

等离子喷涂 NiCoCrAlY/Al₂O₃ 高温固体润滑耐磨涂层的抗氧化性能研究

曹玉霞¹, 杜令忠², 张伟刚², 兰叶³, 黄传兵²

- (1. 唐山学院 环境与化学工程系, 河北 唐山 063000;
2. 中国科学院过程工程研究所 多相复杂系统国家重点实验室, 北京 100190;
3. 博天环境集团股份有限公司, 北京 100082)

摘要: 目的 研究等离子喷涂 NiCoCrAlY/Al₂O₃ 高温固体润滑耐磨涂层在 850 ℃ 时的高温抗氧化性能和抗氧化机理。方法 采用喷雾造粒、化工冶金包覆技术制备 NiCoCrAlY/Al₂O₃ 复合粉体, 并采用等离子喷涂技术在 45# 钢表面制备 NiCoCrAlY/Al₂O₃ 复合涂层。采用 SEM 和 XRD 研究粉体和涂层的显微结构和物相组成, 并采用马弗炉研究复合涂层在 850 ℃ 的恒温氧化动力学曲线, 通过研究氧化 96 h 以后涂层表面的组织形貌, 探讨 NiCoCrAlY/Al₂O₃ 复合涂层的抗氧化机理。结果 NiCoCrAlY 合金层均匀致密地包覆在 Al₂O₃ 颗粒的表面, 包覆层厚度约为 3~5 μm。复合粉体的主要组成为 Al₂O₃ 相和 NiCoCrAlY 合金相, 没有其他杂质相的存在。等离子喷涂 NiCoCrAlY/Al₂O₃ 复合涂层氧化动力学曲线分为大斜率直线、抛物线和系数几乎为 0 的抛物线等 3 个阶段。氧化 96 h 以后, 涂层的氧化质量增量为 4.9 mg/cm² 左右, 表面形成了一层连续的氧化物保护膜, 经 EDX 分析, 氧化膜层主要由 Al、O、Cr 和 Ni 组成。结论 等离子喷涂 NiCoCrAlY/Al₂O₃ 复合涂层具有良好的高温抗氧化性能, 涂层中 Ni、Cr、Al 的氧化以及硬质相 Al₂O₃ 的加入是涂层抗氧化的主要原因。

关键词: NiCoCrAlY/Al₂O₃; 复合涂层; 等离子喷涂; 抗氧化

中图分类号: TG174.442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2015)04-0048-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.04.009

Study on Oxidation Resistance of Atmospheric Plasma-sprayed NiCoCrAlY/Al₂O₃ Wear-resistant Coatings at Elevated Temperature

CAO Yu-xia¹, DU Ling-zhong², ZHANG Wei-gang², LAN Ye³, HUANG Chuan-bing²

- (1. Department of Environmental and Chemical Engineering, Tangshan College, Tangshan 063000, China;
2. State Key Laboratory of Multi-phase Complex Systems, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of

收稿日期: 2015-01-08; 修订日期: 2015-01-27

Received: 2015-01-08; Revised: 2015-01-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(51471159); 河北省自然科学基金项目(E2015105068); 唐山市科技计划项目(14130286a); 唐山学院材料科学与工程重点学科(TSC2013003)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51471159); Natural Science Foundation of Hebei (E2015105068); Science and Technology Plans of Tangshan (14130286a); Key Disciplines of Materials Science and Engineering of Tangshan College(TSC2013003)

作者简介: 曹玉霞(1980—), 女, 讲师, 主要研究方向为复合材料。

Biography: CAO Yu-xia(1980—), Female, Lecturer, Research focus: composite materials.

通讯作者: 黄传兵(1981—), 男, 副研究员, 主要研究方向为涂层材料。

Corresponding author: HUANG Chuan-bing(1981—), Male, Associate professor, Research focus: composite materials.

Sciences, Beijing 100190, China; 3. Botian Environmental Group Limited by Share Ltd, Beijing 100082, China)

ABSTRACT: Objective To study the oxidation resistance and oxidation-resistance mechanism of atmospheric plasma-sprayed NiCoCrAlY/Al₂O₃ wear-resistant coatings at 850 °C. **Methods** The NiCoCrAlY/Al₂O₃ composite powder was prepared by the technology of spray granulation, chemical and metallurgical coating and solid state alloying. The NiCoCrAlY/Al₂O₃ composite coating was prepared by atmospheric plasma-spray technology using the prepared powder on the surface of 45# steel. The microstructure and phase composition of the powder and coating were studied by SEM and XED. The oxidation kinetic curve at constant 850 °C was explored with muffle furnace and the oxidation resistance mechanism of the APS sprayed NiCoCrAlY/Al₂O₃ composite coatings was investigated through analysis of morphology of the coating surface after 96 h of oxidation. **Results** The Al₂O₃ was evenly and closely coated with NiCoCrAlY alloy and the thickness of NiCoCrAlY alloy was 3 ~ 5 μm. The phase compositions of composite powder were mainly NiCoCrAlY and Al₂O₃ without other impurities. The oxidation kinetics curves of the coatings can be divided into three stages: severely sloping, parabolic and slightly parabolic stages. The value of oxidation weight gain was about 4.9 mg/cm² after 96 h of oxidation. The oxide film was formed and the phase compositions of oxide film were Al₂O₃, Cr and Ni according to the EDX analysis. **Conclusion** The NiCoCrAlY/Al₂O₃ composite coating exhibited excellent oxidation resistance property. The reason of oxidation resistance of the coating was the oxidation of Ni, Al and the addition of Al₂O₃.

KEY WORDS: NiCoCrAlY/Al₂O₃; composite coating; plasma spray; oxidation resistance

航空发动机的高压压气机和涡轮轴部位以及热能电力装备中的摩擦运动零部件均在高温热腐蚀条件下工作,这就要求它们不仅应具有良好的润滑耐磨性能,而且应具有很好的抗高温氧化和耐高温热腐蚀性能。然而,单一材料的零部件很难满足这种苛刻的要求,因此,在其表面包覆一层高温防护涂层是最有效的解决方法之一^[1-3]。针对高温防护涂层材料,国内外科学工作者做了许多研究^[4-7]。其中,Ni 基高温合金的抗氧化性和抗高温热腐蚀性能优良,是目前国际上应用最广泛的高温固体润滑耐磨涂层的基体材料之一^[8-10]。同时,Al₂O₃ 具有良好的物理化学性能和高硬度,被广泛用作高温固体润滑耐磨涂层的耐磨材料^[11-13]。因此,文中采用 NiCoCrAlY 为基体材料,以 Al₂O₃ 为耐磨材料,制备高温固体润滑耐磨涂层。

高温固体润滑耐磨涂层的制备多采用热喷涂技术。与其他方法相比,热喷涂技术具有诸多优点:工艺灵活,适应性强;能够喷涂金属、陶瓷和塑料等多种材料;不受施工场所和被喷涂工件尺寸的限制;对基体材料的热影响比较小。因此,热喷涂技术在高温防护涂层的制备中得到了广泛的应用^[14-17],特别是其

中的等离子喷涂技术应用尤为广泛。

文中采用等离子喷涂技术在 45#钢表面制备了 NiCoCrAlY/Al₂O₃ 高温固体润滑耐磨涂层,并对该涂层的抗氧化性能进行了研究,探讨了 NiCoCrAlY/Al₂O₃ 高温固体润滑耐磨涂层的抗氧化机理。

1 实验

1.1 材料制备

将化学纯 Al₂O₃ 粉末喷雾造粒成 45 ~ 125 μm 的球状颗粒,采用化工冶金包覆技术制备 NiCoCrAlY/Al₂O₃ 复合粉体。复合粉体的化学成分(以质量分数计)为: Ni 37%, Co 1.25%, Cr 8.75%, Al 2.75%, Y 0.25%, Al₂O₃ 50%。

实验选用的基体材料为 45#钢(40 mm×30 mm×3 mm),采用 APS-2000 等离子喷涂设备在基体表面制备涂层。为了获得清洁、活性高的表面,喷涂之前在基体表面进行喷砂预处理。制备涂层的工艺参数见表 1。

表 1 等离子喷涂 NiCoCrAlY/Al₂O₃ 涂层工艺参数

Tab.1 Thermal-spray parameters of the APS sprayed NiCoCrAlY/Al₂O₃ coating

Voltage/V	Current/A	Powder feed rate /(g · min ⁻¹)	Spray distance /mm	H ₂		Ar	
				Flow rate/ (L · min ⁻¹)	Pressure / MPa	Flow rate/ (L · min ⁻¹)	Pressure / MPa
65	500	30	120	2.5	0.6	40	0.6

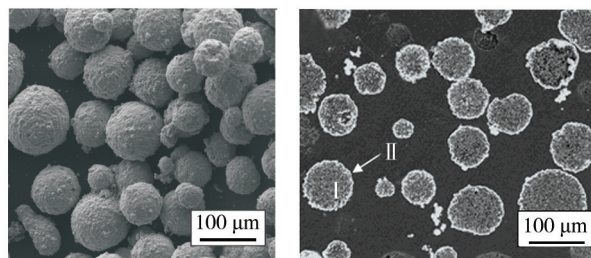
1.2 材料表征

采用 FEI Quanta 200 FEG 电子扫描显微镜观察粉体和涂层的组织结构,用 Philips X'PERT X 射线衍射仪对粉体进行物相表征,采用 SX-5-12 型马弗炉对粉体进行抗氧化性实验。

2 结果与分析

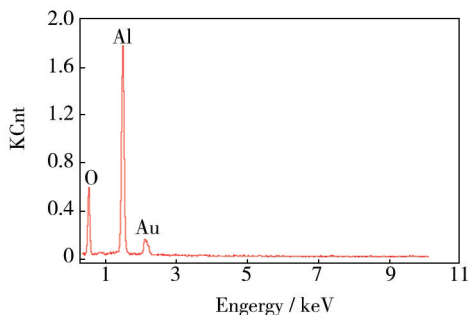
2.1 粉体的结构和物相分析

等离子喷涂复合粉末的表面和截面 SEM 形貌如图 1 所示。从图 1a 中可以看出,复合粉体均呈球形,颗粒分布均匀,粒度在 30 ~ 100 μm 左右。从图 1b 中可以看出,灰色球状颗粒为 Al_2O_3 ,它主要是作为涂层

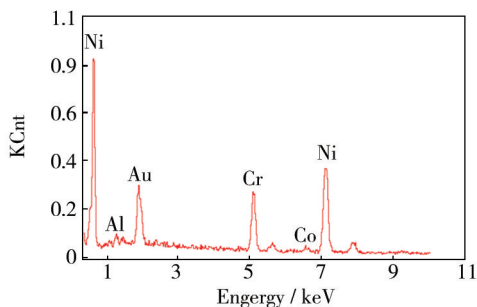


a 表面

b 截面



c b图 I 区域EDX



d b图 II 区域EDX

图 1 等离子喷涂复合粉末的 SEM 形貌及成分分析

Fig. 1 SEM morphology and composition analysis of the APS sprayed composite powders: a) surface morphology; b) cross-sectional morphology; c, d) EDX of Fig. b

的耐磨相;白色部分为 NiCoCrAlY 合金层,主要作为涂层的粘结相和高温润滑相。NiCoCrAlY 合金层均匀致密地包覆在 Al_2O_3 颗粒的表面,包覆层厚度约为 3 ~ 5 μm 。

等离子喷涂 NiCoCrAlY/ Al_2O_3 复合粉末的 XRD 图谱如图 2 所示。可以看出,粉末的主要组成为 Al_2O_3 相和 NiCoCrAlY 合金相,没有其他杂质相的存在。

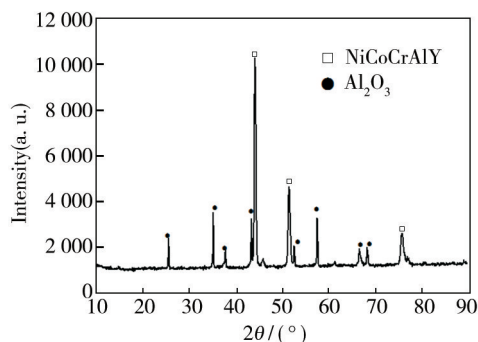
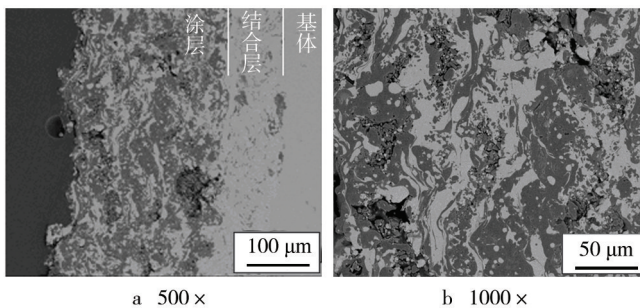


图 2 NiCoCrAlY/ Al_2O_3 复合粉末的 XRD 图谱

Fig. 2 XRD pattern of the NiCoCrAlY/ Al_2O_3 composite powder

2.2 涂层的结构分析

等离子喷涂 NiCoCrAlY/ Al_2O_3 复合涂层典型的 SEM 形貌如图 3 所示。从图 3a 中可以看出,涂层、结合层以及基体之间结合良好。涂层呈典型的扁平状结构,各层颗粒间结合良好,无较大的空隙和明显的裂纹等缺陷存在。从图 3b 可以看出,颜色较暗的灰色区域为 Al_2O_3 ,颜色较亮的白色区域为 NiCoCrAlY 相,而黑色区域为空隙。经灰度法测量,涂层的孔隙率为 $(2.84 \pm 0.5)\%$ 。同时,由于 Al_2O_3 的熔融温度较高,涂层中有少量未熔融的 Al_2O_3 颗粒存在。



a 500 ×

b 1000 ×

图 3 等离子喷涂 NiCoCrAlY/ Al_2O_3 复合涂层的 SEM 形貌
Fig. 3 SEM morphology of APS sprayed NiCoCrAlY/ Al_2O_3 composite coatings

2.3 涂层的氧化性能分析

对于高温润滑耐磨涂层来说,涂层的抗氧化性能

是影响涂层使用寿命的一个非常重要的性能指标。等离子喷涂 NiCoCrAlY/Al₂O₃ 高温抗氧化复合涂层在 850 ℃ 的恒温氧化动力学曲线和拟合曲线如图 4 所示。从图 4a 中可以看出,氧化时间为 0~4 h 时,涂层呈系数较大的直线迅速增重,对应图 4b 中线的斜率较大;氧化时间为 4~48 h 时,涂层呈系数较小的抛物线缓慢增重,对应图 4b 中直线的斜率较小;氧化时间为 48~96 h 时,涂层质量增量基本接近于 0;氧化 96 h 以后,氧涂层的氧化质量增量为 4.9 mg/cm² 左右。在氧化初期,涂层增重迅速,主要是因为涂层中金属的氧化;氧化中期,涂层进入缓慢氧化阶段,这主要是因为涂层表面生成了氧化膜,氧原子在涂层内部扩散缓慢,减缓了涂层内部金属与氧气的结合;氧化后期,涂层增重基本为 0,这主要是因为随着氧化膜厚度的增加,涂层内部的金属基本不会氧化。

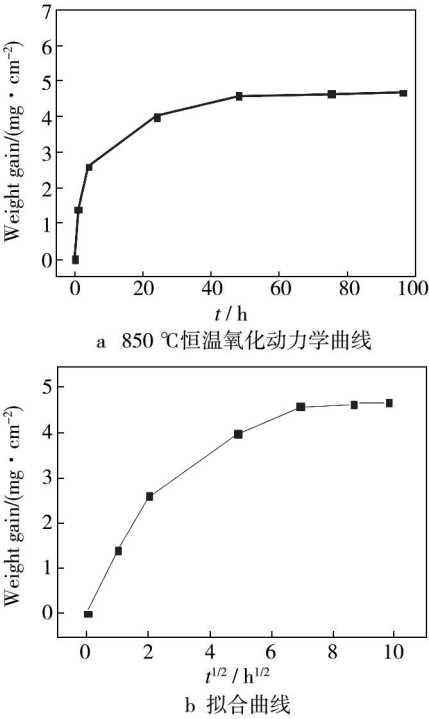


图 4 等离子喷涂 NiCoCrAlY/Al₂O₃ 复合涂层 850 ℃ 恒温氧化动力学曲线及拟合曲线

Fig. 4 Oxidation kinetic curve (a) and fitting curve (b) of the APS sprayed NiCoCrAlY/Al₂O₃ composite coatings at 850 ℃

等离子喷涂 NiCoCrAlY/Al₂O₃ 复合涂层材料在 850 ℃ 恒温氧化 96 h 后的截面形貌如图 5 所示。可以看出,氧化 96 h 以后,涂层表面未出现明显的剥落和裂纹等缺陷。在涂层表面有一层连续的氧化膜形成,且内部涂层与氧化膜层结合良好。由氧化膜层的 EDX 分析可以看出,涂层表面的氧化膜层主要由 Al,

O, Cr 和 Ni 组成,这说明 Al, Cr 和 Ni 金属的氧化物是组成氧化膜的主要成分。在合金中 Al 含量较少,而氧化膜层中 Al 的含量较高,这有可能是因为硬质相 Al₂O₃ 的加入造成的。可见,硬质相 Al₂O₃ 的加入对于涂层抗氧化性能的提高是有利的。同时,涂层内部未发现氧化现象。

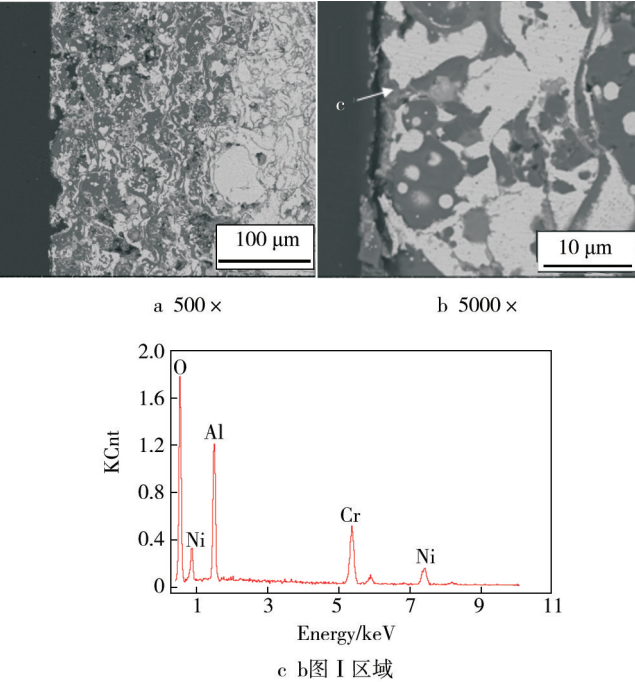


图 5 等离子喷涂 NiCoCrAlY/Al₂O₃ 复合涂层 850 ℃ 恒温氧化 96 h 后截面形貌及成分分析

Fig. 5 Cross-section morphology and composition analysis of the APS sprayed NiCoCrAlY/Al₂O₃ composite coating after oxidation for 96 h at 850 ℃

2.4 涂层的抗氧化机理分析

在 NiCoCrAlY 合金中,用于提高合金材料抗氧化性的元素主要是 Al 和 Cr,且 Al 对于合金材料抗氧化性的提高要优于 Cr。目前,科学工作者在 NiCoCrAlY 合金的抗氧化机理方面做了大量的研究^[18-19]。一般认为,NiCoCrAlY 合金的氧化过程分为 3 个阶段:初期氧化阶段、中期过渡态氧化阶段和后期稳态氧化阶段^[20]。在氧化初期,合金的氧化速度很快,此时所有的金属均会迅速发生氧化,在特别短的一段时间内形成以 Al₂O₃, NiO 和 Cr₂O₃ 为主的混合氧化物膜。在氧化中期,合金中的 Cr 把氧化初期生成的 NiO 中的 Ni 还原出来,生成 Cr₂O₃,其反应方程式如式(1)所示。之后,O 在氧化物保护层中发生缓慢扩散,合金中的 Cr 会随之发生选择性氧化,从而进入后期稳态氧化阶段。



等离子喷涂 NiCoCrAlY/Al₂O₃ 复合涂层与 NiCoCrAlY 合金的氧化过程相似,也分为氧化初期的大斜率直线、氧化中期的抛物线和氧化后期斜率几乎为 0 的直线等 3 个氧化阶段。在氧化初期,氧化质量增加过程十分明显,涂层表面的金属可以自由和空气中的 O₂ 接触而发生氧化,复合涂层的氧化增重曲线与大斜率直线类似。此时界面反应起主导作用,涂层表面生成以 Al₂O₃, NiO 和 Cr₂O₃ 为主的混合氧化物膜。氧化中期,随着一层连续的氧化物膜形成,氧化物膜对 O₂ 起到了明显的阻隔作用,因此涂层的氧化速度明显减慢,涂层的氧化增重曲线与系数较小的抛物线类似。氧化后期,氧原子在较厚的氧化物膜中的扩散速度非常缓慢,氧化增重曲线与斜率几乎为 0 的直线类似。同时,由于涂层中 Al₂O₃ 的加入,涂层中金属与 O₂ 的接触面积明显减小,极大地提高了涂层的抗氧化性能。

3 结论

1) 采用喷雾造粒、化工冶金包覆技术制备了 NiCoCrAlY/Al₂O₃ 复合粉体,并采用等离子喷涂技术制备了 NiCoCrAlY/Al₂O₃ 复合涂层。

2) NiCoCrAlY/Al₂O₃ 复合涂层具有良好的高温抗氧化性能,氧化 96 h 以后,涂层的氧化质量增量为 4.9 mg/cm² 左右。

3) 涂层中 Ni, Cr 和 Al 的氧化以及硬质相 Al₂O₃ 的加入是涂层抗氧化的主要原因。

参考文献

- [1] HUANG Chuan-bing, DU Ling-zhong, ZHANG Wei-gang. Preparation and Characterization of Atmospheric Plasma-sprayed NiCr/Cr₃C₂-BaF₂ · CaF₂ Composite Coating [J]. Surface and Coating Technology, 2009, 203: 3058—3063.
- [2] 黄传兵, 杜令忠, 刘伟, 等. 等离子喷涂 CoCrAl-B₄C 涂层的微观结构与性能 [J]. 表面技术, 2012, 41(3): 1—4. HUANG Chuan-bing, DU Ling-zhong, LIU Wei, et al. Microstructure and Properties of Plasma Sprayed CoCrAl-B₄C Coating [J]. Surface Technology, 2012, 41(3): 1—4.
- [3] 黄传兵. 航空发动机高温固体润滑-耐磨涂层的制备与研究 [D]. 北京: 中国科学院过程工程研究所, 2009. HUANG Chuan-bing. Study and Preparation and Performance of Turbo-engine's Coatings with Solid Lubricating and Wear-resistant Effects Used at Elevated Temperatures [D].

Beijing: Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, 2009.

- [4] HUANG Chuan-bing, DU Ling-zhong, ZHANG Wei-gang. Effects of Solid Lubricant Content on the Microstructure and Properties of NiCr/Cr₃C₂-BaF₂ · CaF₂ Composite Coatings [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 479: 777—784.
- [5] SIDHU T S, PRAKASH S, AGRAWAL R D. Hot Corrosion Studies of HVOF Sprayed Cr₃C₂-NiCr and Ni-20Cr Coatings on Nickel-based Superalloy at 900 °C [J]. Surface and Coating Technology, 2006, 201: 792—800.
- [6] DELLACORTE C, EDMONDS B J. Thermal Processing Effects on the Adhesive Strength of PS304 High Temperature Solid Lubricant Coatings [J]. Tribology International, 2002, 45(4): 499—505.
- [7] LIU G H, ROBBEVALLOIRE F, GRAS R, et al. Improvement in Tribological Properties of Chromium Oxide Coating at High Temperature by Solid Lubricants [J]. Wear, 1993, 160: 181—189.
- [8] DONNET C, ERDEMIR A. Historical Developments and New Trends in Tribological and Solid Lubricant Coatings [J]. Surface and Coating Technology, 2004, 180/181: 76—84.
- [9] DU Ling-zhong, HUANG Chuan-bing, ZHANG Wei-gang, et al. Effect of NiCr Clad BaF₂ · CaF₂ Addition on Wera Performance of Plasma Sprayed Chromium Carbide-Nichrome Coating [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2009, 203: 3058—3065.
- [10] MURTHY J K N, VENKATARAMAN B. Abrasive Wear Behaviour of WC-CoCr and Cr₃C₂-20 (NiCr) Deposited by HVOF and Detonation Spray Processes [J]. Surface and Coating Technology, 2006, 200: 2642—2652.
- [11] 曹玉霞. 航空发动机高温固体润滑耐磨涂层的制备与性能研究 [D]. 北京: 中国科学院过程工程研究所, 2012. CAO Yu-xia. Preparation and Performance Study on the Solid Lubricating and Wear-resistant Coatings in Turbo-engine at Elevated Temperatures [D]. Beijing: Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, 2012.
- [12] HAMDY A S, SHOEIB M A, HADY H, et al. Corrosion Behavior of Electroless Ni-P Alloy Coatings Containing Tungsten or Nano-scattered Alumina Composite in 3.5% NaCl Solution [J]. Surface and Coating Technology, 2007, 202: 162—171.
- [13] CAO Yu-xia, HUANG Chuan-bing, LIU Wei, et al. Effects of Boron Carbide Content on the Microstructure and Properties of Atmospheric Plasma-Sprayed NiCoCrAlY/Al₂O₃-B₄C Composite Coatings [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2014, 23(4): 716—724.
- [14] OUYANG J H, SASAKI S. Tribological Characteristics of

- Low-pressure Plasma-sprayed Al₂O₃ Coating from Room Temperature to 800 °C [J]. Tribology International, 2005, 38:49—57.
- [15] KIM G, CHOI H, HAN C, et al. Characterization of Atmospheric Plasma Spray NiCr-Cr₂O₃-Ag-CaF₂/BaF₂ Coatings [J]. Surface and Coating Technology, 2005, 195: 107—115.
- [16] 毛杰, 宋进兵, 邓畅光, 等. 氧化铝涂层的超音速等离子喷涂参数影响及硬度分析[J]. 表面技术, 2014, 43(4): 110—114.
- MAO Jie, SONG Jin-bing, DENG Chang-guang, et al. Parameter Effect and Microhardness Analysis of Al₂O₃ Coatings Prepared by the Supersonic Plasma Spraying Technique [J]. Surface Technology, 2014, 43(4): 110—114.
- [17] SIDHU H S, SIDHU B S, PRAKASH S. Wear Characteristics of Cr₃C₂-NiCr and WC-Co Coatings Deposited by LPG Fueled HVOF [J]. Tribology International, 2010, 43: 887—890.
- [18] DOMINIC M, BRYAN D G, MATHIEU B. Thermal Stability and Oxidation Behavior of Nanostructured NiCoCrAlY Coatings [J]. Surface and Coating Technology, 2011, 205: 4162—4168.
- [19] 徐一, 缪强, 梁文萍, 等. γ-TiAl 表面 NiCrAlY/Al 复合涂层的高温氧化行为[J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(6): 1407—1411.
- XU Yi, MIAO Qiang, LIANG Wen-ping, et al. Oxidation Behavior of γ-TiAl Alloy with NiCrAlY/Al Duplex Coating at 950 °C [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(6): 1407—1411.
- [20] 王宏宇. 纳米颗粒增强 NiCoCrAlY 激光熔覆涂层制备及其特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- WANG Hong-yu. Research on Preparation and Characteristics of NiCoCrAlY Laser Cladded Coatings Reinforced by Nano-particles [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.

(上接第 41 页)

- OU Xian, DENG Chang-guang, WANG Ri-chu, et al. Influences of the Supersonic Plasma Spraying Process on the Hardness Properties of Cr₂O₃ Coating [J]. Surface Technology, 2014, 43(1): 81—85.
- [14] 王立生, 林涛, 郭志猛, 等. 热处理对热浸镀镍基涂层磨料磨损的影响[J]. 表面技术, 2010, 39(6): 1—3.
- WANG Li-sheng, LIN Tao, GUO Zhi-meng, et al. Effect of Heat Treatment on Abrasive Wear of Hot Dipping Ni-based Coating [J]. Surface Technology, 2010, 39(6): 1—3.
- [15] 夏光明, 严淑群, 贺立, 等. TRT 叶片 Co-Cr 粉末防护涂层研究及应用[J]. 粉末冶金技术, 2012, 30(5): 376—380.
- XIA Guang-ming, YAN Shu-qun, HE Li, et al. The Research on Co-Cr Protective Coating of TRT Blade and Its Application [J]. Powder Metallurgy Technology, 2012, 30(5): 376—380.

(上接第 47 页)

- [28] 杜挺. 稀土元素在金属材料中的一些物理化学作用[J]. 金属学报, 1997, 33: 69—76.
- DU T. RE on the Physical and Chemical Role of Metal Materials [J]. Acta Metallurgica Sinica, 1997, 33: 69—76.
- [29] BRAMFITT B L. The Effect of Carbide and Nitride Additions on the Heterogeneous Nucleation Behavior of Liquid Iron [J]. Metallurgical and Materials Transactions, 1970, 1: 1987—1995.
- [30] KATAGIRI S, ISHIZAWA N. A New High Temperature Modification of Face-centered Cubic Y₂O₃ [J]. Powder Diffraction, 1993, 8(1): 60.
- [31] DE Mol Van Otterloo J L, DE Hosson J T M. Microstructural Features and Mechanical Properties of a Cobalt-based Laser Coating [J]. Acta Materialia, 1997, 45(3): 1225—1236.