

热喷涂原理及应用

胡传炘 编著

(京)新登字 175 号

图书在版编目(CIP)数据

热喷涂原理及应用 / 胡传炘编著

北京: 中国科学技术出版社, 1994 5

ISBN 7-5046-0551-4

I .热… II .胡… III .热喷涂-概论 IV .TG174.442

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (94) 第 05243 号

中国科学技术出版社出版

北京海淀区白石桥路 32 号 邮政编码: 100081

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

密云体校印刷厂印刷

开本: 787×1092 毫米 1/32 印张 5.75 字数: 120 千字

1994 年 5 月第 1 版 1994 年 5 月第 1 次印刷

印数: 1-2000 册 定价: 10.00 元

目 录

第一章 概述

§ 1-1 表面技术简介	(1)
§ 1-2 热喷涂定义、分类及特点	(3)
§ 1-3 热喷涂技术发展概况	(8)
§ 1-4 热喷涂原理, 工艺及应用	(13)

第二章 氧-乙炔火焰喷涂

§ 2-1 喷涂与喷熔原理及特点	(18)
§ 2-2 重熔	(24)
§ 2-3 喷涂与喷熔设备	(27)
§ 2-4 喷涂用金属线材	(33)
§ 2-5 喷涂(熔)用金属粉末	(43)
§ 2-6 喷涂用非金属粉末	(48)
§ 2-7 喷涂用复合材料	(52)
§ 2-8 金属线材火焰喷涂工艺	(55)
§ 2-9 金属粉末火焰喷涂工艺	(62)
§ 2-10 火焰喷熔工艺	(64)
§ 2-11 塑料粉末火焰喷涂工艺	(66)

第三章 超音速火焰喷涂及爆炸火焰喷涂

§ 3-1 超音速火焰喷涂原理	(70)
§ 3-2 超音速火焰喷涂设备种类及涂层性能	(74)

§ 3-3 爆炸火焰喷涂原理	(77)
§ 3-4 爆炸火焰喷涂特点及应用	(80)

第四章 电弧喷涂及线爆喷涂

§ 4-1 电弧喷涂原理	(83)
§ 4-2 电弧喷涂特点及应用	(86)
§ 4-3 电弧喷涂设备	(89)
§ 4-4 电弧喷涂工艺	(93)
§ 4-5 线爆喷涂	(94)

第五章 等离子喷涂

§ 5-1 等离子喷涂原理及特点	(98)
§ 5-2 等离子喷涂设备	(101)
§ 5-3 等离子喷涂工艺	(103)
§ 5-4 等离子弧粉末堆焊	(110)

第六章 涂层性能检测

§ 6-1 工艺性能检测	(113)
§ 6-2 物理及化学性能检测	(118)

第七章 防腐蚀涂层

§ 7-1 大型钢结构金属喷涂长效防腐	(120)
§ 7-2 电弧喷涂防腐	(127)
§ 7-3 实用工艺举例	(134)

第八章 防磨损涂层

§ 8-1 模具喷熔修复	(139)
§ 8-2 曲轴氧-乙炔火焰线材喷涂修复工艺	(140)
§ 8-3 实用工艺举例	(142)

第九章 特殊功能层及其它应用

§ 9-1 金属热喷涂法制模具	(149)
§ 9-2 聚四氟基体锌铜复合涂层	(165)
§ 9-3 实用工艺举例	(170)

参考文献

第一章 概 述

热喷涂技术自本世纪初开始在生产中应用以来,经过 80 余年的发展,至今,在机械、化工、交通、能源、国防等许多领域,获得愈来愈广泛的应用。

本章在概括介绍一般表面技术及当今热喷涂技术发展状况的基础上,重点叙述其特点及应用前景。

§ 1—1 表面技术简介

一、什么是表面技术

在固体材料表面,采用物理方法、化学方法或生物高分子方法等,对表面进行涂装、处理、形成具有特殊功能的表面层,或某种功能的覆盖层。这种表面加工技术,称之为表面技术。

上述可见,表面技术研究对象是:固体材料表面层。加工方法是:物理法、化学法、生物高分子法,手段是:涂装、处理、扩散及固定化。研究目的及作用是:形成特殊功能表面层及覆盖层,起到装饰、防护,特殊功能(强化、韧化……)作用。

二、表面技术内容

1. 表面涂装

(1) 机械涂装。刷、喷、浸、淋(有机涂料)。

- (2) 化学涂装。化学镀、鍍金、化学气相沉积。
- (3) 热涂法。热浸（热镀锌）、热喷涂（金属或非金属）。
- (4) 电及电化学涂装。电镀、电泳、静电喷涂，物理气相沉积。

2. 表面处理

- (1) 热处理。渗氮，渗碳、喷熔。
- (2) 化学处理（化学转化膜）。氧化、发兰、磷化、钝化、铬盐处理。
- (3) 清洁处理。机械清洗、化学清洗、超声清洗、激光洗等。

3. 特殊功能层（表面工程）

- (1) 半导体工程：晶体管、集成电路等。
- (2) 表面生物工程：膜分离技术，酶催化技术等。

三、材料或结构破坏形式

三种形式：磨损、腐蚀、断裂。均与表面技术密切相关。抗磨损、防腐蚀、抗断裂（表面裂纹显然最为可怕）成为表面技术研究的重要内容。

上述可见，热喷涂技术只是表面技术中的一部分，但却是近些年来，发展极为迅速的一部分。

§ 1—2 热喷涂定义、分类及特点

一、什么是热喷涂

热喷涂材料经热源加热至熔化或半熔化态，用高压气流令其雾化并喷射于工件上，从而形成涂层的一种表面加工方法，称之为热喷涂。

热喷涂材料可以是金属，也可以是非金属；可以是粉状，也可以是线状或棒状。

一般金属喷涂层与工件（基体）之间以及喷涂层微粒之间的结合，是机械结合或微冶金结合。通过重熔，或采用喷熔方法，可以得到冶金结合的涂层。

值得指出的是，热喷涂金属粒子，其速度贡献主要是获得较致密涂层，用其打击力，而不是将其动能转变为热能。

例：火焰线材喷钢粒子，速度 $V=80\sim 160\text{m/s}$ 取 200m/s 。质量 $M=\rho v=\rho \cdot \frac{1}{6}D^3$ ， D 为粒子直径，实测为 $4\sim 45\mu\text{m}$ ，现取 $D=50\mu\text{m}$ ，取 $\rho=7800\text{kg/m}^3$ ，则一个粒子产生之动能为：

$$\begin{aligned} E &= \frac{1}{2} M v^2 = \frac{1}{2} \times 7800 \times \frac{1}{6} \times (5 \times 10^{-5})^3 \times (200)^2 \\ &= 3.2 \times 10^{-6} \text{J} \\ &= 0.8 \times 10^{-6} \text{cal} \end{aligned}$$

钢比热为 $4.6 \times 10^2 \text{J/cal} \cdot \text{g} \cdot ^\circ\text{C}$ 。则一个钢粒子可令 1kg 钢基体温度升高：

$$\Delta t = 3.2 \times 10^{-6} / 4.6 \times 10^2 = 0.7 \times 10^{-8} ^\circ\text{C}$$

火焰线材喷枪每小时可喷钢 2kg ，则有

$$\frac{2}{1.6 \times 10^{-10}} \doteq 10^{10} \text{ 个粒子 (100 亿)}$$

可令基体 (1kg) 升高: $0.7 \times 10^8 \times 10^{10} = 70^\circ\text{C}$ 。可见, 是十分有限的。

连续喷涂, 主要是由于粒子本身的热能令基体温度升高。

二、热喷涂分类

根据热喷涂热源及热喷涂材料的不同, 可将热喷涂技术分为火焰加热法及电加热法两种 (见表 1-1)。根据具体情况, 可细分为下述几种。

1. 火焰线材 (或棒材) 及粉末喷涂

以氧-乙炔为热源, 用氧、空气或其它气体作为喷射气流。这种喷涂方法设备简单, 操作容易, 机动灵活。一般有气焊设备的地方, 只要添加喷枪即可。这种喷涂方法, 在机械、化工、交通许多部门已得到广泛应用。

2. 火焰爆炸喷涂

由氧和乙炔以一定比例在喷涂中混合, 并周期地点燃。加热由氮气流送入的浮游状粉末, 形成超音速压力波式气流来喷涂。在航空航天部门已得到较多应用。

3. 火焰超音速喷涂

由氧和可燃气 (如氢、甲烷等) 混合, 在较高压力下于燃烧室中燃烧。喷涂粉末由氮气从燃烧室中心送入。此高温气体加粉末经拉瓦尔喷管, 或混合气体点燃后产生爆震, 均可在喷嘴处以超音速 (2—4 倍音速) 喷出。这种喷涂方法在国内外, 已成功应用于航空航天、石油化工、冶金等多个

表 1-1

热喷涂技术分类

分类	火焰加热法			电加热法		
	线材喷涂	粉末喷涂	超音速喷涂	电弧喷涂	线爆喷涂	等离子喷涂
工作气体	氧气+燃气(如乙炔、氢气等)			—	—	氩、氢、氮等
热源	燃烧火焰			电弧	电容放电	等离子焰流
热喷涂颗粒加速力源	压缩空气			压缩空气	放电爆炸波	等离子焰流
形状	线材(或棒材)	粉末	燃烧火焰 (或爆炸波)	粉末	线材	粉末
			金属粉, 金属陶瓷	Al ₂ O ₃ 及 Cr ₂ O ₃ 等金属陶瓷	Mo, Ti, W, 碳素钢, 不锈钢, 硬质合金等	Ni, Mo, Al 等自熔合金, Al ₂ O ₃ 及 ZrO ₂ 等陶瓷材料; Ni/Al 及 Co/WC 等复合材料
种类	Al, Zn, Cu, Mo, Ni, Ni-Cr 合金, 碳素钢, 不锈钢复合丝, 铜	Ni 基粉, Co 基粉, 尼龙, 聚乙烯, 聚四氟乙烯, 聚苯硫醚, 环氧树脂	金属陶瓷	Al, Zn, 碳素钢, 不锈钢, 硬质合金等材料	Mo, Ti, W, 碳素钢, 不锈钢, 硬质合金等材料	自熔合金或在自熔合金中加部分陶瓷材料
			700~1500	700~1500	600~700 1000(LPPS)	
颗粒飞行速度(m/s)	80~160 (喷射距 100~200mm)	1770(喷射距 300mm)	可控制在 250 以下	可控制在 250 以下	可控制在 250 以下	
基体受热温度(°C)	可控制在 350 以下					
结合强度(MPa)	>9.8	>6.8	70	>9.8	>19.6	58
气孔率(%)	5~20	5~20	3~5	5~15	0.1~1.0	3~5
						0

部门。

4. 火焰粉末喷熔

热喷涂粉末（一般为自熔性合金粉末）经氧-乙炔火焰加热后喷涂于工件上。在工件不熔化的情况下，加热涂层并令其与工件表面熔合，从而形成冶金结合涂层。其实质是：固态金属被液态金属熔解而互相结合的过程。这种工艺在油田、造纸、模具、轴类等方面得到广泛应用。

5. 电弧喷涂

以电弧为热源，用空气或其它气体为喷射气流的喷涂。即以两根金属线，用电机驱动到喷嘴口相交，产生短路电弧，端部熔化，再用喷射气流令其雾化吹出沉积于工件表面。这种方法在国外已广泛用于大型钢结构防腐及轴类修复。在国内近几年已开始应用于工程。

6. 线爆喷涂

当贮存在电容器上的电能通过待喷金属材料瞬间放电时，线材（待喷材料）一部分立即被气化爆炸，其余部分则熔化并被放电爆炸波吹出，沉积于工件表面。这种喷涂方法在内燃机气缸、某些纺织机械零件，尤其是内孔（如 $\phi 10$ 孔）喷涂中得到成功应用。

7. 等离子喷涂

以电弧放电（非转移型等离子弧）产生的等离子（热离子化的气体）作为热源，令喷涂粉末熔化，并在等离子焰流加速下吹向工件形成涂层。这种方法可喷金属、非金属，尤其是高熔点材料（如金属陶瓷、碳化物等）。在零件耐磨损、抗腐蚀及特殊功能层（如远红外涂层）制造等方面用途很广。

8. 等离子弧粉末堆焊

用转移型等离子弧加热工件表面并形成熔池。喷涂粉末由喷枪进入电弧并经弧柱加热喷射进熔池，从而形成合金喷熔层。这种工艺在防腐耐磨层（如某些耐酸密封面、耐磨密封面），磨粒磨损件等制备及修复中得到成功应用。

三、热喷涂特点

热喷涂技术具有下述特点：

1. 工艺灵活，适应范围广。热喷涂施工对象，可小可大。小的可到 10mm 内孔（线爆喷涂），大的可到桥梁，铁塔（火焰线材喷涂、电弧喷涂）。可在实验室、车间内进行真空气氛中喷涂，也可在野外现场作业。可整体喷涂，也可局部喷涂。
2. 基体及喷涂材料广泛。基体可是金属、非金属（包括陶瓷、塑料、石膏、水泥、木材、甚至纸张）。喷涂材料可是金属及其合金、塑料、陶瓷等。可以说，几乎是无所不能喷。这样，就有可能通过热喷涂方法制备金属/非金属复合涂层，从而获得用其它方法难以得到的综合性能。
3. 除去火焰喷熔及等离子弧粉末堆焊外，用热喷涂工艺加工的工件受热较少，工件产生的应力变形很小。
4. 生产效率高。热喷涂工艺生产效率，从几公斤（每小时喷涂材料重量）到数 10 公斤，沉积效率很高。

§ 1-3 热喷涂技术发展概况

一、国外发展概况

第一阶段 (1910~1941 年), 热喷涂技术初期发展阶段。

本阶段的基本特点是: 提出线材火焰喷涂及电弧喷涂, 出现热喷涂初期喷涂设备, 并初步应用于生产。但并未得到重视, 热喷涂技术水平不高, 也不成熟。

1910 年, 端士 M. U. Schoop 提出第一个金属喷涂装置“固定式坩埚融熔喷涂装置。”即将坩埚中熔化的金属液注入到由旋管喷出的热空气流中, 经雾化喷射到工件上。这种装置喷涂效率低、涂层质量差、装置庞大、实用价值不大。

1912 年, Schoop 制成“火焰金属线材喷涂枪”。

1914 年, Schoop 又提出“电弧喷涂枪”, 并于 1916 年制成。

上述设计或产品, 实用价值虽不大, 但是有启蒙性质。以后, 德国、前苏联、日本开始用电弧喷涂, 英、法、美多应用火焰线材喷涂。

30 年代至 1941 年 (二次大战前), 火焰线材喷涂进一步发展, 火焰粉末喷涂出现。热喷涂应用由早期的装饰性涂层发展到抗水及大气腐蚀 (喷锌), 耐热及抗氧化 (喷铝及扩散渗铝)、抗磨损 (喷钢)。这一阶段, 基本上是火焰金属线材喷涂独占局面。

第二阶段 (1942~1969 年), 热喷涂技术迅猛发展并成熟阶段。

这一阶段的基本特点是：先进热喷涂设备不断出现，各种热喷涂技术不断发展并逐步完善，生产应用日益扩大并成熟。

1942 年，荷兰研制成功“手持式低温坩埚喷枪”，并取得专利。

二次大战中，车械修理频繁，各种机床、电机等设备要抢修，热喷涂技术受到重视。

1945 年，美国 Metco 公司制出“Metco—2E 火焰金属线材喷涂枪”，第一次带有“线材进给速度可以调节的机构”，使金属喷涂从较难持续作业变为可以稳定持续作业。这种枪在当时美军中得到成功应用。

1948 年以后，世界各国进一步对热喷涂技术感兴趣。此时，美国的 Moyul, Metco, Wallco/Monoy, 英国的 Berk, 奥地利的 Metallizing, 法国的 S. N. M. 等单位做了许多工作。

50 年代，热喷涂装置，喷涂材料及应用方面，均获得巨大进展。在热喷涂装置上，美国 Metco 公司推出“Metco—P 型粉末喷枪”。不仅能喷自熔性合金粉末，还可喷高熔点陶瓷粉末，在工业上得到广泛应用。60 年代中后期，Metco 相继推出线材火焰喷涂设备，等离子喷涂设备，均获广泛应用。此外，如英国 Metallisation 公司的电弧喷涂设备，瑞士 Castolin—Enteotio 公司的粉末火焰喷涂设备等，均得到相当应用。此时喷涂材料已形成标准系列，用于生产的粉末已达 200 种以上。这方面的进展，当首推 1953 年研制成的自熔合金粉末，它使得火焰重熔工艺用于生产实际成为可能，并因此而产生了火焰重熔工艺。

50 年代后期至 60 年代，由于航空航天及原子能工业的

发展,对高熔点、高纯度、高强度涂层提出要求。人们对高热源、高喷速、改善喷涂气氛等方面进行了研究,从而获得两项巨大成果。一项是,50年代末,美国 Plasma-Dyne 公司研制出等离子喷涂设备。不久,Metco 公司及热动力公司也开始了这方面的研究工作。另一项是:1955 年,美国 Union Carbide (联合碳化物)公司研制出爆炸喷枪。但由于该公司采取的专利措施及设备的复杂性,限制了它的应用。等离子喷涂由于热源温度达万度以上,但焰流速度及喷涂气氛可控制,从而有可能获得特殊性能涂层。爆炸喷涂由于喷涂颗粒速度极大,从而令涂层之气孔率大为降低,且大大提高了涂层自身及其与基体的结合强度。60 年代末,日本九州大学栖原教授研制成功线爆喷涂,解决了喷涂内孔的困难。

第三阶段(1970 年至今),热喷涂技术向高功率、高速度、高效率发展阶段。

这一阶段的基本特点是:热喷涂技术向高功率、高速度、高效率方向发展。新型热喷涂设备及材料层出不穷;对喷涂过程机理及参数分析日益引起注意;热喷涂应用领域日益扩大。

70 年代初期,美国 Metco 公司和 Plasmadyne 公司先后发展了 80kW 高能等离子喷枪;瑞士 Plasma-Technik 公司制成 100kW 高能等离子喷枪;前苏联制成 140kW 高能等离子喷枪,每小时喷 Al_2O_3 粉 30kg。这些装置的特点是:功率高、热效率高,粉末沉积快,涂层质量好。

以后,又制成功率为 200kW 液稳弧巨型喷涂装置,大大提高了生产效率,每小时可喷 Al_2O_3 50kg 以上。

同在 70 年代初,德国发动机和透平公司提出低压等离子

喷涂装置 (LPPS)。被认为是第四代等离子喷涂装置。LPPS 涂层均匀致密。残余应力小、粉末沉积率高、而且能喷涂 (这是其它喷涂法难做到的)。因而此种方法有相当生命力。随后, 法国 Snml 公司、美国 Metco 公司, Electro-Plasma line 公司, 瑞士 Plasma-Technik 公司也制成了 LPPS 装置。

70 年代中期, 美国西南研究所发展了 Fare 喷枪, 打破了美 Union Carbide 公司对爆炸喷涂的垄断, 开创了爆炸喷涂的新局面。

1981 年, 美 Browning 公司 Jet-kote 分部研制成功超音速火焰喷枪, 对等离子喷涂提出有力的挑战。同年, 应美国空军要求, Metco 公司制成世界第一台微机控制系统之 LPPS 装置, 把热喷涂技术引向更严密的领域。

70 年代中期以来, 在喷涂材料方面得到迅速发展。目前, 应用于生产的各种线材、棒材有数 10 种。各种粉末至少在 200 种以上。其中, Metco 公司和 Entetin Welding Alloy 公司发展的自粘一次复合粉, 大大简化了喷涂工艺。

80 年代以来, 国外正在发展的热喷涂新技术有: 美国 Prett &Whitnecy 航空公司发展的用于等离子喷涂的 Gator-Gard 特殊喷嘴。令涂层之均质性、残余应力显著改善; 美国西南研究所 (空间工业) 首创, 现在 H. E. Zachary 公司研究成功的燃气空气重复爆炸法 (Fare 法), 该法与爆炸喷涂相似, 但各有不同。此法可获得优良涂层, 在石油、航空、造纸部门得到初步应用。

此外, Metco 公司又推出了效率很高的 Metco-12E 金属线材火焰喷枪; 瑞士 H. Gruner 发展了真空等离子喷涂 (VPS); 德国 E. Ertwrk 提出了低压电弧喷涂 (LPES); 波兰

Z. Babiak 发展了 $\text{Al}+\text{Cr}_2\text{O}_3$ 管状药芯线材火焰喷涂等等。

总之，近些年来，无论是喷涂设备、工艺及应用诸方面，正在迅速发展。

二、国内发展概况

第一阶段（1949 年以前，）初步引入阶段。

这一阶段特点是：热喷涂技术从国外引入，初步应用，谈不上发展。

40 年代，热喷涂技术由国外引入，上海建立我国第一家热喷涂专业厂——上海瑞法喷涂机器厂。主要是应用电弧线材喷涂工艺，修复坦克内燃机曲轴。

第二阶段（1950~1969 年），稳步发展阶段。

这一阶段的特点是：开始制造火焰金属线材喷涂枪，火焰粉末喷枪及电弧喷枪。开始研制等离子喷枪。热喷涂技术在生产中得到日益广泛的应用。

50 年代，上海喷涂机械厂研制出 ZQP-1 型金属线材火焰喷涂枪（相当于 Metco-2E）及火焰粉末喷涂枪（相当于英国 Schri 火焰喷枪）；电弧喷枪（相当于前苏联 ЭМ-СА 手持电弧喷枪）。1959 年又制出电动离心接触调速的陶瓷棒火焰喷枪。

60 年代，航空部 625 研究所研制出 40kW 等离子喷涂设备，并开始批量生产。

在此阶段，热喷涂材料（线材及粉末）得到很大发展并初具规模，在金属喷涂防腐及防磨损等方面也获得较多应用。

第三阶段（1970 年至今），迅速发展阶段。