

LZPTJS

等离子

# 喷涂技术

顾庆生 编著



江苏科学技术出版社

## 内 容 提 要

本书主要介绍等离子喷涂技术基础知识；等离子喷涂设备、粉末、工艺；等离子喷涂后的涂层系统、涂层切削加工与检测技术，以及等离子喷涂技术的应用、发展和安全防护。此外，在各章节中，还结合介绍国内外等离子喷涂技术的进展情况和科研成果。

本书可供从事热喷涂技术工作的技术人员和工人阅读，亦可供从事材料保护、焊接、金属切削加工和设备维修等专业方面的技术人员和工人在推广应用热喷涂技术的过程中参考。

## 等 离 子 喷 涂 技 术

周庆生 编著

---

出版：江苏科学技术出版社

发行：江苏省新华书店

印刷：泰州人民印刷厂

---

开本 787×1092毫米 1/32 印张 7.25 字数 158,000

1982年3月第1版 1982年3月第1次印刷

印数 1-7,000册

---

书号：15196 071 定价：0.70元

责任编辑 孙广能

## 前 言

等离子喷涂是金属表面处理方法中的一项新技术，目前国内外普遍重视这一技术的试验研究和推广应用。

等离子喷涂技术是利用等离子焰流作为热源，将金属或非金属粉末加热到熔化或半熔化状态，并以高速喷向预先经过粗糙处理的基体表面上，从而形成一种具有特殊性能的涂层。

根据机器零件表面性能的要求，可选用相应的粉末材料进行喷涂，从而提高零件表面的耐磨损、耐高温、耐腐蚀、抗冲刷、耐绝缘等性能，以达到修复旧件、提高零件使用寿命、节省钢材和贵重合金材料等目的。对涂层性能的检测和实际使用结果，表明了喷涂后的涂层具有平整、光滑、致密、粘结强度高、对零件的热变形影响小等一系列优点。目前，已在宇航工业、国防工业、机器制造、石油化工机械、机车车辆、冶金机械、电力机械等部门中获得广泛应用，并取得了很好的技术、经济效果。

等离子喷涂在表面处理技术领域中有广泛的应用前途。为了进一步推广应用这一新技术，本人通过调查研究和实践，并参考了一些国内外有关资料，编写了《等离子喷涂技术》一书，供从事这项工作的同志参阅。

在编著和审稿过程中，得到了哈尔滨焊接研究所齐波工程师的大力支持和帮助，并审阅了全稿，在此表示感谢。

由于本人水平有限，再加上这项技术尚在不断发 展，本书显然不可能完全反映出当前的技术水平，衷心地希望读者批评指正。

周庆生

1981年11月

# 目 录

## 第一章 等离子喷涂技术基础

|     |               |    |
|-----|---------------|----|
| 第一节 | 概述            | 1  |
| 第二节 | 等离子体基本概念      | 3  |
| 第三节 | 等离子弧的物理基础     | 8  |
| 第四节 | 等离子弧的形式       | 13 |
| 第五节 | 等离子弧特性        | 14 |
| 第六节 | 等离子弧的工作气体     | 17 |
| 第七节 | 等离子喷涂的基本原理和特点 | 18 |

## 第二章 等离子喷涂设备

|     |              |    |
|-----|--------------|----|
| 第一节 | 电源           | 21 |
| 第二节 | 电气控制系统       | 31 |
| 第三节 | 等离子喷涂枪       | 43 |
| 第四节 | 送粉器          | 75 |
| 第五节 | 水冷及供气系统      | 79 |
| 第六节 | 设备故障的分析及排除方法 | 84 |

## 第三章 等离子喷涂合金粉末

|     |         |     |
|-----|---------|-----|
| 第一节 | 陶瓷粉末    | 90  |
| 第二节 | 复合粉末    | 95  |
| 第三节 | 自熔性合金粉末 | 102 |

## 第四章 等离子喷涂涂层系统设计

|     |          |     |
|-----|----------|-----|
| 第一节 | 涂层的性质及分类 | 121 |
|-----|----------|-----|

|            |                        |     |
|------------|------------------------|-----|
| 第二节        | 涂层结构                   | 124 |
| 第三节        | 涂层结合机理                 | 128 |
| <b>第五章</b> | <b>等离子喷涂工艺</b>         |     |
| 第一节        | 喷涂前的表面处理               | 131 |
| 第二节        | 等离子喷涂工艺参数的选择           | 138 |
| 第三节        | 喷涂后的基体表面处理             | 143 |
| 第四节        | 涂层缺陷的分析                | 145 |
| <b>第六章</b> | <b>等离子喷涂层的金属切削加工</b>   |     |
| 第一节        | 涂层结构与金属切削加工的关系         | 150 |
| 第二节        | 等离子喷涂层的机械切削加工(以车削加工为例) | 152 |
| 第三节        | 等离子喷涂层的磨削加工            | 156 |
| 第四节        | 国外等离子喷涂层金属切削加工发展概况     | 160 |
| <b>第七章</b> | <b>等离子喷涂层性能检测技术</b>    |     |
| 第一节        | 等离子喷涂层与基体表面的粘结强度试验     | 164 |
| 第二节        | 等离子喷涂层本身的粘结强度试验        | 170 |
| 第三节        | 等离子喷涂层孔隙率的测定           | 174 |
| 第四节        | 等离子喷涂层的金相组织            | 176 |
| 第五节        | 等离子喷涂层硬度的测定            | 182 |
| 第六节        | 等离子喷涂层的环境试验            | 183 |
| <b>第八章</b> | <b>等离子喷涂技术的应用</b>      |     |
| 第一节        | 等离子喷涂技术在宇航工业中的应用       | 188 |
| 第二节        | 等离子喷涂技术在汽车制造业中的应用      | 191 |
| 第三节        | 等离子喷涂技术在机床制造业中的应用      | 193 |
| 第四节        | 等离子喷涂技术在电机制造业中的应用      | 201 |
| 第五节        | 等离子喷涂技术在机车车辆制造业中的应用    | 204 |
| 第六节        | 等离子喷涂技术在冶金工业中的应用       | 205 |

|            |                     |     |
|------------|---------------------|-----|
| 第七节        | 等离子喷涂技术在其它工业中的应用    | 206 |
| <b>第九章</b> | <b>等离子喷涂技术的发展</b>   |     |
| 第一节        | 发展高能等离子喷涂设备         | 209 |
| 第二节        | 发展高焓、高速等离子喷枪        | 212 |
| 第三节        | 超细粉末的研制和超细粉末送粉器     | 215 |
| 第四节        | 等离子喷涂工艺过程的自动化       | 217 |
| 第五节        | 等离子喷涂技术的基础理论研究      | 218 |
| <b>第十章</b> | <b>等离子喷涂技术的安全防护</b> |     |
| 第一节        | 等离子喷涂过程中对人体有害的因素    | 220 |
| 第二节        | 等离子喷涂时的安全防护措施       | 224 |

# 第一章 等离子喷涂技术基础

## 第一节 概 述

随着科学技术的不断发展，人们对机器零部件表面性能的要求也越来越高，一般的金属材料 and 工程合金，在表面的耐磨性、耐腐蚀和耐高温等方面，已远远不能满足要求。如果选用特殊的合金材料来制作零部件整体，则很不经济；另一方面，有些特殊合金材料虽然能满足其表面性能的要求，但并不一定具有良好的加工工艺性能（包括铸造、焊接、锻造、热处理和切削加工等性能）。因此，采用特殊合金材料来制作机器设备零部件往往是不合适的。那么，能否通过在普通材质的零件表面上覆盖一层具有特殊合金材料性能的涂层的办法，来解决这个难题呢？实践证明是可以的。等离子喷涂技术就是实现这一工艺过程的一门新技术。

等离子喷涂技术是五十年代末期开始发展起来的。它和其它喷涂方法（氧乙炔火焰喷涂、金属电弧喷涂）相比，可以熔化一切难熔金属和非金属粉末，使普通材质的零件表面获得一层具有耐磨、耐腐蚀、耐高温等各种不同性能的涂层。它可以达到提高机器设备零部件的表面质量、延长使用寿命、修复已损缺的旧件等目的。它还具有喷涂效率高、涂层致密、与基体的粘结强度高、零件热变形影响极小等优点。因此，等离子喷涂技术在现代工业和尖端科学技术中得到了广泛的应用。

宇航工业中的人造卫星、火箭、导弹的表面层，在飞行中经过大气层时，需要承受极高的温度和具有优良的绝热特性，以保持其内部的仪表在恒温条件下工作，现在已采用等离子喷涂耐热、隔热涂层来满足上述要求。火箭发动机内部出口燃烧室和导弹的喷嘴在工作时承受很高的温度，采用等离子喷涂耐热涂层可以大大地提高其使用寿命。在机器制造工业中，机器摩擦副零件（如机床中的导轨副和轴颈轴瓦副、汽车拖拉机中的曲轴和凸轮轴）的摩擦表面采用等离子喷涂耐磨涂层，可以提高其耐磨性能。在化学工业中使用的机器设备，要求具有很高的耐腐蚀性能，若采用等离子喷涂耐腐涂层和进行“封孔处理”（第四章专门介绍），可以延长其使用寿命。

在机器设备的修理过程中，采用等离子喷涂技术，可以使许多因磨损和腐蚀而报废的零部件得以修复。由于喷涂后的涂层具有特殊合金材料的性能，因此，那些修复的零部件的使用寿命往往超过新的零部件。

等离子喷涂技术的应用和发展，已受到许多国家的高度重视。就美国JT<sub>3</sub>D发动机而言，其中有44种269个零件采用了等离子喷涂工艺，涂层材料有Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CrC、WC/Co和Ni/Al等。英国在飞机的制造和修理过程中，也多处采用了等离子喷涂技术。

近几年来，等离子喷涂技术在我国也得到了迅速发展。我国的宇航工业、国防工业、石油化工、机器制造、电力工业、机车车辆等部门，正在日益广泛地采用这项新技术。



## 第二节 等离子体基本概念

### 一、电离现象

在日常生活和生产实际过程中，人们经常遇到的物质有三种状态，即固态、液态和气态。然而，物质的状态并不是固定不变的，而是随着外界条件的不同，可以相互转化，或转化成另外的新的状态。

当处于气体状态的物质进一步升高温度时（如加温到 $10000^{\circ}\text{K}$ 左右），其状态便会进一步发生变化，成为物质的第四态——等离子态。为了说明等离子态的产生过程，则必须首先了解气体原子的结构和它在外力作用下的变化过程。

任何元素的原子，都由一个带正电的原子核和若干个带负电的电子所组成。核外电子所带负电荷的总数在数值上恰好等于原子核的正电荷，它们之间靠静电引力结合在一起，形成中性原子。如果供给原子一定的能量，来克服原子核与电子之间的静电引力，便能使电子脱离其原有的轨道，而成为自由电子，失去电子后的原子就成为带正电的正离子。中性原子中的电子脱离原子核的束缚而成为自由电子的过程称为原子的电离过程。图1-1为等离子喷涂时常用的氮气原子的电离过程示意图。

在通常情况下，气体是良好的电绝缘体。但是，电离后的气体已不遵循普通物理学和热力学定律，它具有导电特性。在电场作用下，正离子向负极运动，电子向正极运动，起到了导电的作用。气体电离程度越高，正负离子数量越多，导电性就越好。电离后的气体还具有携带和传递能量的特性。例如电子在电场中得到加速时，对空间的气体分子进

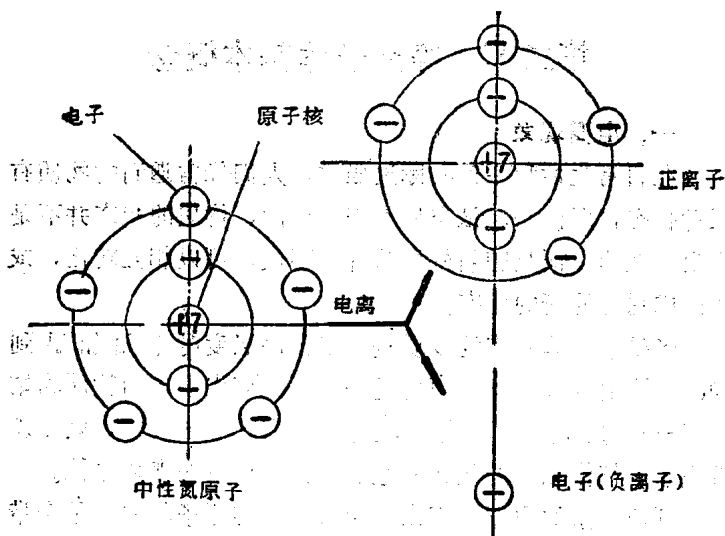


图1-1 氮原子电离过程

行撞击，将动能转化为热能。

## 二、电离度和电离能

### 1. 电离度

气体电离程度的强弱可用电离度来表示。通常把已电离气体的粒子数与未电离前的粒子总数之比称为电离度。其表示公式如下：

$$X = \frac{N_A^+}{N_A^0}$$

式中  $X$ ——电离度；

$N_A^+$ ——已电离的粒子数；

$N_A^0$ ——未电离前的粒子总数。

### 2. 影响电离度的因素

### (1) 温度

随着温度的升高，气体粒子运动的动能也就增加。具有高动能的粒子在热运动中互相碰撞，就可以有更多的机会发生电离。所以温度对电离度的影响是比较大的。温度越高，电离度越大。图 1-2 为一个大气压下氮气电离度与温度的变化曲线图。

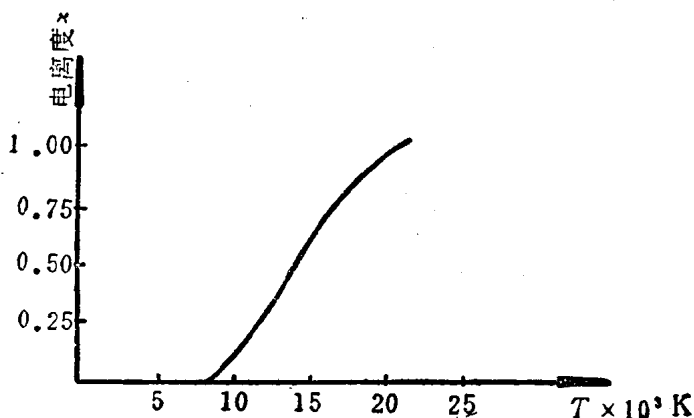


图1-2 一个大气压下氮原子电离度与温度的关系

### (2) 压力

根据热力学中的沙哈方程，推导得出电离度与压力的关系式如下：

$$X = \sqrt{\frac{K(T)}{K(T) + P}}$$

式中  $X$ ——电离度；  
 $K(T)$ ——电离过程中的平衡常数；  
 $P$ ——压力值。

由上式可以明显地看出：当气体压力越低（即气体极其

稀薄)时, 电离度越高; 即使在不高的温度下, 也可以出现很高的电离度, 因此在很宽的温度范围内都可以存在着电离现象。在宇宙空间中, 由于气体极其稀薄, 所以电离现象在宇宙中是普遍存在的。

### 3. 电离能

气体原子中的外层电子摆脱原子核对它的束缚, 而成为自由电子时所需的能量称为电离能。可用下式表示。



式中  $A$ ——气体原子;  
 $W$ ——电离能;  
 $A^+$ ——正离子;  
 $e$ ——电子。

一个电子所需的电离能为:

$$W = q_e \cdot U_i$$

式中  $q_e$ ——一个电子所带的电量;

$$q_e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ 库}$$

$U_i$ ——不同气体的电离电位。

气体的电离电位可以理解为使电子从原子中摆脱出来所需要的外加电场的电位差。电离电位的单位为伏特。表1-1为几种常用气体在常温常压下的电离电位值。

表1-1 几种气体在常温常压下的电离电位

| 气体种类    | 氢(H <sub>2</sub> ) | 氩(Ar) | 氮(N <sub>2</sub> ) | 氧(O <sub>2</sub> ) | 氦(He) |
|---------|--------------------|-------|--------------------|--------------------|-------|
| 电离电位(伏) | 15.4               | 15.7  | 15.8               | 12.5               | 24.5  |

根据表1-1可以算出各种不同气体电离时所需的电离能W。现以氮气为例:

氮气的电离电位:  $U_i = 15.8$  伏



述的等离子体，不是这种广义的等离子体，而是指气体经过压缩电弧后由于出现高温而形成的等离子体，一般称为热等离子体。

### 第三节 等离子弧的物理基础

#### 一、自由电弧

##### 1. 自由电弧现象

在通常情况下，气体具有良好的电绝缘性能。但是在某些情况下，电流却可以从气体中通过，电流通过气体的现象称为气体放电现象。例如雷雨过程中的闪电现象和使用电器开关时产生的电弧现象均属气体放电现象。闪电能够照亮大地，小小的电弧会烧坏开关电器，这些现象表明电弧能释放出大量的能量。在研究如何减弱或消灭电器开关中产生电弧现象的过程中，人们开始考虑如何人为地产生和利用电弧现象，变消极因素为积极因素。长期以来，人们已经利用电弧的热能进行电弧焊接和电弧炉炼钢；利用电弧现象产生的光能可

以进行照明（如探照灯和氙灯）。

##### 2. 自由电弧产生的原理

自由电弧产生的原理如图 1-3 所示。当开关 K 关闭时，两极间存在一定的电压。在正负两电极间的间隙里

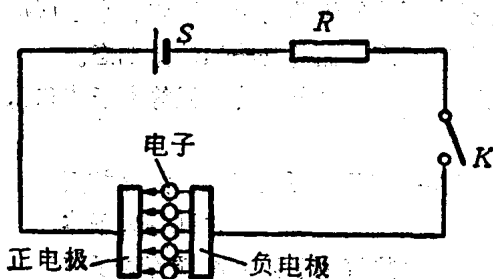


图1-3 自由电弧原理图  
S—直流电源； R—电阻；  
K—开关

产生一个很强的电场。两极间隙距离越小，电场越强。当间隙小到一定程度时，电场力就足以将阴极电子拉出电极而飞向阳极。随着电场力的增加，电子获得很高的动能，足以对气体粒子进行撞击而产生电离现象。电离后的气体又会出现更多的电子，这些电子在电场中又被加速去撞击新的气体粒子。这样，在两极间的电子浓度不断增加，气体就被电流击穿，同时出现了很强的光和热，即发生了气体燃烧现象。由于热能的作用，气体又进一步被电离。这种在两极之间的气体介质中出现的持续强烈的电离现象称为电弧现象。上述电弧现象不受任何约束，气体发生自由燃烧，故称为自由电弧。例如，电弧焊接和氩弧焊均属于这类电弧。

自由电弧在不受约束的条件下，弧柱较粗，热量分散，电离度较低，一般温度在  $5000 \sim 60000^{\circ} \text{K}$ ①。因此，自由电弧在应用上就受到了一定的限制。

## 二、等离子弧(又称压缩电弧)

1. 产生原理(图1-4)

当自由电弧通过

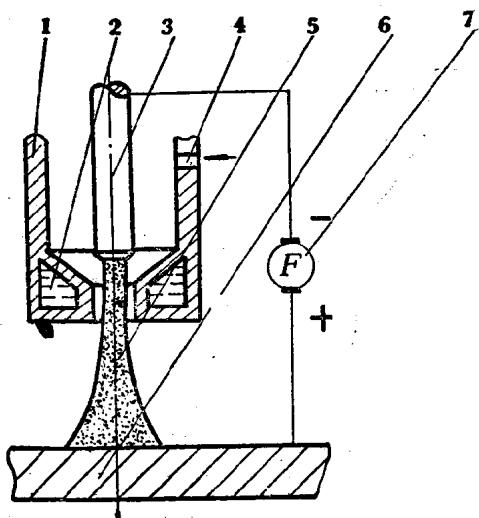


图1-4 等离子弧产生的原理

1. 喷嘴; 2. 冷却水; 3. 阴极; 4. 进气孔;  
5. 等离子弧; 6. 工件; 7. 直流电源

①K为绝对温度单位。绝对温度 $T$ 与摄氏温度 $t(^{\circ}\text{C})$ 的关系式： $T = (t^{\circ}\text{C} + 273.16) \text{K}$ 。

带小孔的冷却喷嘴和在喷嘴内通入气体时，电弧的性能有了很大的变化，弧柱变细，热量集中，温度升高。一般把受到压缩作用的电弧称为压缩电弧或等离子弧。

## 2. 等离子弧的压缩效应

等离子弧与自由电弧的最大区别就在于等离子弧在冷却喷嘴内受到如下三个方面的压缩作用。

### (1) 机械压缩效应

在喷嘴处于循环水的冷却条件下，由于喷嘴孔道内壁的温度很低，进入喷嘴通过喷嘴内壁附近的气体必然受到冷却，形成一股依附在喷嘴孔道内壁上的冷却气膜。这样，喷嘴孔径的大小就基本确定了环形冷却气膜的直径。也就相应地确定了等离子弧弧柱的粗细。因此，喷嘴孔径越小和孔道越长，对弧柱的压缩愈强，弧柱直径愈细。这种对弧柱的压缩现象称为机械压缩效应。

### (2) 热压缩效应

在电弧和喷嘴内壁之间形成的冷却气膜，气体电离度很低，导电性能差，电流很难通过，这样等离子弧只能被迫通过电离度高的中心部位，这就意味着电弧受到冷却气流的压缩。我们把这种现象称为热压缩效应。

### (3) 自磁压缩效应

由电磁原理可知：当一根导线中通过电流时，在导线周围垂直于导线的平面上便形成了磁场，磁场的方向可按右手定则来确定。若两根电流方向相同的平行导线，在磁场的作用下，根据左手定则可知，两根导线将产生相互吸引的电磁力，如图1-5所示。如果是一束电流方向相同的平行导线，则在电磁力的作用下，每根导线将受到指向其中心方向的电磁力，如图1-6所示。对于等离子弧来说，可以把它看作是由



无数根相互靠近的电流方向相同的平行导线所组成的。在弧柱内，各部位由于电磁力的作用，都存在指向其中心部位的压缩力。这种现象是由于电弧本身的磁场产生的，称为自磁压缩效应。

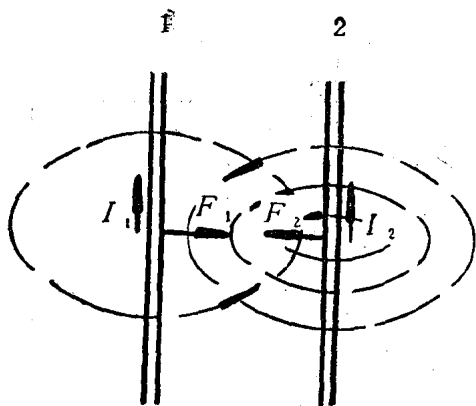


图1-5 两根平行导线流过相同方向电流时受力示意图

上述三种压缩效应对电弧作用的结果，使电弧受到强烈压缩而产生等离子弧。这三种压缩效应是同时存在的。机械压缩效应取决于喷嘴的结构和尺寸，热压缩效应取决于气体的进气方式、流量大小和喷嘴内壁的冷却效果，这两种压缩效应是可以控制的。自磁压缩效应是由于电弧本身而引起的，它的压缩效果完全取决于上述两种压缩效应的结果。因此，分析影响各种压缩效应的主要因素，为设计等离子喷涂枪提供了主要的依据。

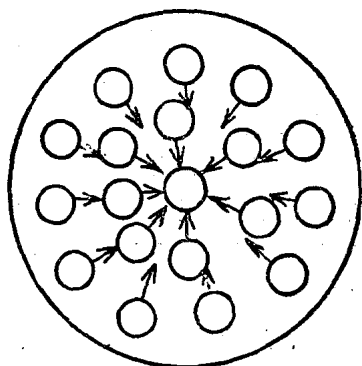


图1-6 一束平行导线流过相同方向电流时受力示意图

### 三、等离子弧的组成

等离子弧的组成和自由电弧一样，都是由阴极和阴极