氧化铝涂层的超音速等离子喷涂参数影响及硬度分析

毛杰，宋进兵，邓畅光，黄科

（广州有色金属研究院，广州 510651）

摘　要：目的　初步明确超音速等离子喷涂参数对涂层的影响规律，优化工艺参数。**方法**　采用超音速等离子喷涂技术制备 Al_2O_3 陶瓷涂层，对涂层进行表征，分析喷涂电流 I、等离子发生气体压力 P_{air}、喷距 d 对涂层显微结构的影响。基于涂层显微硬度 HV 设计工艺优化试验，建立喷涂参数与显微硬度之间的回归方程。**结果**　I=260 A 或 P_{air}=0.55 MPa 时，涂层是 α-Al_2O_3 和 γ-Al_2O_3 双相复合结构；I=340 A 或 P_{air}=0.35 MPa 时，涂层几乎全由 γ-Al_2O_3 相组成，基本不含有未熔颗粒；喷距变化对涂层相组成的影响不显著。I 或 d 增大，或者 P_{air} 降低，显微硬度都呈增大趋势。**结论**　在实验范围内，超音速等离子喷涂 Al_2O_3 涂层的显微硬度最优工艺是：P_{air}=0.35 MPa，I=340 A，d=230 mm。

关键词： 超音速等离子喷涂；Al_2O_3 涂层；喷涂参数；显微结构；工艺优化；显微硬度

中图分类号： TG174.442　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 1001-3660(2014)04-0110-05

Parameter Effect and Microhardness Analysis of Al_2O_3 Coatings Prepared by the Supersonic Plasma Spraying Technique

MAO Jie, *SONG Jin-bing*, *DENG Chang-guang*, *HUANG Ke*

(Guangzhou Research Institute of Non-ferrous Metals, Guangzhou 510651, China)

ABSTRACT: Objective To preliminarily clarify the effect of parameters on coatings in supersonic plasma spraying and to obtain the optimal process parameters. **Methods** Al_2O_3 ceramic coatings were prepared by the supersonic plasma spraying technique. The microstructure and properties of Al_2O_3 coating were characterized and the effect of spraying parameters such as spraying current, pressure of plasma gas and spray distance were also discussed. According to the response surface methodology, the optimization experiment with three factors and three levels was designed and the regression equation was established between the influencing factors and the response value, thickness. **Results** When I=260 A or P_{air}=0.55 MPa, the coating was a dual-phase composite structure consisting of α-Al_2O_3 and γ-Al_2O_3. When I=340 A or P_{air}=0.35 MPa, the coating was almost fully deposited into the γ-Al_2O_3 phase, substantially containing no unmelted particles. Change in spraying distance had no significant effect on the phase composition of the coating. When I or d increased or P_{air} reduced, HV tended to increase. **Conclusion** In the experimental range, the optimal process parameters for microhardness of supersonic plasma spray were P_{air}=0.35 MPa, I=340 A and d=230 mm.

KEY WORDS: supersonic atmosphere plasma spraying; Al_2O_3 coating; spraying parameters; microstructure; process optimization; microhardness

收稿日期： 2014-03-24；**修订日期：** 2014-05-09

Received: 2014-03-24; **Revised**: 2014-05-09

基金项目： 国际科技合作项目(2011DFB50030)；广东省引进创新科研团队计划(2011C007)

Fund: Supported by the International S & T Cooperation Project (2011DFB50030) and Guangdong Innovative Research Team Program(2011C007)

作者简介： 毛杰(1979—)，男，湖南常德人，博士，工程师，主要从事热喷涂技术及涂层应用方面的研究。

Biography: MAO Jie(1979—), Male, from Changde, Hunan, Ph. D., Engineer, Research focus: thermal spraying technology and coating application.

热喷涂技术的应用广泛,可制备的涂层种类众多,包括耐磨减摩涂层、隔热绝缘涂层、抗氧化涂层、防腐蚀涂层等[1—5]。普通等离子喷涂系统的射流温度高达 15 000 K,可实现所有高熔点材料的熔化,但射流速度为 300 ~ 1000 m/s,粒子速度仅能达到 150 ~250 m/s,同时射流"边界效应"较大,使得射流边界粒子的熔化状态、速度以及氧化物含量与焰流中心粒子不同。美国 Browning 公司在 1986 年首次推出超音速等离子喷涂系统(PlazJet)。该系统将高气流量和高压等离子扩展弧混合,通过特殊喷嘴的加速使粒子速度达到超音速以上,能够改善普通等离子喷涂陶瓷涂层的结合强度低、孔隙率高等问题,但是其能耗和气体消耗量都非常高,分别高达 270 kW 和 130 ~ 230 L/min,生产成本大大增加。乌克兰国家科学院巴顿焊接研究所开发的超音速等离子喷涂设备的等离子形成气体采用压缩空气,不使用昂贵气体,仅添加很少量(体积分数约 5%)的可燃气体(丙烷或甲烷),等离子体射流速度高达 1500 ~ 3000 m/s,粒子速度 400 ~800 m/s,喷涂能力不低于 20 ~ 50 kg/h,电能 50 ~ 180 kW,材料利用率 0.70 ~ 0.75,可广泛应用于冶金机械、交通车辆、船舶制造与维修、军工装备等领域[6—9]。

文中在 Q235 钢表面采用超音速等离子喷涂技术制备 Al_2O_3 陶瓷涂层,讨论喷涂参数对涂层显微结构的影响,并以涂层显微硬度作为响应值,进行了工艺优化和回归分析。

1　试验

基体材料为 Q235 普通碳素钢,试样尺寸为 40 mm×30 mm×6 mm。喷涂前,先对基材进行汽油除油和超声波清洗,再用 46# 锆刚玉对待喷涂表面进行喷砂粗化处理,喷砂压力为 0.3 MPa,然后用压缩空气清除待喷涂表面可能吸附的砂粒。

先超音速火焰喷涂 NiCr 合金层作为粘接层,NiCr 粉末粒径为 15 ~45 μm;再采用 PLAZER 180 PL-S 型超音速等离子喷涂系统(乌克兰)喷涂 Al_2O_3 陶瓷层,Al_2O_3 粉末型号为 Amperit 740,粒径 5 ~22 μm,喷涂陶瓷层的工艺参数见表 1。

采用 Rigaku D/MAX-RC 型 X 射线衍射仪分析涂层样品的物相,靶材为 Cu,$\lambda = 0.154\ 06$ nm。用 JL-SM5910 型扫描电镜(SEM)观察涂层样品的截面形貌。采用 EM-1500VP 型数字显微硬度计测 Al_2O_3 涂层的显微硬度,加载载荷为 3 N,加载时间为 15 s,每组工艺条件的试样取 2 个,每个试样在不同位置测 5 ~7 次,取平均值。

表 1　涂层喷涂工艺参数

Tab.1 Coating deposition parameters

项目	对照组 1	对照组 2	对照组 3
电流/A	260/340	340	300
空气压力/MPa	0.35	0.35/0.55	0.35
丙烷压力/MPa	0.7	0.7	0.7
送粉量/(g·min^{-1})	~100	~100	~100
喷距/mm	200	200	170/230
基体预热/℃	~80	~80	~80

2　结果与讨论

2.1　涂层显微结构

原始氧化铝喷涂粉末为 α-Al_2O_3 稳定相。图 1 是不同对照组 Al_2O_3 涂层的 X 衍射图谱,曲线 a,b 分别对应于表 1 中对照组 1 的 260,340 A。对比可知,电流为 260 A 时,超音速等离子喷涂的氧化铝涂层中含有 α-Al_2O_3 和 γ-Al_2O_3 两相,是以 γ-Al_2O_3 为主的双相复合结构;电流增加到 340 A 时,涂层几乎全由 γ-Al_2O_3 相组成。在大气等离子喷涂中,α-Al_2O_3 粉末熔融,急冷后主要形成 γ-Al_2O_3,部分未熔的 α-Al_2O_3 颗粒会夹杂在涂层中,因此 γ-Al_2O_3 的含量可以反映粉末在等离子射流中的熔融状态。PLAZER 180 PL-S 型超音速等离子喷涂系统的工作电压是恒定的,保持在约 500 V,当电流从 260 A 增加到 340 A 时,喷涂功率相应从 130 kW 增加到 170 kW,喷涂粉末在等离子射流中的熔融状态得以改善,基本能达到完全熔融,

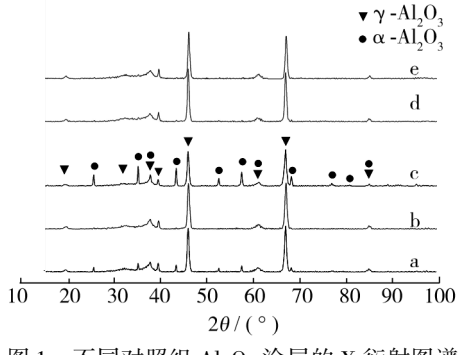


图 1　不同对照组 Al_2O_3 涂层的 X 衍射图谱

Fig. 1 XRD patterns for Al_2O_3 coating with different parameters

急冷后形成 γ-Al_2O_3 相,基本不含有 α-Al_2O_3 相未熔颗粒。

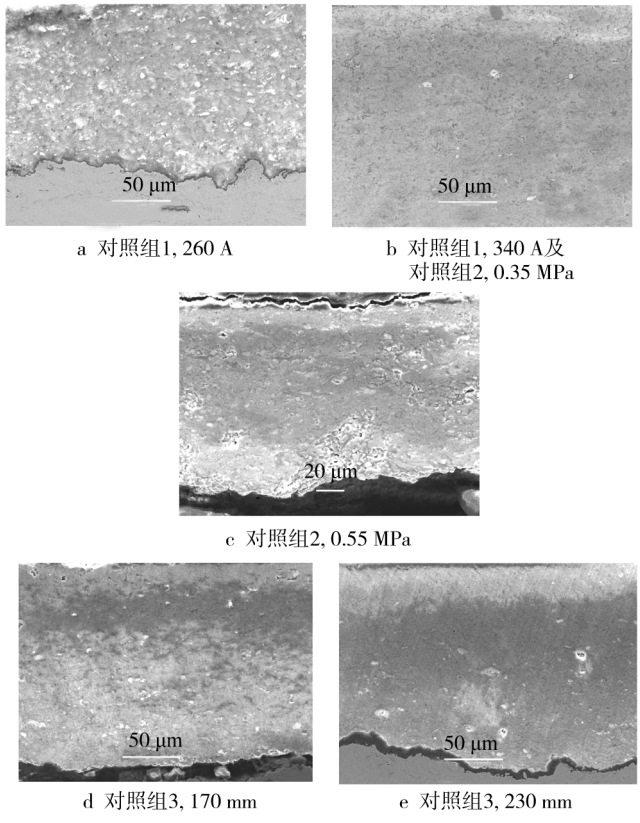
图 1 曲线 b 还对应于对照组 2 的 0.35 MPa,曲线 c 则对应于对照组 2 的 0.55 MPa。实验设备通过压缩空气高频离化而形成等离子体,混合的压缩空气和等离子体通过特殊设计的喷枪内通道及喷嘴的加速,形成超音速等离子射流,所以喷涂工作时的空气压力越大,射流速度就越大,伴随空气流量增大,单位焓值下降。射流速度增大意味着粒子加热时间缩短;等离子体单位焓值下降意味着粒子加热效果减弱;这两方面都将导致粉末颗粒的熔融情况不好。因此对应较大空气压力(P_{air} = 0.55 MPa)的曲线 c 中,未熔颗粒 α-Al_2O_3 相的衍射峰非常明显。

图 1 曲线 d,e 分别对应于对照组 3 的 170,230 mm,二者非常近似,均难以分辨出 α-Al_2O_3 相,说明喷距的变化对特定工艺参数下制备的涂层相组成的影响不显著。换句话说,在特定的工艺条件下,粉末在超音速等离子射流轴向的一个较大范围内都可以获得良好的熔融状态,保证以完全熔融的液滴形式撞击基材,凝固形成涂层。这与等离子射流的速度高有直接关系,说明超音速等离子喷涂工艺的喷距可调节范围大,体现了实际喷涂应用的优势条件之一。

图 2 为超音速等离子喷涂 Al_2O_3 陶瓷涂层的剖面形貌。总体可见,超音速等离子喷涂的涂层内部非常致密,仅存在极少量的微孔,一般孔径<3 μm。这是因为超音速等离子喷涂的射流速度非常高,粒子送入并加速后获得的动能较大,高动能撞击使得熔融粒子的铺展变形更加剧烈,单个铺展粒子之间相互挤压,结合更加紧密,表现出涂层内极低的孔隙率和非常小的孔隙孔径。涂层与基体之间的结合跟喷涂参数和沉积环境条件有很大的关系,可能形成非常不规则且很深的交错咬合和嵌入,结合界面完整连续,不出现孔隙,如图 2a 所示;也可能形成涂层与基体的剥离和微裂纹,如图 2c 所示。

图 2a,b 与图 1 曲线 a,b 的对比分析一致。电流较小制备的涂层中含有 α-Al_2O_3 和 γ-Al_2O_3 两相,图 2a 中的白色夹杂物即是未熔的 α-Al_2O_3 颗粒,采用图像分析技术可计算不同视场内 α-Al_2O_3 相的体积分数,数值约为 9.6%;而电流增加到 340 A 时,涂层中的白色未熔 α-Al_2O_3 颗粒非常少。可见增大喷涂电流能显著改善喷涂粉末在等离子射流中的熔融状态。

图 2b,c 与图 1 曲线 b,c 的对比分析一致。空气压力较大制备的涂层中含有 α-Al_2O_3 和 γ-Al_2O_3 两相,图 2c 中的白色夹杂物即是未熔的 α-Al_2O_3 颗粒,通过图像分析技术算得 α-Al_2O_3 相的体积分数约为 15.9%;而 P_{air} = 0.35 MPa 时,涂层中的白色未熔 α-Al_2O_3 颗粒非常少。可见采用较小的空气压力会显著改善喷涂粉末在等离子射流中的熔融状态。



a 对照组1, 260 A
b 对照组1, 340 A及对照组2, 0.35 MPa
c 对照组2, 0.55 MPa
d 对照组3, 170 mm
e 对照组3, 230 mm

图 2 Al_2O_3 涂层的剖面形貌

Fig. 2 SEM images for cross-section of Al_2O_3 coating

图 2d,e 的涂层结构相近,都是仅含有极少量的未熔颗粒。d = 170 mm 时,未熔颗粒的体积分数大约为 2.8%;d = 230 mm 时,未熔颗粒的体积分数大约为 1.4%。这说明在特定工艺参数下,喷距在较大范围内变化时,喷涂粉末在等离子射流中均能够获得良好的熔融状态。

2.2 显微硬度及工艺优化

2.2.1 实验设计及回归分析

2.1 小节中通过简单的参数对照,定性分析了喷涂电流 I、等离子发生气体压力 P_{air} 及喷距 d 对涂层显微结构的影响。为了进一步讨论工艺参数的影响,以涂层硬度 HV 作为响应值,以 I,P_{air} 和 d 为变量,保持丙烷压力、送粉量和基体温度等其他参数不变,根据 Box-Behnken 二阶响应曲面法设计三因素三水平的工艺优化试验[10—11]。工艺优化试验的变量和实测响应

值见表 2。

表 2　实验设计及响应值

Tab. 2 Experiment design matrix and response results

序号	I/A	P_{air}/MPa	d/mm	响应值显微硬度 HV
1	260	0.35	200	1214.64
2	260	0.45	170	413.49
3	260	0.45	230	1156.83
4	260	0.55	200	468.53
5	300	0.35	170	957.40
6	300	0.35	230	1135.49
7	300	0.45	200	669.76
8	300	0.45	200	1029.25
9	300	0.45	200	1017.99
10	300	0.55	170	469.17
11	300	0.55	230	446.10
12	340	0.35	200	1256.32
13	340	0.45	170	1010.60
14	340	0.45	230	1231.60
15	340	0.55	200	939.41

通过响应曲面法的回归模型适配度分析,基于响应值显微硬度的回归方程为:

$$HV = +111.586\ 17 + 3.701\ 38I - 2800.8P_{air} + 4.664d \quad (1)$$

选用模型方差分析,如表 3 所示。模型 F 值为 8.53,P 值仅为 0.0033,模型显著;同时失拟度 F 值为 0.88,P 值仅为 0.6388,不显著。这说明该模型可以作为试验响应值的回归拟合。

一般来说,拟合方程系数的 P 值<0.05 代表该因子的影响效果是显著的,P 值>0.1 是不显著的。实验中选取的变量 I, P_{air}, d 的 P 值分别为 0.0535, 0.0018和0.0657,说明选取的工艺参数的确对涂层硬度存在较显著的影响,其中等离子发生气体压力的影响最显著,其次是电流。文献[12]采用正交试验法研究了超音速等离子喷涂参数中喷涂电流、空气压力、喷距对 Cr_2O_3 涂层硬度的影响,指出参数影响的主次顺序为:空气压力>喷涂电流>喷涂距离,其工艺参数的影响显著性规律和本文结论是一致的。

表 3　回归模型方差分析

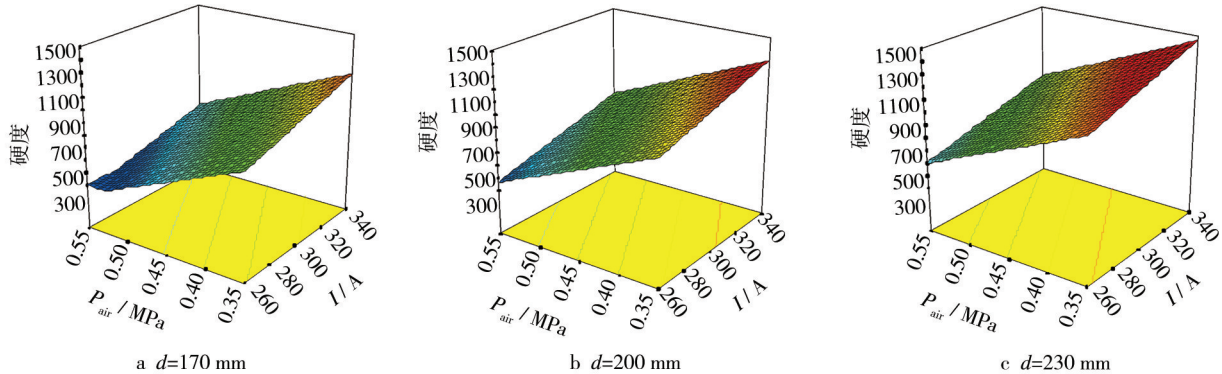
Tab. 3 Variance analysis of regression model

项目	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	9.60×10^5	3	3.20×10^5	8.53	0.0033
I	1.75×10^5	1	1.75×10^5	4.68	0.0535
P_{air}	6.28×10^5	1	6.28×10^5	16.73	0.0018
d	1.57×10^5	1	1.57×10^5	4.18	0.0657
失拟度	3.29×10^5	9	3.66×10^4	0.88	0.6388

2.2.2　显微硬度 HV 的影响规律分析

显微硬度 HV 的拟合方程式(1)中,电流 I 和喷距 d 的系数均是正值,说明两者对显微硬度的影响呈正比,而等离子发生气体压力 P_{air}的影响则相反,即电流或喷距增大,或等离子发生气体压力降低,显微硬度都呈增大趋势。

利用方程(1)作出显微硬度 HV 的响应曲面图,如图 3 所示。图 3 中显示,P_{air}和 I 交互作用对显微硬度的影响效应是一致的,即 P_{air}降低和 I 增大,显微硬度 HV 都呈增大趋势,在 P_{air}较大和 I 较小的区域将获得非常低的涂层硬度,体现出涂层硬度接近于基体硬度,说明沉积的涂层比较薄且疏松。比较图 3 的三个图可以直观地看出,d 增大,不改变 P_{air}和 I 对涂层硬度的影响规律,且随着 d 的增加,涂层的显微硬度整体呈上升趋势。基于三种变量的综合影响,实验模型表明,在 P_{air}较小、I 和 d 较大的区域可以获得硬度较



a d=170 mm　　b d=200 mm　　c d=230 mm

图 3　显微硬度 HV 的响应曲面图

Fig. 3 Response surface of microhardness HV

高的致密涂层。原因主要是，P_{air}较小时，产生的超音速等离子射流速度相对较低，而较大的喷距增加了颗粒在射流中的加热时间，同时相对较小的等离子发生气体流量和较大的电流使得射流对颗粒的热焓输出较大，因此粉末的熔化情况得以改善，沉积在基材上能良好铺展，呈片层状紧密层叠而形成致密涂层。从实验优化模型可以看出，在 $P_{air}=0.35$ MPa，$I=340$ A，$d=230$ mm 时，涂层可获得最大的显微硬度（1462.5 HV）。虽然减小 P_{air}及增大 I 可以进一步提高涂层硬度，但由于 340 A 的电流几乎是 PLAZER 180 PL-S 型超音速等离子喷涂系统的功率极限，同时等离子发生气体压力减小到 0.35 MPa 以下会造成等离子起弧困难，射流的超音速状态不稳定，因此认为在实验范围内，上述优化工艺即为最优工艺。

3 结论

1）电流 $I=260$ A 或等离子发生空气压力 $P_{air}=0.55$ MPa 时，超音速等离子喷涂的氧化铝涂层是 α-Al_2O_3 和 γ-Al_2O_3 双相复合结构；而 $I=340$ A 或 $P_{air}=0.35$ MPa 时，涂层几乎全由 γ-Al_2O_3 相组成，基本不含有未熔颗粒。喷距变化对涂层相组成的影响不显著。

2）基于显微硬度 HV 的最终响应曲面法拟合方程为：$HV=+111.586\ 17+3.701\ 38I-2800.8P_{air}+4.664d$。电流 I 或喷距 d 增大，或者等离子发生气体压力 P_{air}降低，显微硬度 HV 都呈增大趋势。

3）在实验范围内，获得最高显微硬度的超音速等离子喷涂 Al_2O_3 涂层工艺是：等离子发生气体压力 $P_{air}=0.35$ MPa，电流 $I=340$ A，喷距 $d=230$ mm。

参考文献

[1] 徐滨士，张伟，梁秀兵. 热喷涂材料的应用与发展[J]. 材料工程，2001(12)：3—7.
XU Bin-shi, ZHANG Wei, LIANG Xiu-bing. The Application and Development of Thermal Spray Materials[J]. Material Engineering, 2001(12): 3—7.

[2] 华绍春，王汉功，汪刘应，等. 热喷涂技术的研究进展[J]. 金属热处理，2008，33(5)：82—86.
HUA Shao-chun, WANG Han-gong, WANG Liu-ying, et al. Development on Thermal Spray Technology[J]. Heat Treatment of Metal, 2008, 33(5): 82—86.

[3] 李朋，李秉忠. 热喷涂铝涂层与玻璃结合机理的研究[J]. 装备环境工程，2009，6(2)：36—39.
LI Peng, LI Bing-zhong. Bonding Mechanism of Thermal Sprayed Aluminum Coating on Glass[J]. Equipment Environmental Engineering, 2009, 6(2): 36—39.

[4] 梁义，魏世丞，刘毅，等. Zn-Al 和 Al-RE 热喷涂涂层的耐蚀性研究[J]. 装备环境工程，2010，7(6)：171—174.
LIANG Yi, WEI Shi-cheng, LIU Yi, et al. Study of Corrosion Resistance of Zn-Al and Al-RE Thermal Spraying Coatings [J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(6): 171—174.

[5] 刘世念，苏伟，魏增福，等. 热喷涂防腐涂层在大气环境中的应用[J]. 装备环境工程，2013，10(6)：72—76.
LIU Shi-nian, SU Wei, WEI Zeng-fu, et al. Application of Corrosion Resistant Coating of Thermal Spraying in the Atmospheric Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(6): 72—76.

[6] 谢兆钱，卢飞，王海军，等. 超音速等离子喷涂 NiCr-Cr_3C_2 工艺的参数优化[J]. 表面技术，2011，40(6)：78—81.
XIE Zhao-qian, LU Fei, WANG Hai-jun, et al. Process Optimization of NiCr-Cr_3C_2 Coatings by Supersonic Plasma Spraying[J]. Surface Technology, 2011, 40(6): 78—81.

[7] 王海斗，徐滨士，姜祎，等. 超音速等离子喷涂层的组织及性能分析[J]. 焊接学报，2011，32(9)：1—4.
WANG Hai-dou, XU Bin-shi, JIANG Yi, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Supersonic Plasma Sprayed Coating[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(9): 1—4.

[8] 欧献，邓畅光，王日初，等. 超音速等离子喷涂涂层耐磨性能研究进展[J]. 材料导报，2013，27(21)：104—106.
OU Xian, DENG Chang-guang, WANG Ri-chu, et al. Advances in Wear Resistance Performance of Supersonic Atmospheric Plasma Sprayed Coating[J]. Materials Review, 2013, 27(21): 104—106.

[9] 韩志海，王海军，白宇，等. 超音速等离子喷涂制备细密柱晶结构热障涂层研究进展[J]. 热喷涂技术，2011，3(2)：1—14.
HAN Zhi-hai, WANG Hai-jun, BAI Yu, et al. Development of Thermal Barrier Coating with Fine Columnar Crystal Structure Fabricated by Supersonic Atmospheric Plasma Sprayed [J]. Thermal Spray Technology, 2011, 3(2): 1—14.

[10] 毛杰，邓畅光，邓春明，等. 基于孔隙率的 Cr_2O_3 涂层工艺优化及回归分析[J]. 中国表面工程，2013，26(4)：38—43.
MAO Jie, DENG Chang-guang, DENG Chun-ming, et al. Process Optimization and Regression Analysis of Cr_2O_3 Coating Based on Porosity[J]. China Surface Engineering, 2013, 26(4): 38—43.

（下转第 141 页）

[32] RAMACHANDRAN C S, BALASUBRAMANIAN V, ANANTHAPADMANABHAN P V. Synthesis, Spheroidization and Spray Deposition of Lanthanum Zirconate Using Thermal Plasma Process [J]. Surface and Coatings Technology, 2012, 206: 3017—3035.

[33] CHEN Hong-fei, LIU Yun. Design, Preparation and Characterization of Graded YSZ/$La_2Zr_2O_7$ Thermal Barrier Coatings[J]. Journal of the America Ceramic Society, 2010, 93: 1732—1740.

[34] WANG L, WANG Y, SUN X G. Thermal Shock Behavior of 8YSZ and Double Ceramic Layer $La_2Zr_2O_7$/8YSZ Thermal Barrier Coatings Fabricated by Atmospheric Plasma Spraying[J]. Ceramic International, 2012, 38: 3595—3606.

[35] 陈晓鸽, 张天彤, 张红松. 等离子喷涂 $Sm_2Zr_2O_7$/NiCoCrAlY 功能梯度热障涂层的热冲击性能[J]. 表面技术, 2012, 41(4): 86—89
CHEN Xiao-ge, ZHANG Tian-tong, ZHANG Hong-song. Thermal Shocking Property of Plasma Sprayed $Sm_2Zr_2O_7$/NiCoCrAlY Functional Graded Thermal Barrier Coatings [J]. Surface Technology, 2012, 41(4): 86—89.

[36] WANG Xue-ying, ZHU Yong-ping, DU Ling-zhong. The Study on Porosity and Thermophysical Properties of Nanostructured $La_2Zr_2O_7$ Coatings[J]. Applied Surface Science, 2011, 257: 8945—8949.

[37] ZHAO Xiao-dong, ZENG Ke-li, XIA Jian-gang. Nanostructured Lanthanum Zirconate Coating and Its Thermal Stability Properties [J]. Proceedings of Sino-swedish Structured Materials Symposium, 2007: 147—151.

[38] CHEN Hong-fei, GAO Yan-feng, TAO Shun-yan. Thermophysical Properties of Lanthanum Zirconate Coating Prepared by Plasma Spraying and the Influence of Post-annealing[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 486: 391—399.

[39] XU Zhen-hua, HE Li-min, MU Ren-de, et al. Thermal Barrier Coatings of Lanthanum Zirconate Cerium Composite Oxide Made by Electron Beam Physical Vapor Deposition[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 478: 168—172.

[40] YU Jian-hua, ZHAO Hua-yu, TAO Shun-yan, et al. Thermal Conductivity of Plasma Sprayed $Sm_2Zr_2O_7$ Coatings [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2010, 30: 799—804.

[41] WANG L, WANG Y, SUN X G, et al. Finite Element Simulation of Residual Stress of Double-ceramic-layer $La_2Zr_2O_7$/8YSZ Thermal Barrier Coatings Using Birth and Death Element Technique [J]. Computational Materials Science, 2012, 53: 117—127.

[42] WANG L, WANG Y, ZHANG W Q, et al. Finite Element Simulation of Stress Distribution and Development in 8YSZ and Double-ceramic-layer $La_2Zr_2O_7$/8YSZ Thermal Barrier Coatings During Thermal Shock [J]. Applied Surface Science, 2012, 258: 3540—3551.

[43] 马岳, 段祝平, 席军. 热障涂层高温抗氧化性能研究的现状与发展[J]. 表面技术, 2009, 38(6): 10—13.
MA Yue, DUAN Zhu-ping, XI Jun. The Spray and Development of Investigation on Oxidation Resistance at High Temperature in Thermal Barrier Coatings[J]. Surface Technology, 2009, 38(6): 10—13.

[44] XU Zhen-hua, HE Li-min, MU Ren-de, et al. Hot Corrosion Behavior of $La_2Zr_2O_7$ with the Addition of Y_2O_3 Thermal Barrier Coatings in Contacts with Vanadate Sulfate Salts [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 504: 382—385.

[45] XU Zhen-hua, HE Li-min, MU Ren-de, et al. Hot Corrosion Behavior of Rare Earth Zirconates and Yttria Partially Stabilized Zirconia Thermal Barrier Coatings [J]. Surface and Coatings Technology, 2010, 204: 3652—3661.

[46] SUBRAMANIAM Y, AKIRA K, ANANTHAPADMANABHAN P V. Initial Phase Hot Corrosion Mechanism of Gas Tunnel Type Plasma Sprayed Thermal Barrier Coatings [J]. Materials Science and Engineering B, 2012, 177: 536—542.

[47] HABIBI M H, WANG L. Evolution of Hot Corrosion Resistance of YSZ, $Gd_2Zr_2O_7$, and $Gd_2Zr_2O_7$ + YSZ Composite Thermal Barrier Coatings in $Na_2SO_4+V_2O_5$ at 1050 ℃[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2012, 32: 1635—1642.

(上接第 114 页)

[11] 毛杰, 邓春明, 邓畅光, 等. 响应曲面法在大气等离子喷涂工艺研究中的应用[J]. 表面技术, 2013, 42(4): 65—68.
MAO Jie, DENG Chun-ming, DENG Chang-guang, et al. Application of Response Surface Methodology to the Process Study of Atmospheric Plasma Spraying[J]. Surface Technology, 2013, 42(4): 65—68.

[12] 欧献, 邓畅光, 王日初, 等. 超音速等离子喷涂工艺参数对 Cr_2O_3 涂层硬度的影响[J]. 表面技术, 2014, 43(1): 81—85.
OU Xian, DENG Chang-guang, WANG Ri-chu, et al. Influences of the Supersonic Plasma Spraying Process on the Hardness Properties of Cr_2O_3 Coating[J]. Surface Technology, 2014, 43(1): 81—85.