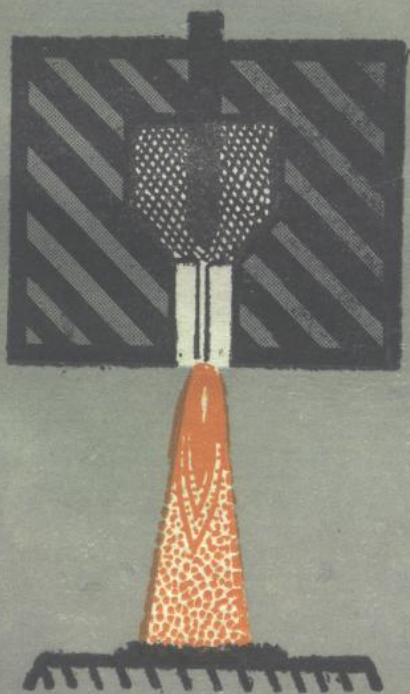


工程机械修理丛书

等离子喷涂及堆焊

DENGLIZIPENTU JI DUIHAN



徐滨士 刘世参 刘学蕙 编著 中国铁道出版社

7117-1
U.4

工程机械修理丛书

等离子喷涂及堆焊

徐滨士 刘世参 刘学蕙 编著



中国铁道出版社

1986年·北京

内 容 简 介

本书系统地介绍了等离子喷涂及堆焊技术的原理、工艺及设备。内容主要包括：基本概念；等离子喷涂工艺及堆焊工艺；工艺的材料及参数的选择；涂层系统设计；修复典型零部件的应用实例；喷涂层及堆焊层的机械加工；劳动保护及安全等。书后还附有有关数据供读者使用。

本书可供从事机械修理的技术人员、技术工人使用，同时可作为机械修理工人普及理论、提高技术的教材，亦可供院校有关专业师生参考。

ZQ70/20

工程机械修理丛书

等离子喷涂及堆焊

徐滨士 刘世参 刘学慧 编著

中国铁道出版社出版

责任编辑：郑晓薇 封面设计：霍 达

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092毫米 1/32 印张：5.75 字数：130千

1986年10月 第1版 第1次印刷

印数：0001—2,500册 定价：1.00元

出版说明

机械维修是维持正常生产所必须的，是延长机械使用寿命和节约能源、资源的重要途径。近几年来，由于经济发展的需要，机械维修技术发展很快，维修理论有了新的发展，维修管理工作有了改进，许多新工艺也在机械维修行业得到了应用。

为了普及机械维修理论，推广各种新工艺，把机械维修方面的科研成果及早用在生产上，不断提高维修行业的技术水平，兹决定出版《工程机械修理丛书》。

本《丛书》暂分以下18册，将陆续出版：1.清洗；2.零件检验；3.装配；4.等离子喷涂及堆焊；5.高压水清洗技术；6.真空熔接工艺；7.振动电堆焊；8.粘接；9.镀铁；10.氧-乙炔火焰喷涂与喷焊；11.摩擦磨损与润滑；12.断裂失效分析；13.穴蚀的形成与修理；14.铸铁焊补；15.修复层的机械加工；16.轴承修理；17.典型零部件的修理；18.柴油机不解体检测技术。内容从基础理论到修理工艺，力争阐述系统，技术先进、适用，通俗易懂，便于自学。

本套《丛书》由徐滨士、易新乾、李国枢三位同志主编。

1985年7月

目 录

第一章 概 述	1
第一节 基本概念.....	1
第二节 热喷涂与堆焊的发展概况.....	2
第三节 热喷涂与堆焊在国民经济中的应用.....	6
第二章 等离子喷涂	13
第一节 等离子体及等离子弧.....	13
第二节 等离子喷涂原理.....	18
第三节 等离子喷涂设备.....	23
第四节 等离子喷涂用粉末.....	44
第五节 等离子喷涂用气体及其选择.....	56
第六节 等离子喷涂工艺.....	58
第七节 等离子喷涂层的性能测试及质量检验.....	67
第三章 等离子弧堆焊	79
第一节 等离子弧堆焊原理及应用.....	79
第二节 等离子弧堆焊设备.....	82
第三节 等离子弧堆焊用粉末及气体.....	91
第四节 等离子弧堆焊工艺.....	94
第四章 等离子喷涂与堆焊涂层系统设计	105
第一节 涂层的性能及分类.....	106
第二节 涂层系统设计的原则.....	107
第五章 等离子喷涂、堆焊修复典型零件	114
第一节 等离子喷涂、堆焊在机械零件修复中 的应用.....	114

第二节	等离子喷涂、堆焊修复典型零件工艺	·····121
第三节	等离子喷涂修复重载履带车辆零件试验结果及质量分析	·····128
第六章	等离子喷涂层及堆焊层的机械加工	·····133
第一节	等离子喷涂层及堆焊层机械加工的特点	·····133
第二节	等离子喷涂层及堆焊层的车削加工	·····134
第三节	等离子喷涂层及堆焊层的磨削加工	·····139
第四节	国外喷涂层加工典型实例	·····147
第七章	劳动保护与安全	·····151
第一节	等离子喷涂过程中对人体有害的因素	·····151
第二节	等离子喷涂时的安全防护措施	·····153
附 录		·····156
参考资料		·····178

第一章 概 述

机械零件大多数是用金属材料制造的，在使用中由于相配合零件表面的相互作用会引起磨损；零件的金属表面由于大气的影晌发生化学和电化学的作用而招致腐蚀。有时两种现象同时发生，称为磨蚀。随着现代工业和科学技术的发展，机械零件经常处于异常复杂和苛刻的条件下工作，大量机械设备往往因磨损、腐蚀或磨蚀而报废。

据国外工业发达国家统计，每年钢材腐蚀损失占钢材总产量10%，经济损失占国民经济总产值2~4%。我国国家科委对金属腐蚀情况做过调查，根据调查初步推算我国仅因金属腐蚀每年所造成的损失达100~150亿元之多。如果将金属腐蚀、磨损所造成的停工、停产及所引起的事故等损失统计在内，其数字是更加惊人的。因此，国内外对研究开发金属表面强化和抗磨技术普遍关切和重视。

本世纪以来，由于重视表面强化和抗磨技术的开发，各种强化方法不断涌现。

常用的强化方法有：化学热处理法，电镀法，热喷涂法，气焊与电弧堆焊法等。

上述各种方法都有各自的优势和局限性。每种方法均有一定的应用范围。我们要发挥各种方法的优势，相互补充，达到表面强化的目的，使抗磨涂层的质量好、成本低、效率高。

第一节 基本概念

热喷涂是指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，形成喷涂层的一种金属表面加工方法。

根据热源来分，热喷涂有四种基本方法：电弧喷涂；火焰喷涂；等离子喷涂和特殊方法。火焰喷涂就是以气体火焰为热源的热喷涂。目前，火焰喷涂按火焰喷射速度分为：火焰喷涂、火焰冲击喷涂（爆炸喷涂）及超音速喷涂三种。电弧喷涂是以电弧为热源的热喷涂。等离子喷涂是以等离子弧为热源的热喷涂。

以气体火焰为热源，将喷涂材料（自溶性合金粉末）通过特殊工艺方法重熔喷涂涂层的工艺方法称为喷熔。喷熔过程的特点是先在母材表面喷上涂层，然后利用高于涂层熔点（但低于母材熔点）的温度使涂层熔融，以使其与母材表面形成具有钎焊接头特点的结合。喷熔的结合强度显著高于喷涂的结合强度，因而喷熔工艺可以应用于抗疲劳、抗冲击的机械零件。

堆焊是指为增大或恢复焊件尺寸，或使焊件表面获得具有特殊性能的熔敷金属而进行的焊接。堆焊过程中不仅使焊接材料熔化，而且使母材表面熔化，使熔化的焊接材料与母材混合形成原子结合的接头，其结合强度高于喷涂。

等离子堆焊就是以等离子弧为热源的堆焊。

第二节 热喷涂与堆焊的发展概况

热喷涂技术由瑞士肖普（Schoop）博士首创，1908年他用雾化装置进行喷涂试验。1913年制作的世界第一台丝材喷枪，到1920年逐渐完善并得到了实用。

1920年日本人到瑞士考查后将金属喷涂引入日本，发明了用交流电弧为热源的热喷涂装置。由于交流电弧不稳定，效率低，涂层质量差，没能实际推广。后来，西德改用直流电源后，

电弧喷涂才有了实用价值。1938年美国研制了电弧线材喷枪。

五十年代西德发展了罗凯特 (Rokide) 氧-乙炔为热源的棒材系列及其喷枪。1953年发明了自熔性合金，这是五十年代喷涂材料方面的重大突破。

五十年代后期，为了满足航空、原子能、导弹、火箭等尖端技术对于高熔点、高强度涂层的迫切要求，美国相继发明了爆炸喷涂和等离子喷涂。

六十年代加拿大生产了数十种复合粉，美国、瑞士公司继续发展了复合粉的制备技术。自熔性合金粉和复合粉的出现，对热喷涂技术的发展起了重要作用。

美国、比利时及西德致力于碳化物、陶瓷、金属陶瓷及难熔金属等喷涂用粉的研究与生产。

七十年代以来，美国公司研制了大量铝热型混合粉和复合粉。美国麦特寇 (METCO) 公司设计生产的一系列自粘一次喷涂粉、兼有自熔性合金粉与放热型复合粉的特点，简化了喷涂工艺，是喷涂材料发展的新趋势。

我国热喷涂技术起步较早，五十年代就开展了丝材电弧喷涂；六十年代在某些军工部门开始研究等离子喷涂；七十年代出现了品种和型号较为齐全的材料和设备。但总的来说进展缓慢，只是到了近几年才获得了较快的发展。特别是国家经委将热喷涂做为国家重点推广项目以后，发展速度更快并取得了显著的经济效益。

等离子喷涂与堆焊弧焰温度高、喷涂颗粒飞行速度快，涂层结合强度也较高 ($4 \sim 8 \text{ kgf/mm}^2$)，孔隙率小于 5%，在我国军工部门得到普遍应用。

堆焊技术是利用焊接方法进行强化机械零件表面的一种维修焊接技术。利用这一技术可以改变零件表面的化学成分和组织结构，完善其性能，延长零件的使用寿命，具有重要

的经济价值。

常用的工艺方法有：手工电弧堆焊、振动电弧堆焊、氧-乙炔焰堆焊、等离子堆焊等。

手工电弧堆焊简便灵活，应用广泛，它的主要缺点是生产率低（1~3 kg/h）、劳动条件差及降低堆焊零件的疲劳强度等。

焊接材料的发展及工艺方法的改进，使手工电弧焊的应用不断扩大。例如应用加入铁粉的焊条使生产率显著提高。又如采用酸性药皮的堆焊焊条可以大大改善焊接的工艺性能，使粉尘量下降，改善焊工的工作条件。

应用手工碳极电弧为热源进行自熔性合金膏剂堆焊，可以获得平整而薄的性能优异的堆焊层，而且熔深也很小。

氧-乙炔焰堆焊具有堆焊层薄、熔深浅的特点，设备简单，工艺适应性强。近年来，由于硬质合金复合材料的出现，氧-乙炔焰温度低，堆焊后可保持复合材料中硬质合金的原有形貌和性能，也是应用较广的工艺。应用硬质合金复合材料堆焊高炉料钟零件，其使用寿命比原来用的索尔玛依特合金提高3~8倍。瑞士卡斯托林公司用50%碳化钨自熔性合金粉末，采用氧-乙炔喷熔一步法的熔敷层使犁铧的使用寿命从原来的三个月延长到九个月。美国研究火焰喷涂与激光重熔的方法，显著提高了生产率。

振动电弧堆焊采用细焊丝并使其连续振动，能在小电流下保证堆焊过程的稳定性，因此使零件受热较小，热影响区较小，变形也小，并能获得薄而平整的、硬度较高的堆焊金属层，在机械零件修复中得到了广泛应用。为了提高振动电弧堆焊层的质量，生产中应用了各种保护介质（如水蒸气、压缩空气、二氧化碳）及熔剂层下保护的振动电弧堆焊。

熔剂层下振动电弧堆焊具有焊层质量好，修复零件的抗

疲劳强度较高的特点，可用来修复重要的机械零件。

水蒸气保护介质具有较好的保护作用，堆焊层的质量较高，热影响区小，设备简单，经济性好等，因而应用广泛。

二氧化碳保护振动焊，能隔离氮的侵入而获得质量好的堆焊层；能够减弱氢的作用，而提高抗裂性能；生产率较高，因此是一种有发展前途的焊接方法。

振动电弧堆焊是比较经济而简便的工艺，特别是在汽车、拖拉机修理中应用比较广泛。由于它的生产率低、堆焊层耐磨性一般，修复零件抗疲劳性能下降，故在重要机械零件上的应用受到了限制。

高频感应堆焊靠高频电流加热熔化堆焊材料而形成堆焊层。一般来说，高频加热中使加热温度略高于堆焊材料的熔化温度，略低于基体金属的熔化温度。这样既可使零件的受热小、变形小，又能满意地获得具有钎焊性质的冶金结合。堆焊硬质合金时，将粉碎的硬质合金与硼酸混合后涂在零件表面上，加热后，使基体金属熔融，而硬质合金颗粒沉入液态基体金属中，形成以钢为基体并镶入硬质合金的抗磨层。

据悉，苏联有的拖拉机与农机制造部门采用感应堆焊已占全部工作量的93%。

对感应堆焊除应完善工艺、提高耐磨性外，还应研究各种专用机械化装置，以提高生产率，扩大零件修复范围，增强经济效益。

高频感应堆焊层的厚度为0.1~2 mm，并且具有操作简便、熔深浅、生产率高等优点，因此必将得到广泛应用。我国农业机械化科学研究院工艺材料研究所，已开展犁铧等零件的感应堆焊应用研究，并取得了成效。

等离子堆焊多被应用于抗疲劳、耐冲击、耐高温、耐腐蚀等要求结合强度高的零件。例如用于修复发动机气门，修

复气门寿命比新品高1~2倍。因此这一工艺方法在一些重要工业部门得到了应用。

等离子弧是一种高能热源,堆焊层的厚度为0.5~5mm,熔深大小可控制,热量集中,零件变形小,生产率较高,有的生产率可达12kg/h。

等离子堆焊常应用丝状和粉状材料,有时也应用管状材料或成型材料。

苏联在七十年代农业收获机部件上应用了等离子堆焊工艺,班产100件,每年可节约10万卢布。我国农具厂在犁铧正面堆焊高铬铸铁合金,在海南岛红壤土中使用,寿命提高2倍。

近年来,开发研究了一种新型的反极性微等离子弧粉末堆焊,其原理是反极性微等离子弧的斑点,清除熔池周围固态金属表面的氧化膜。在净化区的前沿地带,被阴极斑点加热到具有良好润湿性的发汗状态,这时熔池中少量金属漫流到此区形成一个很薄的膜(10 μ m左右),随着熔池的移动,在此薄膜上形成所需厚度的焊道。这种堆焊层的稀释率很小,熔深仅为几个微米,堆焊厚度小于0.5mm,堆焊表面光洁整齐。所以这是一种较为理想的工艺方法。

第三节 热喷涂与堆焊在国民经济中的应用

从上述热喷涂及堆焊技术的应用来看,由装饰性涂层发展为各种功能性涂层,如耐磨、抗氧化、隔热、导电、绝缘、减磨、润滑、防辐射等,热喷涂与堆焊作为一项表面强化技术,比起整体提高材质无疑要经济得多,因此它既可用于修复,也可用于制造。由于涂层材料的优异,使得修复零件的寿命不仅达到了而且超过了新产品的寿命,对产品质量

量起到了改造作用。因此，在新产品设计时就应考虑到应用热喷涂与堆焊的强化技术。

表1—1、表1—2、表1—3分别列出了热喷涂及堆焊技术的应用,热喷涂工艺的特点,及等离子喷涂与其它几种修复方法比较。

热喷涂及堆焊技术应用

表 1—1

领域	零 部 件	工 艺*	涂 层 用 途	涂 层 材 料
火箭技术	火箭头部和喷管	1	耐热、抗冲蚀	Al_2O_3, ZrO_2, W
宇宙飞行器	喷气推进弹体整流罩	1	绝热	$ZrO_2, Al_2O_3,$
	宇宙研究装置	1	防粘连、绝热、热辐射性能	Al_2O_3, ZrO_2, W 金属及氧化物,碳化物等
	超短波天线	1	绝热、绝缘	Al_2O_3
航 空	喷气发动机涡轮和压气机	1	耐冲蚀	$Co-WC, TiC,$ Cr_2O_3
	叶片	1,2	耐热	$Ni-Al, Ni-Cr-B-Si$
	燃气涡轮叶片	1	耐热	$Ni-Al, Al, Al_2O_3,$
	燃烧室内衬	1	耐热	$Co-Cr-Al-Y,$ $MgZrO_2$
空	起落架轴颈	1	耐磨	硬质碳化物及其合金
	机翼和机身承力结构	1	强度、刚度	纤维增强复合材料
	前整流舱	1	滑动、封严	聚苯脂-硅铝
	机匣	1	耐磨、润滑可磨、封严	镍包石墨 镍包硅藻土
机械制造	压铸模具	1	耐热	$Cr-Ni$ 合金
	可拆卸的和不可拆卸的压模	1,2	耐热和防止焊合、耐磨	$Al_2O_3, Ni-Al$
	难熔金属挤压模具	1	绝热	$Ni-Cr-B-Si$ Al_2O_3, ZrO_2

续上表

领域	零 部 件	工艺*	涂层用途	涂层材料
机 械 制 造	轧机	1	防止粘合	Al ₂ O ₃
	高频感应圈	1	电绝缘	Al ₂ O ₃
	大型零件(例如涡轮)	1	耐热	Al ₂ O ₃
	铸件的半永久性模			
	机床导轨	1,2	耐磨	Mo, Ni-Cr-B-Si 等
	管状金属结构	1	绝热	Al ₂ O ₃
	烧结舟	1	防止焊合	Al ₂ O ₃
	切削和磨削工具, 其中 包括精磨	1	耐久性、精确度	硬质合金、金刚石、 碳化物等
	量具	1	耐久性	碳化物
	阀体和蝶板	2	防腐	Al
	通用阀门密封面	1,3	耐磨	镍基、铁基自熔性合 金
	铍犁	3	耐磨	高铬铸铁合金
	挖泥船驳头	3	耐磨	镍基合金
	泥砂机刮板	3	耐磨	镍基合金
	螺旋送粉杆	3	耐磨	铁基合金
	轴、曲轴修复	1,2,4	耐磨	镍基合金、高碳钢
	剪刀片	3	耐磨	铁基合金
	离合器锥体	1,2	耐磨	Mo
	离合器推板	3	耐磨	镍基合金
	齿轮、凸轮	3	耐磨	铁基合金
冷拔钢管内模	3	耐磨	铁基合金	
热切边模具	3	耐磨	钴基合金	
冲头	1	耐磨	Mo	
陶瓷钎焊处的金属涂 层	1	达到陶瓷和金属牢 固结合	Mo	
动力(包 括原子能)	输电铁塔	2	防腐	Zn, Al
	大型水闸门	2	防腐	Zn, Al
	MHD通道和零件	1	电绝缘	Al ₂ O ₃ , MgO- Al ₂ O ₃

续上表

领域	零 部 件	工艺*	涂层用途	涂层材料
动力 (包括原子能)	燃料电池	1	热强	Al_2O_3, ZrO_2
	排烟风机叶片	1	耐磨	$Al_2O_3, Ni-Al$
	粉状燃料燃烧嘴	1	耐热	Al_2O_3, ZrO_2
	核反应堆轴蕊和导热元件的内外表面	1	改善热交换和防止 CO_2 对轴的腐蚀	有铝底层的镁合金
	反应堆零件, 其中包括石墨零件、	1	防止粘合、绝热	Al_2O_3, ZrO_2
	控制设备的传感器(压力传感器)	1	电绝缘	Al_2O_3
冶 金	高炉节气阀	1	高温下的热强和耐磨	$Al, Ni-Al, ZrO_2$
	高炉风口、渣口	1	高温下的热强和耐磨	$Al_2O_3, Ni-Al, ZrO_2$
	薄钢板转炉防护罩	1	抗金属溅射, 炽热气体冲蚀	一层 Al_2O_3 , + 一层 Cr_2O_3
	平炉炉顶耐火材料	1	耐久性	Al_2O_3, ZrO_2
	炼锌用搅拌器	1	耐热防止铁锌反应	$Ni-Al, Al_2O_3$
	电锯盘	1	电绝缘	Al_2O_3
	熔炼钎和轴的石墨钳锅	1	防止溅粘污熔融金属	铬酸镁
	熔炼半导体材料硅	1	减少杂质含量	Mo
	镍矿浸析压力锅	1	防腐、耐磨	Al_2O_3 浸渗聚合物
化 工	冷凝器零件	1	耐腐蚀	Al_2O_3 浸渗聚合物
	容器、管道及其它装置	1	耐腐蚀	Al_2O_3 浸渗聚合物
	碳化塔	2	耐腐蚀	Al 浸渗聚合物
	柱塞阀门密封面	1,3	防腐耐磨	镍基合金
	通风机浆片	1	防硫酸蒸气腐蚀	Cr_2O_3
	贫液泵叶轮耐磨环	1	防腐耐磨	Cr_2O_3

续上表

领域	零 部 件	工艺*	涂层用途	涂层材料
石油、 煤碳	水力采煤钻孔泵工作 轮衬套和其它零件	1	防腐耐磨	粗粒WC + Cr-Ni Cr-B-Ni-Si
	土壤加工机械工具、 电铲和传送带	1	耐磨防腐	硬质合金
	裂化装置泵	3	耐磨防腐	镍基合金
	钻杆接头	3	耐磨	高铬铸铁合金
	采煤机镶型截齿	3	耐磨	高铬铸铁合金
	刮板输煤机中部槽板	3	耐磨	高铬铸铁合金
	固液泵叶轮	3	耐磨	高铬铸铁合金
交通、 运输、 铁道	铁路桥梁	2	防腐	Zn, Al
	内燃机排气阀	3	耐磨	钴基合金等
	活塞端部和燃烧室表 面	1	绝热、耐热 (触媒作用)	Al ₂ O ₃ , Al-Ni CeO + LaO
	发动机汽缸 活塞环	1 1,2	耐磨 耐磨	钢 Mo
轻 工	造纸烘缸	2	防腐	不锈钢
	烘烤元件	1	增加红外辐射	TiO ₂ , ZrO ₂ 等
	玻璃模具	3	耐磨	镍基合金
纺 织	纤维导管	1	耐磨	Al ₂ O ₃ + TiO ₂
	细纱机成形凸轮	3	耐磨	镍基合金
	精纺机前分离罗拉	2	耐磨	Ni-Al镍基合金
电子、 无线电 和仪器 制造	热电子发电的极板和 电子源、离子源	1	增强发射	LaB ₆
	逻辑和记忆装置的固 体电路超高频设备等	1	电路中的电绝缘磁 性及其它性能电联 结电绝缘	电绝缘材料、半导体 材料、铁氧体材料和 金属
	固定电容和可变电容 带有负正电阻温度系 数的热敏电阻	1		Al ₂ O ₃
		1		BaTiO ₃

续上表

领域	零 部 件	工艺*	涂 层 用 途	涂 层 材 料
材料科学	纤维增强复合材料	1	制备材料基体	金属和合金
建筑	建筑物的内部和外部 修饰	1,2	装饰和防护	金属和氧化物
水利	水闸门起闭杆等	4	防腐耐磨	不锈钢

* 1 —— 等离子喷涂； 2 —— 火焰喷涂； 3 —— 喷熔或堆焊； 4 —— 电弧喷涂。

热喷涂工艺的特点

表 1-2

	等离子喷涂法	火焰喷涂法	电弧喷涂法	爆燃喷涂法
冲击速度(m/s)	150	100	100	800
近似温度值(K)	20000	3000	5000	4000
典型涂层孔隙率(%)	1~10	10~15	10~15	1~2
典型粘结强度 (MN/m ²)	30	7	10	60
优 点	孔隙率低， 粘性强， 多用途的冷 基材，污染 低	便宜， 沉积率高	便宜，效率 高，污染低， 冷的基材	孔隙率非常 低，粘性强 极佳，冷的 基材
限 制	价格相当昂 贵	通常孔隙率 高，粘性强 差，对工件 要加热	只应用于导 电物，通常 孔隙率很高	非常昂贵， 效率低