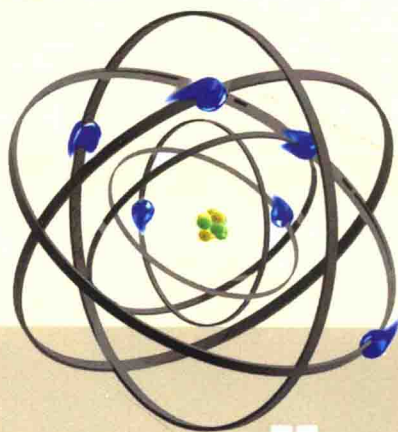


Cailiao Gaixing Shiyan

材料改性实验

史月丽 罗 勇 顾永琴 王庆良 王温银 编



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

材料改性实验

史月丽 罗 勇 顾永琴 王庆良 王温银 编

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书根据材料专业的特点,主要介绍了材料表面改性技术及实验,如等离子热喷涂原理及应用、等离子气相沉积原理及应用和离子注入技术及相关实验技术;还介绍了钢铁材料的热处理改性技术,如钢的热处理组织、加热与冷却规范对钢的组织性能的影响、淬火钢回火时的组织性能及钢材成分、工艺、组织和性能的关系以及相关实验技术;最后列举了几个组织鉴别在失效分析中的应用实例。

本书可作为材料及相关专业的本科生教学用书,也可供从事与材料相关工作的工程技术和管理人员使用和参考。

图书在版编目(CIP)数据

材料改性实验/史月丽等编. —徐州:中国矿业大学出版社,2013.8

ISBN 978 - 7 - 5646 - 2004 - 2

I. ①材… II. ①史… III. ①材料科学—高等学校—教材 IV. ①TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 199734 号

书 名 材料改性实验

编 者 史月丽 等

责任编辑 潘俊成

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

开 本 787×960 1/16 印张 9.5 字数 186 千字

版次印次 2013 年 8 月第 1 版 2013 年 8 月第 1 次印刷

定 价 18.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

本教材是为材料专业的“材料改性实验”课程编写的。

本书分为两部分：一部分为材料的表面改性技术，实验主要有等离子热喷涂实验、等离子喷涂涂层性能表征、等离子化学气相沉积 DLC 实验、等离子化学气相沉积 DLC 的表征；另一部分为钢铁材料的热处理改性技术，实验有钢的热处理组织观察、鉴别、热处理综合实验等。结合笔者的科研工作实践，又编写了组织鉴别在失效分析中的应用实例。

本书根据“材料改性实验”课程的教学大纲，以综合性、设计性实验为主，介绍了实验内容涉及的原理、所用设备结构、操作方法、注意事项。重点介绍实验方法，方便操作者根据实验条件设计实验方案。本书由浅入深、循序渐进地介绍理论知识和实践操作方法，强调实验内容的综合性。本书的宗旨是培养学习者的动手能力、提高学习者的实验技能，培养创新意识和创新能力，提高学习者分析问题、解决问题的能力。

本书的编写得到了中国矿业大学材料学院领导的大力支持，另外得到了课题组研究生吴超、郝玉婉、吴楠等的大力协助。

由于编者水平所限，书中难免有不妥和错误，敬请读者批评指正。

作 者

2013 年 5 月

目 录

第一部分 表面改性技术

第 1 章 等离子热喷涂原理及应用	3
1.1 等离子体及相关理论	3
1.2 等离子弧	4
1.3 等离子弧的工作气体	7
1.4 等离子喷涂设备	7
1.5 等离子喷涂工艺	15
实验 1(1) 等离子热喷涂实验	21
实验 1(2) 等离子热喷涂涂层性能表征	22
第 2 章 等离子气相沉积原理及应用	23
2.1 气相沉积技术简介	23
2.2 等离子化学气相沉积原理	25
2.3 类金刚石膜	26
2.4 等离子化学气相沉积设备	27
2.5 等离子化学气相沉积制备 DLC	28
2.6 DLC 的表征	29
实验 2(1) 等离子化学气相沉积 DLC 实验	32
实验 2(2) 等离子化学气相沉积 DLC 的表征	33
第 3 章 离子注入技术	35
3.1 离子注入定义	35
3.2 离子注入设备	36
3.3 注入工艺参数及操作步骤	40

3.4 离子注入特点	42
3.5 离子注入应用	43
实验 3 离子注入改性实验	44

第二部分 钢铁材料的热处理改性技术

第 4 章 钢的热处理组织	47
4.1 珠光体(P)	47
4.2 贝氏体(B)	50
4.3 马氏体(M)	56
4.4 钢的回火组织	60
4.5 组织鉴别	62
实验 4 钢的热处理组织观察	66
实验 5 钢的热处理组织鉴别	67
第 5 章 加热与冷却规范对钢的组织性能的影响	69
5.1 钢的加热规范	69
5.2 钢的冷却	76
实验 6(1) 钢的热处理	80
第 6 章 淬火钢回火时的组织及性能	82
6.1 钢回火时的组织转变	82
6.2 钢回火时力学性能的变化	85
6.3 钢的回火工艺	90
实验 6(2) 钢的回火	91
第 7 章 钢材成分、工艺、组织和性能	94
7.1 钢的基本知识	94
7.2 几种常用合金钢简介	98
7.3 小结	100
实验 7 综合性实验	101

第 8 章 组织鉴别在失效分析中的应用实例	103
8.1 断线钳钳头开裂分析	103
8.2 提升机减速齿轮断裂分析	106
8.3 电厂水冷壁管开裂分析	109
8.4 电厂高温再热器管爆管分析	113
8.5 起重机变幅油缸断裂分析	117
8.6 圆弧轴齿轮断裂分析	120
8.7 加热炉炉筋管开裂分析	124
附表一 常用钢的临界点	130
附表二 常用钢根据硬度选用的回火温度	133
附表三 常用钢的腐蚀剂	135
参考文献	137

第一部分

表面改性技术

第1章 等离子热喷涂原理及应用

等离子喷涂是以非转移的等离子弧为热源,喷涂材料以粉末形式送入焰流中制备涂层的一种方法。喷枪的电极(阴极)和喷嘴(阳极)分别接整流电源的负、正极,向喷枪供给工作气体,通过高频火花引燃电弧,气体被加热到很高的温度(约15 000 K)而电离,在机械压缩效应、自磁压缩效应和热压缩效应的作用下,从喷嘴喷出,形成高温高速等离子射流。送粉气流推动粉末进入等离子射流后,被迅速加热和加速,形成熔融或半熔融的粒子束,撞击到经预处理的基材表面,在基材表面流散、变形、凝固,后来的熔融粒子又在先前凝固的粒子上层层叠压,形成涂层。自等离子喷涂技术问世以来,等离子喷涂法已成为现代工业和科学技术各个领域不可缺少的先进加工手段。等离子喷涂是热喷涂的一个重要分支,其特点是其火焰流温度高,能熔化几乎所有材料,因而喷涂用材广泛,可采用等离子喷涂的方法制备各种具有耐磨、耐腐蚀、耐热、耐氧化、导电、绝缘等优异性能的涂层,操作简便、速度快、效率高;适用于各种基体,对金属和非金属的表面均可进行喷涂;被喷涂的零件的尺寸范围宽,既可做大面积的喷涂,也可对大型构件做局部喷涂;既可用于产品制造,也可用于旧件修复等。由于这种喷涂方法的焰流温度高,流速大,所以制备的涂层孔隙率及结合强度均优于常规的火焰喷涂,尤其对制备高熔点的金属涂层及陶瓷涂层有更大的优越性。采用等离子喷涂的方法可制备各种具有耐磨、耐腐蚀、耐热、耐氧化、导电、绝缘等优异性能的涂层。近年来,等离子喷涂技术有了飞速的发展,其应用领域也将会越来越广泛。

1.1 等离子体及相关理论

等离子体是指气体部分或全部电离(电弧放电、辉光放电、高频放电、光致电离),形成正、负离子数量相等而整体呈中性的导电体,是继固体、液体、气体之后物质的第四态。

等离子体是一个广义的概念。等离子喷涂技术中所叙述的等离子体是

指气体经过压缩电弧后形成的高温等离子体,亦称热等离子体。

等离子体可分为以下三大类:

① 高温高压等离子体,电离度接近 100%,温度可达几亿度,用于核聚变的研究。

② 低温低压等离子体,电离度不足 1%,温度仅为 $50\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

③ 高温低压等离子体,约有 1% 以上的气体被电离,具有几万度的温度。离子、自由电子、未被电离的原子的动能接近于热平衡。等离子喷涂所利用的正是这类等离子体。

作为物质的一种独立形态,等离子体具有以下几个特点:

① 导电性:由于气体原子被电离成正离子和负离子,气体中充满了带电粒子,具有很强的导电性。

② 电中性:虽然等离子体内部具有很多荷电粒子,但所有粒子所带的正电荷数和负电荷数相等,因此整体而言是呈电中性的。

③ 与磁场可作用性:由于等离子体是由荷电粒子组成的导电体,因此可用磁场控制它的位置、形状和运动,如电弧的旋转、电弧的稳定等。

1.2 等 离 子 弧

用于喷涂的等离子电弧(简称等离子弧)一般都是用等离子弧发生器产生的压缩电弧。一般阴极采用钨钨或钨钍合金材料,喷嘴阳极采用紫铜。压缩电弧的形成是所谓热压缩效应、自磁压缩效应和机械压缩效应联合作用的结果。

① 热压缩效应:由于水冷紫铜喷嘴孔道内壁温度很低,流经喷嘴内壁附近的气体受到冷却,形成薄层冷气膜,其电离度很低,导电性差,迫使等离子弧集中流过电离度高的中心部位,电弧受到冷却气流的压缩的现象。

② 自磁压缩效应:电弧电流有一定的流向,弧柱相当于一束电流方向相同的平行导体。由于平行导体间电磁力的相互作用,使弧柱各部位都受到指向弧柱轴线的压缩力作用,弧柱直径进一步缩小。这种现象是由于电弧自身的磁场产生的,故称之为自磁压缩效应。

③ 机械压缩效应:等离子是通过等离子喷枪的喷嘴喷射出来,因此水冷紫铜喷嘴孔径的大小限制了等离子弧弧柱的直径大小。喷嘴孔径越小,孔道越长,对弧柱的压缩越强,弧柱直径越小,这种对弧柱的压缩现象就称为机械

压缩效应。

等离子弧有以下几种作用形式：

① 非转移型弧：喷嘴接电源正极，钨极接电源负极，电弧建立在钨极和喷嘴内表面之间，等离子焰流从喷嘴内喷出。非转移型弧可用于喷涂、切割等。

② 转移型弧：工件接电源正极，钨极接电源负极，电弧建立在钨极和工件之间。转移型弧可用于金属切割、粉末堆焊等。

③ 联合型弧：喷嘴和工件接电源正极，钨极接电源负极，非转移型弧和转移型弧并存的等离子弧。联合型弧亦可用于喷涂。

等离子弧可划分为阴极和阴极区、弧柱区、阳极和阳极区三个部分，如图1-1所示。

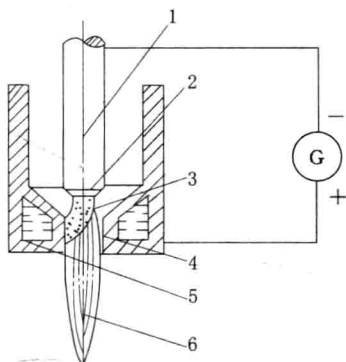


图 1-1 等离子弧组成部分

1——阴极；2——阴极区；3——弧柱；4——阳极区；5——阳极；6——焰流

① 阴极和阴极区——等离子放电的绝大多数电子是由阴极发出的。阴极表面放电部分的总和称为阴极斑点，其电流密度高达 $10^3 \sim 10^7 \text{ A/cm}^2$ 。阴极区域指靠近阴极（距阴极约 10^{-4} cm ）电场强度很强的区域。由于大量电子从阴极逸出，造成阴极区内正负离子数的不平衡，形成阴极位降区，电位梯度可达 $10^5 \sim 10^6 \text{ V/cm}$ 的数量级。

② 弧柱区——弧柱区是由电弧长度上均匀分布的导电气体组成的。电位梯度一般为 $10 \sim 50 \text{ V/cm}$ 。弧柱区正负离子浓度几乎相等，在其每个宏观区域中电离气体都呈中性，所谓等离子体即指弧柱部分。

③ 阳极和阳极区——阳极基本上仅接受弧柱区流来的电子，电子流入阳极也集中在阳极表面不大的区域上，称之为阳极斑点。阳极区指靠近阳极斑

点附近($10^{-3} \sim 10^{-4}$ cm)电场强度较高的区域,其电位梯度为 $10^3 \sim 10^5$ V/cm 数量级。进入阳极区的电子带来大量的热量,使阳极温度升高。

电弧等离子焰流具有很高的速度,在电弧功率较大时,可获得超音速。获得高速的原因:工作气体在电弧中被加热,温度升高、体积急剧膨胀、产生很大压力,迫使等离子体以极高速度从喷嘴喷出。如 Ar 气常温密度为 1.7 kg/m^3 ,高温时可降为 0.05 kg/m^3 ,即体积膨胀 34.8 倍,因此能产生极大的压力。等离子喷涂用的等离子焰流速度一般为每秒几百米。

等离子焰流具有很高的温度。如图 1-2 所示,在喷嘴出口处等离子焰流的温度可以通过理论计算推出,亦可通过实验测定。

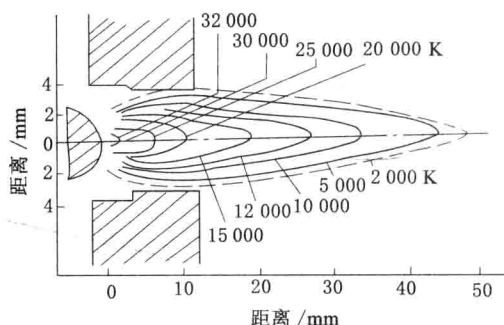


图 1-2 等离子焰流的温度分布

等离子体热焓比一般气体包含更丰富的内容(本质是一样的),其内能除表示等离子体的基本离子(分子、原子、离子、电子)的运动能量外,还包括解离、电离等过程的能量变化。

电弧的静特性是指电弧两端电压与电流的关系。当电流不变时,电弧电压越高,电弧效率亦越高。因此,希望得到上升的电弧静特性,这样当电弧电流增加时,效率不至于下降。电弧等离子静特性有多种因素影响,主要有:

- ① 气体种类的影响。
- ② 气体流量对电弧电压的影响。
- ③ 喷嘴孔径的影响。

等离子弧是一种压缩性电弧,弧柱挺拔、电离度高,故电流形状、位置、电弧电压、电流均较自由电弧稳定,不易受外界环境干扰。压缩性电弧可调节性因素多,可在较广范围内稳定工作。例如,改变工作气体种类可得到氧化、中性或还原气氛;改变喷嘴尺寸、控制气体流量、调节电参数,可获得不同刚

柔性的等离子弧,保证等离子焰流可根据需要具有不同速度;对特定等离子弧设备可通过调节电功率,可得到不同焰流的温度及喷射速度。

1.3 等离子弧的工作气体

产生等离子弧的工作气体(又称等离子气),常用的有氮、氢、氩、氦。具体选用哪种气体或用哪几种组成混合气体作为工作气体,要视具体工艺要求,同时兼顾价格来定。

氮气作为等离子工作气体,其具有较高的热焓值,且具有较高的热效率。另外,其来源方便,价格便宜,所以成为等离子喷涂中最常用的工作气体。但是,由于氮气保护性差,因此在喷涂易氧化的粉末时是不用的。在氮气中加入5%~20%的氢气作为等离子喷涂的工作气体,将有助于提高等离子弧的工作电压和喷枪的使用功率。

氢气和氮气一样,具有很高的热焓值。但由于氢气来源比较困难,价格较贵,一般只在工作气体中加入一定量的氢气,以提高等离子弧的温度和热能。在喷涂高熔点的粉末时,氢气是不可缺少的气体。对于绝大多数金属材料来说,氢气是还原性气体,因此工作气体中加入氢气可以有效地防止材料的氧化。

氩气是氩原子气体,其热焓值没有上述两种气体高。但是,由于它没有分解过程,吸收热量后温度升高很快,并且电离,因此电弧性能优于双原子气体。同时维持电弧稳定燃烧所需的电弧电压比双原子低,电弧的稳定性好。氮气是惰性气体,具有良好的保护性能,所以在喷涂易氧化的粉末材料时,氩气最为合适。但氩气来源比较困难,价格昂贵,在应用时受到一定的限制。

氢气为单原子、惰性气体,是一种很好的工作气体,且具有很高的热焓值。但氢气在空气中含量少,制取困难,故很少采用。

1.4 等离子喷涂设备

本次实验使用的设备型号是DH-1080型等离子喷涂系统。DH-1080等离子喷涂系统可分为六大组件:电源,喷枪(机装或手工),控制柜,转接箱,送粉器,冷水机组。其组成结构如图1-3所示。

在整个系统中,主气(氩气或氮气)、次气(氢气或氦气)和空气分别进入

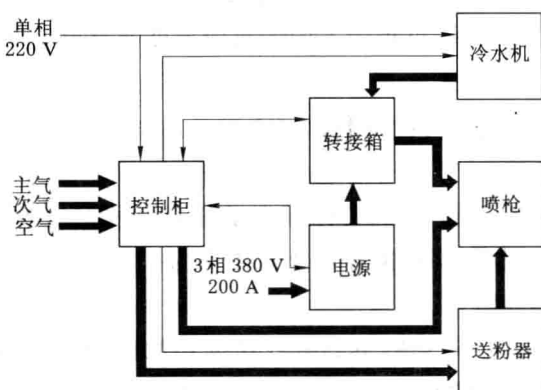


图 1-3 DH-1080 等离子喷涂系统组成结构图

控制柜,在控制柜中进行分配,然后分成两路输出。一路进入喷枪,另一路进入送粉器。另外,3 相 380 V 的交流电输入电源,经变压整流后输出进入转接箱。同时从冷水机组送来的冷却水也进入转接箱,通过水电缆,将电能和冷却水送入喷枪。此外,控制柜接收和发送各种信号,使整个系统可靠地、方便地、高效地运行。

1.4.1 控制柜

控制系统的任务是向等离子喷枪供应冷却水、工作气、工作电流及高频电流,可方便调节气、水、电并予以显示。此外,还可对喷涂进行自动化的控制,实现主要工艺参数(主气、次气、电弧电流等)可程序控制。

整个控制柜分为电气控制和气动控制两部分,而部分气动元件则受电气控制。控制柜主要有三种功能:① 系统状态监视;② 气体流量控制;③ 电气控制。其外形如图 1-4 所示,具体参数如表 1-1 所示。

1.4.2 电源

喷涂用的整流电源是向喷枪供给电能的装置,其电源均为直流电源,其外特性、动特性及供电参数都应满足喷枪产生等离子弧的要求。目前采用的整流电源类型,主要是磁放大器硅整流电源及可控硅整流电源。

电源系统采用低压大电流的设计理念,作为电源,能提供最高达 80 kW 的输出功率。采用可控硅三相全桥控制,最高 125 V 的空载电压,1 000 A 的工作电流。工作时可以稳定在 100~800 A,电流的精度可达 1%,是一典型

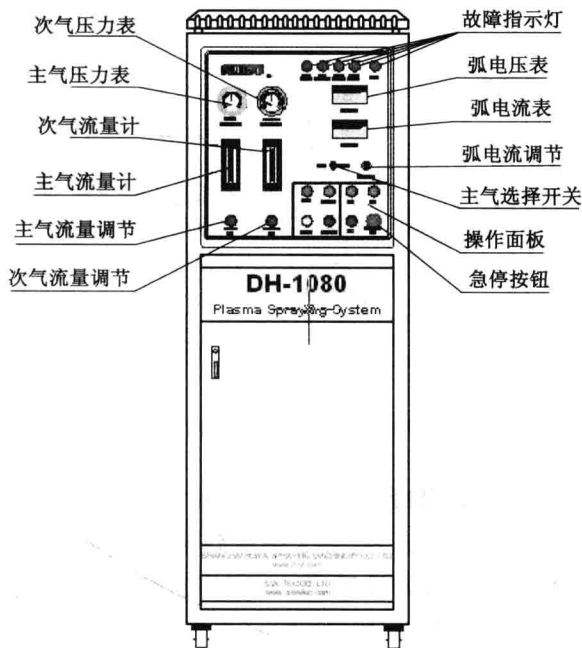


图 1-4 DH-1080 等离子喷涂系统控制柜外形

表 1-1 DH-1080 等离子喷涂系统控制柜参数

项 目 内 容	基 本 参 数
输入电源	单相 AC220 V、50 Hz
输入功率	200 W
控制类型	PLC 控制
主气类型及压力	氩气、氮气 0.7 MPa
主气最大耗量	2 m ³ /h
次气类型及压力	氢气、氮气 0.5 MPa
空气及压力	0.5 MPa
气体使用方式	氩气、氩气+氢气、氮气、氮气+氢气、氩气+氮气、氮气+氮气

的恒流源，具有电压陡降特性。同时，整个开机及关机过程采用软启弧方式，避免喷枪受到冲击。其工作原理如图 1-5 所示。

本系统采用先进的低压启弧原理，将空载电压设定为 60 V，保证人身安

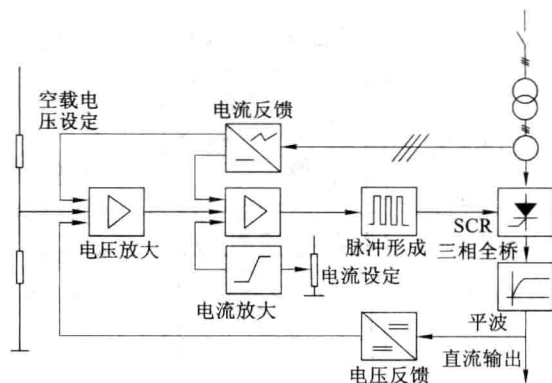


图 1-5 DH-1080 等离子喷涂系统电气原理

全和系统安全,并且采用软启弧,使喷枪从开始启动到正常工作缓慢过渡,避免瞬时大电流对喷枪进行冲击,增加了喷枪的使用寿命。

该电源根据恒流源来进行设计,具有电压陡降特性。其技术参数如表1-2所示,其电压陡降特性如图 1-6 所示。

表 1-2 DH-1080 等离子喷涂系统电源技术参数

项目内容	基本参数
输入电源	3 相 AC380 V、50 Hz
额定输入功率	80 kW
输出空载电压	60 V
工作电流	0~800 A
工作电压	30~85 V
电源特性	恒流源
电流精度	<1%
负载率	80%

1.4.3 喷枪

喷枪实际上是一个非转移型等离子弧发生器,旨在产生高熔、高速的等离子焰流和将粉末流畅地送入焰流中,是最关键的部件,整个系统的电、气、粉、水都集于其上。

喷枪是整个喷涂系统中最重要也是最为关键的一个部分。DH-1080 等离