

# 氧乙炔焰粉末喷涂技术

四川省经济委员会

四川省热喷涂协组作

编

主编：麻毓璜

执笔：李英瑞 支树平 李跃文

刘 贵 李孝志 黄仕雄

责任编辑：崔泽海

封面设计：魏天禄

**氧乙炔焰粉末喷涂技术**      **麻毓璜等编**

---

四川科学技术出版社出版      (成都盐道街三号)

四川省新华书店发行      成都印刷一厂印刷

---

开本 787×1092 毫米 1/32 印张 11 插页 8 字数 216 千

1983年8月第1版      1983年8月第1次印刷

印数· 1—5,600册

---

书号：15298·5

定价：1.00元

## 前 言

热喷涂技术，是我国近几年在表面防护、表面强化和特殊功能表面涂层技术等方面迅速发展起来的一门具有广阔前景的新技术。它主要包括燃烧焰喷涂技术、等离子喷涂技术、电弧喷涂技术和爆炸喷涂技术。其中，以氧乙炔焰粉末喷涂，设备简单，工艺灵活，施喷方便，易于推广，是一项花钱少、见效快、量大面广、经济效益显著的适用技术。它能根据不同要求喷涂不同材料，使工件表面具有耐磨、耐蚀、抗氧化、隔热、导电、绝缘、密封等不同性能，以适应各种不同的技术要求。它对机械磨损件的修复、腐蚀介质的防护以及适应高参数的工况，节省贵金属材料，提高产品质量，降低生产成本，都能起到积极作用，现已成为如同铸、锻、焊、热处理那样独立的先进热加工工艺。国家经济委员会将这项技术列为一九八一至一九八五年全国推广的五十项新技术重点项目之一，并要求各部门、各行业到一九八三年，凡能应用喷涂技术的产品（包括修复件）都应采用；在一些大、中城市建立喷涂技术服务点，不断改进喷涂（焊）设备的结构和性能，加强喷涂技术研究工作，制订出粉末材料、喷涂工艺、质量、检验等技术标准，使喷涂技术、喷涂粉末材料质

量和品种达到或接近国际先进水平。

为了适应发展这项适用技术的要求，达到上述目的，根据我省近年来推广应用的实践经验，必须首先抓好技术培训和技术服务，这就迫切需要我们提供一本切合实际的教材，全国热喷涂协作组也曾多次嘱咐和要求过。为此，我们组织了四川省热喷涂技术协作组的部分成员研究讨论，确定以氧乙炔焰粉末喷涂为题，制定了撰写范围，主要内容和章、节、段的三级提纲，印发协作组成员单位广泛征求意见。然后，在我处肖汤圣等同志的组织下，经过编写同志的努力，完成了《氧乙炔焰粉末喷涂技术》一书的编著工作。本书共十二章约十五万字，绪论、第六章由国营新都机械厂麻毓璜同志，第一章、第二章由成都农机学院李耀文同志，第五章、第十一章由成都农机学院李孝志同志，第四章、第八章、第九章由国营新都机械厂支树平同志，第三章由国营西南金属制品厂李英瑞同志，第七章由国营西南金属制品厂黄仕雄同志，第十章、第十二章由解放军五七〇一厂刘贵同志分别撰写，由麻毓璜同志审阅全书，修改定稿。

本书总结了丰富的实践经验，具有一定的理论水平，做到图文并茂，以应用技术为主，兼顾基础知识，落实在一个“用”字上。适用于具有中等文化程度、有一定实践经验的技术工人阅读，也可作中等专业学校和技工学校的教参和培训班的教材，可供从事这项技术工作的工程技术人员参考。

在本书的编写和审查定稿的过程中得到了全国有关单位的大力支持和帮助：北京、上海、武汉等有关单位为本书提

供了宝贵的资料，国营新都机械厂、成都农机学院、国营西南金属制品厂、解放军五七〇一厂、成都无缝钢管厂、成都前进机器厂、成都电镀厂、崇庆县农机修造厂派出工程技术人员参加本书的审查，在此一并表示衷心感谢。

由于时间仓促和编写同志的水平所限，难免有错误和不当之处，敬希广大读者给予批评指正。

四川省经济建设委员会技术处

一九八二年十月于成都

# 目 录

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 绪论.....                | 1   |
| 第一章 基本原理.....          | 5   |
| 第一节 概述.....            | 5   |
| 第二节 氧乙炔焰.....          | 7   |
| 第三节 涂层的形成.....         | 13  |
| 第四节 自粘结材料涂层与基体的粘结..... | 19  |
| 第五节 自熔性合金涂层的重熔.....    | 21  |
| 第二章 喷涂装置.....          | 23  |
| 第一节 设备、工具及其连接.....     | 27  |
| 第二节 氧气供给系统.....        | 29  |
| 第三节 乙炔供给系统.....        | 37  |
| 第四节 喷枪.....            | 49  |
| 第五节 辅助设备及工具.....       | 67  |
| 第三章 粉末.....            | 74  |
| 第一节 基本要求和分类.....       | 74  |
| 第二节 金属及合金粉末.....       | 76  |
| 第三节 自粘结粉末.....         | 86  |
| 第四节 自熔性合金粉末.....       | 39  |
| 第五节 复合粉末.....          | 106 |

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 第六节 陶瓷和塑料粉末·····      | 110 |
| 第七节 粉末的检验·····        | 115 |
| 第四章 表面制备·····         | 164 |
| 第一节 表面制备的目的和内容·····   | 164 |
| 第二节 清洗·····           | 167 |
| 第三节 喷砂·····           | 171 |
| 第四节 机械加工·····         | 175 |
| 第五节 化学处理·····         | 179 |
| 第六节 电拉毛·····          | 182 |
| 第七节 某些特殊材料的表面制备·····  | 183 |
| 第五章 工艺·····           | 185 |
| 第一节 喷前准备·····         | 185 |
| 第二节 喷涂工艺及涂层质量控制·····  | 189 |
| 第三节 自粘结粉末的喷涂特点·····   | 199 |
| 第四节 自熔性合金涂层的重熔·····   | 200 |
| 第六章 涂层设计·····         | 212 |
| 第一节 涂层设计的重要性·····     | 212 |
| 第二节 涂层设计时考虑的主要因素····· | 214 |
| 第三节 涂层设计的内容和步骤·····   | 219 |
| 第四节 涂层设计·····         | 223 |
| 第五节 涂层性能评定·····       | 242 |
| 第六节 常用涂层简介·····       | 246 |
| 第七章 涂层质量检验·····       | 254 |
| 第一节 检验方法·····         | 254 |
| 第二节 涂层表面缺陷·····       | 281 |

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 第八章 后处理和机加工.....      | 289 |
| 第一节 后处理.....          | 289 |
| 第二节 机加工.....          | 296 |
| 第九章 涂层的去涂.....        | 307 |
| 第一节 概述.....           | 307 |
| 第二节 方法选择.....         | 307 |
| 第三节 非机械法去除方法简介.....   | 307 |
| 第十章 常用热喷涂方法比较.....    | 314 |
| 第一节 氧乙炔焰粉末喷涂的特点.....  | 314 |
| 第二节 其它热喷涂方法.....      | 314 |
| 第三节 热喷涂方法的选择.....     | 322 |
| 第十一章 氧乙炔焰粉末喷涂的应用..... | 326 |
| 第一节 在国民经济各部门的应用.....  | 326 |
| 第二节 典型应用.....         | 328 |
| 第十二章 安全技术.....        | 333 |

## 绪 论

各种各样的机械设备、零部件，在生产、储运和使用过程中，由于接触各种腐蚀介质而被腐蚀；有的因有相对运动而被磨损、磨蚀；有的因接触流体而被冲蚀；有的兼有上述各种原因而发生磨损侵蚀。所有这些都使其实际效果在远未达到人们预想的可靠性和寿命之前，就过早的破坏或失效。腐蚀和磨损所造成的损失是十分惊人的。据国外资料报导，各种机械的结构件因腐蚀和磨损造成过早破坏的约占70%。国外某公司对其金属设备在两年期限内失效原因统计指出，有56.9%因腐蚀造成，43.1%因机械原因造成。

随着现代化工业技术的迅速发展，如原子能工业、军事工业、空间技术和海洋开发等近代科学技术，对材料科学提出了更新、更广、更严格、更苛刻的要求；用单一材料来制造整体设备和整个零件，不仅是不经济的，甚至是不可能的。如高熔点的金属和陶瓷材料，不但价格昂贵，而且其自身性能还不能满足作为整体构件所要求具备的特性。所以，在开发新材料的领域中，除研究新的制造整体构件的材料外，材料工作者长期大量的工作，都集中在材料表面的研究上。加强材料的表面防护，表面强化和在材料表面设计各种特殊功能的涂层来满足近代科学技术对产品提出的各种要求。这种

表面涂层技术，如果能和机械零件的结构设计有机的结合起来，可以达到常规方法不能相比的惊人效果，从而使产品的设计达到一个新的高度。所以，近二十多年来，表面涂层技术得到迅速发展。

热喷涂技术就是近几十年来，在研究材料的表面防护、表面强化和特殊功能表面涂层技术中逐步发展起来的一门独立技术。所谓热喷涂，就是采用不同的热源（焰流）将要制成涂层的材料如金属、合金、陶瓷、金属陶瓷、塑料以及复合材料，瞬时加热到熔融或高塑性状态，在焰流中形成雾状并被焰流加速后，以一定的速度喷向已经预先制备的工件基体表面并沉积形成涂层的表面处理技术的统称。

热喷涂的种类很多。按照采用的热源不同，常见的可分为：（1）燃烧焰喷涂；（2）电弧喷涂；（3）等离子焰喷涂；（4）爆燃喷涂。按照喷涂材料的形状可分为：（1）线材喷涂；（2）棒材喷涂；（3）粉末喷涂。

燃烧焰喷涂是使用氧气和可燃气体混合燃烧火焰作热源。可以采用的可燃性气体种类很多，如乙炔、氢气、甲烷、丙烷和煤气等，最常用的是乙炔。所以，燃烧焰喷涂技术又常被称为氧乙炔焰喷涂技术。

热喷涂技术的发展历史，同其它工艺技术一样，由于科学技术发展的要求，引起了设备的发展和材料的研究的深入。设备的改进和材料的突破，提高了工艺技术，促进了科学技术的飞跃。如果从1882年德国专利DRP24460熔融金属经高压气体制成粉末算起，热喷涂技术已经有整整一百年历史。如

果从1913年瑞士工学博士M·U·Schoop用其发明的氧乙炔焰线材气喷涂装置，用于承包喷涂施工算起，也已有近70年历史了。初期只是喷涂一些工艺美术的装饰性涂层和喷铝、喷锌作为防水和大气腐蚀的保护性涂层。

二十世纪五十年代，空间时代的到来，火箭发动机、喷气发动机、超音速飞行器要求发展新的高温材料，同样要求有新的技术来生产和评价这些材料。材料科学家面临的问题是传统工程材料和加工技术已经远远不能胜任。为了适应这方面的要求，促使热喷涂技术迅速发展起来，研制成功了等离子喷涂技术和爆燃喷涂技术。自熔性合金、放热型复合粉末及自粘结功能性涂层材料也先后问世。新材料的出现，反过来又进一步地促进了设备的更新和工艺技术的发展。七十年代研制成功了高能等离子喷涂设备，出现了阶梯涂层和渐变复合涂层，形成了完整的喷涂系统工程。

应该特别指出的是，最早问世的氧乙炔焰喷涂技术，在飞速发展的热喷涂技术中，不但没有被淘汰，而是经过不断改进在适应各类材料的喷涂中继续发展。各种新型喷涂材料的出现，进一步扩大了氧乙炔焰喷涂技术的使用范围。新型的喷枪不仅可以喷涂金属和合金粉末，还可以喷涂金属陶瓷等各种复合材料。氧乙炔焰喷涂，由于设备简单、操作方便、使用灵活，所以在大力推广热喷涂技术中是一种重要力量。

热喷涂技术是在空间时代到来后迅速发展起来的，并且首先在使用条件十分苛刻、要求极其严格的宇航工业中得到应用，然后向民用工业部门逐步扩展，这就扫除了人们曾对

热喷涂涂层应用的怀疑态度。经过近三十年的发展，应用几乎遍于所有的工业部门。从最早所谓边缘科学已经发展成为象铸、锻、焊、热处理等一样独立的热加工工艺。自七十年代初，就作为独立的学科活跃于世界科技舞台。

我国热喷涂技术是从五十年代开始的，在上海诞生了国内第一个专业化喷涂厂，研究氧乙炔焰丝喷及电喷装置，并开展低熔点金属喷涂的对外加工业务。在这同时，一些大型企业也相继从国外引进了少数喷涂设备用于喷涂低熔点合金。六十年代研制成功了等离子设备，并在典型产品应用上初见效果。同时也初步形成了一些喷涂粉末的生产能力，粉末亦陆续供应市场。七十年代初研制成功放热型镍包铝复合粉末，极大地推动了热喷涂技术的发展。

国内热喷涂技术的飞速发展，是在七十年代后期。无论是在设备、材料方面，还是在工艺应用方面，都出现了一个飞跃。并建立了一批喷涂设备和喷涂材料的生产工厂，具备了一定的生产能力，研（仿）制的设备、材料都达到或接近引进的水平。热喷涂技术的应用领域已经扩大到了国民经济各个部门，并取得了明显的经济效益。根据机械、冶金、电力、铁道、农机五个系统的统计，到1981年底，仅热喷涂修复零件一项，就为国家节约资金1亿元左右。

1981年10月，国家经委和国家科委在北京召开了“全国热喷涂（焊）技术经验交流推广会议”。成立了“全国热喷涂技术协作组”，并将热喷涂技术列为我国第六个五年计划的重点推广项目。

# 第一章 基本原理

氧乙炔焰粉末喷涂技术是近代各种热喷涂技术中应用较广泛的一种，喷涂所用的热源是氧乙炔火焰，喷涂所用的材料是各种特殊粉末。

## 第一节 概 述

将欲喷涂粉末送入专门的喷枪中，通过氧乙炔焰流的加热作用，使粉末达到熔融或高塑性状态，同时焰流对雾状熔滴按一定速度喷射、沉积到经过预先制备的基体表面上，与基体形成具有一定结合强度，并能满足各种工况条件要求的涂层。这样的一种热喷涂方法，称为氧乙炔焰粉末喷涂，其基本原理示于图 1—1，所得到的涂层称为喷涂层。

采用氧乙炔焰粉末喷涂，在喷涂时的温度可以控制在  $250^{\circ}\text{C}$  以下，不会改变基体组织和性能。除某些高熔点的金属、非金属和金属陶瓷粉末外，一般不怕氧化的粉末都可以采用氧乙炔焰喷涂。涂层性能、涂层与基体的结合强度，均能满足使用要求。

当采用的喷涂粉末是自熔性合金粉末时，所形成的涂层

可以用火焰（或其他热源）进行重熔处理。重熔处理是在基体基本不熔化的情况下，涂层熔化“润湿”基体，并与基体表面相互溶解和扩散，从而形成一层与基体呈钎焊状态的表面涂层。这种喷涂加喷后重熔处理的复合工艺（或边喷边熔的工艺），可以称为氧乙炔焰粉末喷熔，有的又称为氧乙炔焰粉末喷焊（本书称氧乙炔焰粉末喷熔）。经重熔处理所得到的涂层称为喷熔层，有的又称为喷焊层（本书称喷熔层）。喷涂层和喷熔层统称涂层。

经过重熔处理的涂层，几乎没有气孔，结构致密，表面光滑，涂层与基体之间形成冶金结合，且结合强度高。

氧乙炔焰粉末喷涂所形成的涂层，在喷涂后可以根据需要对涂层进行各种特殊的后处理，如重熔处理等（注意重熔处理只适用于自熔性合金涂层）。

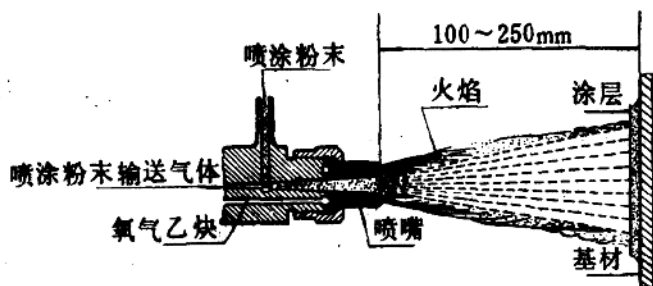


图1-1 氧乙炔焰粉末喷涂原理示意简图

喷涂粉末是从喷枪上方的粉斗中，通过进粉口送入到输送粉末的气体（氧气或氧气与乙炔的混合气）中。然后粉末

由送粉气体输送至喷嘴，在喷嘴出口处遇到燃烧气流而被加热，同时以一定速度喷射到工作表面。

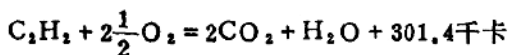
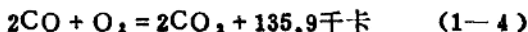
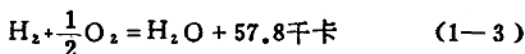
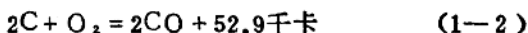
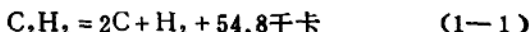
根据需要，也可以向喷枪中通入其它气体（如压缩空气、氮气等），使粉末获得更大的喷射速度。

## 第二节 氧 乙 炔 焰

氧乙炔火焰是氧乙炔焰粉末喷涂的热源，它是由乙炔与氧气混合燃烧而产生的。许多气态燃料（如乙炔、氢气、甲烷、丙烷和煤气）与氧（或空气）混合燃烧都能产生火焰，并释放出大量的热量。但使用最广泛的可燃气体是乙炔。所以，这里仅讨论氧乙炔火焰。

### 一、氧、乙炔的燃烧

氧、乙炔的完全燃烧化学反应式如下。



从反应式中可以看出，在完全燃烧时氧气与乙炔的体积比是2.5:1。也就是说，需要2.5个体积单位的氧气与1个体

积单位的乙炔作用才能完全燃烧。

实际上，在喷枪中氧气与乙炔的混合比值要比这个数字小得多，一般为 $1:1\sim 1.2$ 就能得到中性焰。其所缺少的氧气由火焰周围的空气中的氧补给。这样就大大减少了火焰周围空气中的氧气含量，同时也大大减轻了空气对喷涂的有害影响。

混合气体中氧气和乙炔的体积比值是个很重要的技术数据，它直接决定着火焰的外形、构造、化学性能和热性能等，是喷涂工艺中主要的工艺参数之一。

## 二、氧乙炔焰的种类和构造

根据混合气体中氧气和乙炔的体积比值，可以把氧乙炔焰分为三种，即中性焰、碳化焰和氧化焰。

### 1. 中性焰

当氧气和乙炔的体积比值为 $1:1.2$ 时，得到的火焰是中性焰，火焰的外形见图1—2(b)。

中性焰由焰心、内焰和外焰三部分组成。焰心呈现光亮的蓝白色圆锥形。在焰心处，乙炔受热分解为碳和氢气（见式1—1），生成的碳粒包裹在焰心外面，使焰心形成了光亮而明显的轮廓。焰心的外面是内焰，颜色较暗，长度从焰心伸长出去20毫米左右。内焰外面是淡蓝色的外焰。

在内焰，氧气和乙炔完成初步化学反应（见式1—2），生成一氧化碳和氢气。在外焰，由于吸取了周围空气中的氧气而进一步反应（见式1—3、4）达到完全燃烧，生成二氧化

碳和水蒸气。

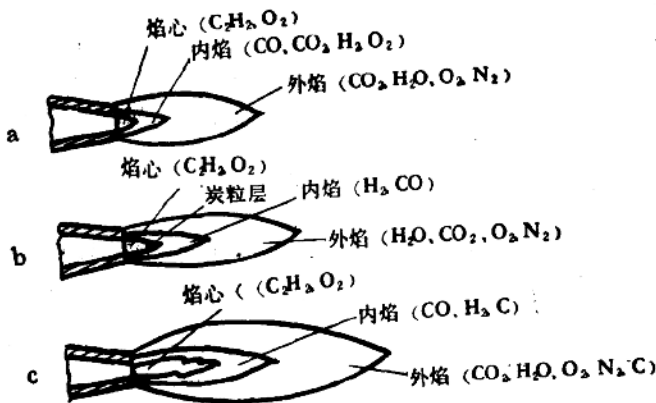


图1-2 氧乙炔火焰的种类与构造  
(a)氧化焰 (b)中性焰 (c)碳化焰

在焰心和外焰内部存在着游离状态的氧气，对金属有相当强烈的氧化作用，即具氧化性。而内焰中的一氧化碳和氢气都具有还原性，能夺走氧气且温度又高，所以最适宜用于喷涂和进行涂层的重熔处理。

喷涂一般材料，多采用中性焰。

## 2. 碳化焰

当氧气和乙炔的体积比值小于1时，一般在0.85~0.95的范围内，得到的火焰是碳化焰。火焰的外形见图1-2(c)。

碳化焰的焰心较长，没有明显的轮廓。内焰呈淡蓝色，长度与乙炔含量有关，内焰越长，表示过剩的乙炔越多。当乙炔过剩量很大时，由于氧气不足，乙炔不能充分燃烧，所