂等有机材料及氧化物等无机材料,如何选择合适的封孔剂,要根据工件的工作介质、环境、温度及成本等多种因素进行考虑.

对于承受高应力载荷或冲击磨损的工件,为了提高涂层的结合强度,要对喷涂层进行重熔处理(如火焰重熔、感应重熔、激光重熔以及热等静压等),使多孔的且与基体仅以机械结合的涂层变为与基材呈冶金结合的致密涂层.

有尺寸精度要求的,要对涂层进行机械加工.由于喷涂涂层具有与一般的金属及陶瓷材料不同的特点,如涂层有微孔,不利于散热;涂层本身的强度较低,不能承受很大的切削力;涂层中有很多硬的质点,对刀具的磨损很快等,因而形成了喷涂涂层不同于一般材料的难于加工的特点.所以必须选用合理的加工方法和相应的工艺参数才能保证喷涂层机械加工的顺利进行和保证达到所要求的尺寸精度.

四. 热喷涂技术的特点

从热喷涂技术的原理及工艺过程分析,热喷涂技术具有以下一些特点.

1. 由于热源的温度范围很宽,因而可喷涂的涂层材料几乎包括所有固态工程材料,如金属、合金、陶瓷、金属陶瓷、塑料以及由它们组成的复合物等.因而能赋予基体以各种功能(如耐磨、耐蚀、耐高温、抗氧化、绝缘、隔热、生物相容、红外吸收等)的表面.

2. 喷涂过程中基体表面受热的程度较小而且可以控制,因此可以在各种材料上进行喷涂(如金属、陶瓷、玻璃、布疋、纸张、塑料等),并且对基材的组织性能几乎没有影响,工件变形也小.

3. 设备简单、操作灵活,既可对大型构件进行大面积喷涂,也可在指定的局部进行喷涂;既可在工厂室内进行喷涂也可在室外现场进行施工.

4. 喷涂操作的程序较少,施工时间较短,效率高,比较经济.

随着热喷涂应用要求的提高和领域的扩大,特别是喷涂技术本身的进步,如喷涂设备的日益高能和精良,涂层材料品种的逐渐增多、性能逐渐提高,热喷涂技术近十年来获得了飞速的发展,不但应用领域大为扩展,而且该技术已由早期的制备一般的防护涂层发展到制备各种功能涂层;由单个工件的维修发展到大批的产品制造;由单一的涂层制备发展到包括产品失效分析、表面预处理、涂层材料和设备的研制、选择,涂层系统设计和涂层后加工在内的喷涂系统工程;成为材料表面科学领域中一个十分活跃的学科.并且在现代工业中逐渐形成象铸、锻、焊和热处理那样的独立的材料加工技术.成为工业部门节约贵重材料、节约能源、提高产品质量、延长产品使用寿命、降低成本、提高工效的重要的工艺手段,在国民经济的各个领域内得到越来越广泛的应用.

五. 各种热喷涂方法概述

1. 氧乙炔火焰喷涂(焊)

是最早的一种喷涂方法。它是利用氧和乙炔的燃烧火焰将粉末状或丝状、棒状的涂层材料加热到熔融或半熔融状态后喷向基体表面而形成涂层的一种方法。它具有设备简单、工艺成熟、操作灵活、投资少、见效快的特点。它可制备各种金属、合金、陶瓷及塑料涂层，是目前国内最常用的喷涂方法之一。但是，由该方法制备的涂层孔隙度较大，与基体材料的结合强度也较低。但是，对于自熔合金而言，如若采用燃烧火焰将其一次喷融或将喷涂层进行二次重熔(有火焰重熔、感应重熔和炉熔等)的方法则称为喷焊，喷焊涂层由于与基体材料呈冶金结合状态，因而与基体材料的结合强度大大提高，可以应用于冲击大、负荷重的工况下，如连续铸造拉矫辊、热轧矫直辊表面采用镍基自熔合金喷焊涂层进行强化，均获得了十分良好的耐蚀、耐磨和抗热疲劳的强化效果。

2. 爆炸喷涂(D - GUN)

本方法是利用氧和可燃性气体的混合气，经点火后在喷枪中爆炸，利用脉冲式气体爆炸的能量，将被喷涂的粉末材料加热、加速轰击到工件表面而形成涂层。气体燃烧和爆炸的结果可产生超音速高能气流，爆炸波的传播速度高达 3000 m/s ，其中心温度可达 3450°C ，粉末粒子的飞行速度可达 1200 m/s 。因而爆炸喷涂层涂层致密，与基体的结合强度高，最高可达 24 kg/mm^2 。该法的缺点是噪音大，而且爆炸是不连续的，因而效率较低。爆炸喷涂是20世纪50年代由美国联合碳化物公司发明，但问世后许多年都由该公司所垄断，不对外出售技术和设备，只在其服务公司内为用户进行喷涂加工，主要喷涂陶瓷和金属陶瓷，进行航空发动机的维修。

3. 高速火焰喷涂(HVOF)

高速火焰喷涂(或称超音速火焰喷涂)是20世纪80年代出现的一种高能喷涂方法，它的开发是继等离子喷涂之后热喷涂工业最具创造性的进展。虽然高速火焰喷涂方法可喷涂的材料很多，但由于其火焰含氧少温度适中，焰流速度很高，能有效地防止粉末涂层材料的氧化和分解，故特别适合碳化物类涂层的喷涂。该设备发展到第三代，性能有了大幅度的提高，例如JP-5000、DJ-2700等设备其室压达到8-12 bar，功率达到100-120 kw，喷涂效率可达 10 kg/h (WC-Co)，涂层厚度可达数mm，涂层性能已能达到爆炸喷涂的水平。在许多工业部门获得广泛的应用。如航空发动中的耐磨涂层、造纸机械用的镜面涂层等。近年来，由于电镀铬工艺的环境污染问题，电镀铬工业在一些工业发达国家受到严格的限制，并逐渐被淘汰，采用高速火焰喷涂涂层代替镀铬层的应用越来越受到工业界的关注和重视。

4. 电弧喷涂

电弧喷涂是在两根丝状的金属材料之间产生电弧，电弧产生的热使金属

丝熔化，熔化部分由压缩空气气流雾化并喷向基体表面而形成涂层。该工艺也具有设备一次投资少，使用方便、效率高等特点，但喷涂材料必须是导电的金属及合金丝，因而其应用受到了一定的限制，但它的高效率使得它在喷涂 Al、Zn 及不锈钢等大面积防腐应用方面成为首选工艺。

5. 等离子喷涂 (APS)

当某种气体如氮、氩、氢及氦等通过一压缩电弧时产生电离而形成电中性的等离子体(是物质除气、液、固态外的第四态)。等离子弧的能量集中温度很高，其焰流的温度在万度以上，可以将所有固态工程材料熔化。以这种高温等离子体作热源将涂层材料熔化制备涂层的工艺就是等离子喷涂。国内外已有数百种材料用于等离子喷涂，是应用较普遍的喷涂方法。

等离子喷涂涂层的致密度及与基体材料的结合强度均比火焰喷涂涂层和电弧喷涂涂层的高，而且也是制备陶瓷涂层的最佳工艺。

等离子技术中引人注目之处是设备的大容量化和高输出功率化，目前气体等离子喷涂设备已有 200 kw 的设备出售，不但大大提高了喷涂效率，也使涂层质量更为改善，因而可以实现大面积高质量涂层的连续生产，如柔性印刷用网纹辊镜面陶瓷层以及高分子薄膜电晕处理用陶瓷绝缘涂层的制备等。

6. 低压等离子喷涂 (LPPS)

等离子喷涂可以在不同气氛和不同压力下实现，当喷涂作业在气氛可控的负压密封容器内进行时就成为低压等离子喷涂。低压等离子喷涂的优点是：焰流速度快、粒子动能大，形成的涂层致密、结合强度高；低压环境下可对基体进行预热和进行反向转移弧电清理，进一步提高涂层与基体的结合强度；由于没有大气污染，涂层材料不氧化成分变化小，因而可以进行活性金属如 Ti、Ta、Nb 等的喷涂；还可使形成等离子体的气体在喷涂过程中与涂层材料进行反应，形成特殊化合物涂层。由于具有以上特点，低压等离子喷涂主要用于制备航空工业等高科技领域的涂层，如飞机涡轮发动机叶片抗高温氧化和热腐蚀的 $M\text{CrAlY}$ ($M = \text{Co}, \text{Ni}, \text{Fe}$) 涂层，以及制备人体人工植入体用生物功能涂层。

7. 水稳等离子喷涂

水稳等离子喷涂是一种高功率和高速等离子喷涂方法，它是在由高速旋转的水形成的隧道里产生的弧中，水蒸气分解形成 O_2 和 H_2 的等离子工作气的喷涂方法。与气体等离子喷涂方法相比，其焰流温度更高体积更大更长，特别是能量更高，因而特别适合于高熔点氧化物陶瓷的大量喷涂。其主要优点是：输出功率大 (150 - 200 kw)，涂层结合强度是气体等离子喷涂涂层的 2 - 3 倍，并且涂层致密，其硬度、耐磨性和耐热冲击性能也有很大提高；喷涂效率高，喷涂能力最大为 50 kg / h，涂层厚度可达 20 mm，而且可以喷涂分散性较大的粉末，因而特别适合陶瓷部件的喷涂成形；只需水和空气，运行成本低，比其他喷涂方法经济。本方法的缺点是焰流为氧化焰，不适喷

涂容易氧化的材料。此外，喷涂枪体积较大，比较笨重。

六. 热喷涂原理和涂层性能

◆热喷涂原理

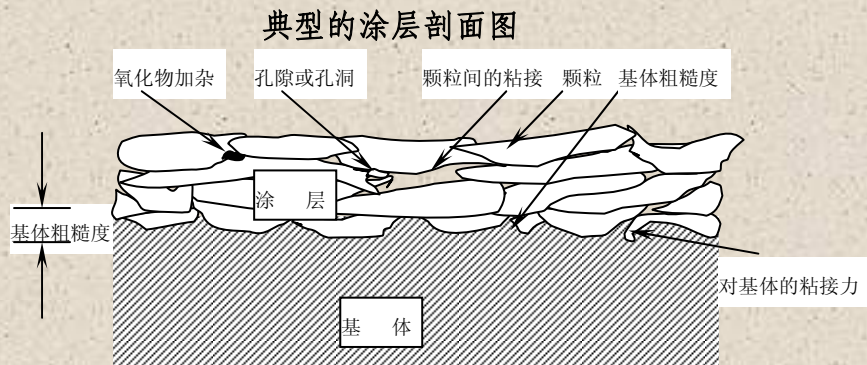
1. 热喷涂涂层的形成

热喷涂时，涂层材料的粒子被热源加热到熔融态或高塑性状态，在外加气体或焰流本身的推力下，雾化并高速喷射向基体表面，涂层材料的粒子与基体发生猛烈碰撞而变形、展平沉积于基体表面，同时急冷而快速凝固，颗粒这样逐层沉积而堆积成涂层。

2. 热喷涂涂层的结构特点

热喷涂涂层形成过程决定了涂层的结构特点，喷涂层是由无数变形粒子相互交错呈波浪式堆叠在一起的层状组织结构，涂层中颗粒与颗粒之间不可避免地存在一些孔隙和空洞，并伴有氧化物夹杂。涂层剖面典型的结构如下图，其特点为：

- * 呈层状
- * 含有氧化物夹杂
- * 含有孔隙或气孔



3. 热喷涂涂层的结合机理

涂层的结合包括涂层与基体的结合和涂层内部的结合。涂层与基体表面的粘结力称为结合力，涂层内部的粘结力称为内聚力。涂层中颗粒与基体之间的结合以及颗粒之间的结合机理，目前尚无定论，通常认为有以下几种方式。

(1) 机械结合

碰撞成扁平状并随基体表面起伏的颗粒和凹凸不平的表面相互嵌合，以颗粒的机械联锁而形成的结合（抛锚效应），一般来说，涂层与基体的结合以机械结合为主。

(2) 冶金-化学结合

这是当涂层和基体表面产生冶金反应，如出现扩散和合金化时的一种结合类型。当喷涂后进行重熔即喷焊时，喷焊层与基体的结合主要是冶金结合。

(3) 物理结合

颗粒与基体表面间由范德华力或次价键形成的结合。

4. 涂层的残余应力

当熔融颗粒碰撞基体表面时，在产生变形的同时受到激冷而凝固，从而产生收缩应力。涂层的外层受拉应力，基体有时也包括涂层的内层则产生压应力。涂层中的这种残余应力是由热喷涂条件及喷涂材料与基体材料的物理性质的差异所造成的。它影响涂层的质量、限制涂层的厚度。工艺上要采取措施以消除和减少涂层的残余应力。

◆ 热喷涂涂层的性能

1. 化学成分

由于涂层材料在熔化和喷射过程中，在高温下会与周围介质发生作用生成氧化物、氮化物，以及高温下会发生分解，因而涂层的成分与涂层材料的成分是有一定的差异的，并在一定程度上影响涂层的性能。如 $M\text{CrAlY}$ 氧化后会影其耐蚀性，而 WC-Co 经氧化和高温分解后其耐磨性会降低。通过喷涂方法的选择可以避免和减轻这一现象的发生。如采用低压等离子喷涂可大大减少涂层材料的氧化，而高速火焰喷涂则可以防止碳化物的高温分解。

2. 孔隙度

热喷涂涂层中不可避免地存在着孔隙，孔隙度的大小与颗粒的温度和速度以及喷涂距离和喷涂角度等喷涂参数有关。一般来说，温度及速度都低的火焰喷涂和电弧喷涂涂层的孔隙度都比较高，一般达到百分之几，甚至可达百分之十几。而高温的等离子喷涂涂层及高速的超音速火焰喷涂涂层则孔隙度较低。最低可达 0.5% 以下。

3. 硬度

由于热喷涂涂层在形成时的激冷和高速撞击，涂层晶粒细化以及晶格产生畸变使涂层得到强化，因而热喷涂涂层的硬度比一般材料的硬度要高一些，其大小也会因喷涂方法的不同而有所差异。

4. 结合强度

热喷涂涂层与基体的结合主要依靠与基体粗糙表面的机械咬合（抛锚效应）。基材表面的清洁程度、涂层材料的颗粒温度和颗粒撞击基体的速度以及涂层中残余应力的大小均会影响涂层与基体的结合强度，因而涂层的结合强度也与所采用的喷涂方法有关。

5. 冷热疲劳性能

对于一些在冷热循环状态下使用的工件，其涂层的抗冷热疲劳（或称热震）性能至关重要，如若该涂层的抗热震性能不好，则工件在使用过程中便会很快开裂甚至剥落。涂层抗热震性能的好坏主要取决于涂层材料与基体材料的热膨胀系数差异的大小和涂层与基体材料结合的强弱。

七. 热喷涂材料及涂层功能和应用

◆ 热喷涂材料

目前实际应用中已实现工业化生产的喷涂材料有金属、合金和陶瓷等, 主要以粉末、丝材、棒材状态使用, 其中喷涂粉末占喷涂材料总用量的 70 % 以上. 用作涂层的材料有:

1. 热喷涂用粉末

- 纯金属粉末: W, Mo, Al, Cu, Ni, Ti, Ta, Nb 等
合金粉末: Al-Ni, Ni-Cr, Ti-Ni, Ni-Cr-Al, Co-Cr-W, MCrAlY(M=Co、Ni、Fe), Co 基、Ni 基、Fe 基自熔合金等
氧化物陶瓷粉末: Al_2O_3 , ZrO_2 , Cr_2O_3 , TiO_2 等
碳化物粉末: WC, TiC, Cr_3C_2 等
金属陶瓷粉末: WC-Co, Cr_3C_2 -NiCr 等
塑料粉末: 尼龙, 聚乙烯, 聚苯硫醚等

2. 热喷涂用丝材

Al、Cu、Zn, Al-Zn 合金, 巴氏合金, 不锈钢, Ni-Al 丝等

3. 热喷涂用棒材

Al_2O_3 , Cr_2O_3 , ZrO_2 等

◆ 涂层功能和应用

1. 抗磨损涂层

磨损是造成工业部门设备损坏的主要原因之一, 可能产生磨损的工作条件包括微振、滑动、冲击、擦伤、侵蚀等. 抗磨损涂层应该是坚硬的, 而且具有耐热和耐化学腐蚀的性能. Fe、Ni、Co 基自熔合金以及 WC-Co 和 Cr_3C_2 -NiCr 等金属陶瓷以及 Al_2O_3 、 Cr_2O_3 等陶瓷材料具有上述这些性能. 采用涂层技术提高工件表面耐磨性的应用非常广泛, 如活塞环、齿轮同步环喷涂 Mo 涂层, 纺织机械中的罗拉、导丝钩等零部件喷涂耐纤维磨损的 Al_2O_3 、 Al_2O_3 - TiO_2 陶瓷涂层, 泵和阀门密封面喷涂 Cr_2O_3 、WC-Co 等耐磨涂层, 大马力载重汽车曲轴及大型磨煤机、排风机轴等采用 Fe 基合金材料进行磨损修复和耐磨强化等。

2. 防腐蚀涂层

长期暴露在户外大气(海洋、工业及城乡大气)和不同介质(海水、河水、溶剂及油类等)环境中的大型钢铁构件, 如输变电铁塔、钢结构桥、海上钻井平台、煤矿井架以及各种化工容器如储罐等, 受到不同程度的环境氧化和侵蚀. 采用 Al、Zn、Al-Zn 合金及不锈钢等涂层进行防护, 可以获得长达 20 年以上的长期防护效果. 一些受到气体腐蚀和化学腐蚀的部件, 可以根据具体工况(如介质、浓度、温度、压力等)选择合适的金属、合金、陶瓷及塑料等涂层

材料进行防护。

3. 抗高温氧化和耐热腐蚀涂层

对于一些暴露在高温腐蚀气体中的部件,受到高温、气体腐蚀及气流冲刷的作用,严重影响了设备的寿命和运行的安全.抗高温氧化及高温腐蚀的材料除了必须抗高温氧化和耐腐蚀外,还必须具有与基体材料相似的热膨胀系数,方不会因温度周期变化和局部过热导致涂层抗热疲劳性能下降.用作抗高温氧化和高温腐蚀的涂层材料有: NiCr、NiAl、MCrAl、MCrAlY(M = Co、Ni、Fe)及 Hastiloy 和 Stellite 合金等.这类涂层的典型应用如电厂锅炉四管(水冷壁管、再热器管、过热器管及省煤器管)及水冷壁等的高温氧化腐蚀一直是电力、造纸、化工等工业锅炉用户需要解决的问题,经多年研究、实践证明,采用电弧喷涂 Ni - Cr、Fe -Cr -Al、Ni-Cr -Al、45CT 等涂层能获得良好的防护作用,使用寿命最长达 9 年.MCrAlY 涂层用于航空涡轮发动机叶片涂层以及作为涡轮发动机燃烧室、火焰筒等用热障涂层的粘结底层。

4. 热障涂层

ZrO₂、Al₂O₃ 等陶瓷涂层,熔点高、导热系数低,在高温条件下对基体金属具有良好的隔热保护作用称为热障涂层.这种涂层一般由两个系统构成,一是由金属作底层,另一则是由陶瓷作表层.有时为了降低金属和陶瓷间的热膨胀差异和改善涂层中的应力分布,常在粘结底层和陶瓷面层间增加一过渡层,该过渡层或为由底层金属和面层陶瓷材料以不同比例混合的多层涂层或为由金属及陶瓷材料成分连续变化的涂层来形成所谓的成分(或功能)梯度涂层.金属粘结底层为 Co 或 Ni、加有 Cr、Al、Y 的合金材料,陶瓷材料最好采用由 Y₂O₃ 稳定的 ZrO₂,热障涂层一般用于柴油发动机活塞、涡轮发动机燃烧室、阀门和火焰稳定器等。

5. 绝缘涂层

陶瓷材料不仅具有高的硬度和优良的耐磨性能,还具有十分优良的绝缘性能,采用高能等离子喷涂的 Al₂O₃ 涂层致密、绝缘强度高,是理想的绝缘涂层.如果采用有机或无机物质对喷涂层再进行封孔处理,则将获得更为优良的绝缘效果.目前这种高度绝缘的涂层已用于对高分子材料薄膜进行活化处理的电晕放电辊表面,效果良好。

6. 间隙控制涂层

采用复合粉末,在基体上喷涂软质的可磨耗密封涂层是航空、航天工业中迅速发展起来的高温密封、控隙技术,是现代热喷涂涂层的重要应用之一.在配合件的接触运动中采用可磨耗涂层可以使配合件自动形成所必须的间隙,提供最佳的密封状态.目前,高技术的可磨耗涂层材料是由两种粉末的混合粉或团聚粉组成,用火焰或等离子喷涂方法制备.一般来说,可磨耗涂层由金属本体和非金属填料组成,填料通常是石墨、聚脂、氮化硼等.填料的作用是减弱涂层本身的整体性,从而增强涂层的可磨损性.已经开发了一系列的喷涂用可磨损涂层材料,这些涂层用于表面的空气密封部位,压气机或透平

叶片与金属表层结构或机匣之间,获得了良好的密封效果.可磨耗涂层还可用于迷宫式密封,该涂层用来疏导冷却空气,减少发动机压缩空气的损失,并保持转子轴的压力平衡.

7. 尺寸恢复涂层

热喷涂是恢复零部件尺寸的一种经济而有效的方法.无论是因工作磨损还是因加工超差造成工件尺寸不合要求,均能利用热喷涂技术予以恢复.这种方法既没有焊接时的变形问题,也不象特殊的电镀工艺那样昂贵.同时新表面可以由耐磨或抗蚀材料构成,也可以与工件的构成材料相同.修复各种轴类和柱塞件是典型的应用,包括迴转轴、汽车轴、往复柱塞、轴颈、轧辊、造纸烘缸以及石油化工工业中的泵类叶轮叶片及外壳等.发电机汽缸中分面现场热喷涂修复是热喷涂恢复平面工件尺寸的一个成功的应用例.发电机汽缸在长期的使用中其中分面由于微振、热气流腐蚀及冲蚀等作用而发生多处形状不同、面积不等及深浅各异的破坏,引起泄漏而影响发电机效率.采用热喷涂方法分别对各破坏处进行喷涂填补,然后通过打磨使得汽缸平面恢复平整并达到所需的尺寸精度.热喷涂技术不失为重量大、结构复杂和价格昂贵的汽缸的中分面现场修复的安全(不会发生变形)、简便而高效的方法.

8. 生物功能涂层

在不锈钢或钛基体上喷涂生物功能陶瓷涂层,如羟基磷灰石等,能有效地克服金属型人工骨骼与生物体组织不相容和体液腐蚀问题,并能改善人体组织与人工植入体的结合.

9. 远红外幅射涂层

某些氧化物具有高的热幅射率,在受热时能够幅射出远红外波,这种波的能量极易被高分子有机物(如油漆)、水、空气等物质的分子吸收产生共振而产生内热,从而加速过程的进行.在加热元件上喷涂这种涂层,其节电效率一般平均在 25-40 % 左右.