

合金粉末的 火焰喷涂与喷焊

赵福宽 孙灼伦 编

G174.442
8

劳动人事出版社

合金粉末的火焰喷涂与喷焊

赵福宽 孙灼伦 编

责任编辑：张文樑 刘海勇

劳动人事出版社出版

(北京市和平里中街12号)

北京市新源印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 32开本4.5印张 100千字

1988年7月北京第1版 1988年7月北京第1次印刷

印数：2650册

ISBN 7-5045-0184-0/TG·0.21 定价：1.95元

前 言

合金粉末的喷涂与喷焊是一项用途十分广泛的零件表面强化工艺。这项工艺对于改善零件的技术性能，延长使用寿命，降低配件消耗，减少设备维修量都能收到显著的效果。合金粉末的火焰喷涂和喷焊还具有工艺简单，易于掌握，投资少见效快的特点，无论是在大型企业还是在中、小型企业中，都极为实用。

本书是为青年工人编写的自学读物，以介绍喷涂喷焊的基本知识和实际操作技术为主，适当地介绍初步理论，力求浅显易懂，使读者获得喷涂喷焊方面的实际生产知识。

我国目前还没有对这一工艺的技术用语进行统一命名和定义，本书中的技术用语是参照国内多数技术资料和本行业中的通行习惯用语而确定的。计量单位均采用中文名称和符号，以便于初学者的学习和记忆。由于作者的水平有限，不足之处在所难免，深盼读者提出宝贵意见。

本书在编写过程中得到许多单位和个人提供的资料，王瑞安工程师和戈非同志还曾予以审阅，谨向这些同志致以深切的谢意。

编 者

1985年12月

目 录

第一章 概述.....	1
第一节 喷涂喷焊的技术经济地位与发展概况.....	1
第二节 喷涂和喷焊的基本概念.....	5
第三节 喷涂和喷焊同其它表面防护工艺的比较.....	13
第二章 金属零件的磨损和喷涂喷焊层的抗磨作用.....	16
第一节 金属零件的磨损.....	16
第二节 喷涂喷焊对强化零件表面的作用.....	19
第三章 喷涂喷焊的主要材料和工具设备.....	22
第一节 粉末材料.....	22
第二节 喷枪.....	32
第三节 其它工具设备.....	40
第四章 合金粉末的氧—乙炔火焰喷焊.....	43
第一节 喷焊的基本原理.....	43
第二节 喷焊的工艺过程.....	49
第三节 喷焊层的切削加工.....	64
第四节 喷焊层的缺陷及其防止方法.....	70
第五节 喷焊面积、厚度和用粉量的计算.....	75
第五章 合金粉末的氧—乙炔火焰喷涂.....	81

第一节	喷涂的基本原理	81
第二节	喷涂的工艺流程	85
第三节	喷涂层的封孔处理和切削加工	92
第四节	喷涂层的缺陷及其防止方法	96
第五节	喷涂层的厚度和用粉量计算	98
第六章	喷涂喷焊层质量的简易检查方法	101
第一节	喷涂喷焊层的表面检查	101
第二节	喷涂喷焊层的力学性能试验	104
第七章	典型工艺	110
第一节	典型喷焊工艺	110
第二节	典型喷涂工艺	116
附表一	部分国产喷焊合金粉末简表	124
附表二	部分国产喷涂合金粉末简表	129
附表三	部分国产镍—铝复合粉简表	132
附表四	部分国产自粘性一次喷涂复合粉简表	133
附表五	部分国产包复型粉末简表	134
附表六	喷涂喷焊枪具一览表	136

第一章 概 述

第一节 喷涂喷焊的技术经济 地位与发展概况

一、喷涂喷焊的技术经济地位

几乎每一家工厂和矿山都有一座废铁堆，少则几吨、十几吨，多的甚至达到数百吨。这里丢弃着大大小小的各种金属零件、构件，甚至有整台的报废设备。每年都有数不清的零件从工作岗位上淘汰下来，源源不断地扔在这里。为了替换这些失效报废的零件，人们不得不花费巨额资金，付出巨大的社会劳动。据估算，全世界每年至少有1亿吨的钢铁是用于旧零件更新的。我国仅煤炭企业中的统配矿，每年就要消耗20万吨左右的配件。

一个零件从采矿、选矿、冶炼、制坯、加工、运输、安装到投入使用是何等的不易，过早的报废实在令人可惜。它们是怎样失效报废的呢？

金属零件的损坏失效形式主要有两类：第一类是由于零件的机械强度不够，零件因受到拉伸、压缩、弯曲、扭转、剪切、冲击等外力作用而开裂、折断，或发生超过允许范围的变形。产生这种形式的损坏是由于机械设计不合理、加工制造质量不良和使用维护不当造成的。这种损坏往往是突然

发生的，损伤的积累过程不明显。有的关键部位突然损坏，还会引起事故的发生。我们称这种损坏为“非正常损坏”。要避免这种损坏，需要通过改进机械结构设计、选用更优良的材料、确保加工制造质量和加强使用管理来解决。零件的第二种损坏形式是由于零件表面的强度、硬度、耐磨性、耐腐蚀性不足，使零件的表面逐渐磨损、剥落、锈蚀，直到无法继续工作。在这种形式的损坏中，零件的损伤有明显的积累过程，我们可以把它称之为“渐进性损坏”。还有一些零件的失效是第一类和第二类形式兼而有之，零件先被磨损、腐蚀，逐渐变细、变薄，机械强度大大降低，然后在外力作用下或断或裂，或产生过大的变形。究其原因，问题还是首先出在“表面”上，这样的损坏形式也应该归到第二类。

让我们把注意力还回到废铁堆上来，分析一下在这些报废的零件中，是哪种损坏形式占大多数？我们发现，非正常损坏的零件比重不大，而占90%以上的零件是由于渐进性损坏而报废的。人们说：“这些零件太老了”。国家科委在1981年曾组织调查金属的腐蚀情况，推算出我国每年由于金属腐蚀而造成的损失高达100~150亿元，这真是一个可观的数字！

既然大多数零件是由于零件表面的物理化学性能不够理想而失效的，不言而喻，解决零件的“表面”问题，改善零件表面的理化性能，必将大幅度地提高零件寿命。而喷涂和喷焊正是强化金属表面的一项理想工艺。采用喷涂和喷焊可以给较差的材料穿上一层性能优良的防护衣，提高零件质量，延长使用寿命，改善机械性能，延长设备的检修周期，减少备件的库存，给国家和企业带来很大的经济效益。

恰当地选用材料和工艺，喷涂喷焊层可以具有各种不同

的性能，如耐磨、耐腐蚀、抗氧化、导电、绝缘、导热、隔热、耐高温、自润滑等等。美国“北极星”式导弹的第一级喷嘴采用了钨喷敷层保护，可以承受三千多摄氏度的高温。“探险者”号人造卫星外壳上的氧化铝喷敷层是有效的绝热保护层，使仪器仓内的温度维持在 $10\sim 30^{\circ}\text{C}$ 之间。在我们日常的生产中，喷涂喷焊的用途更是广泛。交通运输、机械制造、建材、冶金、采矿、发电、轻工、化工、农林等各行各业都能采用喷涂喷焊技术。零星工件的加工修理可以使用它，批量零件的生产也能使用它。新零件的表面预保护、旧零件的修复都能采用这种技术。

合金粉末的氧—乙炔火焰喷涂和喷焊还具有工具材料简单、无需大型设备、施工场地便于移动、操作技术容易掌握、投资少见效快等优点。一个企业配备上一套喷涂喷焊工具，就增添了一种新的技术手段，这对于大、中、小企业都很适用。

二、喷涂喷焊的发展概况

据一些资料介绍，远在19世纪末，在德国就有人做过将金属溶液用高速气流吹成微滴的试验。但这还不能算热喷涂，只能算做金属溶液的雾化试验。热喷涂的创始人一般认为是瑞士的肖普博士。他在20世纪初首先进行了用氧—乙炔火焰把金属丝熔融并且喷敷到工件表面的试验研究，并获得了成功。后来，他看到孩子们用玩具大炮把铅弹射击到砖墙上，有的铅弹既没有弹回来，又没有落在地上，而是贴在了墙上。他联想到，如果把喷涂材料做成粉粒状，未尝不是一个好办法。于是他进行了金属粉末的喷涂试验。

当然，最先发展起来的还是金属丝熔融喷涂。这是因为当时的粉末喷涂设备十分复杂和笨重，不便于在工业上大量

采用，金属粉末的制备也不象拔丝那样容易。所以，直到20世纪40年代，丝喷技术还占据着热喷涂的统治地位。后来，比较轻便和实用的专用粉末喷枪问世以后，粉喷技术才得到推广。粉末比金属丝有更大的优越性，粉末既可以用气体燃料加热，又可以用该气体输送，而且许多不能拉拔成丝的材料却能够制成粉末，使喷敷材料更加广泛。可以这样说，粉末材料给热喷涂技术开辟了新天地，使这项技术获得了新的生命力，粉末也逐渐取代了金属丝的统治地位。

40年代以后，热喷涂技术的应用范围也逐渐向机械零件的表面强化方面发展。到了50年代，由于军事工业、高能物理和空间技术的发展，对材料的要求更加苛刻，材料问题经常成为整个工程的关键，一些技术人员便向热喷涂技术寻求办法。这从客观上促进了热喷涂技术的发展。特别是自熔性合金粉末和具有自发热性能的复合粉末研制成功以及粉末喷枪的完善，使合金粉末的喷涂和喷焊从技术上过了关，应用的领域便迅速扩大并进入了高速发展阶段。

目前国际上十分重视这项技术的发展，有专门的国际会议讨论热喷涂技术问题。专攻热喷涂技术研究和产品生产的科研机构及生产厂家遍及各国，技术理论日臻完善。一些国家已将热喷涂工具和材料系列化。还有一些有影响的大型企业和学术组织活跃在世界各地，象瑞士的卡斯托林公司、日本的熔射协会等等。不少机械制造商还特别规定了哪些产品必须采用喷涂喷焊进行表面处理，以提高产品的竞争能力。总之，这项技术已发展成为一项象铸造、锻压、焊接、热处理一样的金属热加工新分支。

我国是从60年代初开始采用热喷涂技术的。冶金、交通、军工等部门应用较早。70年代后期这种技术几乎在全国

各个行业中得到推广并且迅速发展。国家经委还把它列为重点新技术推广项目之一，举办培训班，建立协作网和推广站，开展技术交流活动。许多科研、教学、生产单位从事热喷涂理论的研究和机具、材料的研制。现在我国已能生产型号比较齐全的喷枪和粉末，基本上满足了各种零件、各种工作条件的要求。

第二节 喷涂和喷焊的基本概念

一、什么是喷涂和喷焊

喷涂和喷焊就是利用火焰、电弧、等离子弧等热源将喷敷材料加热到熔融、半熔融状态，高速喷射到工件表面，并使其附着在上面，以得到我们所需要的几何尺寸和表面性能。

二、分类

(一) 按喷敷材料的形态分类

喷敷材料可以是金属丝、粉末和棒材，所以热喷涂按喷敷材料的形态可以分为丝喷、粉喷和棒喷。金属丝和粉末在我国应用较多，棒材应用很少。在国外，棒材也只限于金属氧化物的喷涂。下面概要介绍这三种材料的喷涂技术特点。

1. 丝喷

丝喷的历史最为悠久，目前在国内外还被广泛采用着。在喷涂过程中，只有完全熔融的微滴才能从金属丝上脱离下来。所以喷涂层质地细密，孔隙小，涂层与基材的结合强度较高。但丝喷需要空气压缩设备，整个系统较复杂，耗能也较多。另外，由于要把喷敷材料拉拔成丝，使材料的成份受到了限制，不能拔丝的材料纵然有再好的性能也不能被采用。

2. 粉喷

粉末材料喷涂虽然起步较晚，但在 50 年代以后获得长足的进步。特别是自熔性合金粉末和自发热复合粉末的出现，使粉末成为最主要的喷敷材料。粉末材料的成份配比不受延展性的限制，差不多所有固体材料都能加工成粉粒状态。粉末可以用气体输送，这就使喷敷设备的结构大大简化了。如果采用氧—乙炔火焰为热源，还可以不用压缩气体，而只用燃料气体输送粉末，使这种工艺极其简便和灵活。粉喷还兼有喷涂和喷焊两种工艺方法，实用性更强。粉末喷涂的结合强度低于丝喷，但粉末喷焊的结合强度很高。

3. 棒喷

棒喷用的棒材是将喷敷材料的颗粒用粘合剂粘合成直径 3~7 毫米的棒料，加压成型后烧结而成的。它的主要成份多为金属氧化物，如氧化铝、氧化锆等。棒材的喷涂要使用专用设备，国内采用的很少。

（二）按热源分类

按照热源的不同，热喷涂可以分为氧—乙炔法、等离子法、高频感应法和爆燃法等。

1、氧—乙炔火焰法

这种方法是以氧—乙炔火焰为热源，将喷敷材料加热到熔融、半熔融状态，并由燃烧气体将粉末喷射到工件表面。

图 1-1 是氧—乙炔火焰法喷涂喷焊示意图。粉末在喷枪的粉末射吸室内被氧气吸入送粉道，在混合室与乙炔混合后由喷嘴高速喷出。氧和乙炔的混合气体在喷嘴处被点燃，火焰携带着粉末喷向工件。粉末边飞行边被加热，最后附着在工件上。这种热源的最高温度约为 3200℃ 左右，粉末飞行速度为 40~120 米/秒。这种方法的特点是燃料气体兼做送粉气

体，设备结构简单，使用方便。

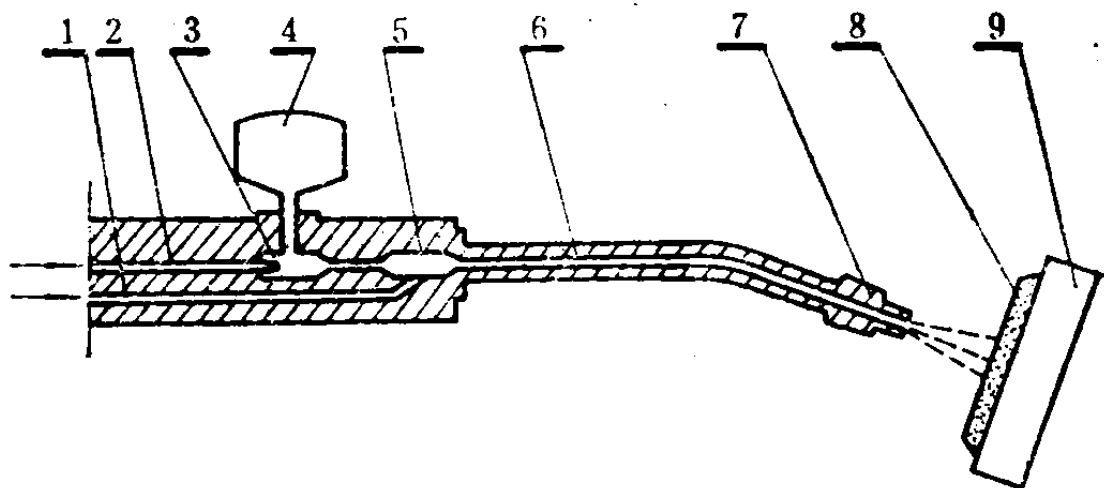


图 1-1 氧—乙炔火焰喷涂喷焊示意图

1.乙炔管 2.氧气管 3.粉末射吸室 4.粉斗 5.混合室 6.混合气管 7.喷嘴 8.喷涂喷焊层 9.工件

2. 等离子法

等离子法是根据某些气体（如氩气、氮气等）在高压电场作用下，能够电离成等离子体，从而达到很高的温度这一特点，将喷敷材料在等离子弧中加热，并用等离子焰流和高压气体将喷敷材料高速喷射到工件表面上的工艺方法。

图1-2是等离子喷焊示意图。紫铜喷嘴和工件接电源的正极，钨棒接负极。工作气体在正负极之间形成等离子弧。送粉机构将合金粉末送入等离子焰流中，粉末被加热成液体微滴，并以很高的速度喷敷到工件表面上。等离子弧的温度高达 16000°C ，能熔解任何难熔材料。该方法能量集中，起弧稳定，粉末的飞行速度高达 $300\sim 350$ 米/秒，喷涂效果极佳。我国已能批量生产等离子喷涂和喷焊机床。由于等离子法需要较复杂的专用设备和专门的工作间，投资较高，对环境也有一定的污染，它的推广受到一定限制。

3. 电弧法

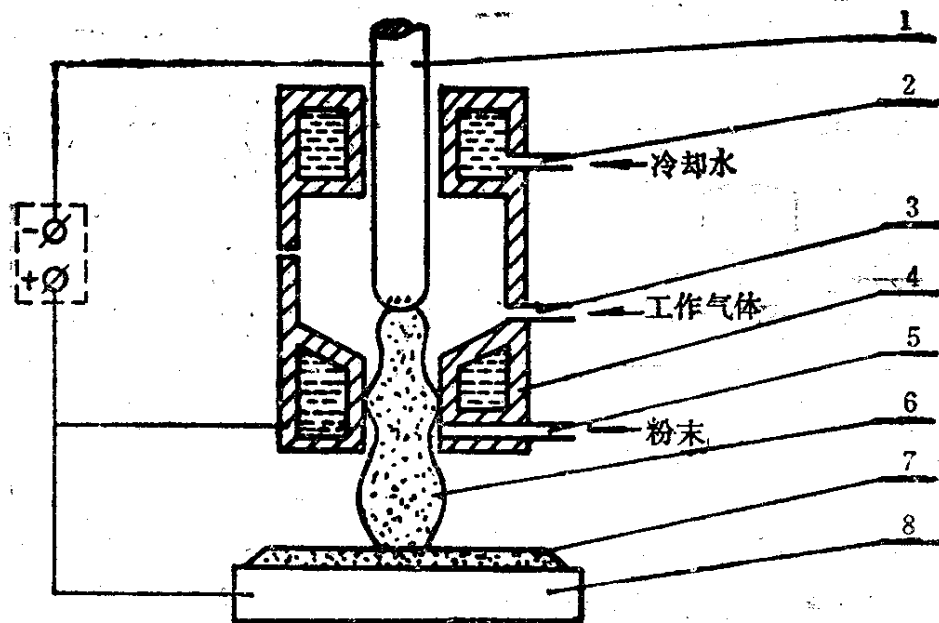


图 1-2 联合弧等离子喷焊法示意图

1. 钨棒 2. 冷却水 3. 工作气体进口 4. 紫铜喷嘴 5. 金属粉末进口 6. 等离子弧 7. 喷焊层 8. 工件

电弧法是依靠正负电极之间的放电电弧将喷敷材料加热，再用压缩气体将喷敷材料的微滴喷射到工件表面上的工艺方法。

图1-3是电弧喷涂示意图。两条合金丝分别接到电源的正负极上，由两套送丝机构把它们送到压缩气体喷嘴前，两条金属丝在彼此接近时，形成电弧放电，并使合金丝的尖端熔化。熔化的金属立即被高压气体吹成微滴，飞行到工件表面上。

电弧喷涂法的喷涂质量较高，火焰温度约为6000℃，熔滴的飞行速度约200米/秒，喷涂层与工件基材的结合力高于氧—乙炔火焰喷涂，而且电弧喷涂速度快、效率高，适用于大面积喷涂和大批量生产。电弧法的缺点是需要压气设备，

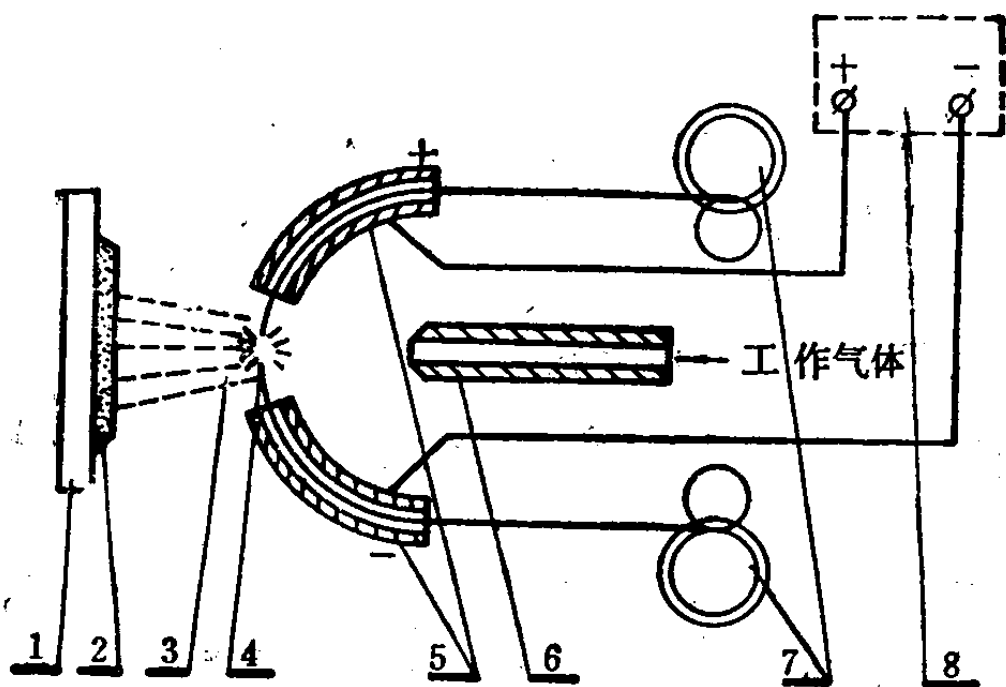


图 1-3 电弧喷涂示意图

1. 工件 2. 喷涂层 3. 含有金属熔滴的气流 4. 电弧
5. 导电嘴 6. 压气喷嘴 7. 送丝机构 8. 电源

装置比较笨重。又由于火焰温度高，微粒的飞行速度不很快，合金丝中的合金元素烧损严重，需要制备专用的金属丝，加工成本较高。

4. 高频感应法

图1-4为高频感应喷涂示意图。送丝机构将金属丝材送入高频线圈中。频率达几万赫兹的交流电产生的交变磁场在金属丝中感应出高频涡流，涡流使金属丝的温度升高，直到熔化。熔化的金属被压缩气体吹成微滴，喷射到工件表面上。这种方法使用的设备化较复杂，耗能大，国内应用的极少。

5. 爆燃法

爆燃法是把氧—乙炔混合气体在特殊的枪管中引爆，推动合金粉末以极高的速度喷向工件。这种方法的热源温度为

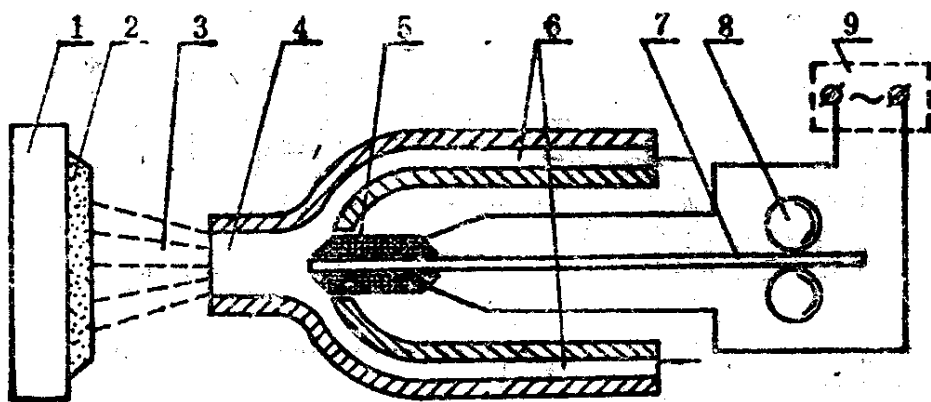


图 1-4 高频感应法喷涂原理示意图

- 1.工件 2.喷涂层 3.含有金属熔滴的气流 4.喷嘴
5.高频感应线圈 6.压缩气体管 7.金属丝
8.送丝机构 9.高频电源

3000~3500℃，粉末飞行速度高达300~350米/秒。

图1-5为爆燃喷涂示意图。氧和乙炔进入枪管后，粉末材料随即被吹入枪管。这时用火花塞点燃气体，引起燃料气体的爆炸，将粉末喷射出去。用这种方法得到的涂层密度

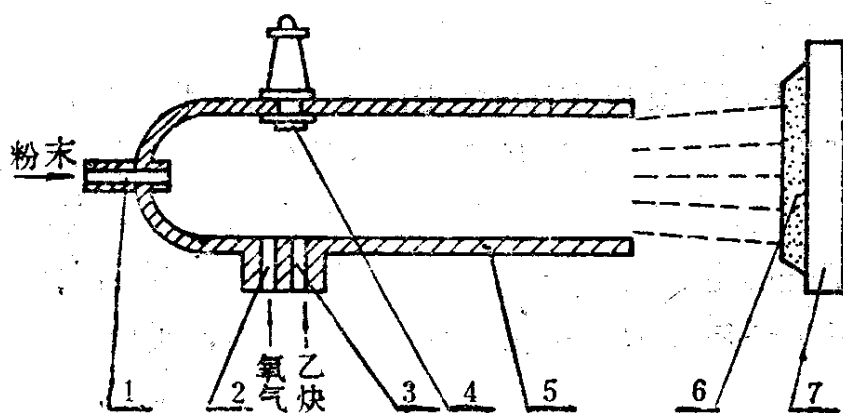


图 1-5 爆燃法喷涂原理示意图

- 1.粉末进口 2.氧气进口 3.乙炔进口 4.电火花塞
5.枪筒 6.喷涂层 7.工件

高，粘合力强，而工件温度却很低（不超过 200°C ），不易产生变形。但喷涂过程中噪音高达 $140\sim 150$ 分贝，需要将装置安装在双层混凝土的密闭室内，人员遥控操作。目前美国、日本已在生产中使用这种方法，国内还在研究中。

三、合金粉末的氧—乙炔火焰喷涂和喷焊

合金粉末的氧—乙炔火焰喷涂和喷焊是本书介绍的重点。金属丝和棒材目前都只能用于喷涂，而粉材既可用于喷涂又可用于喷焊。合金粉末的喷涂和喷焊可以使用等离子法和氧—乙炔火焰法两种方法。而氧—乙炔火焰法是最方便、最常用的方法。

喷涂和喷焊虽同属于热喷涂的范畴，但二者从工艺方法到适用范围都有许多不同。二者的主要区别有以下几点：

1. 工艺方法不同

喷涂和喷焊虽然都是把合金粉末用喷枪喷到加工件的表面上，但具体的工艺方法却是不一样的，从工件的预处理、预热、喷粉、冷却直到喷后的加工处理都有不同的工艺要求。其中最主要的区别是，喷焊工艺中包括一道用火焰将喷敷到工件表面的粉层再熔融一遍的工序，这道工序叫“重熔”。而喷涂工艺没有重熔过程。所以喷焊又称为“热喷”、“喷熔”，喷涂又称为“冷喷”、“喷镀”。

2. 喷敷层的性能不同

喷涂层和喷焊层的表面性能是不同的，尤其是力学性能差别很大。喷焊层与工件基体的结合是彼此焊合在一起的，叫“冶金结合”，法向抗拉结合强度有 400 兆帕（约合 40 公斤力/毫米²）左右，和焊接强度差不多，质地细密，抗冲击性能良好。而喷涂层与工件基体的结合是以彼此互相锚嵌的机械结合为主，法向抗拉结合强度为 $30\sim 50$ 兆帕（约合 $3\sim 5$ 公斤

力/毫米²)，质地比较疏松，抗冲击性能也较差。二者的抗腐蚀能力也不相同，喷焊层的抗腐蚀能力强，能有效地保护工件不受腐蚀。而喷涂层疏松多孔，尽管喷涂层自身具有一定的抗腐蚀能力，但腐蚀性气体或液体会透过孔隙到达工件基体，腐蚀工件。所以喷涂层不经封孔处理是不能用于腐蚀环境的。

3.对基材的影响不同

喷焊对基材的影响较大。重熔工序使基材的局部温度达到900℃以上。这一方面要造成金相组织的改变，另一方面也会由于工件各部位受热不均，产生热变形。而喷涂没有重熔工序，基材的温度最多不超过250℃，远低于铁合金的相变温度，金相组织不会发生什么变化，热变形也很微小。

4.使用的工具、材料不同

喷涂和喷焊要选用不同的枪具。喷涂枪的功率较大，火焰大而分散，有利于粉末在飞行中加热；喷焊枪的功率略小，但火焰更集中，有利于重熔。

喷涂粉末和喷焊粉末一般也不能通用。喷焊要使用自熔性合金粉末。自熔性合金粉末在重熔中能自行脱氧造渣，形成坚实、质密的喷焊层。而对喷涂粉末并不要求自行生成焊渣，但要求喷涂层与基体有较高的结合强度。所以喷涂强调使用具有自发热性能的包复型粉末。由于对粉末的要求不一样，喷涂粉末和喷焊粉末的合金组元、成份配比是不相同的。

5.适用范围不同

由于喷涂和喷焊的工艺方法不同，喷敷层的性能不同，其适用范围也会不同。关于喷涂和喷焊的适用条件我们将在第四章中详细讨论。