

# 氩氮气体混合比对等离子射流温度和涂层特性的影响

Effect of the Ar-N<sub>2</sub> Mixture Ratios on Temperature of the Plasma Jet and Properties of the Coating

刘 丹, 张海鸥, 王桂兰 (华中科技大学材料科学与工程学院, 武汉 430074)

LIU Dan, ZHANG Hai-ou, WANG Gui-lan

(School of Material Science and Engineering,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**摘要:** 采用了不同的氩氮体积混合比进行等离子喷涂实验, 并获得相应条件下的涂层。用 CCD 数码相机采集了射流的形态和温度场, SX-40 扫描电镜观察了涂层的显微组织, HXD-1000A 显微硬度计测得涂层的硬度。根据实验结果研究了不同氩氮气体混合比对射流形态和温度场、涂层显微组织、硬度的影响。

**关键词:** 等离子喷涂; 氩氮; 涂层; 硬度; 温度场

**中图分类号:** TG 174.442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381 (2003) 11-0045-04

**Abstract:** The plasma spraying experiments were carried out using various argon-nitrogen volume mixture ratios, and the corresponding coatings were obtained. The plasma jet configuration and temperature field were collected by CCD, microstructure, hardness of the coating were observed or measured by SEM or Vickers hardness tester. The effect of the different Ar-N<sub>2</sub> mixture ratio on the plasma jet configuration, microstructure and hardness of the coatings were investigated.

**Key words:** plasma spraying; argon-nitrogen; coating; hardness; temperature field

等离子喷涂过程中常用的气体有氩气、氮气、氢气等气体, 氮气和氢气属于双原子气体, 在热电离过程中, 首先要吸收热量分解成单原子, 然后进一步吸收热量发生原子电离, 这两种气体都具有很高的热焓值, 在等离子射流与粉末进行热交换时能够放出较大的热量以利于粉末的熔化。氩气是单原子气体, 它在热电离中没有分解过程, 而是直接吸收热量进行电离。因此, 其热焓值没有双原子气体高, 对粉末的加热能力不如氢气和氮气, 但氩气没有分解过程, 在吸收热量产生电离时, 温度升高很快, 使用的弧电压较低, 所以引弧性能要比氩气和氮气好<sup>[1]</sup>。

鉴于两类气体的优缺点, 在实际的等离子喷涂过程中, 常采用混合气体。气体混合比则成为影响工艺过程中射流质量、粉末熔融状况、涂层成形性和质量的一个重要因素。所以有必要对不同等离子气体混合比条件下的射流形态和温度、涂层特性进行研究, 以寻找合适的喷涂工艺的混合比。已有的研究中<sup>[2-6]</sup>, 多为研究喷涂距离或喷涂功率对射流特性和涂层质量的影响, 而对不同等离子气体混合比对射流形态和温度和涂层质量的研究还鲜见报道。本研究在等离子喷涂工艺中采用四组不同混合比的氩氮气体进行实验, 并分析不同混合比对射流和涂层特性的影响。

## 1 实验条件及方法

### 1.1 实验设备

喷涂实验采用 LU-600 等离子电源、781 型喷枪。实验装置如图 1, 工作气为氩氮混合气, 两种气体

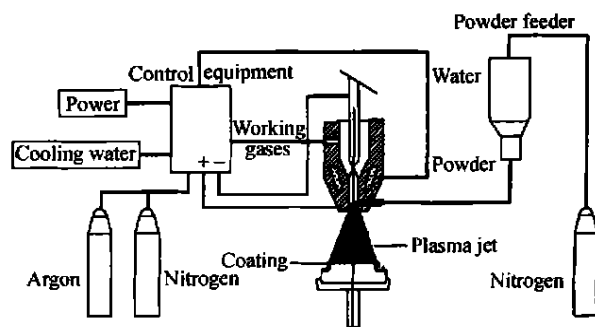


图 1 等离子喷涂设备

Fig. 1 Plasma spraying equipment

通过控制设备进行混合然后送入喷枪内进行喷涂, 气体的流量和混合比可以通过控制设备进行控制, 送粉装置通过送粉气氮气将粉末送入到喷枪, 本装置为内送粉方式。通过 CCD 相机采集射流的形态 (射流灰度图) 并采用阿贝尔变换求出温度分布, 用 SX-40 扫描电镜观察实验获得的涂层的断层组织, 并用 HXD-

1000A 显微硬度计测得涂层的硬度。

1.2 实验方法

实验条件如表 1 所示。

表 1 实验工艺参数

Table 1 Experiment process parameters

Ar : N <sub>2</sub>	Voltage/ V	Current/ A
1 0	32	375
1 0.1	45	375
1 0.35	50	375
1 0.55	55	375

实验用 45<sup>#</sup> 钢为基体, 喷涂前用砂纸对基体表面进行打磨以增强涂层和基体间的结合力, 实验粉末为在此条件下能够较好熔化的 Fe-Cr-Ni 合金粉末, 粒度为 200 目。在四组实验条件下进行喷涂实验, 在实验的过程中用 CCD 相机采集每一种条件下的稳定射流图像, 将得到的四组涂层用 SX- 40 扫描电镜分析其断层组织。硬度实验时, 首先将喷涂试样横截面研磨抛光, 然后测试涂层硬度, 所加载荷为 200g, 加载时间为 15s, 取试样上均匀分布的 5 点的硬度平均值作为试样平均硬度值。

2 结果与分析

2.1 氩氮混合比对射流温度及形态的影响

等离子射流中心温度高达  $1 \times 10^4\text{K}$  左右, 在此温度条件下, 一般的测试方法和测温仪已不再适用。测量电弧及等离子体温度最常用的方法有光谱法、干涉法及探针法。干涉法根据气体折射率变化来确定它的温度, 但调试困难、对诊断对象要求严格。探针法则通过对气体焓值的测量来确定它的温度, 但对电弧有干扰且装置复杂。光谱法属于非接触式测量, 不干扰等离子体原有的状态, 借助光谱、光电及计算机技术可使测量数据与数据处理工作快速完成, 因而在实践中被广泛采用<sup>[8]</sup>, 所以本研究采用了光谱辐射谱线强度法来测温。

光谱辐射谱线绝对强度法是利用射流谱线的发射率与等离子温度的函数关系, 通过求谱线发射率来确定温度分布。在局域热力学平衡条件下, 等离子体温度中波长为  $\lambda$  的光谱线的发射率为  $\epsilon(\lambda, T)$  :

$$\epsilon(\lambda, T) = \frac{1}{4\pi} A_{mm} g_m \frac{h}{\lambda} \frac{n(T)}{u(T)} \exp(\frac{E_m}{K_b T})$$

(1)

式中,  $A_{mm}$  为跃迁几率,  $g_m$  是  $m$  能级统计权重,  $E_m$  是激发电势,  $K_b$  是玻耳兹曼常数, 都可通过查阅文献获得。 $n(T)$  是粒子数密度,  $u(T)$  是粒子配分函数, 需要通过理论计算求得。

对于氩氮之类的混合气体, 可用基本气体的谱线来测量其等离子体的温度<sup>[8]</sup>。谱线的光谱发射率不但是温度的函数, 而且还与等离子体中的氮气浓度有关。由文献 [7, 8] 中的实验结论可知: 氮含量为  $C$  的氩原子数密度  $n(T, C)$  与氮含量为 0 的氩原子数密度  $n(T, 0)$  存在如下的简单关系:

$$n(T, C) = K(C) n(T, 0)$$

(2)

因此, 对氩氮等离子体  $K(C)$  值与氮气摩尔浓度  $C$  的关系可如表 2 所示。由此, 若已知等离子体中氮气的莫尔浓度  $C$ , 并测得该等离子辐射中某氩原子谱线 (694. 6nm) 的发射系数  $\epsilon(T, C)$ , 则通过 (2) 式可以求得同一温度下的纯氩等离子体 ( $C = 0$ ) 中同一谱线的发射系数  $\epsilon(T, 0) = \epsilon(T, C)/K(C)$ 。这样由 (1) 式, 利用纯氩等离子体的  $\epsilon-T$  关系求得温度值, 就能确定任意浓度的等离子射流的温度场。实际上, 不能直接测量到谱线的发射系数  $\epsilon$ , 而只能测出它沿光程的积分值- 光谱辐射强度  $I$ , 但借助 Abel 变换可由测得的辐射强度  $I$  来确定  $\epsilon$  的分布<sup>[9]</sup>。

图 2 为在表 1 中所列的 4 组混合比条件下得到的与等离子射流形态灰度图对应的温度场。可以看出: 不同混合比条件下温度都是由中心向外逐渐降低; 随着混合气体中氮气的体积增加, 相对应温度场的温度逐渐升高。这是因为氮气热焓较高, 随着其体积量的增加, 温度场的温度随之升高, 而在氩氮比为 1 0.35 和 1 0.55 范围时中心高温区下降梯度较为平缓, 这将有利于粉末的熔融和基体的表面处理。

由于射流温度场是由表示射流形态的灰度图转换而来, 温度场与射流形态相似<sup>[7]</sup>, 因此可以看出: 随着氮气体积的增加, 射流形态呈轴向增长, 逐渐变得狭长, 即射流的紊动度降低, 在氩氮比例为 1 0.55 时射流紊动度最低。图 2 中前两种条件所示的射流高温区域射流短, 是因为在喷枪的喷口处由于冷空气的作用, 形成射流对周围气体的严重卷吸, 表现出较强的湍流特性, 射流能量衰减很快, 这样就不利于粒子在射流飞行过程中的加热熔化。而后两种混合比下所示射流长, 能量衰减缓慢, 温度梯度比较平缓, 有利于粉末的熔化和材料表面处理。

表 2 氩氮等离子体的  $K(C)$  值

Table 2  $K(C)$  of Ar-N<sub>2</sub> plasma jet

N%	0	1	3	5	10	15	20	25	30
$K(C)$	1.000	0.982	0.943	0.906	0.818	0.739	0.667	0.601	0.538

2.2 氩氮混合比对涂层性能的影响

评价涂层质量的因素很多, 可以分析它的结合强度, 也可以分析其物理性能或化学成分, 这需结合应用的侧重点进行选择, 本研究过程中侧重涂层结合的

情况和涂层硬度，所以选择了分析涂层断面组织和硬度实验。

涂层的形成过程决定了涂层的结构，等离子熔射涂层是由无数变形粒子相互交错呈波浪式堆叠在一起的层状组织。高温高速的粒子陆续撞击基体或已形成的涂层表面，变形并扁平化成薄片，凝固形成涂层。

颗粒的陆续堆积，使扁平化后的粒子之间不可避免地存在某些孔隙或空洞。粒子在凝固过程中收缩而产生微观收缩应力，应力积累造成涂层整体的残余应力，当残余应力较大时，涂层内甚至出现微裂纹。因此，评价涂层微观组织的好坏将由熔融粒子的扁平化程度、涂层结合情况、涂层的孔隙状况来决定<sup>[10]</sup>。

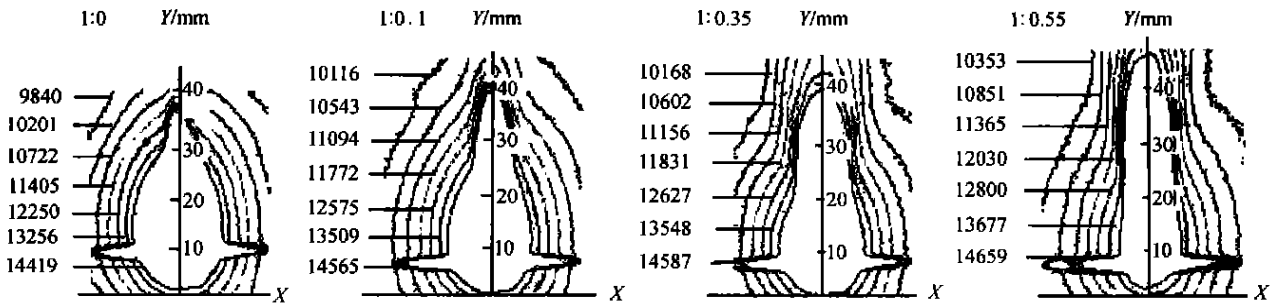


图 2 不同氩氮混合比下等离子射流温度场  
Fig. 2 Plasma jet temperature field under different Ar-N<sub>2</sub> mixture ratios

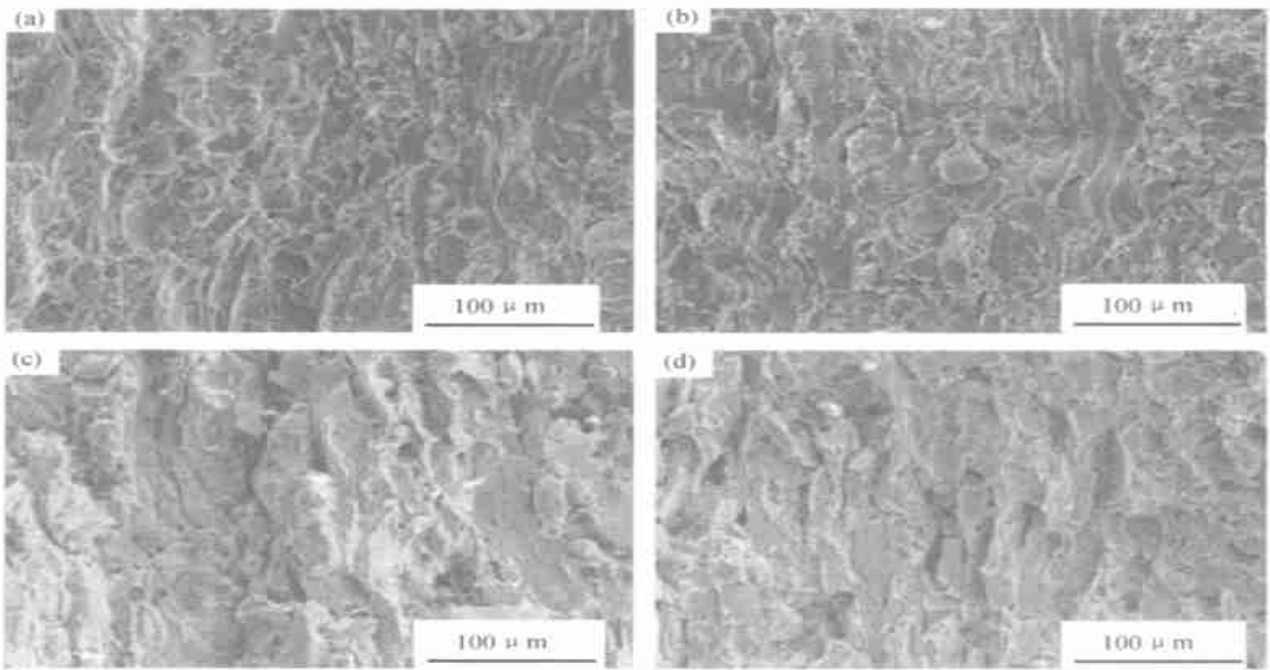


图 3 不同氩氮体积比时涂层的 SEM 图  
Fig. 3 SEM of coatings under different Ar-N<sub>2</sub> volume mixture ratios  
(a) 1 0; (b) 1 0.1; (c) 1 0.35 (d) 1 0.55

图 3 为用 SX-40 扫描电镜分析涂层的断层组织得到的四组 SEM 图片，可以看出，在氩氮比为 1 0 的条件下，涂层断层间的界面并不明显，未熔粒子较多，层状组织和球状组织相互交错，有较多的孔隙；在氩氮比为 1 0.1 时，涂层的微观组织也与 1 0 时的情况差不多。所以在上述两种熔射工艺条件下，获得的涂层质量都不理想，不适合用于等离子喷涂工艺。而在氩氮比为 1 0.35 和 1 0.55 时，涂层组织明显

呈均匀的叠层分布，几乎没有球形颗粒，粒子变形充分。

硬度是用于耐磨热喷涂涂层的重要力学性能指标。表 3 为在四组条件下测得的涂层硬度，由图 4 所示硬度曲线可以清楚地看出随氮气体积增加，硬度逐渐增大，说明涂层结合更为致密均匀，孔隙少，所以涂层能够获得较高的硬度。但到了 1 0.35 后，硬度升高趋于平缓，说明此后氮气含量增加对涂层硬度的

增加无明显影响。

表 3 不同氩氮混合比下涂层硬度值

Table 3 Hardness of coatings under different Ar-N<sub>2</sub> mixture ratios

Ar	N <sub>2</sub>	Hardness of the points (HV)					Average
1	0	611.6	603.0	579.5	599.4	623.0	603.3
1	0.1	698.1	604.2	646.2	660.0	683.0	658.3
1	0.35	657.5	693.5	713.5	719.8	673.0	691.5
1	0.55	725.3	747.5	689.1	660.3	678.8	700.2

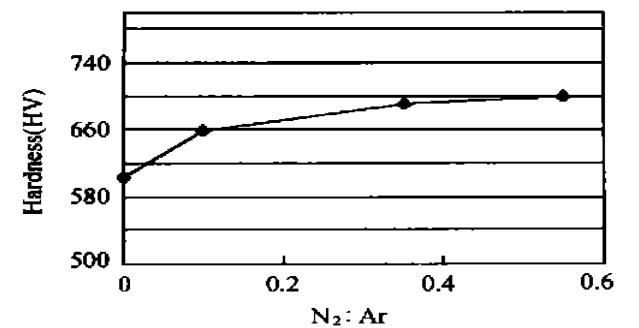


图 4 不同氩氮体积比下涂层硬度曲线

Fig. 4 Hardness curves of coatings under different Ar-N<sub>2</sub> volume mixture ratios

3 结论

(1) 在氩氮比为 1 0, 1 0.1, 1 0.35, 1 0.55 的四组条件中, 随着氮气含量的增加, 射流逐渐变得狭长, 紊动度逐渐降低, 温度场温度逐渐升高。在氩氮比为 1 0.35 之后, 射流质量最好, 中心高温区温度下降平缓, 有利于基体表面处理和粉末的熔融。

(2) 随着氮气含量增加, 涂层组织变得均匀致密, 涂层硬度也随之增加。在氩氮比为 1 0.35 之后, 硬度变化不大, 涂层组织达到最好。

(3) 氩氮比为 1 0.35 至 1 0.55 范围内的氩氮气体混合比条件最适合等离子喷涂工艺, 对这四组混合比条件下的涂层及射流特性的测量和诊断, 有助于制定合理的等离子喷涂工艺参数。

参考文献

[1] 徐滨士, 刘世参. 等离子喷涂及堆焊 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1986. 10.

[2] 蒋驰, 周晋林, 等. 等离子喷涂参数对钼涂层组织及性能的影响 [J]. 材料保护, 2002, (8): 27—31.

[3] 周静, 曹兴进, 等. 等离子喷涂 NiCr 合金基复合梯度润滑涂层的组织与力学性能研究 [J]. 表面技术, 2002, (3): 17—20.

[4] 曹毅, 张叶方, 等. 等离子喷涂工艺参数对 B4C 涂层性能的影响 [J]. 山东陶瓷, 1998, (4): 16—19.

[5] 高阳, 史雅琴, 等. 等离子喷涂碳化钨涂层组织与喷涂条件的关系 [J]. 机械工程材料, 2002, (8): 25—31.

[6] 李长久, 孙波. 微束等离子喷涂工艺条件对 Cu 涂层组织和性能的影响 [J]. 西安交通大学学报, 2002, (8): 25—31.

[7] 张海鸥, 刘丹, 王桂兰. 面向 RPST 的氩氮等离子射流温度分布的测量 [J]. 机械科学与技术 (已录用) .

[8] 胡槐林, 李志信. 等离子体的温度测量与光谱测温仪 [J]. 清华大学学报, 1990, 30 (2): 100—104.

[9] 过增元, 赵文化. 电弧和热等离子体 [M]. 北京: 科学出版社, 1986. 1—18.

[10] 王汗功. 超音速电弧喷涂技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1999. 9.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50075032); 国家十五 863 机器人主题项目 (2001AA421150)

收稿日期: 2003-04-02; 修订日期: 2003-08-02

作者简介: 刘丹 (1978-), 男, 硕士研究生, 联系地址: 湖北省武汉市华中科技大学东 12 舍 427 室 (430074)。

\* \* \* \* \*

(上接第 44 页)

参考文献

[1] Luo Haosu, Xu Guisheng, Xu Haiqing, et al. Jpn J Appl Phys, 2000, 39 (9B): 5581—5585.

[2] Dong M and Ye Z G. J Cryst Growth, 2000, 209: 81—90.

[3] Tu Chi-Shun, Tsai C L, Hugo Schmidt V, et al. J Appl Phys, 2000, 89 (12): 7908—7916.

[4] Park S E, Shrout T R. IEEE Trans Ultras, Ferroelectr Freq Control, 1997, 44 (5): 1140—1147.

[5] Park S E, Shrout T R. J Appl Phys, 1997, 82(4): 1804—1811.

[6] 李文卓, 赵万生, 詹涵菁, 等. 压电与声光, 2001, 23 (4): 259.

[7] Seabaugh M M, Kerscht I H and Messing G L. J Am Ceram Soc, 1997, 80 (5): 1181—1188.

[8] Duran C, Trolrier-McKinstre S and Messing G L. J Am Ceram Soc, 2000, 83 (9): 2203—2213.

[9] Duran C, Trolrier-McKinstre S and Messing G L. J Mater Res, 2003, 18 (1): 228—238.

[10] Horn J A, Zhang S C, Selvaraj U, et al. J Am Ceram Soc, 1999, 82 (4): 921—926.

[11] Fukuchi E and Kimura T. J Am Ceram Soc, 2002, 85 (6): 1461—1466.

[12] Sabolsky E M, James A R, Kwon S, et al. Appl. Phys. Letters, 2001, 78 (17), 2551—2553.

[13] Swartz S L and Shrout T R. Mater Res Bull, 1982, 17 (10): 1245—1250.

[14] Kingery W D 等著, 清华大学无机非金属材料教研组译. 陶瓷导论 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1982. 427.

[15] Sabolsky E M, Messing G L and Trolrier-McKinstre S. J Am Ceram Soc, 2001, 84 (11): 2507—2513.

基金项目: 西北工业大学博士生创新基金 (200207); 国家自然科学基金基金 (50002009)

收稿日期: 2003-05-26; 修订日期: 2003-09-08

作者简介: 赵丽丽 (1972-), 女, 博士生, 讲师, 从事信息功能材料的研究, 联系地址: 西北大学电子科学系 (710069)。