

目 录

第八章 等离子弧喷涂(焊)设备及工艺

8-1	原理及基本特点	(1)
8-1.1	等离子弧的形式及其特点	(1)
8-1.2	等离子弧喷涂原理及特点	(5)
8-1.3	等离子弧喷焊原理及特点	(7)
8-2	等离子弧喷涂(焊)设备	(9)
8-2.1	等离子弧喷涂设备	(9)
8-2.1.1	电源和电气控制系统	(10)
1.	饱和电抗式硅整流电源	(10)
2.	可控硅型电源	(12)
3.	直流发电机电源	(12)
8-2.1.2	喷枪	(13)
1.	阴极	(15)
2.	喷嘴	(17)
8-2.1.3	送粉器	(20)
1.	自重式送粉器	(20)
2.	刮板式送粉器	(20)
3.	雾化式送粉器	(20)
5.	电磁振动式送粉器	(22)
6.	鼓轮式送粉器	(23)
8-2.1.4	供气系统	(23)
8-2.1.5	水冷系统	(24)
8-2.2	等离子弧喷焊设备	(25)

8—2.2.1	喷焊电路	(25)
8—2.2.2	喷焊枪	(27)
1.	间接水冷电极喷焊枪	(28)
2.	直接水冷电极喷焊枪	(28)
3.	大功率喷焊枪	(29)
8—2.2.3	焊枪摆动机构	(29)
1.	偏心轮式摆动机构	(29)
2.	凸轮式摆动机构	(30)
8—3	等离子喷涂(焊)工艺	(31)
8—3.1	等离子喷涂工艺	(31)
8—3.1.1	基体表面预处理	(31)
1.	基体表面清理	(32)
2.	基体表面粗糙化	(33)
3.	自粘结材料表面预涂处理	(34)
4.	特殊基体的预处理	(34)
8—3.1.2	等离子喷涂工艺	(34)
1.	等离子气体的选择	(34)
2.	输入功率与电参数	(36)
3.	供粉	(38)
4.	喷涂距离和喷涂角	(40)
5.	移枪速度	(41)
6.	基体温度控制	(42)
8—3.1.3	喷后涂层处理	(45)
8—3.2	涂层系统设计	(46)
8—3.2.1	喷涂材料的选择	(47)
1.	耐磨涂层材料	(47)
2.	耐热涂层材料	(48)

3.	耐蚀涂层材料·····	(48)
4.	导电和绝缘涂层材料·····	(49)
5.	其它特殊性能的涂层材料·····	(49)
8—3.2.2	粘结底层·····	(50)
8—3.2.3	阶梯涂层·····	(51)
8—3.3	涂层结构和质量控制·····	(52)
8—3.3.1	涂层结构·····	(52)
8—3.3.2	涂层的内应力和调节残余应力的工艺措施··	(53)
8—3.3.3	喷涂时喷层厚度分布规律·····	(56)
8—3.3.4	涂层结合和提高粘结强度的工艺措施·····	(56)
1.	物理的方法·····	(58)
2.	化学的方法·····	(61)
8—3.4	等离子喷涂的应用与进展·····	(62)
8—3.4.1	喷涂设备方面·····	(64)
8—3.4.2	喷涂工艺方面·····	(65)
8—3.4.3	基础理论研究方面·····	(65)
8—3.4.4	喷涂材料方面·····	(65)
8—3.5	等离子喷涂技术的防护安全措施·····	(66)
8—3.5.1	等离子喷涂过程中对人体的有害因素·····	(66)
1.	有害气体·····	(66)
2.	金属和金属氧化物的蒸汽和粉尘·····	(66)
3.	强烈的光辐射·····	(67)
4.	噪声·····	(67)
5.	高频电和放射性·····	(67)
8—3.5.2	等离子喷涂时的防护安全措施·····	(68)
1.	通风和隔离·····	(68)
2.	对光辐射的防护·····	(68)

3.	噪声防护.....	(68)
4.	加强个人防护、个人卫生和增加营养.....	(69)
8—3.6	等离子喷焊工艺.....	(69)
8—3.6.1	喷焊的主要工艺指标.....	(69)
1.	熔敷率.....	(69)
2.	粉末利用率.....	(69)
3.	冲淡率.....	(70)
4.	成型性.....	(70)
5.	焊层质量.....	(71)
6.	工艺稳定性.....	(71)
8—3.6.2	等离子弧粉末喷焊主要工艺参数分析.....	(71)
1.	非转移弧和转移弧的电流和电压.....	(71)
2.	喷焊速度与送粉量.....	(72)
3.	喷焊枪的摆动频率和摆幅.....	(73)
4.	离子气、送粉气和保护气.....	(73)
5.	电极内缩和喷距.....	(74)
8—3.6.3	操作技术.....	(74)
1.	工艺动作程序.....	(74)
2.	动作控制方式.....	(77)
3.	操作中常见故障和焊层缺陷.....	(77)

第九章 喷涂(焊)层的机加工

9—1	前言.....	(79)
9—2	线材喷涂层的机加工.....	(81)
9—3	等离子涂层的机加工.....	(83)
9—4	喷焊层的机加工.....	(84)

第十章 涂层设计

10—1	涂层设计原则	(91)
10—1.1	采用热喷涂(焊)技术的依据	(92)
10—1.1.1	经济性	(92)
10—1.1.2	技术性	(92)
10—1.1.3	可能性	(93)
10—1.2	了解工件使用情况和需具备的性能	(94)
10—2	喷涂(焊)工艺的选择	(94)
10—2.1	喷焊与喷涂的选择	(94)
10—2.2	喷涂方法的选择	(95)
10—2.3	设计适当的喷涂(焊)工艺	(96)
10—3	喷涂(焊)材料的选择	(97)
10—3.1	一般涂层	(97)
10—3.2	组合涂层	(98)
10—4	质量控制	(99)
10—5	美国涂层应用介绍	(99)
10—5.1	耐磨涂层	(100)
10—5.1.1	软轴承用的涂层	(100)
10—5.1.2	硬轴承用的涂层	(100)
10—5.1.3	耐磨粒磨损涂层(使用温度 $<540^{\circ}\text{C}$)	(118)
10—5.1.4	耐磨粒磨损涂层(使用温度 $538\sim 834$)	(118)
10—5.1.5	耐硬表面涂层(使用温度 538°C)	(118)
10—5.1.6	耐绞丝涂层	(119)
10—5.1.7	耐硬表面涂层(使用温度 $540\sim 815^{\circ}\text{C}$)	(120)
10—5.1.8	耐微振磨损涂层(使用温度 $<540^{\circ}\text{C}$)	(120)
10—5.1.9	耐微振磨损涂层(使用温度 $538\sim 843^{\circ}\text{C}$)	(121)

10—5.1.10 耐气蚀涂层.....	(122)
10—5.1.11 耐冲蚀磨损涂层(使用温度 $<538^{\circ}\text{C}$).....	(122)
10—5.1.12 耐冲蚀磨损涂层(使用温度 $538\sim 834^{\circ}\text{C}$)..	(123)
10—5.2 耐热、耐氧化涂层.....	(123)
10—5.2.1 耐氧化气氛涂层.....	(123)
10—5.2.2 耐腐蚀气体涂层.....	(124)
10—5.2.3 耐冲蚀涂层(使用温度 $>843^{\circ}\text{C}$).....	(124)
10—5.2.4 热障涂层.....	(124)
10—5.2.5 耐熔融锌涂层.....	(125)
10—5.2.6 耐熔融铝涂层.....	(125)
10—5.2.7 耐熔融铁和钢的涂层.....	(125)
10—5.2.8 耐熔融铜涂层.....	(125)
10—5.3 耐大气和海水腐蚀涂层.....	(126)
10—5.3.1 耐工业气氛涂层.....	(126)
10—5.3.2 耐盐类气氛涂层.....	(126)
10—5.3.3 耐饮用水涂层.....	(126)
10—5.3.4 耐热淡水涂层.....	(126)
10—5.3.5 耐海水腐蚀涂层.....	(127)
10—5.4 电导或电阻涂层.....	(127)
10—5.4.1 电导涂层.....	(127)
10—5.4.2 电阻涂层.....	(127)
10—5.5 恢复尺寸涂层.....	(127)
10—5.5.1 修复可切削碳钢用的涂层.....	(128)
10—5.5.2 修复可磨削碳钢用的涂层.....	(128)
10—5.5.3 修复可切削的耐蚀钢用的涂层.....	(128)
10—5.5.4 修复可磨削的耐蚀钢用的涂层.....	(128)
10—5.5.5 修复镍和镍合金用的涂层.....	(129)

10—5.5.6	修复钴和钴合金用的涂层	(129)
10—5.5.7	修复铜和铜合金用的涂层	(129)
10—5.5.8	修复铝、镁及其合金用的涂层	(129)
10—5.5.9	修复钛及其合金用的涂层	(129)
10—5.6	控制间隙用的涂层	(146)
10—5.6.1	可磨涂层	(146)
10—5.6.2	磨料涂层	(146)
10—5.7	密封剂	(146)
附表10.1	美国Metco公司部份粉末牌号的化学、物理性能表	(147)

第十一章 应用实例

11—1	铝、锌防腐涂层的应用	(150)
11—1.1	国外应用方面	(150)
11—1.2	国内应用方面	(152)
11—2	在航空工业中的应用	(153)
11—2.1	国外应用方面	(154)
11—2.2	国内应用方面	(154)
11—3	在铁路系统中的应用	(158)
11—3.1	国外应用方面	(158)
11—3.2	国内应用方面	(162)
11—4	在玻璃工业中的应用	(163)
11—4.1	国外应用方面	(164)
11—4.2	国内应用方面	(164)
11—5	在造纸工业中的应用	(165)
11—5.1	国外应用方面	(165)
11—5.2	国内应用方面	(166)

附:	国内应用热喷涂(焊)技术实例表	(167)
附表11.1	等离子焰粉末喷涂(焊)应用实例	(168)
附表11.2	氧乙炔焰粉末喷涂(焊)冶金工业另件应用实例	(174)
附表11.3	氧乙炔焰粉末喷涂(焊)机械零件应用实例	(186)
附表11.4	氧乙炔焰粉末喷涂(焊)轻工、纺织机械另件应用实例	(194)
附表11.5	氧乙炔焰粉末喷涂(焊)化工、化肥机械零件应用实例	(202)
附表11.6	氧乙炔焰粉末喷涂(焊)汽车及坦克零件应用实例	(206)
附表11.7	氧乙炔焰粉末喷涂(焊)煤矿及矿山工业另件应用实例	(208)
附表11.8	氧乙炔焰粉末喷涂(焊)农业及建筑机械零件应用实例	(214)
附表11.9	氧乙炔焰粉末喷涂(焊)其它应用实例	(216)

第十二章 专利评述和发展动向

12—1	喷涂(焊)设备的发展	(218)
12—1.1	氧乙炔焰粉末喷涂枪	(218)
12—1.1.1	火焰稳定喷涂枪	(218)
12—1.1.2	火焰集中喷涂枪	(220)
12—1.1.3	操作安全喷涂枪	(222)
12—1.1.4	形状可调喷涂枪	(223)
12—1.2	熔融金属喷涂枪	(224)
12—1.2.1	气体加热熔融金属喷涂枪	(224)

12—1.2.2	熔融金属电弧喷涂枪·····	(226)
12—1.3	等离子弧喷涂枪·····	(227)
12—1.3.1	200千瓦液稳等离子喷 涂 枪·····	(227)
12—1.3.2	低压等离子喷涂枪·····	(227)
12—1.4	综述·····	(228)
12—2	喷涂(焊)材料制造方法的发展·····	(229)
12—2.1	自熔合金粉末制造方法·····	(229)
12—2.2	复合粉末制造方法·····	(230)
12—2.3	组合粉末制造方法·····	(231)
12—2.4	丝材制造方法·····	(232)
12—2.5	综述·····	(233)
12—3	喷涂工艺的发展·····	(234)
12—3.1	气体雾化熔融金属直接喷涂·····	(234)
12—3.2	内孔保护涂层·····	(234)
12—3.3	喷涂内孔方法·····	(237)
12—3.4	封闭涂层孔洞的方法·····	(237)
12—3.5	激光重熔方法·····	(239)
12—3.6	喷硼砂保护层·····	(240)
12—3.7	喷涂气氛的影响·····	(240)
12—3.8	巡查剂·····	(241)
12—3.9	综述·····	(242)
12—4	粉末材料的发展·····	(243)
12—4.1	铝组合自熔合金粉末·····	(243)
12—4.2	改进型铝包镍组合粉末·····	(244)
12—4.3	含铝、硅化物合金粉末·····	(245)
12—4.4	含硅、硅化物合金粉末·····	(245)
12—4.5	铜—铝—镍合金粉末·····	(246)

12—4.6	铝热型粉末·····	(247)
12—4.7	综述·····	(248)
12—5	涂层应用研究的发展·····	(248)
12—5.1	隔热涂层·····	(248)
12—5.2	耐冲蚀涂层·····	(249)
12—5.3	耐冲击耐磨涂层·····	(253)
12—5.4	高辐射涂层·····	(253)
12—5.5	高温耐磨涂层·····	(254)
12—5.6	高温耐蚀涂层·····	(254)
12—5.7	高温耐蚀耐磨涂层·····	(255)
12—5.8	可磨密封涂层·····	(256)
12—5.9	自粘结涂层·····	(257)
12—5.10	塑料涂层·····	(258)
12—5.11	活塞环涂层·····	(258)
12—5.12	补齿合金·····	(261)
12—6	发展动向综述·····	(263)
12—6.1	扩大涂层应用·····	(263)
12—6.2	提高涂层质量·····	(264)
12—6.3	降低涂层成本·····	(265)
12—6.4	从第九届国际会议看发展动向·····	(265)

第八章 等离子弧喷涂(焊)

设备及工艺

任何一种新技术、新工艺的诞生和发展，总是与当时的社会需要和生产力发展水平相互紧密联系着的。随着科学技术和现代工业的迅速发展，对材料和工业产品的要求日高。而材料的损伤和破坏有很多是起始于其表面，所以采用涂层来防护基体材料，提高零件的使用寿命常常是颇为有效的。尤其是在现代工业各部门中，广泛采用高温和超低温、高压和真空，以及高速流体等技术，这就对涂层的创制起了巨大的促进作用。涂层材料和涂层新工艺都得以空前活跃的发展。然而，越来越苛刻的工况条件和对涂层的高要求向传统的燃气火焰喷涂技术提出了严重挑战。

五十年代末期，低温等离子体技术的发展，为热喷涂工艺提供了一种颇为理想的高温、高速的气流源，使热喷涂技术达到了一个新的高度，涂层质量明显提高，使用范围更为扩大。至今，等离子喷涂制备各种涂层已成为目前最发达的工艺之一。

§ 8—1 原理及基本特点

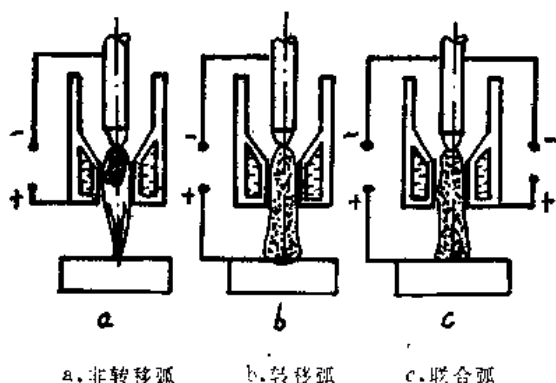
8—1.1 等离子体的形成及其特点

等离子弧即压缩电弧。按接电的方法不同，等离子弧有如下三种形式：

(1) 非转移型弧——水冷铜喷嘴接正，钨棒接负，工件不带电。等离子弧建立于钨棒与铜喷嘴之间，高温、高速的等离子焰流从喷口射出。见图(8—1a)。

(2) 转移型弧——工件接正，钨棒接负。喷嘴不接电，它仅起对弧进行压缩的作用。等离子弧建立在钨棒与工件之间。它对工件的加热能力较非转移型弧为高。见图(8—1b)。

(3) 联合型弧——喷嘴、工件均接正，钨棒接负。上述两类型等离子弧同时存在，称联合型等离子弧。在一般情况下，联合弧中的非转移弧是作为辅助热源的，转移弧为主弧。见图(8—1c)。也有使喷嘴与工件之间产生电弧的特殊联合型等离子弧，并可使用交流电接于喷嘴与工件之间。

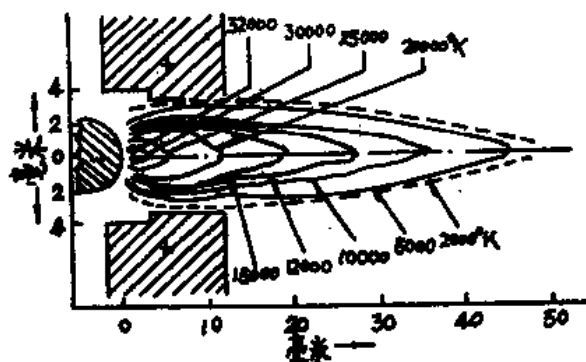


图(8—1) 等离子弧的形式

等离子弧和自由电弧相比较，它显得弧柱细、电流密度大、气体电离度高。因此，具有温度高、能量集中、弧稳定性和可靠性好等特点。

等离子弧的参数可以在很大范围内改变，其温度不会随之在很大范围内变化。一般用于喷涂和喷焊的等离子设备，可获

得 20000°K ，甚至更高温度。这个温度值远高于任何已知材料的熔化温度，甚至高于蒸发温度。对大多数等离子喷涂（焊）工艺，最合适的温度范围大致为 $10000^{\circ}\sim 20000^{\circ}\text{K}$ 。图（8—2）表示了一个非转移型等离子弧温度分布的实测结果（电流：400安；氢气流量：10升/分）。由图可见，在喷嘴出口中心温度将达 $15000^{\circ}\sim 20000^{\circ}\text{K}$ 。轴向的温度梯度颇陡，转移型等离子弧的温度更高。对一个工作条件为：



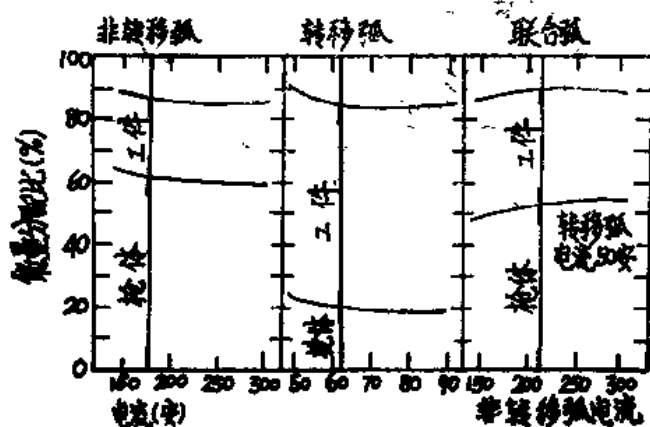
图（8—2）等离子焰流的温度分布

电流300安；电压250伏；喷嘴直径2.8毫米；气体流量50升/分的转移型等离子弧测定表明，在喷嘴出口附近最高温度可达 30000°K 。这样高的温度，用传统方法是难以达到的。氧炔火焰的最高温度只有 3500°K 左右；焊接电弧仅是 $5000\sim 6000^{\circ}\text{K}$ ；氢弧焊也仅为 $9000\sim 10000^{\circ}\text{K}$ ，只及等离子弧温度的一半。

温度诚然是热源的一个重要参数。然而，要判定一定热源的加热能力的大小，则必须视其热功率，即单位时内同所传递的热能。对于等离子弧来说，它的加热能力决定于电功率、电

效率和弧的焓值、导热率、热效率。放电气体所得的热功率和输入电功率之比是电效率，放电气体的热功率和其流量之比即为弧的焓值，粉末材料和工件所得到的那部分热功率与等离子焰流的总热功率之比称为热效率，这些指标与弧的类型有很大关系。

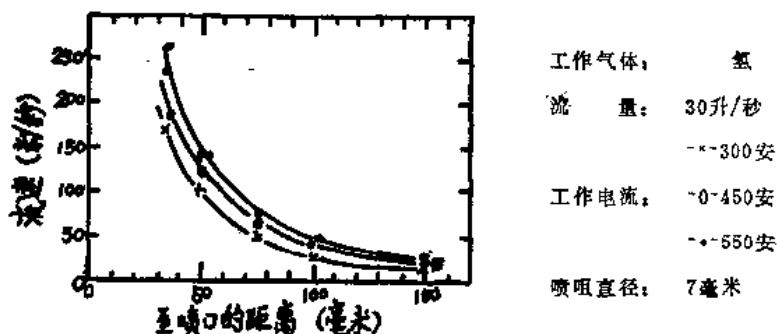
对于非转移型弧，因阳极斑点处于水冷铜喷嘴壁上，阳极的冷却水将带走很多热量，热损失大而效率低。转移型弧的热损失相对少得多，联合型弧的热损失则介乎于二者之间。图（8—3）表示了三种类型等离子弧能量分配的一个实例。在转移型弧中，工件最终能获得60%的热能，而在非转移型弧和联合型弧中，工件仅能得到总热能的25%和35~40%。



图（8—3）三种等离子弧的能量分配

此外，影响等离子弧的加热性能的参数很多，如电流强度；放电气体成份及流量；喷嘴尺寸与形状；极距（阴极与喷嘴的间距）和喷距（喷口至工件的距离）等的改变可控制和调整上述加热性能指标。这些将在喷涂和喷焊工艺中再进行讨论。

作为能量的来源，等离子弧不仅是为了加热、熔化和雾化喷涂材料，而且还给予喷涂材料一定的动能，喷涂材料的粒子靠了粘滞力和动压，被等离子弧加速。而且涂层的质量与喷涂粒子的动能极有关系。所以，等离子弧焰流速度也是热喷涂工作者所关注的重要参数。等离子焰流速度在喷嘴出口处高达1000~2000米/秒，但衰减得很厉害。图（8—4）是对一个喷涂等离子焰流实测的速度值。在这焰流速度下，可使喷涂粒子得到50~150米/秒的速度，甚至更高，达每秒数百米的量级。这速度是氧炔焰喷涂所望尘莫及的。



图（8—4）等离子焰流在轴线上的速度

在喷焊情况下，则需限制焰流的速度。因过大的焰流速度会破坏工艺的正常进行。这种冲力较小的等离子弧称之为“柔性弧”。采用较小的气体流量和较大孔径的喷嘴便能得到柔性弧。

8—1.2 等离子弧喷涂原理及特点

等离子弧喷涂是利用转移型弧喷枪把喷涂材料快速加热、熔化和雾化。并使粒子随高速等离子焰流以很大的动能撞击至

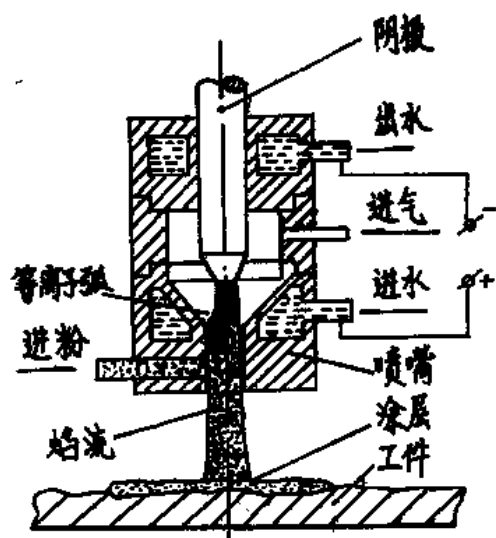


图 (8—5) 等离子喷涂原理图

工件表面。在这过程中，粒子产生剧烈的塑性变形，并复盖在工件表面上，形成涂层。见图(8—5)。

等离子弧喷涂涂层中，粒子之间的结合，以及涂层与基体的结合，大致是由如下三种作用力形成的：(1)机械结合力；(2)分子键力（范德瓦耳力）；(3)化学键力。前两种力的特点是不稳定，且通常

水平较低。一般说来，等离子弧喷涂涂层与工件表面的结合属机械镶嵌和点钎焊混合结合。

非转移型等离子弧的特性决定了等离子喷涂具有如下特点：

1. 因等离子焰流温度高，热量集中，能熔化和过热所有高熔点的喷涂材料。所以，它特别适用于难熔材料的喷涂，而这对燃气火焰喷涂和电弧喷涂是不易实现的。并且焰流的加热能力可据喷嘴的形状和工作条件的选择很易调整，故金属、陶瓷及其某些塑料等材料都能进行喷涂。

2. 等离子焰流气氛可控，可采用惰性气体(如氩、氮)、和还原气体(如氢)作为工作气体，这就能较好地保护喷涂材料和工件表面，减少氧化。特别是活泼金属(如铝)喷涂时，

涂层中氧化物较少，比较纯净。若有更高纯净度的要求，则可在低压容器中或惰性气氛下进行喷涂。

3. 等离子喷涂时，焰流速度较高，喷涂粒子能获得较大的动能。所以，涂层致密度相对于氧炔焰喷涂涂层为高，一般在88~99%之间。同时，涂层与工作表面的结合强度，涂层的自身强度均优于氧炔焰喷涂和电弧喷涂。

4. 等离子喷涂对工作的热变形影响极小，可使基体在喷涂过程中，不发生组织变化。由于在喷涂时，工件不带电，表面不熔化，且工件与喷枪的相对位移速度快，所以对工件表面的热影响区甚小。实际测定结果证明，等离子喷涂后工件的热变形是微乎其微、不易觉察的。同时，工件仍保持其在喷涂前的原有热处理性能，并无组织变化。这样，对于低熔点材料，甚至是易燃材料，如木材、塑料、纸板、碳和硼的纤维等作为基材的工件也能实行等离子喷涂。

5. 由于等离子喷涂时，喷涂粒子过热度高，速度大，所以喷涂沉积效率较高。此外，喷涂工艺规范稳定，调节性能好，操作方便，易于实现自动控制。这些都是等离子弧喷涂的明显的优点。

必须指出，伴随着高温高速的等离子焰流必然产生剧烈的噪声、很强的光辐射、大量的有害气体（如：臭氧、氮氧化物等）、金属蒸汽和粉尘。这些对于人体是极有害的。所以，在推广应用等离子喷涂技术的同时，必须加强安全防护措施，充分注意操作者的保健。另外，从设备的投资和运转费用来看，等离子喷涂的要比火焰喷涂和电弧喷涂的为高。

8—1.3 等离子弧喷焊原理及特点

等离子弧喷焊一般采用联合型弧。常以两个独立的直流电