复合材料学报 Acta Materiae Compositae Sinica
第30卷 第3期 6月 2013年
Vol. 30 No. 3 June 2013

文章编号：1000-3851(2013)03-0114-06

Al_2O_3－TiC/Al_2O_3－TiC－CaF_2 复合叠层陶瓷材料摩擦磨损性能

宋培龙，杨学锋*，王守仁，杨丽颖
（济南大学 机械工程学院，济南 250022）

摘 要： 将 Al_2O_3－TiC 陶瓷材料与具有固体润滑特性的 Al_2O_3－TiC－CaF_2 陶瓷材料进行叠层，通过真空热压烧结制备 Al_2O_3－TiC/Al_2O_3－TiC－CaF_2 复合叠层陶瓷材料。在环盘式摩擦磨损试验机上进行摩擦磨损实验，研究该材料在不同载荷、转速条件下的摩擦系数和磨损率，分别用 SEM 及 EDS 观察材料磨损前后的微观形貌和分析其成分组成，研究其磨损机制。结果表明：在相同载荷条件下，Al_2O_3－TiC/Al_2O_3－TiC－CaF_2 复合叠层陶瓷材料的摩擦系数和磨损率随着转速的升高而下降，在相同转速条件下，其摩擦系数和磨损率随着载荷的增加而下降；Al_2O_3－TiC/Al_2O_3－TiC－CaF_2 复合叠层陶瓷材料的磨损机制主要是磨粒磨损和黏着磨损。

关键词： 陶瓷；叠层；磨损；表面分析；热压烧结
中图分类号： TB331；TH145.1＋1；TH117.1 **文献标志码：** A

Friction and wear properties of Al_2O_3－TiC/Al_2O_3－TiC－CaF_2 composite laminated ceramic

SONG Peilong，YANG Xuefeng*，WANG Shouren，YANG Liying
（School of Mechanical Engineering，University of Ji'nan，Ji'nan 250022，China）

Abstract： A kind of Al_2O_3－TiC/Al_2O_3－TiC－CaF_2 laminated composite ceramic layered stack by Al_2O_3－TiC ceramic and self-lubricating Al_2O_3－TiC－CaF_2 composite was prepared by vacuum hot pressing sintering. The friction and wear behaviors and wear mechanism of laminated composite were researched though the ring-disc friction and wear tester in different load conditions and rotation speeds，the worn morphology was observed by SEM and the elements were investigated by EDS. Results show that the friction coefficient and wear rate decline when the rotation speed increases at the same load conditions，and also decrease with the increase of the load with the same rotating speed. The main wear mechanisms of Al_2O_3－TiC/Al_2O_3－TiC－CaF_2 laminated composite are abrasive wear and adhesive wear.

Keywords： ceramic；laminates；wear；surface analysis；hot pressing sintering

20 世纪以来，陶瓷材料在工业领域得到了广泛的应用，与金属材料、高分子材料并列为当代三大固体材料[1]。陶瓷材料通常具有熔点高、硬度高、耐磨性好、耐高温等其他材料无法比拟的优良特性，但是材料性脆、不耐冲击是限制其应用的主要原因[2-6]。随着科技的发展和进步，现代工业生产中对陶瓷材料的性能有了更高的要求。磨损是机械零部件失效的主要形式之一，针对陶瓷材料摩擦磨损性能的研究因此也成为许多国内外学者关注的重点[7-8]。陶瓷材料的仿生结构设计为研究其摩擦磨损特性提供了一种新思路[9-12]。本文中参照贝壳的层状结构，将具有高硬度、高强度的 Al_2O_3－TiC 陶瓷材料[13-15]与具有固体润滑特性的 Al_2O_3－TiC－CaF_2[16-19] 陶瓷材料进行叠层[20-24]，通过真空热压烧结的方法，制备出一种新型的 Al_2O_3－TiC/Al_2O_3－TiC－CaF_2 复合陶瓷材料。通过对其进行摩擦磨损实验，分析其摩擦特性和磨损机制，为合理使用该种陶瓷材料提供良好的科学依据。

收到初稿日期： 2012-04-09；**收到修改稿日期：** 2012-09-17；**网络出版时间：** 2013-01-09 11:17:00
网络出版地址： http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20130109.1117.002.html
基金项目： 国家自然科学基金青年科学基金（51005100）；中国博士后科学基金面上项目（20110491572）；山东省科技发展计划（2012GGX10324）
通讯作者： 杨学锋，博士，副教授，主要从事陶瓷模具研发及相关材料摩擦学研究 E-mail：me_yangxf@ujn.edu.cn

1 实验方法

1.1 $Al_2O_3-TiC/Al_2O_3-TiC-CaF_2$ 复合叠层陶瓷材料的制备

选用的主要原料为 Al_2O_3 粉末、TiC 粉末和 CaF_2 粉末。Al_2O_3 粉末采用 α-Al_2O_3，纯度大于 99.9%，平均粒径小于 0.5 μm，密度为 3.97 g/cm^3；TiC 粉末由株洲硬质合金厂提供，纯度大于 99.8%，平均粒径小于 0.5 μm，密度为 4.93 g/cm^3；CaF_2 粉末纯度大于 98%，平均粒径小于 0.5 μm，密度为 3.18 g/cm^3。

按照物理化学相容性原则，将 Al_2O_3 粉末与 TiC 粉末按照体积比 9∶11 的比例混合，使之占总质量的 90%，其余 10%的质量则由粘结金属 Mo∶Ni 按质量比为 9∶1 的比例混合而成，将所有原料放入球磨筒中，在酒精介质下进行充分混合，球磨时间为 72 h。混合后的粉末在真空干燥箱中干燥。将干燥完全的粉末用 74 μm 筛网进行过筛，得到 Al_2O_3-TiC 陶瓷粉末。

$Al_2O_3-TiC-CaF_2$ 陶瓷材料按照 Al_2O_3 与 TiC 体积比为 1∶1.8 的比例混合，使之占总质量的 90%，其余为 CaF_2。将三种原料放入球磨筒中，在酒精介质下进行充分混合，球磨时间为 72 h。混合后的粉末在真空干燥箱中干燥，将干燥完全的粉末用 74 μm 筛网进行过筛。

将过筛后的两种陶瓷粉末按照体积比 1∶1 的比例在石墨模具中进行分层叠加，每层厚度为 1 mm，共 30 层。采用真空热压烧结工艺制备 $Al_2O_3-TiC/Al_2O_3-TiC-CaF_2$ 复合叠层陶瓷材料。烧结温度为(1750±5)℃，烧结压力为 30 MPa，保温时间为 15 min。

1.2 $Al_2O_3-TiC/Al_2O_3-TiC-CaF_2$ 复合叠层陶瓷材料密度及硬度测试

复合材料的理论密度采用合成规则进行计算：

$$\rho = \sum \rho_i V_i \tag{1}$$

其中：ρ_i 为复合材料中各个组分的密度；V_i 为复合材料中各组分的体积分数。将制备好的试样放入超声波清洗机中清洗 30 min，烘干。采用阿基米德排水法测量其体积密度，高精度电子天平称重，精确度为 0.1 mg，排水法测量试样体积。相对密度为体积密度与理论密度之比。

试样经表面研磨，抛光后在显微维式硬度计上测量其硬度。采用金刚石四棱体压头，对面角为 136°，在 200 N 载荷条件下压入陶瓷表面，保压15 s，卸去载荷。在光学显微镜下测量压痕对角线长度，计算硬度值。计算公式为

$$HV = 1.8544 \frac{p}{d^2} \tag{2}$$

其中：p 为实验载荷(N)；d 为压痕对角线长度(mm)。

1.3 摩擦磨损实验

采用济南翰森精密仪器厂生产的 MMG-10 气氛保护摩擦磨损试验机进行摩擦磨损实验，无级变速范围 0.1～2000 r/min，轴向试验力工作范围 10～10000 N。实验陶瓷试样图 1 所示，尺寸为 34 mm×24 mm×5 mm。试样表面经过严格的研磨抛光处理，确保其摩擦表面情况符合实验要求。对磨试样选择硬度为 HRC 42 的淬火 45# 钢，其内径为 18 mm，外径为 22 mm，摩擦表面经过抛光处理。实验条件为干摩擦。实验装置示意图如图 2 所示。

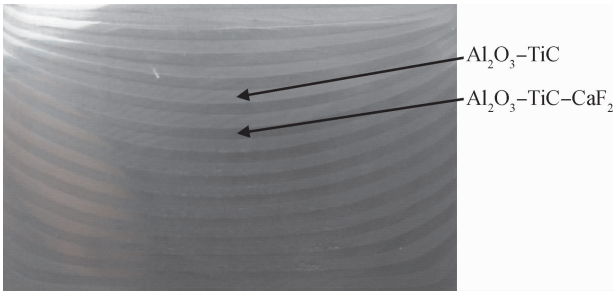

图 1 $Al_2O_3-TiC/Al_2O_3-TiC-CaF_2$ 复合叠层陶瓷材料试样

Fig. 1 Sample of $Al_2O_3-TiC/Al_2O_3-TiC-CaF_2$ composite laminated ceramic

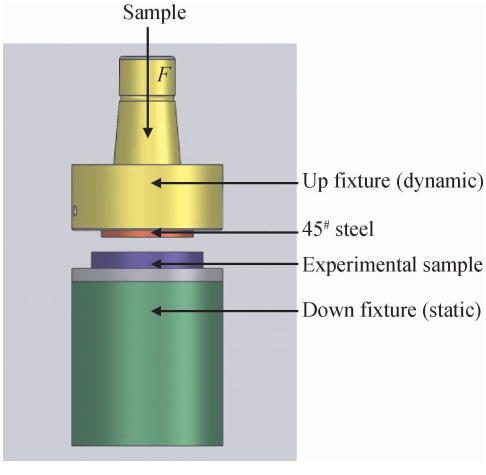

图 2 摩擦磨损实验装置示意图

Fig. 2 Scheme of the friction and wear experiment device

选用环盘式滑动摩擦副，实验时间 t 为 4 min，测定在实验载荷为 100、150、200、250 N，转速为 40、80、120、160、200 r/min 条件下，Al_2O_3 - TiC/Al_2O_3 - TiC - CaF_2 复合叠层陶瓷材料摩擦系数。

选定载荷 200 N 保持不变，转速改变(50、100、150、200、250 r/min)和转速 100 r/min 不变，载荷改变(100、150、200、250 N)两种情况，分别进行实验 60 min，称量 Al_2O_3 - TiC/Al_2O_3 - TiC - CaF_2 复合叠层陶瓷试样在实验前后的质量，计算其磨损率。

摩擦磨损实验完成后，将陶瓷试样放入超声波清洗机中进行清洗 30 min，烘干。用扫描电镜 SEM 观察其微观图像，采用能量弥散 X 射线谱(EDS)，分析其成分。

1.4　磨损率的计算

在一定的载荷和转速条件下将两试样进行对磨。用高精度的电子天平称量陶瓷试样磨损前后的质量，确定其磨损量，计算出磨损率。高精度电子天平的精确度为 0.1 mg。磨损率(W)的计算公式如下：

$$W=\frac{\Delta m}{2\pi Rtn\mu\rho F} \tag{3}$$

其中：Δm 为实验中测得的磨损量(g)；R 为平均摩擦半径(mm)；t 为实验时间(min)；n 为实验转速(r/min)；μ 为平均摩擦系数；F 为实验载荷(N)；ρ 为陶瓷试样的密度(g/cm^3)。

2　实验结果与讨论

2.1　Al_2O_3 - TiC/Al_2O_3 - TiC - CaF_2 密度及硬度

表 1 为 Al_2O_3 - TiC/Al_2O_3 - TiC - CaF_2 复合叠层陶瓷材料试样的密度值，实际密度为理论密度的 98.90%，材料结构致密。表 2 为 Al_2O_3 - TiC/Al_2O_3 - TiC - CaF_2 复合叠层陶瓷材料试样的硬度值。Al_2O_3 - TiC 层硬度最高，Al_2O_3 - TiC - CaF_2 层硬度最低，但是材料整体的平均硬度值达到 20.7 GPa，高于 Al_2O_3 - TiC - CaF_2 层。

表 1　Al_2O_3 - TiC/Al_2O_3 - TiC - CaF_2 复合叠层陶瓷材料试样密度

Table 1　Density of Al_2O_3 - TiC/Al_2O_3 - TiC - CaF_2 composite laminated ceramic sample

	Theoretical density/(g·cm^{-3})	Volume density/(g·cm^{-3})	Relative density/%
Experimental sample	4.53	4.48	98.90

表 2　Al_2O_3 - TiC/Al_2O_3 - TiC - CaF_2 复合叠层陶瓷材料试样硬度值

Table 2　Hardness values of Al_2O_3 - TiC/Al_2O_3 - TiC - CaF_2 composite laminated ceramic sample

	Al_2O_3 - TiC layers	Al_2O_3 - TiC - CaF_2 layers	Interface	Average
Hardness/GPa	22.7	19.3	20.2	20.7

2.2　Al_2O_3 - TiC/Al_2O_3 - TiC - CaF_2 的摩擦系数

Al_2O_3 - TiC/Al_2O_3 - TiC - CaF_2 复合叠层陶瓷试样的摩擦系数随转速和载荷的变化分别如图 3(a)、3(b)所示。可以看出，Al_2O_3 - TiC/Al_2O_3 - TiC - CaF_2 复合叠层陶瓷材料试样的摩擦系数随着载荷和转速的升高而逐渐降低。在低载荷和低转速条件下，摩擦系数值比较大，达到 0.5～0.6，当载荷为 250 N，转速为 200 r/min 时，摩擦系数值低于 0.44。当转速和载荷较低时，45# 钢试样和陶瓷试样的摩擦主要发生在摩擦表面局部的接触峰之间，在摩擦过程中陶瓷表面的微凸峰对配副的 45# 钢材料产生切削，并且对于陶瓷试样本身，表面微凸峰与金属材料碰撞，极易造成断裂，脱落的细微晶粒残留在摩擦表面上阻碍摩擦对偶件之间的相对运动，使得摩擦系数较大。随着载荷和转速的增加，45# 钢试样与陶瓷试样接触点处产生塑性变形，使摩擦副之间的接触面积增加，晶粒脱落减少，因而其摩擦系数相对较小。

2.3　Al_2O_3 - TiC/Al_2O_3 - TiC - CaF_2 的磨损率

图 4(a)为叠层陶瓷试样的磨损率随转速变化曲线。可知，当载荷为 200 N 时，Al_2O_3 - TiC/Al_2O_3 - TiC - CaF_2 复合叠层陶瓷材料试样的磨损率随着转速的增大呈现减小趋势。图 4(b)为叠层陶瓷试样的磨损率随载荷变化曲线。可知，当转速为 100 r/min 时，随着载荷的增加，磨损率不断减小。当载荷从 100 N 增加到 150 N 时，试样磨损率有所减小，变化量不大；载荷从 150 N 增加到250 N 时，试样的磨损率明显减小，载荷为 250 N 时，试样的磨损率为 1.9。表明在该实验条件下，材料在相对高速和大载荷工作环境中的摩擦磨损性能优于低速和低载荷的情况。当载荷和转速较低时，摩擦表面没有达到 CaF_2 颗粒由脆性转变为塑性所需的温度，陶瓷试样表面没有形成润滑膜，此时磨损率较大，磨屑大部分为暗红色的含铁氧化物；随着载荷和转速的增大，摩擦表面温度升高，CaF_2 在摩擦

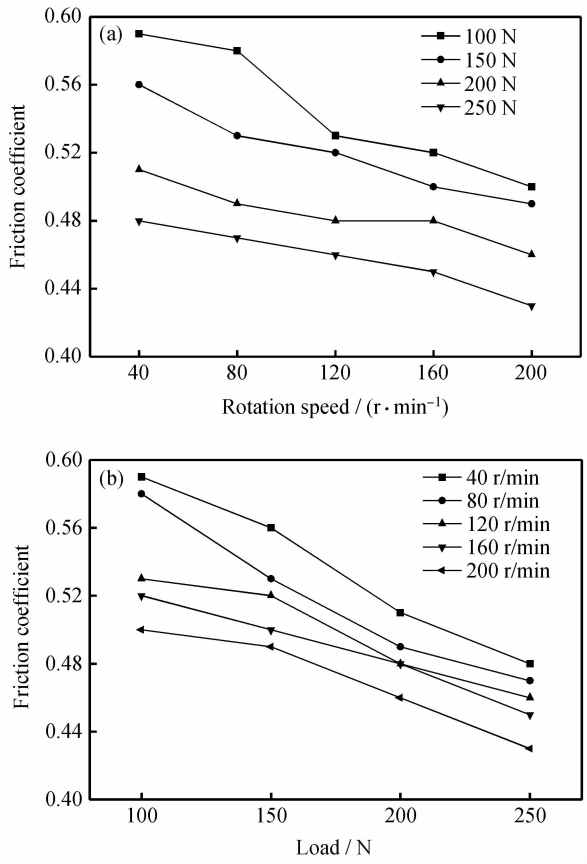

图 3　$Al_2O_3-TiC/Al_2O_3-TiC-CaF_2$ 复合叠层陶瓷材料试样的摩擦系数随转速和载荷变化曲线

Fig. 3　Friction coefficient curves of $Al_2O_3-TiC/Al_2O_3-TiC-CaF_2$ composite laminated ceramic sample changed with rotation speeds and loads

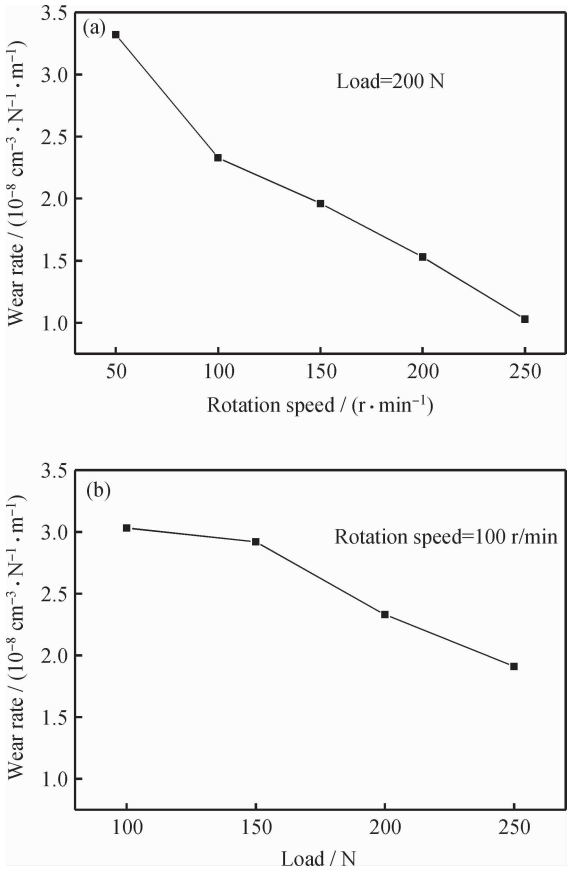

图 4　$Al_2O_3-TiC/Al_2O_3-TiC-CaF_2$ 复合叠层陶瓷材料试样的磨损率随转速和载荷变化曲线

Fig. 4　Wear rate curve of $Al_2O_3-TiC/Al_2O_3-TiC-CaF_2$ composite laminated ceramic sample changed with rotation speeds and loads

表面形成一层润滑膜[16-18, 25]，使得材料的摩擦磨损情况得到改善，摩擦系数降低，磨损率下降。因此，试样磨损率随着载荷和转速的增大而减小。

2.4　$Al_2O_3-TiC/Al_2O_3-TiC-CaF_2$ 的摩擦磨损机制

图 5 和图 6 分别为实验试样 $Al_2O_3-TiC-CaF_2$ 和 Al_2O_3-TiC 材料层的磨损形貌及 EDS 分析图。由图 5(a)可以看出，$Al_2O_3-TiC-CaF_2$ 材料层的磨损表面出现许多凹坑。更高放大倍数条件下(见图 5(b))观察时，许多陶瓷颗粒从基体中脱落，留下明显的晶粒断裂痕迹。这是由于在摩擦过程中，一些陶瓷硬质颗粒受到挤压而剥落，脱落的晶粒在摩擦过程中充当磨粒，摩擦表面在磨粒产生的循环接触应力下产生材料的局部疲劳剥落，形成图中所示的凹坑。由此得出 $Al_2O_3-TiC-CaF_2$ 材料层的磨损类型主要是磨粒磨损。由图 5(c)可知，由于材料的磨损表面含有一定量的含铁氧化物，因此，该层的磨损形式还有黏着磨损。从图6(a)、6(b)可以看出，Al_2O_3-TiC 层磨损表面存在因冷焊而黏附的片状磨屑和由于基体材料脱落而造成的深度较浅的剥落损伤。在摩擦过程中，摩擦副材料的相对硬度相差比较大，45# 钢材料在粘结节点处发生剪切断裂，被剪切的材料一部分粘结到陶瓷材料表面上，形成材料的迁移，如图 6(c)所示；另一部分在循环应力的作用下，从陶瓷材料表面脱落，同时把表面的陶瓷颗粒拔出，在随后的相对运动过程中，新的陶瓷表面又重新被金属覆盖，在这种连续的过程中，使得陶瓷材料表面磨损，产生深度较浅的损伤。由图 6(d)可以看出，在磨损表面存在由 45# 钢材料黏附作用而产生含铁氧化物。由此分析得出，Al_2O_3-TiC 层的磨损形式主要是黏着磨损。

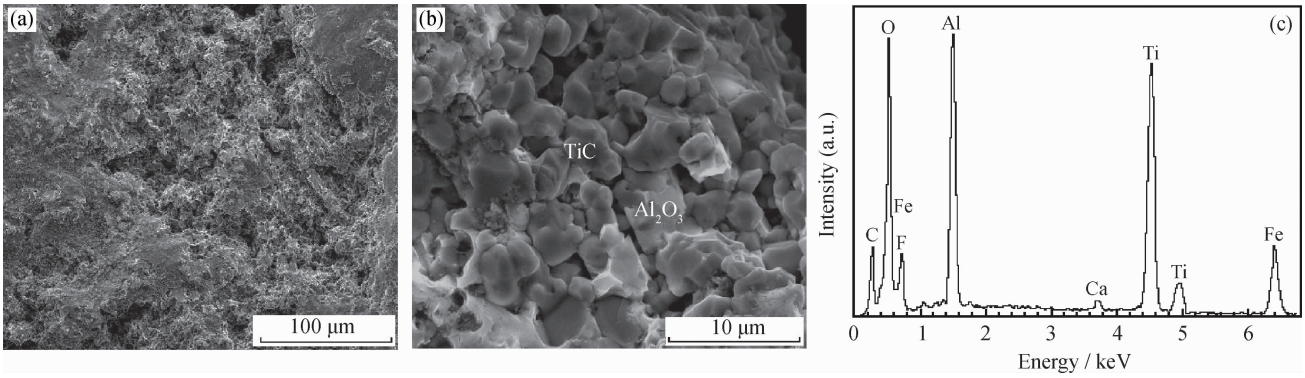

图 5　Al_2O_3 - TiC - CaF_2 层 SEM 图像和 EDS 分析图

Fig. 5　SEM photographs and EDS pattern of Al_2O_3 - TiC - CaF_2 layer

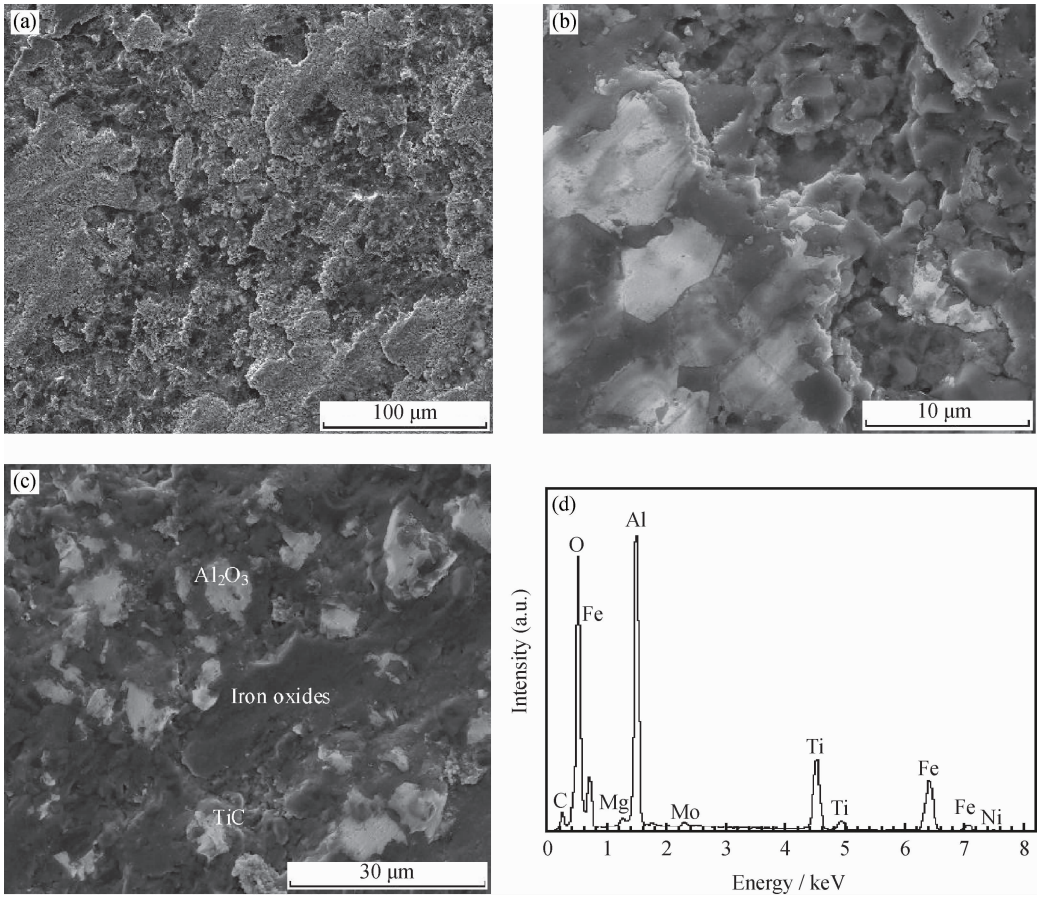

图 6　Al_2O_3 - TiC 层 SEM 图像和 EDS 分析图

Fig. 6　SEM photographs and EDS pattern of Al_2O_3 - TiC layer

3　结　论

（1）通过真空热压烧结办法制备 Al_2O_3 - TiC/Al_2O_3 - TiC - CaF_2 复合叠层陶瓷材料。在给定的实验条件下，实验试样与淬火 45# 钢组成的滑动摩擦副进行摩擦磨损实验。载荷一定时，摩擦系数和磨损率随着转速的提高而减小；转速一定时，摩擦系数和磨损率随着载荷的增加而减小。

（2）Al_2O_3 - TiC/Al_2O_3 - TiC - CaF_2 复合叠层陶瓷材料的磨损形式主要是磨粒磨损和黏着磨损。Al_2O_3 - TiC - CaF_2 材料层的磨损形式主要是磨粒磨损，Al_2O_3 - TiC 材料层的磨损形式主要是黏着磨损。

参考文献：

[1] 肖光春，许崇海，方　斌，等. 陶瓷模具材料的使用性能研究[J]. 稀有金属材料与工程，2007，36(1)：770-773.
Xiao Guangchun，Xu Chonghai，Fang Bin，et al. Research on the engineering performance of ceramic die materials [J]. Rare Metal Materials and Engineering，2007，36(1)：770-773.

[2] 温诗铸，黄　平. 摩擦学原理 [M]. 三版. 北京：清华大学出版社，2009：259-260.
Wen Shizhu，Huang Ping. Principles of tribology [M]. 3rd edition. Beijing：Tsinghua University Press，2009：259-260.

[3] Suh M S，Chae Y H，Kim S S. Friction and wear behavior of structural ceramics sliding against zirconia [J]. Wear，2008，264(9/10)：800-806.

[4] Shi G D，Wua Z J，Wang Z，et al. The mechanical properties and microstructure of the bionic alloy - ceramic laminated composite [J]. Materials and Design，2012，33：300-305.

[5] Liu N，Shi M，Xu Y D，et al. Effect of starting powders size on the Al_2O_3 - TiC composites [J]. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials，2004，22(6)：265-269.

[6] Tai Q，Mocellin A. Review：High temperature deformation of Al_2O_3 based ceramic particle or whisker composites [J]. Ceramics International，1999，25(5)：395-408.

[7] 赵兴中，罗　虹，刘家浚，等. 干摩擦条件下 Ti(CN)－Al_2O_3 复合陶瓷与金属摩擦副的摩擦学特性研究[J]. 硅酸盐学报，1996，24(5)：139-140.
Zhao Xingzhong，Luo Hong，Liu Jiajun，et al. A study on the tribological characteristics of Ti (CN) - Al_2O_3/metal pairs under dry condition [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society，1996，24(5)：139-140.

[8] Sullivan J L，Shi B G，Saied S O. Microtribological studies of two-phase Al_2O_3 - TiC ceramic at low contact pressure [J]. Tribology International，2005，38(11/12)：987-994.

[9] 孙媛媛，王　芬，周彦昭. $A1_2O_3$ 层状复合陶瓷的研究进展[J]. 中国陶瓷，2004，40(4)：20-24.
Sun Yuanyuan，Wang Fen，Zhou Yanzhao. Progress in research on laminated Al_2O_3 ceramic matrix composites [J]. China Ceramic，2004，40(4)：20-24.

[10] 齐亚娥，张永胜，胡丽天. Al_2O_3/Al_2O_3－ZrO_2(3Y)层状纳米陶瓷复合材料的显微结构及弯曲强度[J]. 硅酸盐学报，2011，39(2)：228-232.
Qi Ya'e，Zhang Yongsheng，Hu Litian. Microstructure and bending strength of Al_2O_3/Al_2O_3 - ZrO_2 (3Y) laminated nanocomposites [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society，2011，39(2)：228-232.

[11] 陈　蓓，丁培道，程　川. 层状复合陶瓷材料制备工艺与性能关系[J]. 硅酸盐通报，2004(6)：27-29.
Chen Bei，Ding Peidao，Cheng Chuan. Relationship between processing and mechanical property of Al_2O_3/ZrO_2 laminated ceramics [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society，2004 (6)：27-29.

[12] 丁新更，葛曼珍，杨　辉. 氧化铝/ZTA 强夹层层状复合陶瓷的制备和性能[J]. 硅酸盐通报，2000，19(1)：50-52.
Ding Xingeng，Ge Manzhen，Yang Hui. Preparation and properties of laminated Al_2O_3/ZTA [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society，2000，19(1)：50-52.

[13] 赵　喆，龚江宏，苗赫濯，等. TiC 颗粒弥散 Al_2O_3 复合材料的阻力曲线行为[J]. 硅酸盐学报，2000，28(4)：371-375.
Zhao Zhe，Gong Jianghong，Miao Hezhuo，et al. Crack - resistance curve behavior of TiC particle dispersed Al_2O_3 composites [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society，2000，28(4)：371-375.

[14] Yang X F，Ze X B，Wang H Y. Wear properties and microstructures of alumina matrix composite ceramics used for drawing dies [J]. Ceramics International，2009，34(12)：3495-3502.

[15] 杨学锋，王　慧，昃向博，等. Al_2O_3/TiC/Mo/Ni 陶瓷拉拔模具内孔表面磨损行为[J]. 稀有金属材料与工程，2009，38(2)：164-167.
Yang Xuefeng，Wang Hui，Ze Xiangbo，et al. Research on tribological properties of internal surface on Al_2O_3/TiC/Mo/Ni composite ceramic wire drawing die [J]. Rare Metal Materials and Engineering，2009，38(2)：164-167.

[16] 曹同坤，高　伟. Al_2O_3/TiC/CaF_2 陶瓷的摩擦磨损及自润滑膜的形成机理研究 [J]. 材料工程，2009(9)：75-79.
Cao Tongkun，Gao Wei. Wear behavior and mechanism of self tribofilm formation of Al_2O_3/TiC/CaF_2 [J]. Journal of Materials Engineering，2009(9)：75-79.

[17] 曹同坤，邓建新，孙军龙. Al_2O_3/TiC/CaF_2 自润滑陶瓷材料的研究[J]. 材料工程，2005(3)：37-42.
Cao Tongkun，Deng Jianxin，Sun Junlong. Study on self - lubricating Al_2O_3/TiC/CaF_2 ceramic composite [J]. Journal of Materials Engineering，2005(3)：37-42.

[18] Deng J X，Cao T K，Ding Z L，et al. Tribological behaviors of hot-pressed Al_2O_3/TiC ceramic composites with the additions of CaF_2 solid lubricants [J]. Journal of the European Ceramic Society，2006，8(26)：1317-1323.

[19] 曹同坤，高　伟，王晓娜. Al_2O_3/TiC/CaF_2 自润滑陶瓷刀具材料的切削性能及磨损机理[J]. 青岛科技大学学报：自然科学版，2008(2)：150-153.
Cao Tongkun，Gao Wei，Wang Xiaona. Study on cutting performance and wearing mechanism of Al_2O_3/TiC/CaF_2 self - lubricating ceramic tool [J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology：Natural Science Edition，2008(2)：150-153.

[20] Wang G F，Lu Z，Wang C W，et al. Fabrication and mechanical properties of Al_2O_3 - Si_3N_4/ZrO_2 - Al_2O_3 laminated composites [J]. Powder Technology，2011，214 (2)：188-193.

[21] 钱晓倩，葛曼珍，吴义兵，等. 层状复合陶瓷强韧化机制及其优化设计因素[J]. 无机材料学报，1999，14(4)：520-526.
Qian Xiaoqian，Ge Manzhen，Wu Yibing，et al. Reinforcement mechanisms and optimum design of laminated ceramic composites [J]. Journal of Inorganic Material，1999，14(4)：520-526.

[22] Tarlazzi A，Roncari E，Pinasco P，et al. Tribological behavior of Al_2O_3/ZrO_2 - ZrO_3 laminated composites [J]. Wear，2000，244(1/2)：29-40.

[23] de Portu G，Micele L，Prandstraller D，et al. Abrasive wear in ceramic laminated composites [J]. Wear，2006，260(9/10)：1104-1111.

[24] Zeng Y P，Jiang D L. Fabrication and properties of laminated Al_2O_3/TiC composites [J]. Ceramics International，2001，27 (5)：597-602.

[25] 薛群基，吕晋军. 高温固体润滑研究的现状及发展趋势[J]. 摩擦学学报，1999，19(1)：91-96.
Xue Qunji，Lü Jinjun. Research status and developing trend of solid lubrication at high temperatures [J]. Tribology，1999，19 (1)：91-96.