

等离子喷涂 ZrO_2/Al_2O_3 陶瓷涂层的摩擦磨损性能*

安家财, 杜三明, 肖宏滨, 张永振

(河南科技大学 材料科学与工程学院, 河南 洛阳 471003)

摘要: 采用等离子喷涂技术在 20 钢基体上制备不同 ZrO_2 含量的 ZrO_2/Al_2O_3 陶瓷涂层, 在 QG-700 型高温气氛摩擦磨损试验机上测试了涂层的室温干滑动摩擦磨损性能, 用 JSM-5160LV 型电镜(SEM)对涂层磨损表面和磨屑进行微观形貌观察。结果表明:40ZAT 涂层的摩擦学性能较 10ZAT 与 20ZAT 涂层的有所改善; ZrO_2 含量对等离子喷涂 ZrO_2/Al_2O_3 陶瓷涂层的磨损性能具有一定的影响;涂层的磨损机理为微观断裂引起的剥落磨损。

关键词: 等离子喷涂; 摩擦磨损; 磨损机理; 陶瓷涂层

中图分类号: TG174.442

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2011)01-0020-05

Tribological Properties of Plasma Sprayed ZrO_2/Al_2O_3 Ceramic Coatings

AN Jia-cai, DU San-ming, XIAO Hong-bin, ZHANG Yong-zhen

(School of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang Henan 471003)

Abstract: The different content of ZrO_2 in ZrO_2/Al_2O_3 ceramic coatings were prepared by plasma sprayed on 20 steel substrate, and the tribological properties of coatings were tested on the QG-700 high temperature atmosphere wear tester at room temperature and dry sliding wear. With JSM-5160LV scanning electron microscopy (SEM), we observed the wear surface of coatings and morphology of wear debris. The following conclusions were reached: the tribological properties of 40ZAT coating were more improved than 10ZAT and 20ZAT coatings; the content of ZrO_2 had certain effect on friction and wear of plasma sprayed ZrO_2/Al_2O_3 ceramic coatings. As for ZrO_2/Al_2O_3 ceramic coatings, the wear mechanism was mainly micro-fracture due to spalling wear.

Key words: plasma spray; friction and wear; wear mechanism; ceramic coating

0 引言

等离子喷涂是制备陶瓷复合涂层的高效且经济的表面技术,近年来其应用领域不断扩大^[1,2]。 Al_2O_3 陶瓷材料具有高的强度和硬度,良好的耐高温、耐磨损性能和较低的摩擦因数,是较适用于作摩擦副的一种材料^[3],但是其韧性较差。 ZrO_2 陶瓷材料具有较高的陶瓷韧性^[4],在 Al_2O_3 陶瓷中加入 ZrO_2 陶瓷使两者的优点结合起来。采用等离子喷涂技术在基体上制备 ZrO_2/Al_2O_3 陶瓷涂层,把 ZrO_2/Al_2O_3 陶瓷材料与基体材料的优点有机的结合,以改善材料的使用性能。在 ZrO_2/Al_2O_3 涂层的

实际应用中大部分都涉及其摩擦磨损性能,因此研究涂层的摩擦磨损性能和磨损机理具有十分重要的意义。目前,有关 ZrO_2/Al_2O_3 陶瓷涂层摩擦磨损性能的报道很少^[5,6]。文中主要研究 ZrO_2/Al_2O_3 陶瓷涂层的室温干滑动摩擦磨损性能与磨损机理。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

基体为 20 钢,尺寸为 $\Phi 75\text{ mm} \times 8\text{ mm}$,采用北京安耐康科技有限公司生产的 SB-1B 型回收式喷砂机对基体进行喷砂预处理,喷砂材料为棕刚玉,粒径 0.5~1 mm。等离子喷涂涂层的打底层材料和涂层材料分别采用 Ni/Al 包覆型粉和微米级 $Al_2O_3-13\%TiO_2$ 粉、 ZrO_2 粉,粉末粒径为 20~60 μm 。等离子喷涂采用北京航天振邦精密机械有限公

收稿日期: 2010-10-15; 修回日期: 2010-12-18

基金项目: *国家973项目 (2007CB607603); 国家自然科学基金项目 (50975078); 973计划前期研究专项 (2010CB635113)

作者简介: 安家财 (1983—), 男(汉), 河南周口人, 硕士研究生。

司生产的 ZB-80 型大气等离子喷涂设备, 喷枪为 F4 喷枪, 喷涂后打底层厚度约 0.1 mm, 涂层总厚度约 0.3 mm。等离子喷涂工艺参数如表 1。

表 1 等离子喷涂工艺参数

Table 1 Plasma spraying process parameters

参数名称	打底层参数	涂层参数
电流 / A	503	497
电压 / V	65.2	70.0
H ₂ 流量 / (L/min)	1.2	1.6
Ar 流量 / (L/min)	35	30
喷涂距离 / mm	100~120	100~120
喷涂角 / °	90	90
送粉率 / (g/min)	60	30~40

1.2 试验方法

摩擦磨损试验在 QG-700 型高温气氛摩擦磨损试验机上进行, 其摩擦副形式是球-盘式接触, 研究涂层在室温条件下的干滑动摩擦磨损性能。YG8 硬质合金球作为摩擦副, 其直径为 Φ 5.0 mm、硬度为 89.5 HRC。盘的转动速度分别为 400、500、600、800 和 1000 r/min, 总转数为 5 000 r, 载荷为 500 g。

涂层的磨损率采用磨痕宽度来表征, 磨痕宽度越大其磨损率越大。采用 JSM-5160LV 型电镜(SEM)对涂层磨损表面和磨屑进行微观形貌观察, 并用其附带的能谱仪(EDS)进行化学成分分析。

2 试验结果与分析

2.1 涂层的摩擦性能

图 1 为在室温干滑动摩擦下不同 ZrO_2 含量的涂层与 20 钢基体的摩擦因数随时间变化的曲线图。从图中可以看出: 摩擦因数先增大然后趋于平稳, 在一定摩擦因数范围内发生波动达到动态平行, 且不同 ZrO_2 含量涂层的摩擦因数存在一定差异。从图 1(a)可以看出, 20 钢的平均摩擦因数约 0.612, 10 % $ZrO_2-Al_2O_3-13$ % TiO_2 (10ZAT)涂层的平均摩擦因数约 0.722, 20 % $ZrO_2-Al_2O_3-13$ % TiO_2 (20ZAT)涂层的平均摩擦因数约 0.773, 40 % $ZrO_2-Al_2O_3-13$ % TiO_2 (40ZAT)涂层平均摩擦因数约 0.672, 基体的摩擦因数比涂层的低。从图 1(b)可以得出, 20 钢的平均摩擦因数约 0.605, 10ZAT、20ZAT、40ZAT 涂层的平均摩擦因数分别为 0.601、0.692、0.486, 40ZAT 涂层的平均摩擦因数比基体的低。从摩擦因数角度分析, 40ZAT 涂层的摩擦学性能最好。涂层

的摩擦因数高于 20 钢基体的摩擦因数, 可能因为: 在工件表面发生干滑动摩擦时, 工件磨损和摩擦热的产生同时进行且摩擦力主要转化为摩擦热^[7], 转移的摩擦热主要集中在实际接触面上。在干滑动摩擦下, 20 钢由于摩擦热的作用易于发生氧化, 形成了氧化膜, 而氧化膜起到了润滑作用, 所以摩擦因数低; 涂层呈层片状结构且存在未熔化的颗粒, 在低速低荷、干滑动摩擦下, 对磨件对涂层内部的片层与未熔颗粒剪切力小且对其破坏不大, 滑动时片层与未熔颗粒起阻碍作用, 所以涂层的摩擦因数高于基体 20 钢。

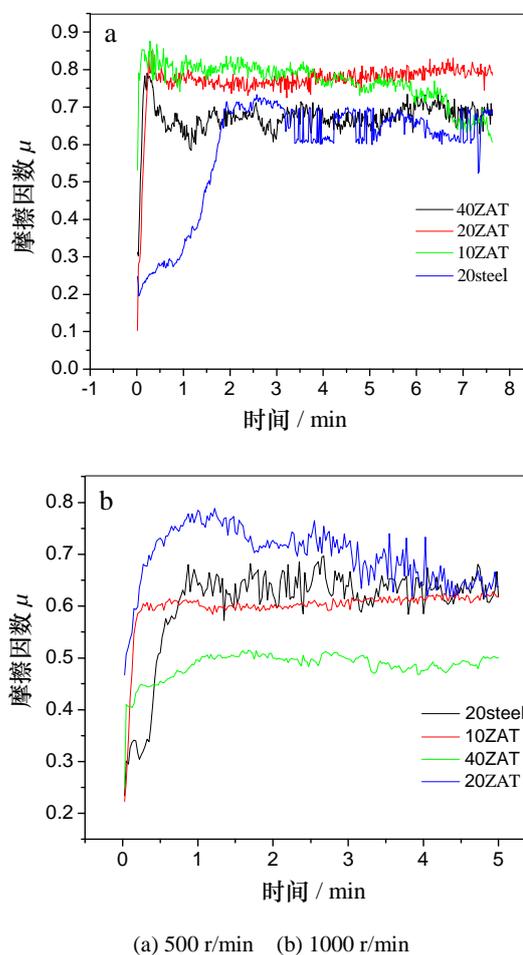


图 1 涂层与 20 钢基体随时间变化的摩擦因数曲线
Fig.1 Friction coefficient curves of coatings and 20 steel with time

2.2 不同转速对涂层摩擦因数的影响

图 2 为不同转速条件下涂层摩擦因数曲线图。从图可以看出: 随着转速的增大, 涂层的摩擦因数趋于减小, 在 600~1 000 r/min 区间内, 10ZAT 涂

层的摩擦因数先增大后减小, 20ZAT 涂层的摩擦因数先减小再增大。在 800 r/min~1000 r/min 时, 40ZAT 涂层的摩擦因数比较平稳。可知, 转速对涂层摩擦因数的影响较大。结合图 1, 从摩擦因数的角度分析, 40ZAT 涂层的摩擦学性能较 10ZAT 和 20ZAT 涂层的有所改善。

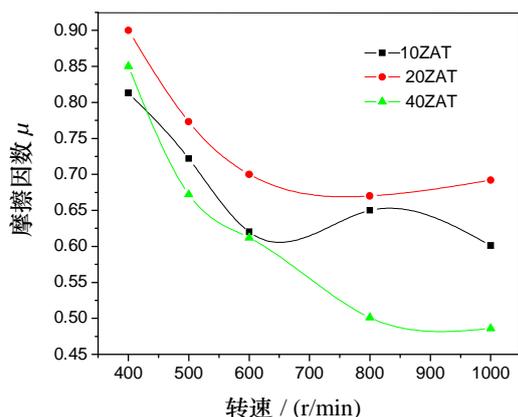
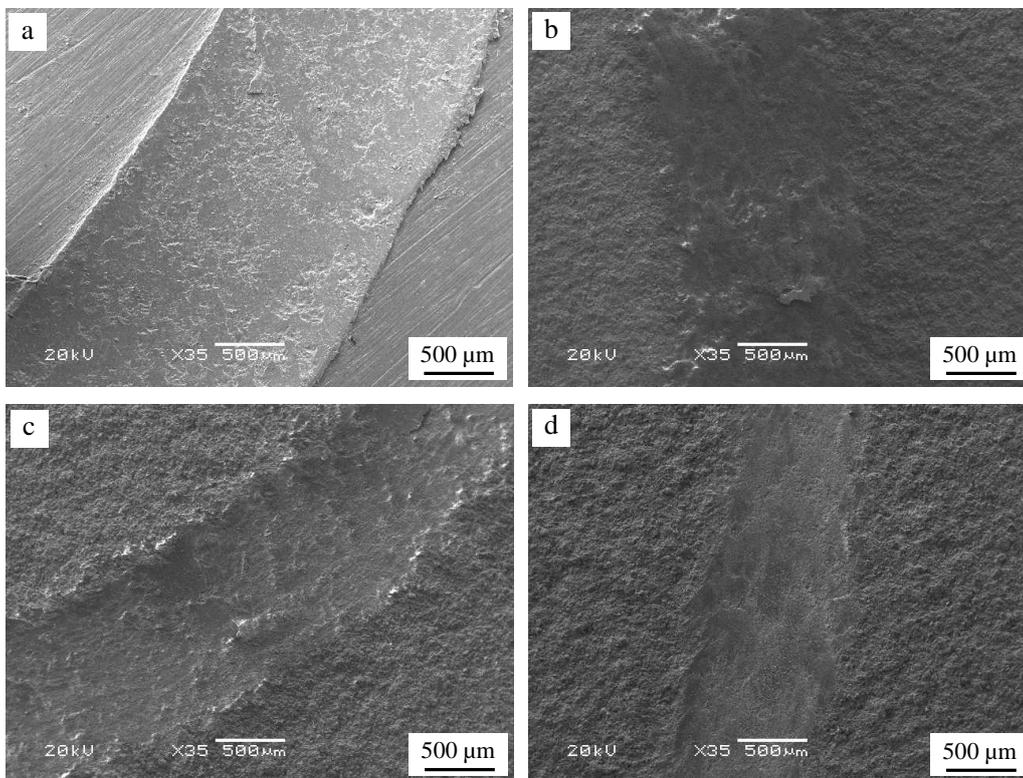


图 2 不同转速对涂层摩擦因数的影响

Fig.2 Effect of different velocity on friction coefficient of coatings

2.3 涂层的磨损率

图 3 为涂层与 20 钢基体在载荷 500 g、转速 1000 r/min 下的磨痕形貌。文中采用磨痕宽度作为磨损率的表征方法, 磨痕宽度越大其磨损率越大。从图中可以看出, 20 钢的磨痕宽度约 1.7 mm, 10ZAT 约 1.0 mm, 20ZAT 和 40ZAT 涂层的约 0.9 mm 和 0.7 mm。对比四种磨痕宽度可知: 40ZAT 涂层的磨痕宽度最小, 可知其磨损率最小。从磨损率的角度分析, 40ZAT 涂层的耐磨性较好, 可能原因: 等离子喷涂陶瓷涂层在摩擦磨损过程中, 涂层的磨损性能主要取决于其断裂韧性^[1], 而 ZrO_2 陶瓷具有高的陶瓷断裂韧性, 随着 ZrO_2 含量的增加, ZrO_2/Al_2O_3 陶瓷的断裂韧性增大^[8], 这有利于提高等离子喷涂 ZrO_2/Al_2O_3 陶瓷涂层的耐磨损性能, 所以 40ZAT 涂层的耐磨性较好。试验结果表明, 随着 ZrO_2 含量的增加, 涂层的磨损率和摩擦因数均减小, 也从一个侧面证明了上述原因。可见, ZrO_2 含量对等离子喷涂 ZrO_2/Al_2O_3 复合陶瓷涂层的磨损性能具有一定的影响。



(a) 20 钢 (b) 10ZAT 涂层 (c) 20ZAT 涂层 (d) 40ZAT 涂层

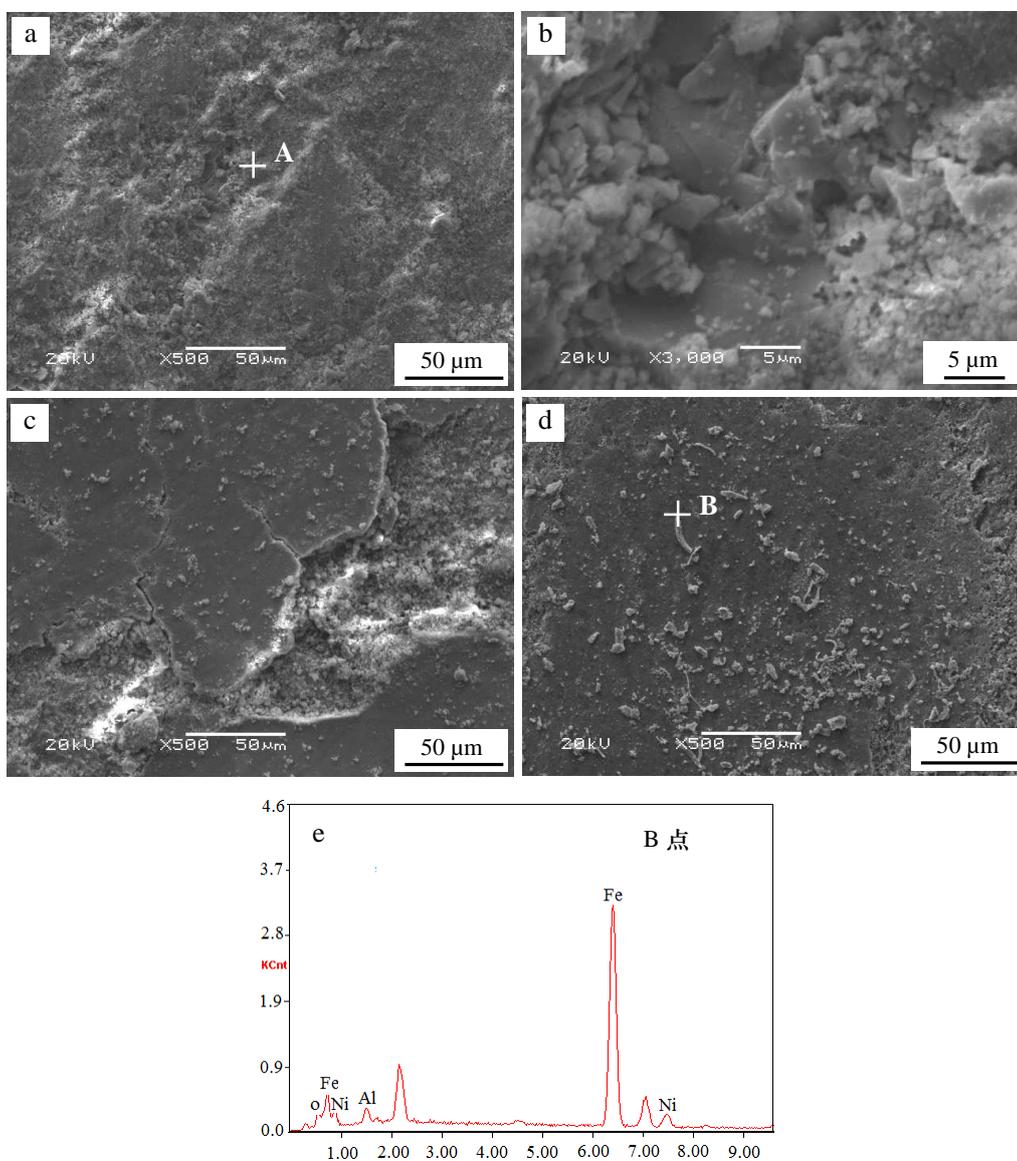
图 3 20 钢与涂层的 SEM 磨痕形貌

Fig.3 SEM morphology of wear mark of 20 steel and coatings

2.4 涂层的磨损形貌

图 4 为载荷 500 g、转速 1 000 r/min 条件下的等离子喷涂涂层的 SEM 磨损形貌和能谱。图 4(b) 是图 4(a) 中 A 点的高倍 SEM，从中可以看出：10ZAT 涂层呈明显的层状结构，存在空隙和裂纹，内部板条结合不够好而导致了涂层内聚结合强度不高，在磨损过程中涂层呈块状剥落，所以其磨损率较大。从图 4(c) 可以看出，20ZAT 涂层磨损表面存在裂纹和剥落坑，涂层呈层片状剥落。在循环压应力和热应力的作用下，在涂层缺陷处(空隙、裂纹等)或晶界处容易产生裂纹源，这些裂纹沿着晶

界或缺陷增长，直至断裂，不同方向的裂纹连接起来形成剥落坑。从图 4(d) 可以看出，40ZAT 涂层磨损表面比较光滑，不存在裂纹且磨损表面附着较多的磨屑。呈块状剥落的涂层一部分残留在磨痕中参与摩擦副的摩擦磨损而被研磨成细小的磨屑，存在于磨痕和硬质合金球之间的细小磨屑形成了磨屑层，此磨屑层有利于减弱硬质合金球与涂层的直接接触且磨屑层对硬质合金球具有润滑作用，从而减小了涂层的磨损率和摩擦因数。相应的 EDS 分析表明，磨痕表面存在 Fe 元素，说明在摩擦磨损过程中发生了硬质合金球向涂层的物质转移。



(a) 10ZAT 涂层 (b) 图(a)中 A 点的放大 (c) 20ZAT 涂层 (d) 40ZAT 涂层 (e) 图(d)中 B 点的 EDS

图 4 涂层的 SEM 磨损形貌和能谱分析
Fig.4 EDS and SEM morphology of worn surface of coatings

2.5 磨损机理

在摩擦磨损时,涂层由于发生微观切削断裂和循环研磨而形成磨屑。图5为涂层磨屑的SEM形

貌。从图5(a)和(b)可以看出:磨屑呈不规则的层片状和细小的颗粒状且以团聚状团聚在一起,磨屑尺寸大约为1~20 μm。说明涂层在摩擦磨损过程中发

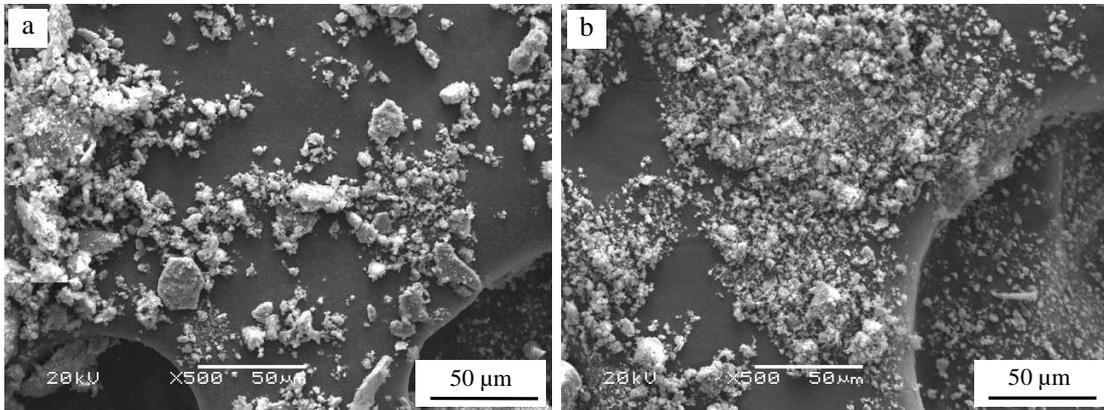


图5 磨屑形貌 (a) 20ZAT 涂层 (b) 40ZAT 涂层

Fig.5 SEM morphology of worn debris (a) 20ZAT coating (b) 40ZAT coating

生了涂层因断裂而引起的剥落,磨屑细小也说明了涂层致密。结合涂层的磨损表面可知:涂层的磨损机理为微观断裂而引起的剥落磨损。

3 结论

采用等离子喷涂技术在20钢基体上制备不同ZrO₂含量的ZrO₂/Al₂O₃陶瓷涂层,测试其摩擦磨损性能,得到了以下结果。

(1) 40ZAT涂层的摩擦学性能较10ZAT与20ZAT涂层的有所改善。

(2) ZrO₂含量对等离子喷涂ZrO₂/Al₂O₃陶瓷涂层的磨损性能具有一定的影响。

(3) 结合涂层的表面磨损和磨屑的形貌进行分析表明,涂层的磨损机理为微观断裂而引起的剥落磨损。

参考文献:

- [1] Yin Zhijian, Tao Shunyan, Zhou Xiaming, et al. Tribological properties of plasma sprayed Al/Al₂O₃ composite coatings [J]. *Wear*, 2007, 263: 1430-1437.
- [2] Lin X H, Zeng Y, Ding C X, et al, Tribological behaviour of nano-structured A₂O₃-3 % TiO₂ coating against steel in dry sliding [J]. *Tribol Lett*, 2004, 17: 19-26.
- [3] 马岳, 段祝平. 表面等离子喷涂材料研究的现状及

发展 [J]. *表面技术*, 1999, 28 (4): 1-4.

- [4] Wang F, Wang L. Mechanism of transient thermalcycle failurein ZrO₂/NiCrAl functionally graded thermal barrier coatings [J]. *Surface Engineering*, 2001, 17: 35-37.
- [5] Zhao Xiaoqin, An Yulong, Chen Jianmin, et al. Properties of Al₂O₃-40 % ZrO₂ composite coatings from ultra-fine feedstocks by atmospheric plasma-spraying [J]. *Wear*, 2008, 265: 1642-1648.
- [6] Liang Bo, Zhang Ga, Liao Hanlin, et al. Friction and wear behavior of ZrO₂-Al₂O₃ composite coatings deposited by air plasma spraying. Correlation with physical and mechanical properties [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2009, 203: 3235-3242.
- [7] K. Kato. Tribology of ceramics [J]. *Wear*, 1990, 136: 117-133.
- [8] J.K.M.F. Daguano, Santos C, Souza R C, et al. Properties of ZrO₂-Al₂O₃ composite as a function of isothermal holding time [J]. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 2007, 25: 374-379.

作者地址: 河南省洛阳市涧西区134信箱 110004

河南科技大学 材料科学与工艺学院

Tel: 135 9815 4046

E-mail: ajcznb123@126.com