

反应等离子喷涂 Al_2O_3 - TiB_2 -Al 复相涂层的反应机理

周小平, 王小军, 朱理奎

(湖北工业大学 绿色轻工材料湖北省重点实验室, 武汉 430068)

摘要: 目的 在铝合金表面制备 Al_2O_3 - TiB_2 -Al 复合涂层, 研究 Al, TiO_2 , B_2O_3 在等离子喷涂中的反应机理。方法 采用反应等离子喷涂技术在铝合金表面制备复合涂层, 应用扫描电镜与 X 射线衍射技术测试复合涂层的物相组成和显微组织, 并通过燃烧波淬熄试验分析等离子喷涂产物。结果 机械球磨可以有效降低粉末发生反应的活化能, 等离子喷涂最佳飞行距离范围为 150 ~ 200 mm。结论 喷涂粉末在飞行过程中发生反应, 经历了预热、熔化、分解、团聚等过程, 验证了最终引燃发生燃烧化学反应的机理。

关键词: 反应等离子喷涂; Al_2O_3 - TiB_2 -Al 复合涂层; 燃烧波淬熄试验; 燃烧反应

中图分类号: TG174.442

文献标识码: A

文章编号: 1001-3660(2014)04-0006-05

Reaction Mechanism of the Formation of Plasma-spraying Al_2O_3 - TiB_2 -Al Composite Coatings

ZHOU Xiao-ping, WANG Xiao-jun, ZHU Li-kui

(Hubei Provincial Key Laboratory of Green Materials for Light Industry, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

ABSTRACT: **Objective** To investigate the preparation of Al_2O_3 - TiB_2 -Al composite coating on the aluminum alloy surface, and analyze the reaction mechanism of Al, TiO_2 , B_2O_3 in plasma spraying. **Methods** The composite coating was prepared on the surface of aluminum alloy using plasma spraying technology. The phase composition and microstructure evaluation of composite coating layer were analyzed by scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction technology. The combustion products of combustion front quenching technique were tested. **Results** It was found that the activation energy of the powder reaction was effectively decreased by mechanical milling, and the optimal flying distance range of plasma spraying was 150 ~ 200 mm. **Conclusion** According to the results, the composite powder experienced the processes of preheating, melting, decomposition and agglomeration during the flight, which verified the mechanism of combustion reaction.

KEY WORDS: reactive plasma spraying; Al_2O_3 - TiB_2 -Al composite coatings; combustion front quenching technique; combustion reaction

铝合金表面等离子喷涂 Al_2O_3 ^[1], Al-B₄C^[2], Al-SiC^[3] 和 Al-CNT^[4] 涂层是提高铝合金耐磨性的有效途径之一, 但单一的 Al_2O_3 涂层脆性大、易剥落, 耐磨

性不能得到保证。添加 B₄C, SiC 陶瓷颗粒以及 CNT 作为喷涂材料, 涂层难以达到强化的效果。由于 TiB_2 相具有高硬度(3300HV)和高弹性模量(550 GPa), 且

收稿日期: 2014-02-21; 修订日期: 2014-04-09

Received: 2014-02-21; Revised: 2014-04-09

基金项目: 国家自然科学基金(51171062)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China(51171062)

作者简介: 周小平(1963—), 男, 武汉人, 博士, 教授, 主要研究方向为材料表面工程。

Biography: ZHOU Xiao-ping (1963—), Male, from Wuhan, Ph. D., Professor, Research focus: material surface engineering.

熔点高,耐磨损,耐腐蚀,高温化学稳定性优异,在 Al_2O_3 中添加 TiB_2 作为粘结剂制成的陶瓷材料保持了硼化物的“三维连续性”,因此具有极好的耐冲击性和耐磨性。制备 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiB}_2$ 复相陶瓷通常采用自蔓延燃烧合成法^[5],该方法工艺流程操作简单,生成物能避免或减少液相的粒子团聚现象,涂层的相界面清洁、干净、无污染且第二相细小弥散均匀分布。反应喷涂是热喷涂和自蔓延燃烧合成技术相结合发展起来的新技术,可用于制备金属陶瓷涂层,如在钢的表面制备 TiC-Fe ^[6-7], $\text{TiC-TiB}_2/\text{Fe}$ ^[8], TiC-Ni ^[9], $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Al}$ ^[10], $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cu}$ ^[11], 三元硼化物 (Mo_2FeB_2) 金属陶瓷涂层^[12-13]。

在低熔点的铝合金材料表面制备高硬度涂层,随着表面陶瓷化技术的研究日益广泛,逐渐成为铝合金表面改性技术的研究热点,具有广阔的发展前景。文中基于反应喷涂技术的优点,以 Al , B_2O_3 和 TiO_2 粉

末为原材料,通过反应等离子喷涂方法,在轻金属材料铝基表面制备与 Al 合金粘结性较好的复合涂层材料。

1 实验

等离子喷涂粉末原材料中 Al , TiO_2 和 B_2O_3 粉末的粒度和质量分数见表 1。基体材料的化学成分见表 2,试样尺寸为 $40\text{ mm}\times 40\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 。

表 1 粉末粒度和组成
Tab.1 Size and composition of the powder

粉末	质量分数/%	粒度/ μm
Al	48.5	20 ~ 30
TiO_2	27.5	30 ~ 40
B_2O_3	24.0	20 ~ 30

表 2 基体材料的化学成分
Tab.2 The chemical composition of matrix material

元素	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
质量分数/%	0.25	0.40	0.10	0.10	2.20 ~ 2.80	0.15 ~ 0.35	0.10 ~ 0.15	0.05 ~ 0.15	余量

喷涂粉末分为混合粉末和团聚粉末两种。将原材料放入搅拌器中,充分均匀混合,制成混合粉末;再放入球磨罐中,加入适量乙醇,球磨 24 h,干燥后加入适量聚乙烯醇(PVA)水溶液,经机械团聚法制粒,最后筛分得到符合要求的喷涂粉末。喷涂工艺见表 3。

表 3 等离子喷涂工艺参数
Tab.3 Technological parameters of plasma spraying

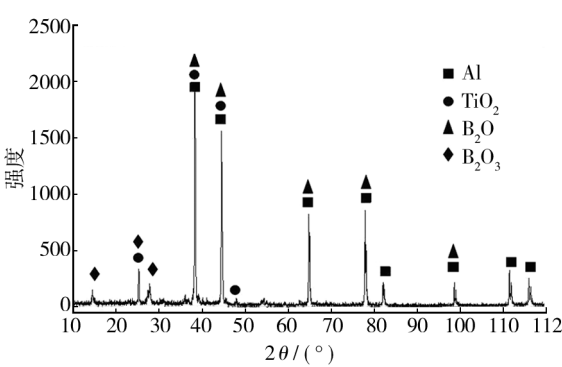
电流/ A	电压/ V	氩气流量/ ($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)	氢气流量/ ($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)	喷涂距 离/mm
550	65	40	6	180 ~ 200

2 结果与分析

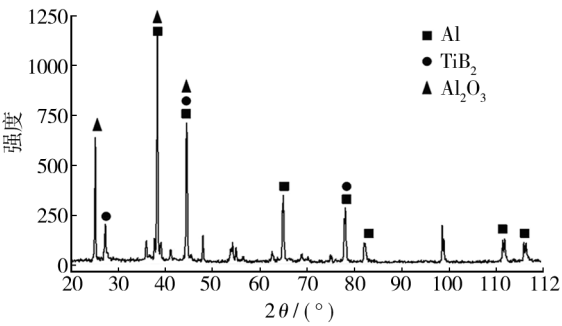
2.1 涂层相组成及组织分析

混合粉末和团聚粉末经等离子喷涂后,所得涂层的 XRD 图谱如图 1 所示,SEM 照片如图 2 所示。

团聚粉末等离子喷涂后,发生了化学反应 $10\text{Al}+3\text{B}_2\text{O}_3+3\text{TiO}_2\rightarrow 3\text{TiB}_2+5\text{Al}_2\text{O}_3$, 获得了 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiB}_2\text{-Al}$ 复合涂层。而混合粉末等离子喷涂后,并未发生上述



a 混合粉末涂层



b 团聚粉末涂层

图 1 等离子喷涂后涂层的 XRD
Fig. 1 XRD spectra of coating agglomerated powder

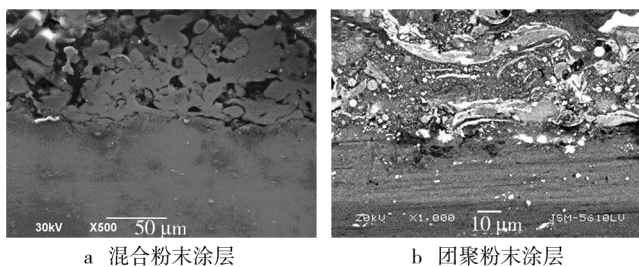


图2 等离子喷涂后涂层的SEM

Fig. 2 SEM micrographs of coating agglomerated powder

化学反应,不能获得 Al_2O_3 - TiB_2 -Al 复合涂层。XRD 图谱表明,混合粉末在等离子喷涂过程中, B_2O_3 部分分解,生成了 B_2O ^[14]。

2.2 涂层的反应机理分析

2.2.1 喷涂粉末的孕育

等离子喷涂涂层中的 Al_2O_3 和 TiB_2 相不是 Al, TiO_2 和 B_2O_3 粉末在球磨过程中产生的,球磨 24 h 后粉末的 XRD 图谱如图 3 所示,在球磨过程中, B_2O_3 部分分解生成 B_2O 。

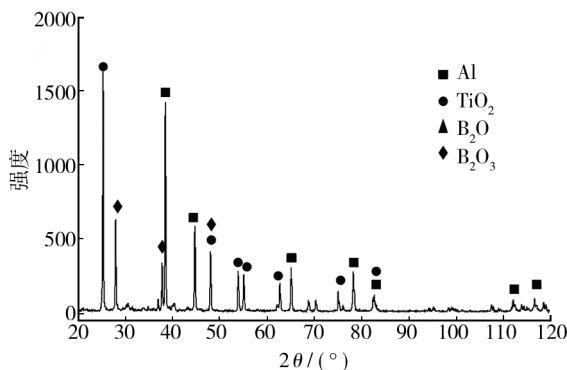


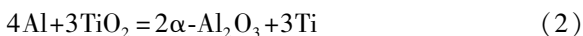
图3 球磨 24 h 后粉末的 XRD

Fig. 3 XRD spectra of the mixed powder after ball milling for 24 hours

对自蔓延高温合成 Al_2O_3 - TiB_2 复相陶瓷的研究表明^[15],在高温条件下,当反应温度升高到 1073 K, $n(\text{B}_2\text{O}_3) : n(\text{TiO}_2) = 1$ 时,Al- TiO_2 - B_2O_3 系混合粉末发生 $10\text{Al} + 3\text{TiO}_2 + 3\text{B}_2\text{O}_3 \rightarrow 5\text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{TiB}_2$ 的反应^[16],是反应(1)—(3)的综合:



$$\Delta G_T = -433.81747 + 0.09999T$$



$$\Delta G_T = -286.19775 + 0.05583T$$



$$\Delta G_T = -327.76011 + 0.02082T$$

从以上关系式计算得知,2500 K 时反应(1)—(2)的吉布斯自由能均为负值,2000 K 时反应(3)的吉布斯自由能也为负值,说明在该等离子喷涂温度条件下,反应(1)—(3)均能自发向右进行,即 Al 可以将 B_2O_3 和 TiO_2 还原,还原后的 B 和 Ti 能合成 TiB_2 。相同温度下,由上述方程式的热力学数据对比得知, TiB_2 不能直接从 B_2O_3 中被还原。由于 B_2O_3 比 TiB_2 吉布斯自由能低很多,因此形成 TiB_2 需分两步走,即在任何相同温度的条件下,Al 更容易将 B_2O_3 还原。图 1a 和图 3 中的 B_2O 相正是 B_2O_3 分解形成的。

等离子喷涂过程中,高温焰流能满足上述反应要求的临界温度条件,给反应的进行提供了初始条件,反应开始后产生大量的热量维持反应的进行,最终获得 Al_2O_3 和 TiB_2 。在相同的等离子喷涂工艺条件下,混合粉末不能发生上述化学反应,其原因是混合粉末没有经过机械球磨,化学反应产生需要较大的活化能。粉末通过机械球磨后,会使 Al, TiO_2 及 B_2O_3 粉体的颗粒变小,接触面积和接触几率提高,粉末颗粒发生晶格畸变,积累大量的位错和晶界能,随着球磨时间的延长,经过反复的变形、冷焊和断裂,形成层片间距小、表面能高、形态细小的复合颗粒。表面能越高,在外界热激活的条件下,越容易发挥粒子的小尺寸效应,使得反应更易于被激活。因此,粉末在等离子喷涂前需要经过机械球磨,制备团聚复合颗粒,使粉末颗粒产生大量的晶格畸变能和表面能,降低化学反应需要的活化能,有利于等离子喷涂过程中化学反应的发生^[17]。

2.2.2 飞行燃烧

与普通热喷涂不同,反应等离子喷射的过程中,球磨后反应物的细小层片复合团聚颗粒在飞行的过程中,除了发生飞行、碰撞、变形、凝固而形成涂层外,还始终伴随燃烧化学反应与结构转变。在等离子喷涂过程中,当团聚粉末进入焰流区时,焰流亮度明显增加(混合粉末在喷涂时,焰流亮度无明显变化),表明粉料在飞行过程中发生了强烈的放热反应。由于等离子喷涂过程中粉末飞行速度很快,无法判断飞行过程中化学反应变化,为此借助燃烧波淬熄试验法。将等离子火焰喷枪枪口置于水面不同距离点燃,实现涂料的燃烧反应喷涂,即球磨后团聚颗粒在飞行不同距离后反应所得的产物遇水而冻结,然后将水中冻结产物收集、烘干,制成粉末样品。烘干后的样品经 XRD 3 衍射仪进行 X 射线衍射分析,即可获得飞行过

程的定量化学产物。本实验中喷涂枪口距水面距离分别为 100,150,200 mm。

喷涂粉末 3 种不同飞行距离淬熄产物的 XRD 分析结果和 SEM 形貌如图 4 所示。分析结果表明,飞行距离在 100 mm 以内,化学反应并没有发生,只

是 B_2O_3 发生了分解;飞行距离在 100 ~ 150 mm 之间,反应发生,得到反应产物 Al_2O_3 和 TiB_2 ,但是反应不完全,有剩余的 TiO_2 ;当飞行距离超过 150 mm 后,化学反应持续进行;飞行距离达到 200 mm 时,化学反应基本结束^[18]。

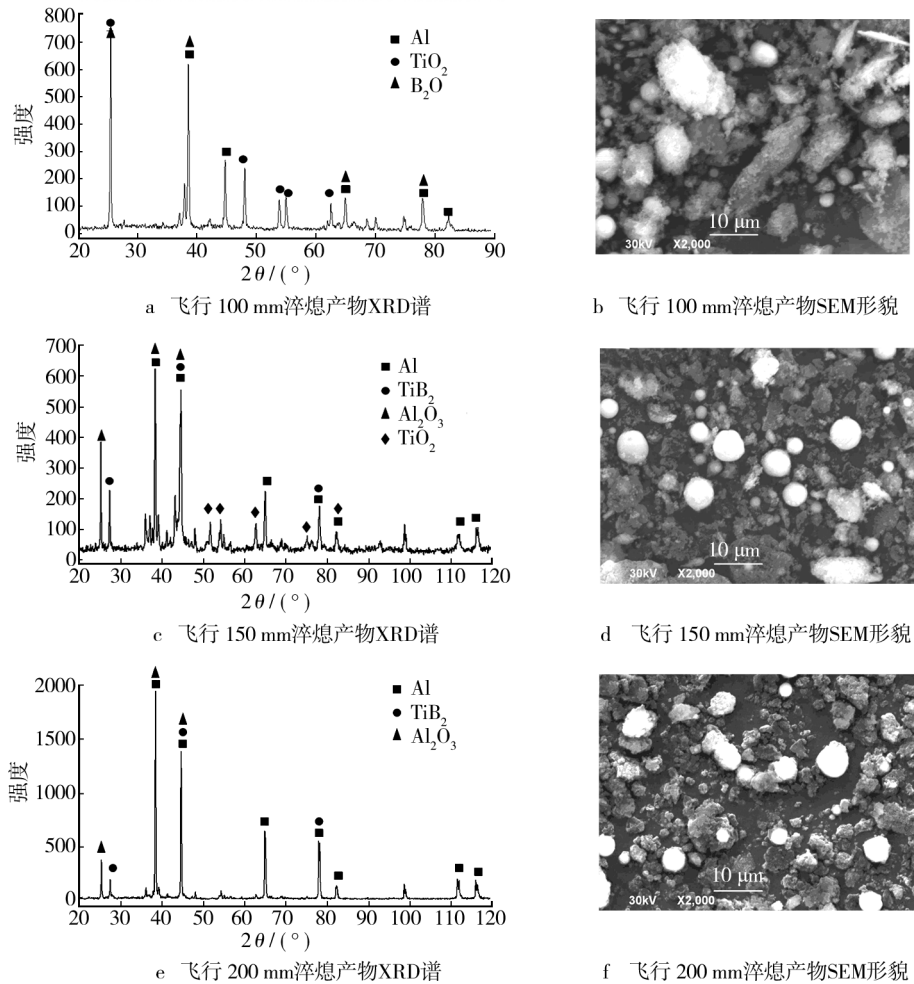
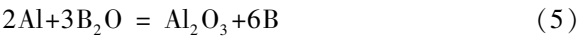


图 4 不同飞行距离粒子淬熄产物的 XRD 谱和 SEM 形貌

Fig. 4 XRD and SEM analyses of spray products formed in combustion wave quenching tests

上述试验结果产生的原因如下。飞行距离在 100 mm 以内时,如图 4b 所示,团聚复合颗粒在飞行的过程中有部分球形颗粒生成,表明生成物经历了由固相到液相的熔化过程。淬熄产物经 XRD 物相分析(图 4a)表明,100 mm 喷涂飞行距离并没有生成 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiB}_2$ 硬质相,仅发生 B_2O_3 分解为 B_2O 。这说明该飞行距离仅为焰流的预热阶段,反应在颗粒表面进行,表面溶解部分在张力的作用下仅把团聚颗粒包裹起来。飞行距离超过 100 mm 后,如图 4d 所示,颗粒数量、尺寸增加,结合图 4c 物相分析知,150 mm 喷涂的飞行距离开始发生反应 $10\text{Al}+3\text{B}_2\text{O}_3+3\text{TiO}_2\rightarrow3\text{TiB}_2+5\text{Al}_2\text{O}_3$,生成 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiB}_2$ 复相陶瓷。此阶段的反应不充分,

B_2O_3 物相没有检测到是因为其熔点低,稳定性差,易溶解,在 150 mm 飞行过程中分解为 B_2O ,所以反应式(1) Al 还原 B_2O_3 的反应实际包括下列两个反应:



由于借助等离子焰流受热条件的影响,反应并非是完全链式的连锁反应方式,在 150 mm 飞行化学反应过程中,那些细小、团聚理想的复合颗粒在接近或完全符合反应比率时先达到燃烧临界温度,并发生燃烧化学反应。

2.2.3 碰撞与凝固

等离子喷涂粉末经过飞行燃烧到达基材后,如喷

涂距离为 150 ~ 200 mm, 可以观察到飞行颗粒撞击 Al 合金基材时出现不同程度的亮斑。这表明当喷涂距离为 150 ~ 200 mm 时, 等离子喷涂粉末经过飞行燃烧并碰撞到铝合金基材, 制备后的团聚复合颗粒经等离子枪焰流的充分加热, 超过 150 mm 飞行预热临界点后, 喷涂复合粒子在焰流热与自身充分反应发热的温度下, 在飞行过程中及碰撞到达铝合金基材后继续发生燃烧反应, 整个复合颗粒均为熔融状态。这种熔融粒子在与基材碰撞中将发生流动铺展呈现出扁平化。如图 4f 所示, 球形粒子大量出现, 尺寸均稳定在 10 ~ 15 μm 之间, 此时中间相 B_2O_3 消失。仔细对比发现, 球形颗粒与原始机械球磨复合颗粒相当, 说明了团聚粉末在飞行中与碰撞基材的过程反应中, 是以单个团聚复合粒子反生燃烧反应, 团聚球磨复合颗粒的最佳尺寸在 30 μm 以下, 这些小尺寸团聚颗粒经完全放热反应, 形成陶瓷液滴, 在小颗粒周边发生连续链式化学反应。图 4e 的 XRD 物相分析表明参与的反应物均完全生成新生的 Al_2O_3 - TiB_2 -Al 陶瓷相。

3 结论

1) 机械球磨可降低 Al-TiO₂-B₂O₃ 粉末体系在等离子喷涂过程中发生化学反应的活化能, 经过机械球磨的粉末更容易发生化学反应, 获得 Al_2O_3 - TiB_2 -Al 复合涂层。

2) 化学反应是喷涂粉末在飞行过程中发生的, 经历预热、Al 的熔化、B₂O₃ 的分解、Al 液在团聚体孔隙中的毛细扩散并向 B₂O₃ 和 TiO₂ 颗粒表面铺展, 最终引燃发生燃烧化学反应。

3) 喷涂最佳范围距离为 150 ~ 200 mm, 飞行粒子和基材碰撞后会继续发生化学反应, 反应产物在焰流和自放热作用下处于熔融状态, 碰撞基材后形成扁平状形貌。

参考文献

- [1] 方学锋, 王泽华, 夏志敏. 铝基体等离子喷涂 NiCrAlCo-Y₂O₃ 涂层工艺的优化[J]. 机械工程材料, 2006, 30(11): 7—9.
FANG Xue-feng, WANG Ze-hua, XIA Zhi-min. Process Optimization of NiCrAlCo-Y₂O₃ Coating on an Aluminum Substrate by Plasma Spraying[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2006, 30(11): 7—9.
- [2] OZKAN S A, SELAHADDIN A A, SALIM A, et al. Al-Si/

B₄C Composite Coatings on Al-Si Substrate by Plasma Spray Technique[J]. Materials and Design, 2007, 28(9): 2443—2449.

- [3] SANSOUCY E A, MARCOUX P B, AJDELSZTAJN L. Properties of SiC-reinforced Aluminum Alloy Coatings Produced by the Cold Gas Dynamic Spraying Process[J]. Surface & Coatings Technology, 2008, 202(16): 3988—3996.
- [4] LAHA A T, KUCHIBHATLA B S, SEAL S. Interfacial Phenomena in Thermally Sprayed Multiwalled Carbon Nanotube Reinforced Aluminum Nanocomposite[J]. Acta Materialia, 2007, 55(3): 1059—1066.
- [5] 张文静, 李银俊, 崔洪芝. 燃烧合成法制备 TiB₂-Al₂O₃ 复相陶瓷的组织结构及形成过程分析[J]. 材料科学与工艺, 2007, 15(2): 294—296.
ZHANG Wen-jing, LI Yin-jun, CUI Hong-zhi. Research on the Fabrication of TiB₂-Al₂O₃ Composites by Self-propagating High Temperature Synthesis[J]. Materials Science & Technology, 2007, 15(2): 294—296.
- [6] LIU Hui-yuan, HUANG Ji-hua. Reactive Flame Spraying of TiC-Fe Cermets Coating Using Asphalt as a Carbonaceous Precursor[J]. Surface & Coatings Technology, 2006, 200(18/19): 5328—5333.
- [7] 宋思利, 邹增大, 王新洪. 多层氩弧熔敷含 TiC 颗粒增强涂层的微观组织及耐磨性能[J]. 焊接学报, 2007, 28(4): 33—37.
SONG Si-li, ZOU Zeng-da, WANG Xin-hong. Microstructure and Wear-resisting of TiC Particle Reinforced Coatings Daled by TiC Welding with Multiple Layer[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(4): 33—37.
- [8] 王振廷, 周晓辉. 氩弧熔敷原位自生 TiC-TiB₂/Fe 复合涂层组织与磨损性能的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(1): 155—158.
WANG Zhen-ting, ZHOU Xiao-hui. Microstructure and Properties of TiC-TiB₂/Fe Composite Coating by Argon Arc Cladding [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(1): 155—158.
- [9] 刘长松, 李志文, 黄继华. 反应火焰喷涂 TiC/Fe 复合涂层的动力学[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(9): 1522—1526.
LIU Chang-song, LI Zhi-wen, HUANG Ji-hua. Dynamics of Reactive Flame Sprayed TiC/Fe Composite Coatings [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2006, 16(9): 1522—1526.
- [10] TAO Hong, DENG Cheng-ji, ZHANG Lian-meng, et al. Fabrication of Al/Al₂O₃ Composites and FGM[J]. Material Science Technology, 2001, 17(6): 646—648.

- [11] SIKORA J, SIKORA E, MACDONALD D D. The Electronic Structure of the Passive Film on Tungsten[J]. *Electrochimica Acta*, 2000, 45(12): 1875—1883.
- [12] WANG Q J, ZHENG M S, ZHU J W. Semi-conductive Properties of Passive Films Formed on Copper in Chromate Solutions[J]. *Thin Solid Films*, 2009, 517(6): 1995—1999.
- [13] 朱振宇, 王毅, 钟庆东, 等. 晶粒度与介质中 Cl^- 浓度对铜表面钝化膜的影响[J]. *腐蚀与防护*, 2012, 33(6): 513—517.
- ZHU Zhen-yu, WANG Yi, ZHONG Qing-dong, et al. Effect of Grain Size and Concentration of Cl^- in Solution on Properties of Passive Film on Cu[J]. *Corrosion and Protection*, 2012, 33(6): 513—517.
- [14] DI P A. Semiconducting Properties of Passive Films on Stainless Steels[J]. *Electrochimica Acta*, 1989, 34(2): 203—210.
- [15] FUJIMOTO S, TSUCHIYA H. Semiconductor Properties and Protective Role of Passive Films of Iron Base Alloys[J]. *Corrosion Science*, 2007, 49(1): 195—202.
- [16] KANG J Q, YANG Y F, JIANG X. Semiconducting Properties of Passive Films Formed on Electroplated Ni and Ni-Co Alloys[J]. *Corrosion Science*, 2008, 50(12): 3576—3580.
- [17] NINGSHEN S, MUDALI U K, MITTAL V K. Semiconducting and Passive Film Properties of Nitrogen-containing Type 316LN Stainless Steels[J]. *Corrosion Science*, 2007, 49(2): 481—496.
- [18] MACDONALD D D, URQUIDI M M. Deterministic Models for Passivity Breakdown [J]. *Corrosion Science*, 1990, 31: 425—430.
- [19] MACDONALD D D, SMEDLEY S I. An Electrochemical Impedance Analysis of Passive Films on Nickel (111) in Phosphate Buffer Solutions[J]. *Electrochimica Acta*, 1990, 35: 1949—1956.
- [20] SIKORA E, SIKORA J, MACDONALD D D. A New Method for Estimating the Diffusivities of Vacancies in Passive Films[J]. *Electrochimica Acta*, 1996, 41(6): 783—789.
- [21] MACDONALD D D, ISMAIL K M, SIKORA E. Characterization of the Passive State on Zinc[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1998, 145: 3141—3149.
- [22] MACDONALD D D, SMEDLEY S I. Characterization of Vacancy Transport in Passive Films Using Low Frequency Electrochemical Impedance Spectroscopy[J]. *Corrosion Science*, 1990, 31: 667—672.
- [23] LIU L, LI Y, WANG F H. Influence of Grain Size on the Corrosion Behavior of a Ni-based Superalloy Nanocrystalline Coating in NaCl Acidic Solution[J]. *Electrochimica Acta*, 2008, 53(5): 2453—2462.

(上接第 10 页)

- [11] 刘宏伟, 张龙, 王建江. Al-CuO 系 SHS 反应火焰喷涂涂层及副产物的形成与转变[J]. *热加工工艺*, 2006, 35(3): 14—17.
- LIU Hong-wei, ZHANG Long, WANG Jian-jiang. Forming and Transforming of Coatings and Outgrowth for RFS Al-CuO[J]. *Hot Working Technology*, 2006, 35(3): 14—17.
- [12] 周小平, 胡心彬, 王钰. H13 钢表面反应火焰喷涂三元硼化物金属陶瓷涂层的组织和性能[J]. *中国表面工程*, 2009, 22(2): 49—52.
- ZHOU Xiao-ping, HU Xin-bin, WANG Jue. Microstructures and Properties of Mo_2FeB_2 Cermets Coating by Reactive Flame Spraying on the Surface of H13 Steel[J]. *China Surface Engineering*, 2009, 22(2): 49—52.
- [13] 周小平, 胡心彬, 王钰. 反应火焰喷涂三元硼化物金属陶瓷涂层的组织和性能[J]. *表面技术*, 2009, 38(2): 7—9.
- ZHOU Xiao-ping, HU Xin-bin, WANG Jue. Microstructures and Properties of Mo_2FeB_2 Cermets Coating by Reactive Flame Spraying[J]. *Surface Technology*, 2009, 38(2): 7—9.
- [14] 李明, 周小平. 反应喷涂制备 Al_2O_3 - TiB_2 复相涂层的工艺研究[J]. *表面技术*, 2011, 40(5): 61—63.
- LI Ming, ZHOU Xiao-ping. Process Study on Al_2O_3 - TiB_2 Composite Coating Prepared by Reactive Spray[J]. *Surface Technology*, 2011, 40(5): 61—63.
- [15] 马壮, 集兴伟, 林鹏. 复相陶瓷涂层 Al-TiO_2 - B_2O_3 体系热力学与动力学分析[J]. *硅酸盐通报*, 2010, 29(3): 582—587.
- MA Zhuang, JI Xing-wei, LIN Peng. Thermodynamics and Kinetics Analysis of Composite Ceramic Coatings Al-TiO_2 - B_2O_3 System[J]. *Bulletin of The Chinese Ceramic Society*, 2010, 29(3): 582—587.
- [16] ZHU He-guo, WANG Heng-zhi, GE Liang-qi. Wear Properties of the Composites Fabricated by Exothermic Dispersion Reaction Synthesis in an Al-TiO_2 - B_2O_3 System[J]. *Wear*, 2008, 264(11/12): 967—972.
- [17] DONG Peng, YAN Biao, CHEN Xing. Preparation of TiB_2 - Al_2O_3 - TiAl_3 Particulate Reinforced Aluminum Matrix Composites[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2009, 29(6): 553—556.
- [18] 毛杰, 邓春明, 邓畅光. 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. Application of Response Surface Methodology to the Process Study of Atmospheric Plasma Spraying[J]. *Surface Technology*, 2013, 42(4): 65—68.