

# 铜合金表面等离子喷涂 $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ 涂层的抗高温氧化性能

柯德庆, 潘应君

(武汉科技大学 材料与冶金学院, 武汉 430081)

**摘要:** 目的 对比研究  $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  涂层的抗高温氧化性能。方法 采用等离子喷涂工艺,以 NiCrAl 为粘接层,在铜合金基体表面分别制备  $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  涂层,测试涂层的显微组织、元素种类及含量、显微硬度,并在相同条件下测试涂层的抗高温氧化性能。结果  $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  涂层都具有明显的层状结构,涂层结合紧密,内部孔洞细小,显微硬度分别为 423HV 和 628HV。这两种涂层都具有一定的抗高温氧化性能, NiCrAl 粘结层是整个涂层最薄弱的环节。结论 等离子喷涂  $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$  涂层的抗高温氧化性能优于  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  涂层。

**关键词:** 等离子喷涂; 铜合金; 氧化锆陶瓷; 氧化铝陶瓷; 抗高温氧化性能

中图分类号: TG174.442

文献标识码: A

文章编号: 1001-3660(2014)03-0064-04

## Study on Oxidation Resistance of $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$ and $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ Coatings by Plasma Spraying on Copper Alloy

KE De-qing, PAN Ying-jun

(Materials and Metallurgy College, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

**ABSTRACT:** **Objective** In order to study the oxidation resistance of  $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  coatings,  $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  coatings with NiCrAl bonding layer were successfully prepared by plasma spraying process. **Methods** The microstructures, element types and levels and micro-hardness of the different coatings were studied by metallurgical microscopy, scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive spectrometer (EDS) and micro-hardness measurement. Oxidation resistance of all the specimens were tested under the same conditions. **Results** Both  $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  coatings had a significant layer structure, good adhesion and low porosity. The micro-hardness of  $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  coatings was 423HV and 628HV, respectively. Both  $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  coatings had certain oxidation resistance. NiCrAl bonding layer was the weakest part of the whole coatings. **Conclusion**  $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$  coatings had better oxidation resistance than  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  coatings.

**KEY WORDS:** plasma spraying; copper alloy; zirconia ceramics; alumina ceramics; oxidation resistance at high temperature

陶瓷材料具有强度和硬度高、耐磨性极高、抗高温氧化等优良性能,常作为隔热材料被广泛应用于高

温工作的零部件中,以延长零部件使用寿命<sup>[1-3]</sup>。相关文献报道,先进的隔热涂层可使高温燃气与金属基

收稿日期: 2013-12-26; 修订日期: 2014-01-18

Received: 2013-12-26; Revised: 2014-01-18

作者简介: 柯德庆(1988—),男,武汉人,硕士,助理工程师,主要研究方向为金属材料表面改性。

**Biography:** KE De-qing(1988—), Male, from Wuhan, Master, Assistant engineer, Research focus: metal material surface modification.

通讯作者: 潘应君(1965—),男,武汉人,教授,博士生导师,主要研究方向为金属材料表面改性。

**Corresponding author:** PAN Ying-jun(1965—), Male, from Wuhan, Professor, Doctoral supervisor, Research focus: metal material surface modification.

体表面之间产生显著的隔热降温<sup>[4]</sup>。

近年来,很多学者对等离子喷涂陶瓷涂层的制备工艺和耐磨、抗热震、隔热等性能进行了大量研究。例如,冯拉俊等人<sup>[5-10]</sup>和柯培玲等人<sup>[11-15]</sup>分别深入研究了  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$  陶瓷涂层的制备工艺、显微组织及性能。抗高温氧化性能是评价陶瓷涂层性能的重要指标之一<sup>[16-17]</sup>,但目前国内很少有人对氧化锆和氧化铝陶瓷涂层的抗高温氧化性能进行对比研究。文中在铜合金基体表面等离子喷涂  $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  陶瓷涂层,主要对比这两种涂层的显微组织、元素种类及含量、显微硬度和抗高温氧化性能。

表 1 等离子喷涂工艺参数  
Tab.1 Parameters of plasma spraying

粉末材料	电流/A	电压/V	氩气流量/( $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ )	氮气流量/( $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ )	送粉率/( $\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$ )	喷涂距离/mm
$\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$	550	66	0.3	0.06	30	90
$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$	550	65	0.3	0.06	30	90
NiCrAl	500	65	0.3	0.05	28	100

1.2 分析方法

- 1) 采用 Axioplan2 型多功能金相显微镜观察涂层显微形貌。
- 2) 通过 HVS-1000 型显微硬度计测定涂层显微硬度分布,加载 100 g,载荷保持时间为 5 s。
- 3) 高温氧化性能试验在 SX2-5-12 型马弗炉中进行。试样分别在 600 ℃ 和 800 ℃ 保温,每隔 1 h 测其氧化质量增量,并绘出氧化质量增量与时间的关系曲线。高温氧化后,通过带能谱分析仪的 NOVA NAND-400 型扫描电镜测试显微组织和元素种类及含量。

2 结果及分析

2.1 显微组织

图 1 显示了等离子喷涂层的结构:表面是陶瓷层,图 1a 为  $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$  陶瓷层,图 1b 为  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  陶瓷层;中间是 NiCrAl 粘结层,可降低由于铜合金基体与陶瓷涂层热膨胀系数不匹配而造成的残余应力;底部为铜合金基体。可以看出,涂层呈明显的层状分布,其中含有大量细小孔隙。孔隙主要是粉末颗粒在堆垛过程中形成的。等离子喷涂焰流温度不均匀,使得粒子不能完全熔化,部分未完全熔化的粒子撞击到

1 试验

1.1 等离子喷涂涂层

基体为市售铜合金板经机加工而成的 20 mm×10 mm×10 mm 试样。采用等离子喷涂工艺在试样 6 个表面涂覆氧化物陶瓷隔热涂层。所用粉末材料包括  $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  和 NiCrAl(粘结层喷涂材料),其粒度分别为  $(45\pm20)$ ,  $(50\pm15)$ ,  $(200\pm40)$   $\mu\text{m}$ 。

采用 DH-80 型等离子喷涂机进行喷涂,以氩气作为离子气,氮气作为保护气,具体工艺参数见表 1。

基体时不能充分变形,从而形成孔洞;此外,由于粉末颗粒不规则,在喷涂过程中的飞行轨迹不断产生变化,不能获得均匀的变形区,也会导致孔洞形成。

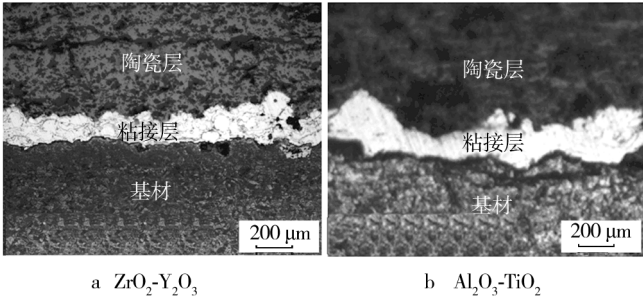


图 1 涂层截面显微形貌

Fig.1 Morphology of cross section of plasma spraying coatings

2.2 显微硬度对比

图 2 为两种涂层试样的显微硬度分布曲线。由图 2 可知,铜合金基体、NiCrAl 中间层的显微硬度分别为 58HV 和 176HV,表层  $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  的显微硬度分别为 423HV 和 628HV。中间层 NiCrAl 的显微硬度较基体铜合金有明显提高,原因是 NiCrAl 粉末被等离子焰流加热喷射到铜合金基体表面,生成了大量镍铬固溶体  $\gamma$  相,起到了固溶强化作用<sup>[18]</sup>。与 NiCrAl 粘结层和铜合金基体相比,表层  $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  的显微硬度都有大幅提升,这主要是由

于等离子喷涂过程中,ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> 粉末经高温熔融喷射后,形成了致密的 ZrO<sub>2</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜,使得涂层显微硬度较高。此外,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> 的显微硬度高于 ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。

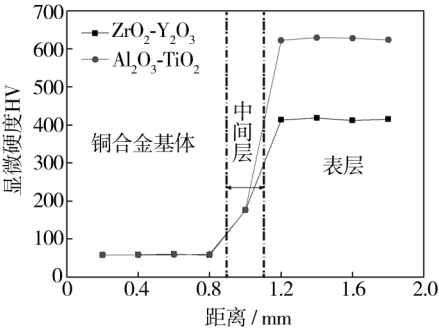


图 2 涂层显微硬度分布曲线

Fig. 2 Micro-hardness distribution curve of plasma spraying coatings

2.3 抗高温氧化性能对比

图 3 所示为两种涂层高温氧化后的截面形貌。由于等离子喷涂的 ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> 氧化物陶瓷在 600 ~ 800 ℃ 的高温条件下为稳定的氧化物状态,不会再被氧化,所以 NiCrAl 粘结层是整个涂层最薄弱的环节。从图 3 中可以看出,经 600,800 ℃ 高温氧化后,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> 和 ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 隔热层保持完好,无明显缺陷,而 NiCrAl 粘结层出现了不同程度的氧化:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> 层下的粘接层经 600 ℃ 保温后,出现

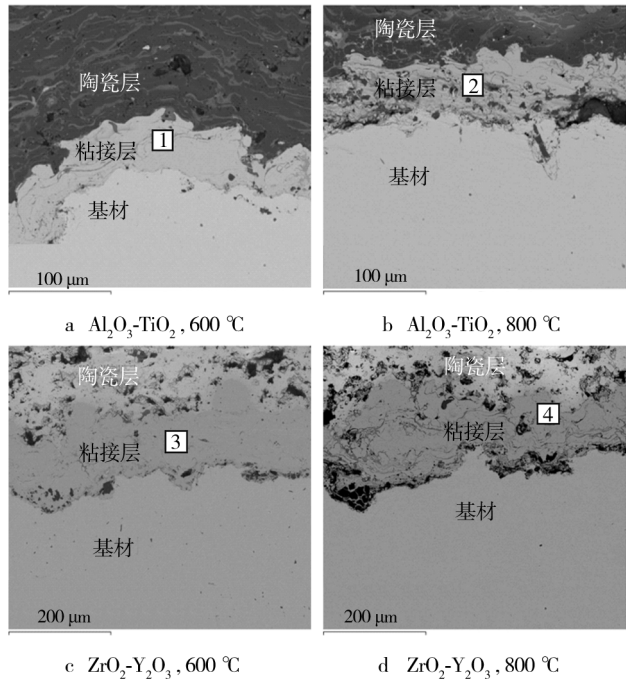


图 3 涂层高温氧化后的截面形貌

Fig. 3 Microstructure of cross section of plasma spraying coatings

了少量微裂纹,800 ℃ 保温后则明显被氧化,出现了大量的孔洞和微裂纹;ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 层下的粘接层经 600 ℃ 保温后,仍结合紧密,基本保持完好,800 ℃ 保温后则部分被氧化,出现了孔洞和微裂纹。以上分析表明:600 ℃ 高温氧化时,ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> 陶瓷层均具有优良的隔热能力,使得粘结层基本保持完好;800 ℃ 高温氧化时,ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> 陶瓷层的隔热能力减弱,使得粘结层出现了不同程度的孔洞和微裂纹。

由于都采用 NiCrAl 粘结层,而 ZrO<sub>2</sub> 的热膨胀系数较 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 高,与粘结层和铜合金基体的热膨胀系数匹配度更好,残余应力较小,故其高温下热应力的影响较小。随着氧化温度的进一步升高,粘结层与铜合金基体连接界面局部成为热力学性能的跃变点和结合强度薄弱点,导致氧化严重。

为了进一步研究两种涂层的抗高温氧化能力,对图 3 中的 1—4 区域进行能谱分析,结果如图 4 所示。

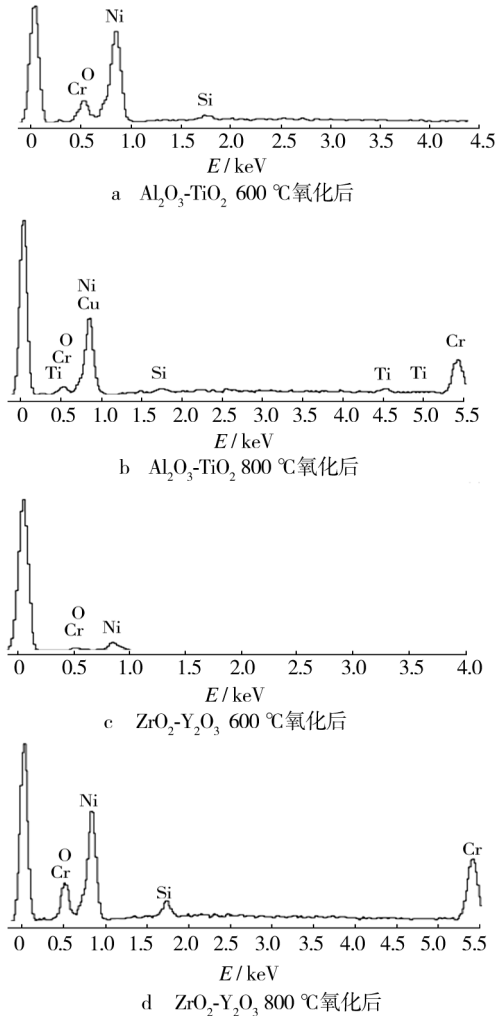


图 4 粘接层能谱分析

Fig. 4 Energy dispersive spectrometry of bonding layer

$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  在 600 °C 氧化后,粘接层(区域1)可能由  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  和  $\text{NiO}$  组成,而在 800 °C 氧化后,粘接层(区域2)可能由  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{NiO}$  和  $\text{CuO}$  组成。这可能是由于在 800 °C 高温氧化时,粘结层因氧化严重而受损,靠近基体与粘结层界面的部分铜扩散至粘结层中被氧化;另一方面,  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  氧化物陶瓷层中定型的  $\text{TiO}_2$  扩散至粘结层,导致粘结层出现了  $\text{Ti}$  和  $\text{Cu}$  元素,也说明了粘结层是高温氧化时最薄弱的环节。 $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$  在 600 °C 氧化后,粘接层(区域3)可能由  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  和  $\text{NiO}$  组成;而在 800 °C 氧化后,粘接层(区域4)可能由  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  和  $\text{NiO}$  组成。区域4的氧含量略高于区域3,说明随着温度的升高,粘结层氧化进一步加剧。

图5为两种涂层氧化质量增量与时间的关系曲线。由图5可知,  $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  涂层都具有优良的抗高温氧化性能。随着保温温度的提高和保温时间的延长,两种涂层的氧化质量增量均有所增加。同一保温温度下,  $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$  涂层的抗高温氧化性能优于  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  涂层。

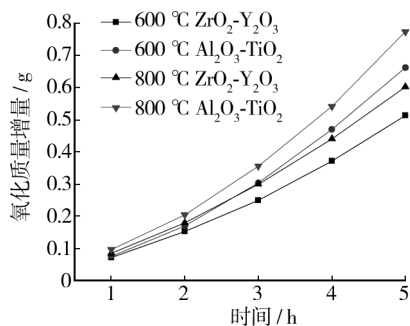


图5 氧化质量增量与时间的关系

Fig. 5 Curve of oxidation weight gain and time

### 3 结论

1) 等离子喷涂工艺制备的  $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  涂层都具有明显的层状结构,涂层结合紧密,内部孔洞细小。

2)  $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  涂层的显微硬度较  $\text{NiCrAl}$  粘结层和铜合金基体有明显提高,  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  涂层的显微硬度最高,达 628HV。

3)  $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  涂层都具有优良的抗高温氧化性能,  $\text{NiCrAl}$  粘结层是整个涂层最薄弱的环节,  $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$  涂层的抗高温氧化性能优于  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  涂层。

### 参考文献

- [1] GOWARD G W. Progress in Coatings for Gas Turbine Airfoils[J]. Surface and Coatings Technology, 1998, 108: 73—79.
- [2] 周洪, 李飞, 何博, 等. 等离子喷涂热障涂层的隔热性分析[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(10): 1609—1615.  
ZHOU Hong, LI Fei, HE Bo, et al. Analyses on Thermal Barrier Effects of Zirconia Based Thermal Barrier Coatings[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2007, 17(10): 1609—1615.
- [3] 张燕, 张行, 刘朝辉, 等. 热喷涂技术与热喷涂材料的发展现状[J]. 装备环境工程, 2013, 10(3): 59—62.  
ZHANG Yan, ZHANG Hang, LIU Zhao-hui, et al. Development Status of Thermal Spray Technology and Thermal Spray Materials[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(3): 59—62.
- [4] PADTURE N P, GELL M, JORDAN E H. Thermal Barrier Coatings for Gas-turbine Engine Applications[J]. Science, 2002, 296(5566): 280—284.
- [5] 冯拉俊, 惠博, 梁天权. 等离子喷涂  $\text{NiAl-Al}_2\text{O}_3$  梯度陶瓷涂层的性能研究[J]. 表面技术, 2005, 34(2): 15—17.  
FENG La-jun, HUI Bo, LIANG Tian-quan. Research on the Properties of Plasma Sprayed  $\text{NiAl-Al}_2\text{O}_3$  Gradient Ceramic Coatings[J]. Surface Technology, 2005, 34(2): 15—17.
- [6] 徐心洁, 贺毅, 马东林, 等. 等离子喷涂  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-13%TiO}_2$  复合陶瓷涂层的组织及热氧化性能的研究[J]. 表面技术, 2010, 39(1): 15—19.  
XU Xin-jie, HE Yi, MA Dong-lin, et al. Study on the Structure and Thermal Oxidization Properties of Plasma-sprayed  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-13%TiO}_2$  Composite Ceramic Coatings[J]. Surface Technology, 2010, 39(1): 15—19.
- [7] 成志芳, 马壮, 卢林. 等离子喷涂  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-13%TiO}_2$  涂层微观组织形貌分析[J]. 表面技术, 2012, 41(3): 9—11.  
CHENG Zhi-fang, MA Zhuang, LU Lin. The Micrographs Analysis of Plasma Sprayed  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-13%TiO}_2$  Coatings[J]. Surface Technology, 2012, 41(3): 9—11.
- [8] RICO A, RODRIGUEZ J, OTERO E, et al. Wear Behaviour of Nanostructured Alumina-Titania Coatings Deposited by Atmospheric Plasma Spray[J]. Wear, 2009, 267(5): 1191—1197.
- [9] JAFARZADEH K, VALEFI Z, GHAVIDEL B. The Effect of Plasma Spray Parameters on the Cavitation Erosion of  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  Coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2010, 205(7): 1850—1855.
- [10] YUSOFF N H N, GHAZALI M J, ISA M C, et al. Optimization of Plasma Spray Parameters on the Mechanical Properties of Agglomerated  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-13%TiO}_2$  Coated Mild Steel[J]. Materials & Design, 2012, 39: 504—508.



- Polystyrene[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2006, 91:1504—1512.
- [7] 何建新,李继红,胡滨,等. 改性聚苯乙烯材料自然环境老化研究[J]. *表面技术*, 2008, 37(5):26—27.  
HE Jian-xin, LI Ji-hong, HU Bin, et al. Study on Natural Weathering Behavior of Modified Polystyrene[J]. *Surface Technology*, 2008, 37(5):26—27.
- [8] JOS'E S V, JUAN L G, SONJA R, et al. Oxidation of Polystyrene Aerosols by VUV-photolysis and/or Ozone[J]. *Photochem Photobiol Sci*, 2009, 8(7):944—952.
- [9] 萧以德,王光雍,李晓刚,等. 我国西部地区大气环境腐蚀性及其材料腐蚀特征[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2003, 23(4):248—254.  
XIAO Yi-de, WANG Guang-yong, LI Xiao-gang, et al. Corrosion Behavior of Atmospheric Environment and Corrosion Feature of Materials in Our Western Area[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2003, 23(4):248—254.
- [10] 张三平,萧以德. 应重视西部环境对材料的腐蚀[J]. *材料保护*, 2002, 35(7):58—60.  
ZHANG San-ping, XIAO Yi-de. Recognition of Effect of Western Area on Materials Corrosion[J]. *Materials Protection*, 2002, 35(7):58—60.
- [11] 马艳秋,王仁辉,刘树华,等. 材料自然老化手册[M]. 北京:中国石化出版社, 2004.
- MA Yan-qiu, WANG Ren-hui, LIU Shu-hua, et al. *Handbook of Material Weathering* [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2004.
- [12] 叶荣根,肖春霞,蔡绪福,等. 苯乙烯树脂抗老化研究进展[J]. *塑料*, 2008, 37(4):72—73.  
YE Rong-gen, XIAO Chun-xiao, CAI Xu-fu, et al. Development of the Study on Styrenic Resins Anti-aging[J]. *Plastics*, 2008, 37(4):72—73.
- [13] 魏薇,肖敏,何建新. 军用包装箱材料自然环境老化 XPS 研究[J]. *装备环境工程*, 2008, 5(5):42—44.  
WEI Wei, XIAO Min, HE Jian-xin. Study on Natural Weathering Behavior of Plastics Ammunition Package[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2008, 5(5):42—44.
- [14] 宣卫芳,王一临,胥泽奇. 弹药塑料包装材料自然环境老化现象研究[J]. *装备环境工程*, 2006, 3(5):28—30.  
XUAN Wei-fang, WANG Yi-lin, XU Ze-qi. Study of Natural Weathering of Plastics Used in Ammunition Packaging[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2006, 3(5):28—30.
- [15] 钟世云,许乾慰,王公善. 聚合物降解与稳定化[M]. 北京:化学工业出版社, 2002.  
ZHONG Shi-yun, XU Qian-wei, WANG Gong-shan. *Degradation and Stabilization of Polymer* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002.
- .....
- (上接第 67 页)
- [11] 柯培玲,武颖娜,王启民,等. 爆炸喷涂空心球形氧化锆热障涂层的抗热冲击性能[J]. *金属学报*, 2004, 40(11):1179—1182.  
KE Pei-ling, WU Ying-na, WANG Qi-min, et al. Thermal Fatigue Behaviors of Thermal Barrier Coatings Deposited by Detonation Gun with Hollow Spherical Powder[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2004, 40(11):1179—1182.
- [12] MORSI M S, EL GWAD S A A, SHOEIB M A, et al. Effect of Air Plasma Sprays Parameters on Coating Performance in Zirconia-based Thermal Barrier Coatings[J]. *Int J Electrochem Sci*, 2012, 7:2811—2831.
- [13] HOSPACH A, MAUER G, VABEN R, et al. Columnar-structured Thermal Barrier Coatings (TBCs) by Thin Film Low-pressure Plasma Spraying (LPPS-TF)[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2011, 20(1/2):116—120.
- [14] GARCIA E, MESQUITA-GUIMARÃES J, MIRANZO P, et al. Mullite and Mullite/ $\text{ZrO}_2$ -7%  $\text{Y}_2\text{O}_3$  Powders for Thermal Spraying of Environmental Barrier Coatings[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2010, 19(1/2):286—293.
- [15] SHINODA K, COLMENARES-ANGULO J, VALAREZO A, et al. Effect of Deposition Rate on the Stress Evolution of Plasma-sprayed Yttria-stabilized Zirconia[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2012, 21(6):1224—1233.
- [16] 王世兴,袁涛,詹华,等. 不同结构等离子喷涂热障涂层的性能研究[J]. *表面技术*, 2013, 42(1):21—24.  
WANG Shi-xing, YUAN Tao, ZHAN Hua, et al. Research on Properties of Plasma Sprayed Thermal Barrier Coatings with different Microstructure[J]. *Surface Technology*, 2013, 42(1):21—24.
- [17] 黄燕滨,邵新海,宋高伟,等. 陶瓷涂层性能影响因素及工艺优化研究[J]. *装备环境工程*, 2012, 9(1):90—93.  
HUANG Yan-bin, SHAO Xin-hai, SONG Gao-wei, et al. Research of Influencing Factors on Performance and Process Optimization of Ceramic Coating[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2012, 9(1):90—93.
- [18] 柯德庆,潘应君,童向阳. 纯铜表面等离子喷焊 Ni60 涂层组织及性能的研究[J]. *表面技术*, 2013, 42(4):91—93.  
KE De-qing, PAN Ying-jun, TONG Xiang-yang. Study on the Microstructure and Properties of Ni60 Coating by Plasma Spray Welding on Copper[J]. *Surface Technology*, 2013, 42(4):91—93.