

等离子喷涂 Al_2O_3 陶瓷涂层的工艺研究*

冯拉俊, 曹凯博, 雷阿利

(西安理工大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710048)

摘 要: 采用 SprayWatch-2i 粒子测速仪测定等离子喷涂时粒子的飞行速度及温度, 确定最佳喷涂电流和电压参数, 改变送粉方式和送粉速率制备 Al_2O_3 涂层。研究所制备涂层的孔隙率、显微硬度、耐磨性及结合强度, 研究结果指出: 影响 Al_2O_3 涂层质量的主要工艺参数为喷涂功率、送粉方式和送粉速率, 等离子喷涂 10~40 μm Al_2O_3 粉末制备 Al_2O_3 陶瓷涂层的最佳工艺参数为电流 600 A、电压 60 V、枪内送粉、送粉速率 10.25 g/min。

关键词: 等离子喷涂; 陶瓷涂层; 工艺参数

中图分类号: TG 174.442

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2005)06-0045-04

Research on the Process of Plasma Sprayed Al_2O_3 Ceramic Coatings

FENG La-jun, CAO Kai-bo, LEI A-li

(School of Material Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048)

Abstract: The optimum parameter of current and voltage of plasma spraying was obtained according to the velocity and temperature of particles in-flight in plasma jet determined by SprayWatch-2i velometer. Al_2O_3 ceramic coatings were prepared by varying the feeding way and speed rate of powders. Studying the coating properties, such as porosities, microhardness, wear resistance, bonding strength, it showed that the power of plasma spraying, feeding way and feeding rate are the key processing parameters. The optimum processing parameters of preparing Al_2O_3 ceramic coatings with particle size 10~40 μm of Al_2O_3 powder are: current 600 A, voltage 60 V, powder feeding inside gun and feeding speed 10.25 g/min.

Key words: plasma spray, ceramic coatings, processing parameter

0 引 言

Al_2O_3 陶瓷涂层由于其良好的耐磨性、耐热性、耐腐蚀性、抗氧化性, 以及电绝缘性, 被广泛用作隔热涂层、绝缘涂层以及耐滑动摩擦磨损的涂层^[1,2]。涂层的质量直接影响涂层的使用寿命, 涂层制备的工艺参数是获得优质涂层的关键^[3]。等离子喷涂技术是目前制备陶瓷涂层的主要方法之一^[4,5]。但是, 由于喷涂设备、粉末粒度、纯度的不同, 使得等离子喷涂制备陶瓷涂层的工艺参数相差较大, 工艺参数变化及枪内、枪外送粉对涂层性能影响的系统研究未见报导。针对这一实际, 文中采用不同的喷涂电流、电压、送粉方式、送粉速率制备 Al_2O_3 陶瓷涂层, 对制备涂层的孔隙率、显微硬度、耐磨性及结合强度进行测定分析, 探索影响涂层质量的主要因

素, 筛选最佳的喷涂工艺参数, 为获得优质涂层提供依据。

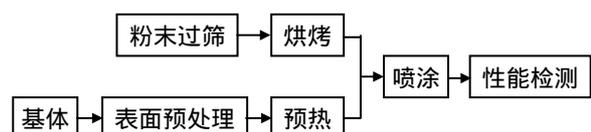
1 试验内容

1.1 试验设备及材料

采用九江等离子喷涂厂生产的 GP80 型等离子喷涂设备系统(主气 Ar, 次气 H_2); PQ-1JA 型喷枪; B6 型微细送粉器; DZKW-C 型水浴锅; TG328A 电光分析天平。喷涂的材料有: NiAl(镍包铝, 47~108 μm), Al_2O_3 (99%) 粉末(10~40 μm)。研究试样为: 涂层孔隙率、结合强度的研究试样为 $\phi 16$ mm \times 50 mm 圆柱形 Q235 钢样, 涂层显微硬度、耐磨性的研究试样为 15 mm \times 10 mm \times 5 mm 矩形 Q235 钢样。

1.2 涂层试样制备

涂层的制备工艺流程如图 1 所示。粉末在 110 下烘烤 2 h 以去除水分, 基体采用喷砂粗化处理,



收稿日期: 2005-11-09; 修回日期: 2005-11-21

基金项目: *陕西省教育厅基金项目 (02jc15)

作者简介: 冯拉俊(1957-), 男(汉), 陕西扶风人, 教授, 博士。

图1 制备工艺流程图

Fig.1 Flow process diagram of preparation

然后进行喷涂。喷涂基本参数为：喷涂距离为 90 mm,喷涂角度为 80°~90°,喷枪移动速度为 20 cm/s,每次喷涂厚度小于 0.10 mm^[6],NiAl 打底层厚度约为 0.15 mm,Al₂O₃工作层厚度约为 0.4 mm,Ar压力 0.85 MPa、流量 1 600 (L/h),H₂压力 0.13 MPa、流量 300 (L/h),送粉气压 0.05 MPa。

1.3 试验方法

首先确定等离子喷涂的电流、电压,采用芬兰 Oseir公司生产的SprayWatch-2i粒子测速仪对等离子喷涂Al₂O₃粉末进行测试,根据测试结果,选择粒子飞行速度和平均温度高的电流、电压值为喷涂Al₂O₃粉末的电流、电压参数。然后,根据已确定的电流、电压参数,在同一送粉速率条件下,研究枪内送粉与枪外送粉对涂层性能的影响,确定最佳送粉方式。在电流、电压、送粉方式确定后,改变送粉速率,研究涂层性能得出最佳送粉速率。从而得出等离子喷涂Al₂O₃涂层的最佳电流、电压、送粉方式、送粉速率等主要工艺参数,为等离子喷涂Al₂O₃粉末提供工艺参数依据。

2 试验结果

2.1 喷涂粒子速度及温度测试结果

用 SprayWatch-2i,在不同的电压、电流下,对飞行粒子的速度、温度进行测试,其结果见表 1。由表 1 可知,电流 600 A、电压 60 V 时粒子飞行速度最大,平均温度最高。

表1 Spraywatch-2i 粒子测速仪测试结果

Table 1 Testing result of Spraywatch-2i velometer

材料	电流/ A	电压/ V	喷涂 距离/ mm	粒子平均 速度/(m/s)	粒子平均 温度/
Al ₂ O ₃	600	60	100	448~494	2569~2785
Al ₂ O ₃	700	50	100	364~406	2234~2258
Al ₂ O ₃	500	70	100	389~468	2489~2769

2.2 送粉方式对涂层性能的影响

在对粒子飞行速度、温度测定的基础上,分别选电流 600 A、电压 60 V 和电流 500 A、电压 70 V,采用相同送粉速率,不同送粉方式进行涂层制备,研究其涂层性能。工艺参数如表 2 所示。

表2 不同送粉方式涂层制备工艺参数

Table 2 Processing parameters of coating preparation with different feeding way

试样	电流/ A	电压/ V	送粉方式	送粉速率/ (g/min)
1#	600	60	枪内	10.25
2#	600	60	枪外	10.25
3#	500	70	枪内	10.25
4#	500	70	枪外	10.25

2.2.1 不同送粉方式所制备涂层的孔隙率

孔隙率用煮沸法进行测试,其孔隙率计算公式^[7]为:

$$\eta = \frac{m_1 - m}{m_1 - m_0} \times 100\%$$

其中: m —干燥试样重量/g; m_1 —饱和水试样在空气中质量/g; m_0 —饱和水试样在水中的质量/g。孔隙率测试结果如表 3 所示。

表3 涂层孔隙率

Table 3 Porosity of coating

试样	m/g	m_1/g	m_0/g	/%
1#	0.7675	0.7765	0.3483	2.10
2#	0.5448	0.5536	0.3325	3.98
3#	0.2758	0.2608	0.1793	4.19
4#	0.2571	0.2799	0.1821	4.54

2.2.2 不同送粉方式所制备涂层的显微硬度

显微硬度通过 HX-1000 显微硬度计进行测试,载荷 100 g,加载时间 10 s。检测结果如表 4 所示。

表4 涂层显微硬度值

Table 4 Microhardness of coating

试样	显微硬度/HV						均值/ HV
1#	681	642	707	592	748	638	667.8
3#	560	661	606	602	602	642	612.2
2#	673	645	606	653	585	627	636.7
4#	530	542	576	566	589	589	582

2.2.3 不同送粉方式所制备涂层的耐磨性

采用三杆磨损机(自制),用 1 000 g 水和 750 g 40 目石英砂混合作为浆料,通过砝码(174 g)对试样摩擦副加载,底盘转速 50 rpm。磨 5 min 后,磨损结果如图 2 所示。

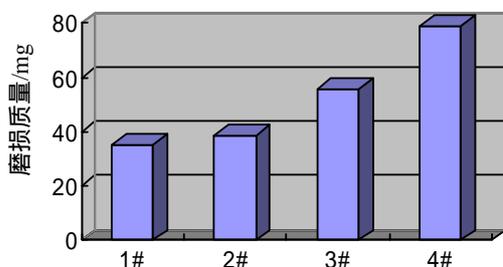


图 2 不同工艺参数制备 Al₂O₃ 涂层磨损柱形图

Fig.2 Column diagram of Al₂O₃ coatings wear prepared by different processing parameters

2.2.4 不同送粉方式所制备涂层的结合强度

用粘结剂对偶试样拉伸试验法测定涂层结合强度。在 WE-10 型万能试验机上进行拉伸试验,结果如表 5 所示。

表 5 涂层的结合强度

Table 5 Bonding strength of coating

试样	1#	2#	3#	4#
结合强度/MPa	11	9.5	8.2	6.7

2.3 枪内送粉条件下,不同送粉速率制备涂层的性能

通过以上结果 1# 试样的涂层孔隙率最低,硬度最高,耐磨性最好,结合强度最大。因此等离子喷涂 Al₂O₃ 粉末采用电流 600 A、电压 60 V、枪内送粉制备的涂层质量最好。在此参数下,调节送粉速率制备 Al₂O₃ 涂层,对所制备试样性能进行测试,测试方法与不同送粉方式制备涂层性能研究中的测试方法相同,结果见表 6。

3 结果分析

不同送粉方式、不同电参数下制备涂层的显微组织见图 3。图中 1#、3# 为枪内送粉制备涂层的显微组织,2#、4# 为枪外送粉制备涂层的显微组织。相同送粉方式下,即 1# 和 3# 相比较 1# 较致密,2# 和 4# 相比较 2# 致密。相同电功率条件下,1# 与 2#、表 6 喷涂电流 600 A、电压 60 V,枪内送粉时,不同送

粉速率条件下,涂层性能测试结果

Table 6 Testing results in the condition of 600A、60V、feeding inside gun and different feeding speed

试样	5#	6#	7#	8#
送粉速率/(g/min)	6.15	8.31	10.25	12.52
孔隙率 / %	6.79	4.67	2.12	9.3
显微硬度/HV	576	625	667	470
结合强度/MPa	7.39	8.48	10.95	6.14

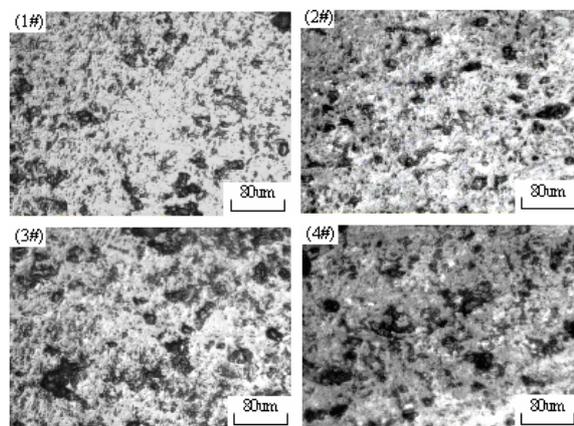


图 3 不同送粉方式、电参数下制备涂层的金相组织

Fig.3 Metallographic structure of coating by different feeding way and electricity parameters

3# 与 4# 相比,1# 和 3# 致密,这表明,枪内送粉和电功率较大的试样质量较好。因为功率越大,Al₂O₃ 颗粒的飞行速度和温度越高,在同样雾化和空气压力作用下,熔滴以较快的速度飞向基体表面,具有较大的动能,而且熔滴吸收的热量多,熔滴温度较高,粒子变形充分,层状堆积效果好。等离子射流是一个空间上的圆锥体,在距枪口不同距离的各个截面上,其温度、焓值、和轴向速度都是以中轴线处为最高,如图 4 所示,在等离子射流中轴线上运动的粉末颗粒能获得最好的加热效果^[8]。枪内送粉粉末能直接进入射流高温区,粒子在等离子焰中飞行的距离长,粒子的平均温度高,粒子的球化效果好。为了证明这一结论,研究过程中,将枪内、枪外送粉的粉末喷入大气中进行收集,并通过扫描电镜观察,结果发现枪内送粉 Al₂O₃ 粉末的球化度高,生粉率低(如图 5 所示)。粒子的运动受到喷嘴的限制,粒子运动轨迹基本和等离子射流的中心线平行,粒子的飞行速度高,粉末容易得到更多的热量

和动能, 熔化充分, 沉积率高。

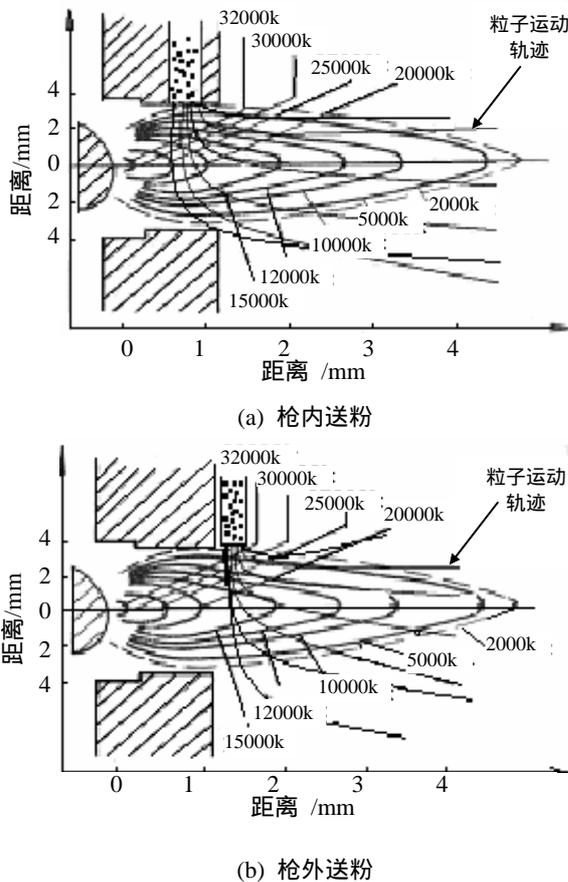
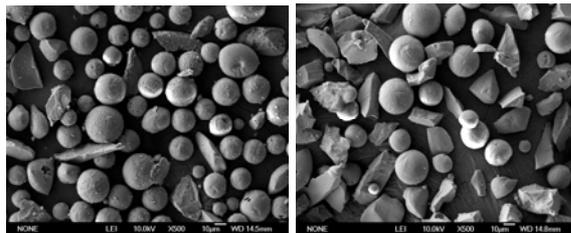


图4 粒子在等离子焰流中的运动轨迹

Fig.4 Moving trace of particles in the plasma flame



(a)枪内送粉

(b)枪外送粉

图5 电流600A、电压60V时的球化率图

Fig.5 Spheroidization diagram at 600A、60V

另外, 送粉速率对涂层质量的影响较大。送粉速率过大时, 不仅颗粒熔化不充分, 沉积效率低, 导致涂层致密性下降, 而且送粉不流畅, 涂层质量不稳定; 送粉速率过小时, 粒子过熔, 在气流作用下, 粒子进一步被雾化变得细小, 由于粉末质量小, 到达基体表面的冲量小, 这导致涂层较疏松, 并且对相同厚度涂层所需喷涂时间较长, 基体温度过

高, 易被氧化, 涂层质量下降, 生产效率低。

4 结论

(1) 等离子喷涂 Al_2O_3 (10~40 μm)粉末, 在电流为600 A、电压为60 V时, 粉末的平均飞行速率可达到448~494 m/s, 平均温度最高可达2785 $^{\circ}C$ 。

(2) 在同样的电流、电压及送粉速率条件下, 枪内送粉粉末在焰心飞行的数目多, 吸收更多的热量, 并且经气流加速的时间长, 使得枪内送粉制备的涂层孔隙率小、耐磨性高、结合强度大。

(3) 送粉速率是一个重要的工艺参数, 送粉量过大, 生粉率较高, 导致涂层疏松, 送粉量过小, 粉末过热, 在飞行过程中雾化变得细小, 粉末在基体表面的冲量较小, 也导致涂层疏松。

(4) 在等离子喷涂粒径为10~40 μm 的 Al_2O_3 粉末时, 最佳的工艺参数为电流600 A, 电压60 V, 枪内送粉, 送粉速率为10.25 m/s。

参考文献:

- [1] 杨元政. 等离子喷涂陶瓷 Al_2O_3 涂层的结构与组织特征 [J]. 兵器材料科学与工程, 2000,23(3):7-11.
- [2] 卢国辉. 爆炸喷涂 Al_2O_3 陶瓷梯度涂层的组织与性能 [J]. 材料工程, 2000(4):30-33.
- [3] 孙永兴, 等. 等离子喷涂工艺稳定性对陶瓷涂层组织和性能的影响 [J]. 材料保护, 2001,34(7):26.
- [4] Pekshev P Y, Ycherniako S V, Arzhakin N A. Plasma-sprayed multilayer protective coatings for gas turbine units [J]. Surface and Coatings Technology, 1994, 64:5-9.
- [5] Kim H J, Kweon Y G. The application of thermal sprayed coatings for pig iron ingot molds [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 1996,5(4):463-468.
- [6] 李金桂. 防腐蚀表面工程技术 [M]. 化学工业出版社, 2003:295-299.
- [7] 陈学定, 韩文政. 表面涂层技术 [M]. 北京:机械工业出版社, 1994.
- [8] 李德元, 等. 等离子技术在材料加工中的应用 [M]. 机械工业出版社, 2005:130-131.

作者地址: 西安市西安理工大学材料学院 515# 710048

Tel: (029)82312833/13572253516

E-mail: laocao8885@126.com