

热喷涂技术

韦福水 蒋伯平 汪行愷 李俊岳 编著



RPTJS

热 喷 涂 技 术

韦福水 蒋伯平 汪行愷 李俊岳 编著



机 械 工 业 出 版 社

热喷涂是一种新的表面强化技术。本书较全面而系统地介绍了热喷涂材料和各种热喷涂工艺、设备；同时也阐述了涂层质量检测 and 劳动保护、安全技术等方面的内容；并列举了热喷涂技术的应用实例等。

本书可供机械制造和维修行业的工程技术人员和工人阅读，也可作为有焊接专业大学师生的参考用书。

热 喷 涂 技 术

韦福水 蒋伯平 汪行愷 李俊岳 编著

责任编辑 俞逢英

封面设计 刘 珊

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

重庆印制一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092 1/32·印张 $6\frac{3}{8}$ ·字数185千字

1986年12月重庆第一版·1986年12月重庆第一次印刷

印数 00,001—5,190·定价 1.80 元

*

科技新书目：132—118

统一书号：15033·6422

前言

热喷涂是在最近几十年内逐步发展起来的一种新的表面强化技术。它能使零件表面获得耐磨、耐热、耐腐蚀、抗氧化、密封、润滑、导电、绝缘、辐射和防辐射等各种各样的特殊性能。热喷涂材料十分广泛，除了金属和合金外，还有陶瓷、塑料和非金属矿物以及复合材料等。热喷涂既可在金属表面，也可在陶瓷、玻璃、塑料以及木材等材料表面施加涂层。由于热喷涂技术具有显著的技术经济效益，因此在许多工业部门中获得越来越广泛的应用。

我们编写这本书的目的是为了更好地推广热喷涂技术，使之在社会主义建设中发挥更大的作用。由于作者水平有限，经验不足，难免有不当之处，敬希读者指正！

“氧-乙炔火焰粉末喷熔”和“等离子弧粉末堆焊”原称为“氧-乙炔火焰粉末喷焊”和“等离子弧粉末喷焊”。根据1982年12月颁布的《GB3375-82》标准，现采用“喷熔”和“堆焊”等名词术语。

齐树华副教授为本书作了修改和审定，付出了辛勤的劳动。此外，在编写过程中，许多同志热心为我们提供宝贵资料，给我们许多有益的帮助，在此一并致谢！

作者

1985年6月

目 录

前言

第一章 结论	1
第一节 热喷涂技术的分类和特点	2
第二节 热喷涂技术的发展简史	4
第三节 热喷涂技术在国民经济中的作用	7
第二章 热喷涂材料	9
第一节 热喷涂材料的分类和要求	9
第二节 纯金属及其合金喷涂材料	11
第三节 自熔合金	21
第四节 热喷涂陶瓷材料	26
第五节 塑料粉末的性能及在热喷涂中的应用	35
第六节 复合材料	39
第三章 涂层结构及工件表面制备	53
第一节 涂层结构的特点	53
第二节 涂层和基体的结合机理	54
第三节 工件表面的制备	56
第四章 氧-乙炔火焰喷涂与喷熔	62
第一节 喷涂与喷熔的基本原理	62
第二节 喷涂与喷熔的设备	72
第三节 氧-乙炔火焰粉末喷涂工艺	83
第四节 氧-乙炔火焰粉末喷熔工艺	91
第五章 等离子喷涂	101
第一节 等离子喷涂的原理及其特点	101
第二节 等离子喷涂设备	110

第三节	等离子喷涂工艺参数	116
第四节	等离子喷涂的几个工艺问题	121
第六章	等离子弧粉末堆焊	129
第一节	等离子弧粉末堆焊的基本原理及特点	129
第二节	等离子弧粉末堆焊设备	132
第三节	等离子弧粉末堆焊工艺	148
第四节	故障分析及排除方法	159
第五节	焊层质量缺陷分析及预防措施	165
第七章	电弧喷涂和其他喷涂技术	171
第一节	电弧喷涂技术	172
第二节	爆炸喷涂技术	176
第三节	金属丝线爆喷涂	179
第八章	喷涂层和喷熔层的性能检测	185
第一节	性能的分类	185
第二节	工艺性能及测试方法	186
第三节	喷层的耐磨性测定	197
第四节	物理性能和耐蚀性能的测定	200
第九章	应用实例	203
第一节	氧-乙炔火焰喷涂应用实例	203
第二节	火焰喷熔应用实例	209
第三节	等离子喷涂应用实例	218
第四节	等离子弧粉末堆焊应用实例	222
第十章	安全技术和劳动保护	232
第一节	安全技术	232
第二节	劳动保护	233
附录		243
一	中华人民共和国原第一机械工业部部标准 (JB—3168—82)	244
二	几家制粉单位生产的喷涂材料	247

第一章 绪 论

在人类的生产和生活活动中，所使用的各种机械、工具、设备、仪器和各种各样的金属结构，不论是在贮存、运输，还是在使用中，它们有的是由于大气（包括工业性及海洋性大气）和化学或药物介质的接触而招致腐蚀；有的因与物件或物料摩擦而造成磨损；有的则是承受高温而产生氧化；还有的因接触流体，表面出现冲蚀、浸蚀；有的同时遭受着多种因素的损坏作用，导致各种产品的精度和效能的降低，并造成最终的失效和破坏。各种时刻都在进行的破坏作用，它无疑加剧了人类在资源、能源和劳力等方面的巨大消耗。在当前科学技术和工业生产突飞猛进的情况下，各种机械设备向大型化、高速化、高效率和高负荷的方向发展，工作环境越来越苛刻，而对产品可靠性和使用寿命的要求则越来越高。另一方面，人类通过长期的生产活动发现，各种零件的破坏往往都是从表面开始。这是因为表面是直接的工作部位，或是介质的接触部位。因此，材料表面保护技术的研究和开发，越来越受到人们的重视。包括热喷涂在内的各种表面强化和保护技术也由此应运而生。由于热喷涂技术具有工艺灵活，施工方便，适应性强，生产效率高和涂层种类繁多等特点，它已活跃于各个工业领域，今天已逐步形成一门独立的表面强化应用技术。

第一节 热喷涂技术的分类和特点

热喷涂技术是将熔融状态的喷涂材料，通过高速气流，使其雾化，喷射在零件表面上，形成喷涂层的一种表面加工方法。

根据热喷涂热源及涂层材料的种类和形式，热喷涂技术可粗略地区分为：火焰线材喷涂（包括火焰棒材喷涂）、火焰粉末喷涂、火焰爆炸喷涂（简称爆炸喷涂）、电弧喷涂、等离子喷涂、脉冲放电线材爆炸喷涂（简称线爆喷涂）以及由火焰粉末喷涂和等离子喷涂所衍生出来的火焰粉末喷熔和等离子弧粉末堆焊等工艺方法。它们所利用的热能形式有燃烧火焰、爆炸火焰、电弧、低温等离子体焰流和电阻热等。国外还正在从事激光喷涂和电子束喷涂的试验研究。喷涂材料的形状有粉末型和线材（包括棒材）型。热喷涂工艺的分类及其某些特性见表1-1。

热喷涂技术就其整体而言，具有以下主要特点：

1. 涂层和基体材料非常广泛。可以用作涂层的材料包括金属及其合金、塑料、陶瓷（其中包括金属陶瓷）及其复合材料。接受涂层的工件材料可以是金属（包括合金），也可以是非金属（包括陶瓷、塑料、石膏甚至木材和纸张等）。用复合粉末制成的复合涂层，可把金属或合金与塑料，或与陶瓷有机结合起来，得到综合性能，这是其它加工方法难以比拟的。

2. 热喷涂工艺灵活。其施工对象，可以小到10毫米的内孔，大到象铁塔、桥梁等大型构件。喷涂既可以在整体表面上进行，亦可以涂敷指定的局部区域。它既可以在真空或控制气氛下喷涂活性材料，也可以按需要在野外进行现场作

表1-1 热喷涂工艺的分类及其特性

[illegible]

业。

3. 喷涂层、喷熔层和堆焊层的厚度可以在较大的范围内变化。

4. 热喷涂的生产效率较高。对于大多数工艺方法，它们的生产效率可达每小时数公斤，有的工艺方法可高达每小时50公斤以上。

5. 除了其中的由热喷涂衍生出来的火焰喷熔和等离子弧粉末堆焊外，热喷涂是一种“冷工艺”，即基体材料的受热程度低，并且可以控制。它不会影响基材的金相组织和冶金质量，因此可以避免工件因受热可能招致的各种损伤（例如产生应力变形）。

6. 与其它堆焊方法相比，火焰喷熔层和等离子弧粉末堆焊层的母材稀释率较低，特别是火焰粉末喷熔工艺，其母材稀释率接近于零，有利于合金材料的充分利用。

第二节 热喷涂技术的发展简史

热喷涂技术最早可以追溯到本世纪初，至今约有七十多年的历史。最早的热喷涂装置是将熔化的金属液注入到由旋管喷出的热空气流中，被雾化并喷射到工件上。这种早期的热喷涂装置，热源采用单独的炉子，涂层材料取液态形式。由于它的喷涂效率和材料利用率以及涂层质量低劣，没有什么实用价值。后来利用氧-乙炔火焰加热金属丝，能在陶瓷、石器、木材上喷涂具有光泽的金属层作为装饰用。这种氧-乙炔火焰线材喷涂工艺方法目前仍在应用。

二十年代出现了电弧喷涂，使热喷涂技术得到了新的发展，其应用范围由低熔点软金属扩大到了难熔金属领域。

从三十年代直到第二次世界大战之前，由于火焰线材喷

涂设备的进一步完善和火焰粉末喷涂工艺的出现，热喷涂的应用领域已经由早期的工艺美术装饰性涂层发展到了喷涂锌和铝作为水和气的防腐蚀涂层，喷涂铝作为耐热和抗氧化涂层，喷涂钢材来恢复机械零件的尺寸。

这个时期，人们对于工件表面的净化和粗化处理技术进行了研究和改进。除喷砂外，还出现用机床车制沟槽，用专用旋转工具滚出槽纹，以及用镍片电火花拉毛等方法作工件表面制备。值得指出的是，发现了钼对于许多光滑洁净的金属表面具有良好的自粘结的作用，这就开创了用喷涂钼来作为结合底层的新方法，从而提高了涂层与工件基体的结合强度。

由于火焰喷涂层与工件基体的结合强度较低，许多工业部门曾持有怀疑态度。涂层的多孔性又限制了它在强腐蚀介质中的应用。第二次世界大战之后，有许多人致力于在喷涂层的基础上加以重熔处理的研究，以便能消除涂层中的气孔，达到与基材形成冶金结合的目的。尽管当时采用过还原性火焰，甚至于向火焰中加入助熔剂的方法，但终因涂层和基材的氧化，相互不发生浸润而告失败。直到1953年，由于自熔合金的研究成功，火焰重熔工艺才得到了新生。这是五十年代热喷涂材料方面最重大的突破。它不仅促成了火焰喷涂工艺的诞生，也刺激了热喷涂材料的发展。

五十年代后期，为了满足航空、航天、原子能等尖端技术对于高熔点、高纯度、高强度涂层的迫切要求，人们不得不在提高热喷涂热源的温度、喷射速度以及改善喷涂气氛等方面作新的探索。爆炸喷涂和等离子喷涂是该时期的最大研究成果。爆炸喷涂极大地提高了喷涂颗粒的速度和动能，所获得的涂层质量具有结合强度高和气孔率少的特点。等离子

喷涂技术不仅把热源温度提高到万度以上，而且具有焰流速度高以及喷涂气氛可控的特点，摆脱了受涂层材料熔点高以及某些材料化学活性强的限制。其后，对于转移型的等离子弧的研究，又促使等离子弧粉末堆焊工艺的形成。

六十年代，各种热喷涂技术达到了相当完善的地步。尤其是放热型自粘结镍包铝复合粉末的发明，不仅改变了喷涂层与工件基材之间的结合机理，提高了它们之间的结合强度，而且开拓了热喷涂材料向复合粉末方向发展的新途径。

脉冲放电电弧喷涂技术是六十年代末期新出现的热喷涂工艺。这种工艺的最大特点是可以对小至10毫米的内孔表面进行喷涂。

七十年代，200千瓦液稳弧喷涂装置的研制成功，不仅大大地提高了生产效率（每小时可喷涂50公斤以上粉末），而且喷涂成本大幅度下降。此外，80千瓦高能等离子喷涂设备、环境气氛控制箱和低压等离子喷涂设备的出现，以及电子计算机技术开始应用到等离子喷涂系统中，不仅使许多活性材料的喷涂成为可能，而且在涂层质量方面有了质的飞跃。

最近几年来，在钛和钛合金作为热喷涂材料的研究方面，取得了可喜的进展，这将为发展新型的防腐蚀喷涂材料奠定基础。此外，超音速火焰喷涂枪的问世，为火焰粉末喷涂增添了新的活力。

我国热喷涂技术最早是应用电弧线材喷涂工艺，修复机械零件。五十年代后期开始研究火焰喷涂；六十年代着手等离子喷涂设备、材料和工艺的研究，并开发了爆炸喷涂技术。迄今，我国热喷涂材料和设备的生产已初具规模。80千瓦等离子喷涂设备和爆炸喷涂装置以及各种复合喷涂材料的

研制成功，标志着我国热喷涂技术已具有一定的水平。热喷涂技术已经在航空、航天、机械、冶金、化工、石油、煤炭、铁道、纺织等等许多部门获得了越来越多的应用，并取得了明显的技术经济效益。有的高等院校为培养技术人材，开设了“热喷涂技术”课程。目前，我国的热喷涂技术水平虽然与国外先进水平相比，还有较大的差距，但是完全可以相信，在不久的将来，一定能赶上国际先进水平。

总而言之，热喷涂技术正在大力推广。喷涂材料及设备朝着系列化、标准化的方向发展；喷涂工艺标准和涂层检测标准陆续被制订出来；喷涂过程中各种现象和涂层与基体之间结合机理方面的基础研究也正日益深入。这项技术已经成为现代工业中必不可少的加工工艺。

第三节 热喷涂技术在国民经济中的作用

由上所述，热喷涂技术的发展是与科学技术水平以及工业生产的需要息息相关的，特别是在50年代以后，由于空间、航空、原子能等尖端技术的发展，对于材料提出越来越高的要求，传统的工程材料和传统的加工工艺已经远远不能胜任。而热喷涂技术则可以在普通的基体材料表面上，获得具有耐磨、耐蚀、抗氧化、耐高温、隔热、导电、绝缘、减摩、润滑、防辐射以及其它特殊的物理、化学性能而处乎优势。可以这样说，热喷涂技术正是在解决这些重大的材料科学课题中逐步确立了自己的地位。

现代工业的一个特点就是工业朝着高度自动化和高速化方向发展，电脑已经开始进入产业部门，这就要求各种机械零部件能长期稳定地工作。因此，对于新材料的要求已经不再限于那些尖端的工业部门，而且已经涉及到许多工业领

域。另一方面，世界各国普遍受到资源、能源短缺的压力，降低材料和能源的消耗已成为各国共同关心的问题。热喷涂作为一门表面强化技术，比起整体地提高材质的性能无疑要经济得多，而且在许多场合，由于采用了特殊涂层而降低了对部件材质的要求，使它的总成本还可能有所下降。因此，热喷涂技术既可用于恢复因表面损坏而报废的零件，也可用于新产品的制造以提供预防性保护，它已成为一门具有重大技术经济效益的应用技术。

从热喷涂技术的应用角度看，在过去主要用于工艺美术的装饰性涂层，或者喷锌和铝为主的防腐蚀涂层和喷涂钢来修复一些一般的机械零件。今天热喷涂技术修复的零件已经有了新的意义，即由于涂层材料性能优异，而使得修复机件的使用寿命在许多情况下已经超过了新品的使用寿命。这就促使喷涂技术直接在新产品上的应用，提供预防性保护的比重日益增长。因此，从发展观点看，热喷涂技术必将会改变许多新产品的结构和设计。有远见的设计师们已经开始对自己的产品进行重新评价和审查，以便使自己的设计如何能采用热喷涂技术和适应于热喷涂的施工要求。

总之，热喷涂技术由于有巨大的技术经济效益，已引起人们广泛的重视，已用于包括各个尖端技术部门在内的许多工业领域，其应用的深度和广度还在继续发展。

第二章 热喷涂材料

第一节 热喷涂材料的分类和要求

一、热喷涂材料的分类

随着现代工业的迅速发展,各工业部门越来越多地要求设备能在高参数(如高温、高压、高速、高度自动化)和恶劣的工况条件下(如严重的磨损和腐蚀条件等),长期稳定地运转。因此,对设备零部件表面的耐蚀、耐磨、耐热等性能的要求日益苛刻。为适应这一要求,热喷涂材料得到了迅速发展,目前已有百种以上。这些材料按外形可分为线材(包括棒材)与粉末两大类。除了锌、铝、铜、钼、镍等有色金属及其合金制成的线材外,还有碳钢、不锈钢等黑色金属所制成的线材以及复合线材和陶瓷棒材等。这类材料主要用于电弧喷涂、气体火焰线材喷涂和线爆喷涂。粉末材料包括上述能做成线材的喷涂材料外,还包括不易做成线材的熔点高或硬而脆的材料,如难熔金属、自熔合金、陶瓷和复合材料等。这类材料主要用于等离子喷涂和等离子弧堆焊、气体火焰喷涂和喷熔以及爆炸喷涂等。由于粉末材料不象线材那样受到加工条件的限制,发展很快,已成为主要的热喷涂材料。

热喷涂材料按其组成成分,可分为五类。

(一)金属及其合金 具有单独使用性能的纯金属均可作为热喷涂材料,如防腐金属锌、铝和铅;难熔金属钼和钨;导电材料铜和铝等。除纯金属外,还有为了改善性能而加入

其它元素形成的合金。此外，还有碳素钢和不锈钢等。

(二)自熔合金粉末 自熔合金的熔点低，在火焰喷熔或等离子弧堆焊时，不需要外加助焊剂，粉末中的合金成分就具有脱氧造渣的作用和改善润湿的能力，并能与母材形成良好的冶金结合。这类喷涂材料由多种元素组成，其性能因组成的成分不同，有较大的差异。自熔合金粉末可以分为镍基自熔合金、钴基自熔合金和铁基自熔合金。这类粉末可用于等离子喷熔和等离子弧堆焊，有的也可以用于气体火焰喷涂和喷熔。

(三)陶瓷材料 陶瓷材料包括金属氧化物、碳化物、硼化物、氮化物和硅化物。一般都是高熔点材料。这类材料主要用于等离子喷涂和爆炸喷涂。

(四)塑料 塑料大致可分为热塑性塑料和热固性塑料两类。例如氟塑料是属于热塑性塑料，它具有良好的防粘、低摩擦系数以及其它特殊的物理化学性能。该类材料一般用于等离子喷涂。

(五)复合粉末 复合粉末是由两种或两种以上具有不同性能的固相所组成，不同的相之间有明显的相界面，是一种新型的工程材料。这类材料可用于等离子喷涂、火焰喷涂以及爆炸喷涂。

二、对热喷涂材料的要求

在热喷涂过程中，热喷涂材料承受高温，并在空气中飞行，随后以高速撞击工件表面产生形变，淬冷后形成叠层。涂层在冷却收缩时会产生应力。因此热喷涂材料除了应满足使用性能的要求外，还应满足喷涂工艺性能的要求。

(一)热喷涂材料应具有良好的使用性能 根据零部件的工作条件，要求其表面具有耐磨、耐蚀、耐高温、抗氧化、

导电、绝缘、发射等使用性能，那么所选用的热喷涂材料也应具有相应的性能，以满足零部件工况要求，提高使用性能和使用寿命。

(二)热喷涂材料在喷涂过程中承受高温，应具有热稳定性，即在高温下不挥发，不升华，不分解，不发生晶形转变，以保持优良的性能。

(三)热喷涂材料的热膨胀系数、热导率应尽可能与工件材料相接近，以减少涂层在冷凝过程中的热收缩应力。

(四)具有良好的固态流动性 为了保证均匀送粉，热喷涂粉末材料应具有良好的固态流动性。粉末的流动性与粉末的形状、粒度分布、表面状态及粉末的湿度等因素有关。球形粉末流动性最好，粉末越湿，流动性越差。超细粉末或非球形粉末应使用特殊送粉器，才能保证均匀连续送粉。

(五)具有良好的润湿性 材料的润湿性与表面张力有关。表面张力愈小，润湿角愈小，液态流动性愈好，易得到平整光滑的涂层。同时也使得涂层与基体接触紧密，有利于提高涂层和基体间的结合强度和涂层本身的緻密性。这种性能对于重熔工艺更为重要。

第二节 纯金属及其合金喷涂材料

作为热喷涂材料的常用金属有：锌、铝、铜、铅、钼、钨、钽等等。它们的某些物理性能见表2-1。

下面介绍几种常用的金属及其合金的性能和在热喷涂中的应用。

一、锌及锌合金

锌为银白色金属。它具有良好的耐蚀性能，在空气或pH值为6~12的水中，长期使用不腐蚀，在海水中的腐蚀也