

## 铝基体上等离子体电解氧化陶瓷涂层的冲蚀性能

张世欣<sup>1</sup>, 刘仁<sup>2,3</sup>, 王小成<sup>1</sup>, 李光<sup>2</sup>, 武传田<sup>1</sup>, 夏原<sup>2</sup>, 杨苗苑<sup>2,3</sup>

(1. 南车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛 266000;

2. 中国科学院力学研究所, 北京 100190; 3. 中国科学院大学物理学院, 北京 100049)

**摘要:** 采用气流喷砂式冲蚀试验机, 对铝合金基体的等离子体电解氧化(PEO)陶瓷层进行冲蚀性能研究。利用扫描电子显微镜及精密天平检测了PEO陶瓷层的表面冲蚀形貌及冲蚀磨损量, 比较分析了粒子速度、入射角度对冲蚀磨损率及冲蚀形貌的影响规律。结果表明, PEO陶瓷涂层在受冲蚀时表面裂纹萌生扩展导致材料破碎成细块脱落, 属于典型的脆性材料冲蚀行为; PEO陶瓷涂层冲蚀磨损率随入射角度的减小逐渐降低, 对低角冲蚀表现良好的抗冲蚀能力; 粒子速度对PEO陶瓷层冲蚀磨损率的影响非常明显, 其速度指数为2.7。

**关键词:** 等离子体电解氧化; 陶瓷涂层; 冲蚀; 入射角度; 粒子速度

**中图分类号:** TG174.453 **文献标志码:** A **文章编号:** 0254-6051(2015)09-0084-04

## Erosion performance of plasma electrolytic oxidation ceramic coating on aluminum substrate

Zhang Shixin<sup>1</sup>, Liu Ren<sup>2,3</sup>, Wang Xiaocheng<sup>1</sup>, Li Guang<sup>2</sup>, Wu Chuantian<sup>1</sup>, Xia Yuan<sup>2</sup>, Yang Miaoyuan<sup>2,3</sup>

(1. CSR SIFANG Co., Ltd., Qingdao Shandong 266000, China;

2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. School of Physics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Using air-blast erosion test machine, the erosion performance of plasma electrolytic oxidation (PEO) ceramic coatings on aluminum alloy substrate was studied. Surface morphology and erosion mass loss of PEO ceramic coatings were tested by scanning electron microscopy and precision scales, and the effects of particle velocity and incident angle on erosion rate and erosion morphology were analyzed. The results show that cracks initiation and propagation on the surface of PEO ceramic coatings after erosion which makes the material break into thin pieces and fall off. Therefore, the erosion of PEO ceramic coatings is a typical brittle material erosion behavior. But the erosion rate of PEO ceramic coatings gradually reduces with the reduction of incident angle, and the PEO ceramic coatings show good erosion resistance when the incident angle is low. Meanwhile, the particle velocity on the erosion rate of PEO ceramic coating has an obvious effect, and the speed index is 2.7.

**Key words:** plasma electrolytic oxidation (PEO); ceramic coating; erosion; incident angle; particle velocity

现代高速列车速度达到300 km/h以上, 在如此高的运行速度下, 加上风沙环境, 冲蚀磨损成为列车车头表面涂层磨损破坏的重要原因。目前车头外壳材料为铝合金, 表面涂层主要由双组份聚氨酯面漆和不饱和聚酯腻子组成, 聚氨酯面漆具有弹性好、韧性佳等优点, 使得其在受正面冲蚀时抗冲蚀能力良好, 但由于硬度较低使得抗划擦能力较弱, 抗低角度冲蚀能力较差。为此需要寻求一种沉积在铝合金表面的硬质、耐磨涂层, 以探索对现有车头表面涂层进行替换的可行性。

等离子体电解氧化(Plasma electrolytic oxidation,

PEO)技术是一种可以直接在铝、镁、钛等轻金属及其合金表面进行陶瓷化改性处理的新方法, 能直接在基体表面生成一层高硬度、耐腐蚀、耐磨损的陶瓷涂层。PEO陶瓷涂层因其高硬度及耐磨损特性被作为现有车头涂层的备选方案。

研究铝基体上等离子体电解氧化陶瓷涂层冲蚀磨损行为<sup>[1-2]</sup>, 了解其冲蚀磨损特性, 可为其在冲蚀环境下的应用奠定基础。本文通过试验研究PEO陶瓷涂层的冲蚀磨损行为, 分析了粒子速度、入射角度对冲蚀磨损率的影响规律, 对陶瓷涂层抗冲蚀角度设计及高速下冲蚀磨损率估算问题进行了深入研究。

### 1 试验材料及方法

#### 1.1 试样制备

本试验选用铝合金为基体, 制备尺寸为24 mm ×

收稿日期: 2015-02-27

作者简介: 张世欣(1973—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为铁道车辆制造工艺技术研发。通信作者: 李光, 副研究员, 硕士生导师, 联系电话: 010-82544266, E-mail: lghit@imech.ac.cn

doi: 10.13251/j.issn.0254-6051.2015.09.016

24 mm × 4.8 mm 的试样。将基体试样表面打磨光滑后, 分别用丙酮及无水乙醇对试样进行去油及清洗。采用等离子体电解氧化技术在试样表面制备一层陶瓷涂层。试验中选用的电解液为 Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> 系溶液, 采用恒流模式处理, 电流密度为 15 A/dm<sup>2</sup>, 时间为 60 min。

1.2 试验方法及步骤

冲蚀试验开始前, 使用粒径在 200 μm 左右的沙粒对冲蚀试验机的送料速度进行测量及校准, 得到冲蚀试验机的送料速度为 2.75 g/min。研究不同粒子质量冲蚀下陶瓷涂层的磨损情况, 通过调节试验时间来控制冲蚀粒子总量; 对于冲蚀角度的研究, 选取 15°、30°、45°、60°、75°和 90° 6 种角度进行试验; 通过调节喷射气压来改变粒子速度, 得到粒子速度对 PEO 陶瓷层冲蚀磨损率的影响。具体试验参数如表 1 所示。

表 1 冲蚀试验设计方案  
Table 1 Design scheme of erosion tests

方案	冲蚀粒子总量/ g	入射角度/ (°)	粒子速度/ (m · s <sup>-1</sup> )
1	0.09、0.18、0.28、 0.37、0.46	90	70
2	0.46	15、30、45、60、 75、90	70
3	0.46	90	30、40、50、 60、70

冲蚀前后对试样进行超声波清洗、烘干, 用精密天平测量冲蚀前后试样的质量变化, 除以冲蚀粒子质量即可得到试样的冲蚀磨损率。用扫描电子显微镜观察冲蚀试样表面形貌及截面组织形貌变化, 分析其冲蚀磨损机理。

1.3 试验装置

PEO 陶瓷涂层在等离子体电解氧化系统中制备, 该系统主要包含 4 部分: 电解槽、冷却系统、交流脉冲电源及自动控制采集系统。

冲蚀磨损试验在自行研制的气流喷砂式冲蚀试验机上进行, 该设备符合美国 ASTM G76 标准, 粒子速度在 20 ~ 100 m/s 可调, 入射角度在 15° ~ 90° 可选。喷砂式冲蚀试验机由 4 部分组成: 压缩空气供给系统、磨料供给系统、测试室、除尘及回收装置, 具体见图 1。压缩空气供给系统提供可调气压, 高速气流携带磨料粒子冲蚀试样; 磨料供给系统用于储存磨料粒子和精密控制送料速度; 测试室用于放置试样以及调节冲蚀入射角度; 除尘及回收装置用于除尘及回收磨料粒子。

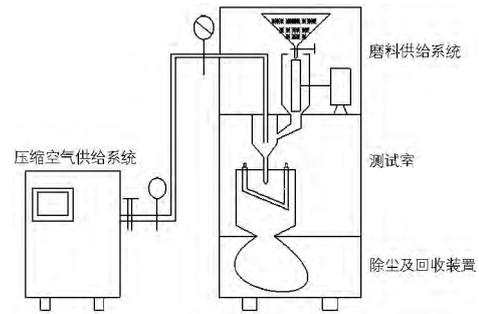


图 1 冲蚀试验机示意图  
Fig. 1 Sketch of erosion test machine

采用 HCC-25A 型电涡流测厚仪测量涂层厚度, 其精度为 1 μm。采用 FA1604 型精密天平测量试样冲蚀前后的质量变化, 其精度为 0.1 mg。采用 TESCAN LYRA 3 FEG-SEM/FIB 扫描电子显微镜对 PEO 陶瓷层表面形貌观察分析。

2 试验结果及分析

2.1 PEO 陶瓷涂层形貌

图 2 为试验制备的陶瓷涂层样品打磨疏松层后表面及截面形貌图, 可以看出涂层表面和内部都存在着一些孔洞, 涂层内部孔径大部分在 10 μm 以内。经测定致密陶瓷涂层的平均厚度约为 55 μm, 其显微硬度值为 1060 HV。

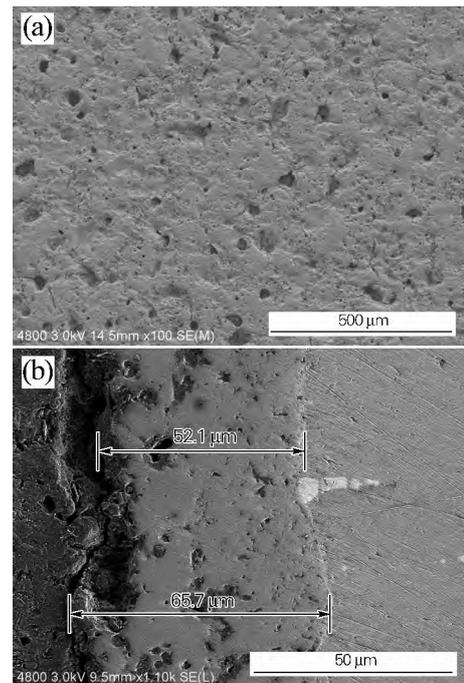


图 2 PEO 陶瓷涂层 SEM 形貌  
(a) 表面; (b) 截面  
Fig. 2 SEM morphologies of the PEO ceramic coating  
(a) surface; (b) cross section

磨料粒子以一定速度冲击 PEO 陶瓷涂层表面,使得陶瓷涂层表面产生许多微细裂纹,裂纹交错扩展使得涂层破碎成小块,进而脱落。如图 3 所示为 0.46 g 粒子以 70 m/s 的冲蚀速度垂直入射后的冲蚀形貌图,可以明显看出交错的裂纹及破碎的陶瓷细块。PEO 陶瓷涂层的主要成分是  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  和  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ,在受微细粒子冲蚀时表面微细裂纹萌生扩展使得陶瓷细块脱落,属于典型的脆性材料冲蚀磨损行为。

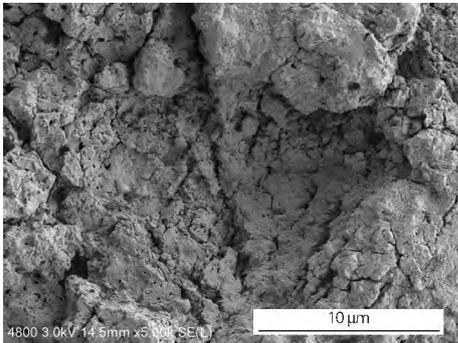


图 3 PEO 陶瓷涂层冲蚀表面形貌

Fig. 3 Erosion surface morphology of the PEO ceramic coating

### 2.2 冲蚀粒子量对冲蚀性的影响

图 4 为 PEO 陶瓷涂层冲蚀磨损量随磨料粒子质量增加的变化规律。研究发现,PEO 陶瓷涂层冲蚀磨损量曲线没有出现明显的孕育期,直接进入冲蚀的稳定阶段。随着粒子质量的增加,涂层冲蚀磨损量呈线性增长。将单位质量磨料粒子冲蚀作用下材料的冲蚀磨损量定义为该材料的冲蚀磨损率,通过冲蚀磨损曲线拟合可以得到 PEO 陶瓷涂层的冲蚀磨损率为 3.8 mg/g。

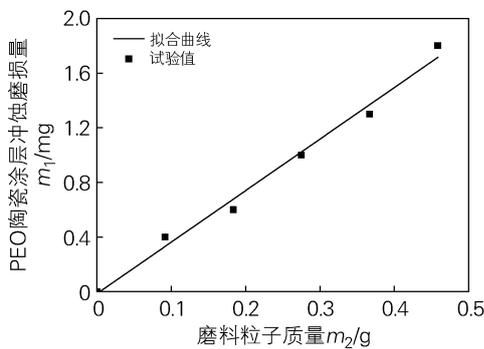


图 4 PEO 陶瓷涂层冲蚀磨损量随磨料粒子质量的变化

Fig. 4 Erosion mass loss of the PEO ceramic coating vs particles mass

### 2.3 入射角对冲蚀性的影响

图 5 为 PEO 陶瓷层冲蚀磨损率随入射角度的变化曲线,可以看出,陶瓷涂层的冲蚀磨损率随着入射角度的增大而增大,在入射角度为  $90^\circ$  时达到峰值,属于

典型的脆性材料冲蚀行为<sup>[3-6]</sup>。当入射角度小于  $45^\circ$  时,PEO 陶瓷涂层冲蚀磨损率增长缓慢;当入射角度大于  $60^\circ$  时,PEO 陶瓷涂层冲蚀磨损率随角度增加而迅速增大。

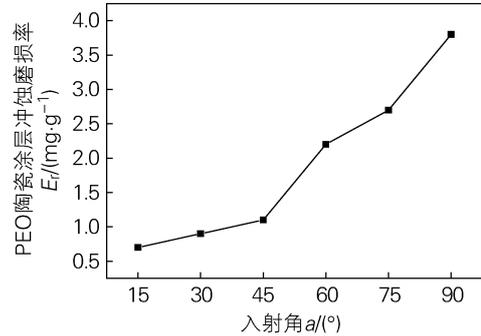


图 5 PEO 陶瓷涂层冲蚀磨损率随入射角度的变化

Fig. 5 Erosion wear rate of the PEO ceramic coating vs incident angle

粒子冲蚀陶瓷涂层表面时,一方面粒子动能的垂直分量撞击涂层表面造成破碎,另一方面切向分量划擦涂层表面。由于陶瓷涂层表面硬度较高,粒子切向分量的划擦对其损伤很小,涂层的磨损主要是由于粒子垂直分量的撞击导致涂层破碎脱落。当入射角度从  $90^\circ$  逐渐减小到  $15^\circ$  时,粒子对涂层的垂直冲击能量也逐渐减小,在涂层表面产生的裂纹及脱落的细块均逐渐减小。如图 6 所示,  $90^\circ$  入射时涂

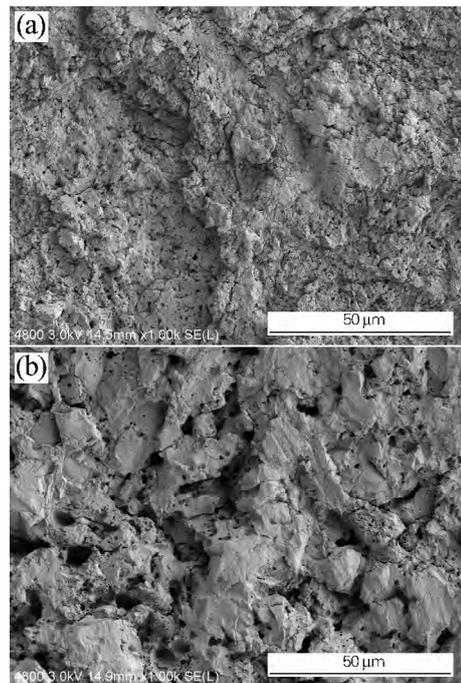


图 6 不同入射角度冲蚀后 PEO 陶瓷涂层表面形貌

Fig. 6 Surface morphologies of the PEO ceramic coating after different incident angle erosion (a)  $90^\circ$ ; (b)  $30^\circ$

层表面裂纹较多,涂层材料破碎成细块程度明显高于 $30^\circ$ 入射时。当入射角度小于 $45^\circ$ 时,PEO陶瓷涂层抗冲蚀能力将提升到垂直入射时的3倍以上,表现出优越的抗冲蚀能力,因此PEO涂层可应用在列车车头的斜面位置。

#### 2.4 粒子速度对冲蚀性的影响

早在1975年Hutchings等就研究了速度变化对韧性材料冲蚀磨损率的影响<sup>[7]</sup>,提出了无量纲公式 $E_r = KV^n$ (式中 $E_r$ 为材料的冲蚀磨损率, $V$ 为粒子冲蚀速度, $K$ 为常数, $n$ 为速度指数)来阐述粒子速度与材料冲蚀磨损率的关系。其中速度指数 $n$ 是与材料性能相关的常数,用于表达冲蚀磨损率随速度变化的剧烈程度。一般地,韧性材料冲蚀磨损的速度指数在2.2左右,脆性材料的速度指数在3.0左右。

为研究粒子速度对PEO陶瓷层冲蚀磨损率的影响<sup>[8-9]</sup>,本文进行了不同粒子速度下的PEO陶瓷涂层冲蚀试验,得到如图7所示的PEO陶瓷涂层冲蚀磨损率随粒子速度的变化曲线。可见,随着粒子速度的增长,PEO陶瓷涂层冲蚀磨损率呈急剧增长趋势。通过曲线拟合发现,PEO陶瓷层冲蚀磨损率 $E_r$ 与粒子速度 $V$ 的关系式为: $E_r = 4.7 \times 10^{-5} V^{2.7}$ ,则可知PEO陶瓷涂层冲蚀磨损的速度指数为2.7。

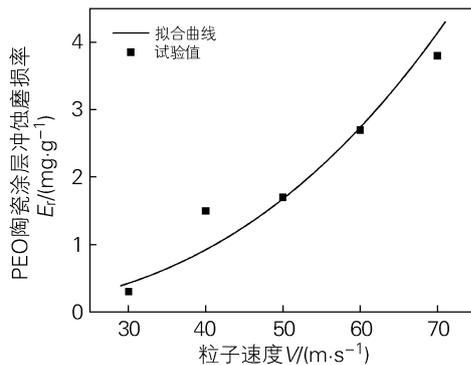


图7 PEO陶瓷涂层冲蚀磨损率随粒子速度的变化

Fig. 7 Erosion wear rate of the PEO ceramic coating vs particle velocity

对于高速微细粒子冲蚀,现有冲蚀设备无法满足其速度要求,可以通过低速冲蚀磨损率及速度指数 $n$ 来进行估算。以冲蚀速度为 $150\text{ m/s}$ 计算,PEO陶瓷涂层的冲蚀磨损率 $E_r = (150/70)^{2.7} \times 3.8 = 29.7\text{ mg/g}$ 。这种方法不仅适用于PEO陶瓷涂层,对于其他涂层及材料均适用。

### 3 结论

1) PEO陶瓷涂层的冲蚀磨损没有出现明显的孕

育期,直接进入冲蚀的稳定阶段;随着粒子质量的增加,试样磨损量呈线性增长;本试验条件下,PEO陶瓷涂层的冲蚀磨损率为 $3.8\text{ mg/g}$ 。

2) PEO陶瓷涂层在受冲蚀时表面裂纹萌生扩展导致材料破碎成细块脱落,属典型脆性材料冲蚀行为。

3) PEO陶瓷涂层冲蚀磨损主要源于粒子在垂直方向的撞击导致涂层表面破碎脱落,因此冲蚀磨损率随入射角度的减小逐渐降低。入射角度在 $45^\circ$ 以下时,PEO陶瓷涂层表现出优越的抗冲蚀性能,可应用与列车车头的斜面位置。

4) 本试验条件下,PEO陶瓷层冲蚀磨损率 $E_r$ 与粒子速度 $V$ 的关系式为: $E_r = 4.7 \times 10^{-5} V^{2.7}$ ,其速度指数为2.7。

#### 参考文献:

- [1] 汤文博,李永刚,徐继达. 冲蚀条件下等离子喷涂 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷涂层的磨损特性[J]. 郑州大学学报(工学版),2002,23(1):39-41.  
Tang Wenbo, Li Yonggang, Xu Jida. Wear character of plasma spraying  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ceramic coating in erosion condition [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2002, 23(1): 39-41.
- [2] 高雪松,黄因慧,田宗军,等. 等离子喷涂纳米 $\text{ZrO}_2$ 复合陶瓷涂层冲蚀行为[J]. 材料热处理学报,2010,31(10):136-140.  
Gao Xuesong, Huang Yinhui, Tian Zongjun, et al. Erosive wear behavior of nano- $\text{ZrO}_2$  coating prepared by plasma spraying [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2010, 31(10): 136-140.
- [3] 廉晓庆,冯秀梅,蒋明学,等. 不同冲蚀角下非均质脆性材料的残余应力和冲蚀机制[J]. 硅酸盐学报,2011,39(11):1740-1746.  
Lian Xiaoqing, Feng Xiumei, Jiang Mingxue, et al. Residual stresses and erosion mechanisms of inhomogeneous brittle material at different impact angles [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2011, 39(11): 1740-1746.
- [4] Oka Y I, Mihara S, Yoshida T. Impact-angle dependence and estimation of erosion damage to ceramic materials caused by solid particle impact [J]. Wear, 2009, 267(1): 129-135.
- [5] Bousser E, Martinu L, Klemberg-Sapieha J E. Solid particle erosion mechanisms of hard protective coatings [J]. Surface and Coatings Technology, 2013, 235(25): 383-393.
- [6] Md AminulIslam, Zoheir N Farhat. Effect of impact angle and velocity on erosion of API X42 pipeline steel under high abrasive feed rate [J]. Wear, 2014, 311(1/2): 180-190.
- [7] Hutchings I M, Winter R E. The erosion of ductile metals by spherical particles [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1975, 8(1): 8-14.
- [8] Lidija Curkovic, Ivan Kumic. Solid particle erosion behaviour of high purity alumina ceramics [J]. Ceramics International, 2011, 37(1): 29-35.
- [9] Wang Xiaojun, Fang Minghao, Zhang Laichang, et al. Solid particle erosion of alumina ceramics at elevated temperature [J]. Materials Chemistry and Physics, 2013, 139: 765-769.