

# Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>/Inconel 718 摩擦副的高温摩擦学性能

李 慧<sup>1,2</sup>,任书芳<sup>1</sup>,商 剑<sup>1,2</sup>,吕晋军<sup>1\*</sup>

(1. 中国科学院兰州化学物理研究所 固体润滑国家重点实验室,甘肃 兰州 730000;

2. 中国科学院 北京研究生院,北京 100049)

**摘 要:** 本文考察了 Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> - Inconel 718 摩擦副从室温到 800 °C 范围内的摩擦磨损性能. 结果表明:温度的升高有利于改善 Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> - Inconel 718 摩擦副的摩擦磨损性能,在 800 °C 时,其摩擦磨损性能优异. 随着温度的升高,摩擦系数从室温的 0.71 降至 800 °C 时的 0.37, Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> 的磨损率从  $4 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$  降至  $10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$  以下. 高温塑性变形和摩擦氧化物层的形成导致摩擦系数的降低,300 °C 以下,晶粒的断裂、拔出与脱落以及材料向合金的转移造成了 Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> 高的磨损率,从 400 °C 至 800 °C, Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> 晶粒的断裂与脱落受到明显抑制,其磨损率显著降低.

**关键词:** Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>; 高温; 摩擦; 磨损

中图分类号: TH117.3

文献标志码:A

文章编号:1004 - 0595(2013)02 - 0129 - 06

## Tribological Properties of Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> - Inconel 718 Couple at Elevated Temperatures

LI Hui<sup>1,2</sup>, REN Shu - fang<sup>1,2</sup>, SHANG Jian<sup>1,2</sup>, LV Jin - jun<sup>1\*</sup>

(1. State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics,

Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The tribological properties of Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> sliding against Ni - based alloy Inconel 718 from ambient temperature to 800 °C were investigated. The experiment results indicated that the tribological behaviors of the couple were improved with the increase of temperatures. The Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> - Inconel 718 couple presented excellent tribological properties at 800 °C. The friction coefficient was 0.81 at ambient temperature and wear rate of Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> was  $4 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ . In contrast, the friction coefficient was 0.37 at 800 °C and the wear rate of Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> reduced to  $10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ . The deformation at elevated temperature and the tribo - oxidation led to the decrease of friction coefficient. The high wear rate of Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> was determined by the fracture and pullout of Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> grains and material transfer to the counterbody alloy during the sliding process below 300 °C, while at 400 ~ 800 °C, the fracture and pull - out of Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> grains were inhibited which resulted in the very low wear rate.

**Key words:** Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>, elevated temperature, friction, wear

可在宽温域反复使用的高温固体润滑材料的研究一直是摩擦学领域内最具挑战性的前沿课题<sup>[1-2]</sup>. 近年来,以空气箔片轴承为背景的高温固体

润滑材料的研究成为高温摩擦学的新挑战点. 空气箔片轴承为无油润滑的流体动压轴承,采用以流体(空气)润滑为主、固体润滑为辅的双重润滑方式,

Received 26 September 2012, revised 16 October 2012, accepted 4 December 2012, available online 28 March 2013.

\* Corresponding author. E - mail: jjlu@lzb.cas.cn, Tel: +86 - 931 - 4968198.

The project was supported by the Natural Science Foundation of China (51075382) and National Key Basic Research Program of Chinese Academy of Sciences (YYYJ - 0931).

国家自然科学基金面上项目(51075382)和中国科学院重大院方向性项目(YYYJ - 0931)资助.

可在高速、高温环境下服役. 早期的空气箔片轴承已成功商业化应用于高速运转的空气循环机(ACM)等系统中<sup>[3]</sup>. 由于空气箔片轴承在启动、停止阶段轴颈与箔片会发生接触并产生磨损,因此需要在轴颈及箔片之间提供高温固体润滑以保证箔片轴承的稳定运行. 美国 NASA 的 Glenn 研究中心研发的 PS304 高温固体润滑涂层已得到应用,但其制备和处理工艺相当复杂<sup>[4]</sup>,涂层孔隙率高,相复杂,制备成本高.

美国 Drexel 大学与 Honeywell 研究机构于 2003 年起开始共同研发用于涡轮机的新一代高温轴颈材料,旨在发展以 Ta<sub>2</sub>AlC - Ag 或 Cr<sub>2</sub>AlC - Ag 为轴颈,高温合金 Inconel 718 为箔片的空气箔片轴承. 该研发经历了实验室摩擦学评价和台架试验两个阶段. 由于台架试验的良好结果,即在 25 ~ 550 °C 范围内,分别成功进行了 10 000 次和 3 000 次启停循环台架试验<sup>[5]</sup>,研发人员认为该类轴颈材料已具有实用价值.

与 Ta<sub>2</sub>AlC 和 Cr<sub>2</sub>AlC 相比, Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> 具有更宽的使用温度、更好的力学性能和可加工性, Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> 基自润滑材料有望有更多的应用. 基于此,本文开展了 Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> 为轴颈、Inconel 718 为箔片的实验室摩擦学评价,旨在为发展空气箔片轴承用新型高温自润滑轴颈材料提供实验依据和数据积累. 与美国的研究相比,我们考察的温度更高(室温到 800 °C),接触应力更高(美国为 MPa,本文为 GPa).

## 1 实验部分

### 1.1 材料的制备

采用原位反应热压烧结制备 Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> 块体材料,具体工艺<sup>[6]</sup>:以 Ti, Si 和石墨粉末为原料,添加少量的(3.1 mol%) Al 粉为烧结助剂,于 1 450 °C,压力为 25 MPa 下在石墨模具中反应烧结制备. 其中杂质主要为 TiC,密度由阿基米德法测得,其性能参数见表 1. 高温合金 Inconel 718 是从北京钢研高纳科技股份有限公司购得.

### 1.2 摩擦磨损试验

与文献[5]相同,本文在 THT 高温摩擦磨损试验机(瑞士 CSM 公司)上评价了 Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>/Inconel 718 摩擦副的摩擦磨损性能,但本文做了两个改动:一是采用栓-盘接触方式而非片-盘接触方式,因此,本文中的接触应力(GPa)远高于文献[5]中的接触应力(MPa);二是评价了室温、200、300、400、500、600 和 800 °C 而非文献[5]中的室温和 550 °C.

Table 1 Some physical parameters of Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>

表 1 Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> 块体材料的力学性能

Properties	Specification
Density/(g · cm <sup>-3</sup> )	4.388
Purity	97%
Vickers hardness/GPa	6 (25 °C)
Bending strength/MPa	432 (25 °C)
Compress strength/MPa	882 (25 °C)
Shear strength/MPa	59 (25 °C)
Young's modulus/GPa	331 (25 °C), 251 (1200 °C)
Poisson ratio	0.20 (25 °C), 0.23 (1200 °C)
Shear modulus/GPa	185 (25 °C), 155 (1200 °C)
Thermal expansion coefficient/°C	6.58 × 10 <sup>-6</sup> (200 °C), 9.00 × 10 <sup>-6</sup> (800 °C)
Thermal conductivity/(W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> )	37.9 (25 °C), 36.9 (100 °C), 35.4 (200 °C)

栓(上试样)为 Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> 块体材料,直径 5 mm,一端加工为直径为 5 mm 的半球状,表面经 1 000# SiC 砂纸打磨;盘(下试样)为 φ32 mm × 8 mm 的镍基高温合金 Inconel 718,经 3 μm 金刚石抛光液抛光,表面粗糙度为 0.02 ~ 0.04 μm. 在每次试验之前用丙酮超声清洗栓和盘的表面 10 min,经干燥后待用. 试验条件:载荷 3 N;线速度 1.0 m/s;滑动距离 2 000 m;试验温度为室温、200、300、400、500、600 和 800 °C. 每个温度下的试验重复 3 次. 所有的试验外部环境均为室温,空气气氛. 摩擦系数由计算机实时自动记录. 栓的磨损体积由万分之一电子天平称量摩擦试验前后其质量变化除以密度求得;盘的磨损体积由三维轮廓仪(MicroXAM - 3D Surface Profiler)获得的磨痕轮廓计算求得. 磨损率由下式计算:

$$W = \frac{V}{FL} \quad (1)$$

式中, W、V、F 和 L 分别为栓或盘的体积磨损率、经丙酮超声清洗后栓或盘的磨损体积、载荷和滑动距离.

用 JSM - 5600LV 型扫描电子显微镜(SEM, 日本 JEOL 公司)/KEVEX 能量色散谱仪(EDS)观察磨痕的表面形貌和进行元素的半定量分析.

## 2 结果与讨论

### 2.1 摩擦磨损性能

文献[5]总结了实验室摩擦学评价结果和台架试验结果的相关性,认为如果实验室摩擦学评价结果满足一定条件,则可通过台架试验. 该条件为摩擦系数 μ 不大于 0.5;磨损率小于 10<sup>-4</sup> mm<sup>3</sup>/(N · m).

图 1 示出了 Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>/Inconel 718 摩擦副的平均摩擦系数随温度的变化. 摩擦系数随温度的升高而

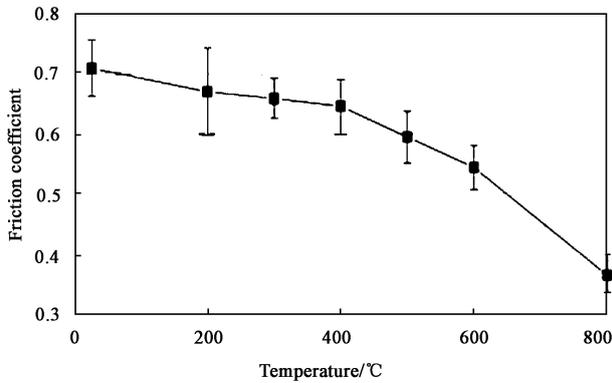
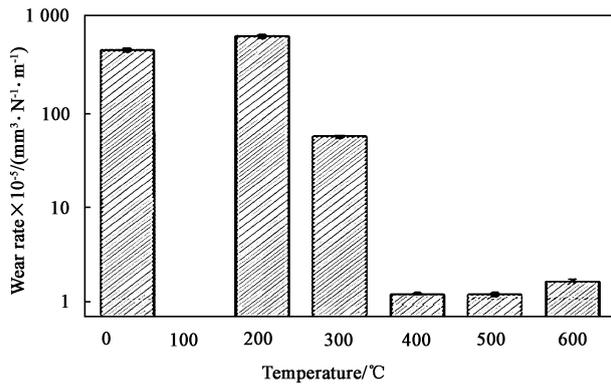


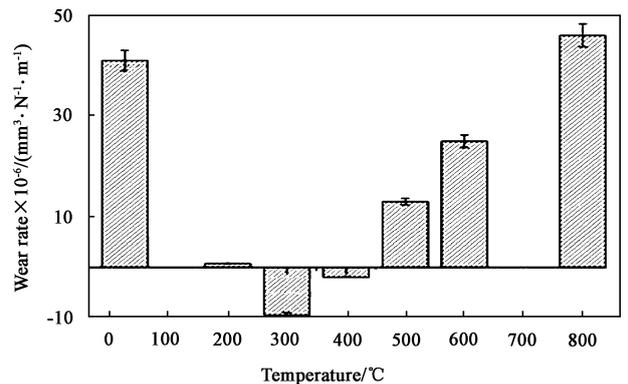
Fig. 1 Friction coefficient of Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> pin sliding against Inconel 718 disk at elevated temperatures

图1 Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>/Inconel 718 摩擦副的摩擦系数-温度曲线

降低,即从室温的 0.71 降至 800 °C 下的 0.37. Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>/Inconel 718 摩擦副在 800 °C 下表现出具备通过台架试验的良好的摩擦学性能.



(a) Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>



(b) Inconel 718

Fig. 2 Wear rates of Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> and Inconel 718 as a function of temperature

图2 Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> 和 Inconel 718 的磨损率随温度的变化

Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> 的磨斑较 600 °C 的更小,因此,其磨损率小于 10<sup>-5</sup> mm<sup>3</sup>/(N·m) 数量级,为轻微磨损.

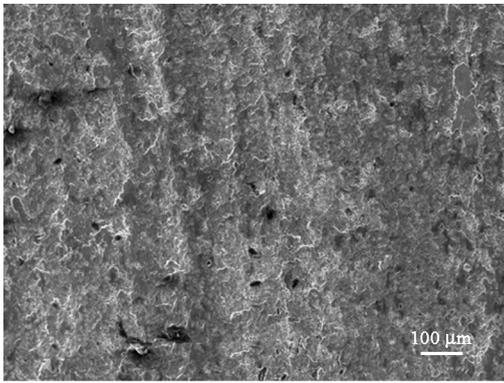
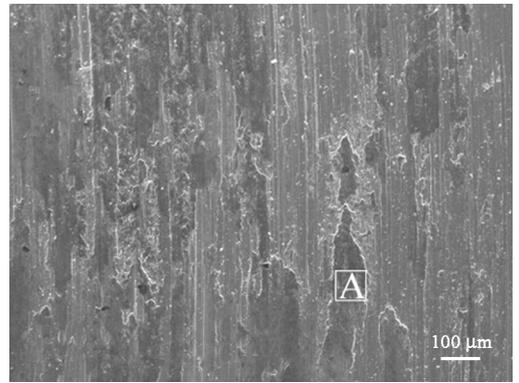
与 Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> 不同,Inconel 718 的磨损率随温度的升高呈先降低后增大的趋势,见图 2(b). 室温下,Inconel 718 的磨损率为 4 × 10<sup>-5</sup> mm<sup>3</sup>/(N·m),温度升高,磨损率迅速降低,到 300 和 400 °C 时,甚至出现了负的磨损率,500 °C 以上,磨损率又开始增加,到 800 °C,其磨损率为 4.6 × 10<sup>-5</sup> mm<sup>3</sup>/(N·m). 从室温至 800 °C 范围内,Inconel 718 的磨损率不超过 ~10<sup>-5</sup> mm<sup>3</sup>/(N·m) 数量级. 由于在摩擦过程中,对偶 Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> 向 Inconel 718 发生了材料转移(见图 4),特别是从 200 °C 到 400 °C,材料转移量更大,在其表面形成了机械混合层,导致负的磨损率.

## 2.2 磨损率

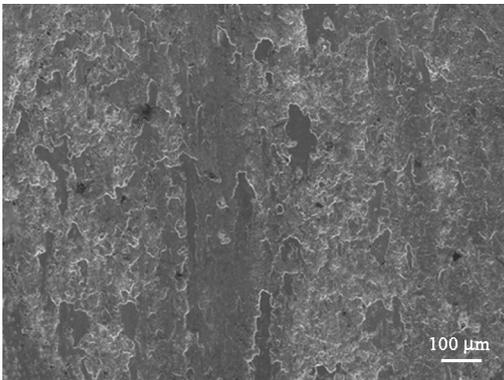
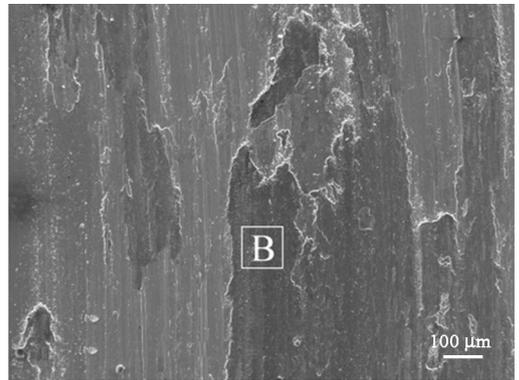
图 2(a) 和 (b) 分别示出了不同温度下 Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> 和 Inconel 718 的磨损率. 从图 2(a) 可知,Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> 的磨损率随温度的变化趋势与摩擦系数随温度的变化趋势相同,即 Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> 的磨损率也随着温度的升高而降低. 在室温和 200 °C 时,Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> 的磨损率均很高,分别为 4 × 10<sup>-3</sup> 和 6 × 10<sup>-3</sup> mm<sup>3</sup>/(N·m),为严重磨损;温度升高,Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> 的磨损率迅速下降,到 400 和 600 °C 时,其磨损率降低至约 10<sup>-5</sup> mm<sup>3</sup>/(N·m) 数量级,为轻微磨损. 从室温到 600 °C 范围内,Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> 的磨损率降低 2 个数量级以上. 800 °C 时,由于在摩擦试验过程中 Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> 的表面发生氧化,质量有所增加,同时磨损又造成其质量减少,因此,电子天平称量摩擦试验前后 Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> 的质量差只有 0.000 1 g,此值与电子天平的精度相当,没有实际意义,因此图中未给出此温度下 Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> 的磨损率. 但是 800 °C 时

## 2.3 磨损面分析

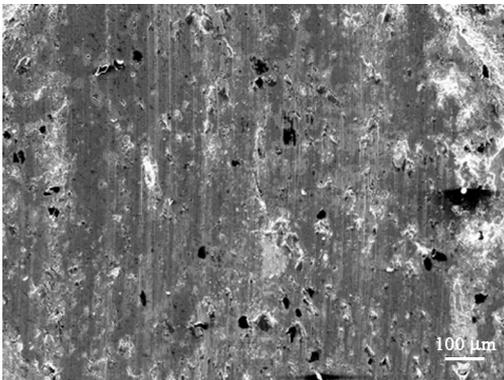
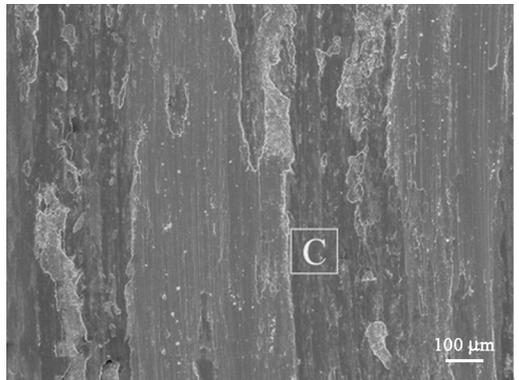
图 3 示出了不同温度下摩擦试验后 Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> 和 Inconel 718 磨损面的 SEM 图片. 可以看出,从室温到 600 °C,在 Inconel 718 合金表面均发现了来自 Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> 的材料转移(见图 4),其表面不同程度的覆盖着不连续的机械混合层或摩擦层. 在室温和 200 °C 下,Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> 表面粗糙多孔,其磨损机理主要为晶粒的拔出与脱落. 文献报道,Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> 的脆塑转变温度在 1 100 °C 到 1 200 °C 左右<sup>[7]</sup>,即在低温下,Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> 与其他陶瓷一样,表现为脆性;同时,Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> 的晶粒间结合又较弱<sup>[8]</sup>,因此在摩擦过程中切向力的作用下,晶粒很容易拔出,或脆性断裂,从而脱离基体,形成磨屑. 其中绝大部分磨屑在离心力的作用

(a) RT,  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$ 

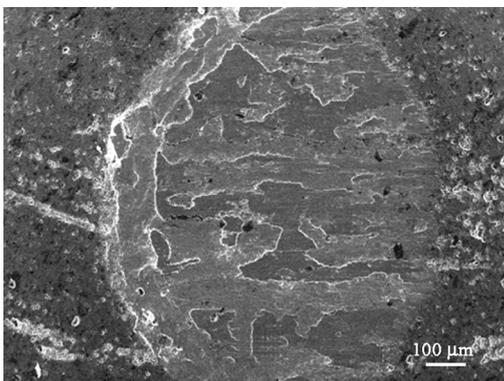
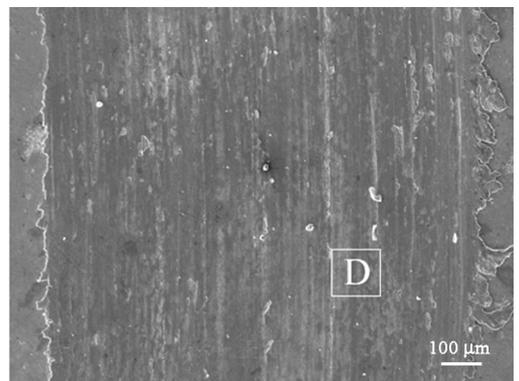
(b) RT, Inconel 718

(c) 400 °C,  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$ 

(d) 400 °C, Inconel 718

(e) 600 °C,  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$ 

(f) 600 °C, Inconel 718

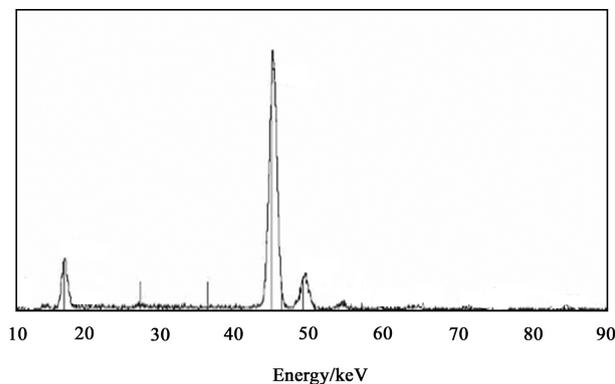
(g) 800 °C,  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$ 

(h) 800 °C, Inconel 718

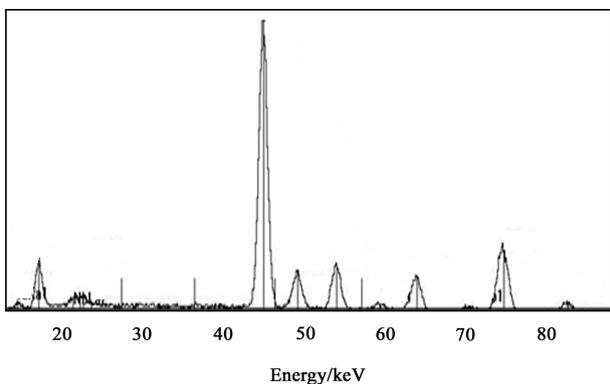
Fig. 3 SEM micrographs of worn surfaces of  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$  and Inconel 718 at elevated temperatures图3 不同温度下  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$  和 Inconel 718 的磨损面形貌图

下排出摩擦界面,这也是造成 Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> 磨损率很大的主要原因之一. 另一方面,少量 Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> 磨屑向 Inconel 718 合金转移(见图4),在反复碾压等机械混合以及热的作用下,与来自合金的组分形成机械混合层,并粘附在合金表面,这也是 Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> 磨损率大的另一原因. 同时,合金表面来自 Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> 的材料转移也导致了合金在 400 °C 以下磨损率大大降低,甚至出现负的磨损率. 温度升至 400 °C 时,在来自环

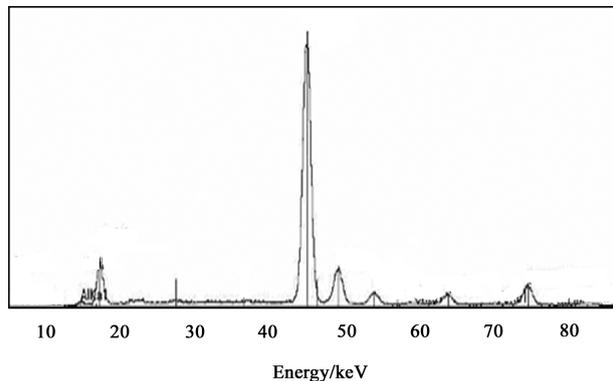
境(摩擦试验机加热源)的热量、摩擦热以及机械作用下,Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> 表现出类似金属的塑性流动特征,晶粒的拔出和脱落受到很大抑制,导致其磨损率大大降低. 600 °C 时,这种塑性更为明显. 同时,合金也表现出金属固有的塑性,与 Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> 对摩时,更容易发生剪切变形,磨痕深度增加,所以其磨损率有所增大. 800 °C 时,Inconel 718 合金表面基本没有来自 Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> 的材料转移见[图4(d)],这也使 Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> 的磨



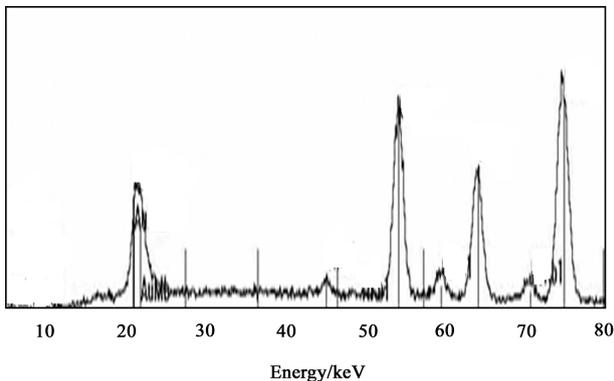
(a) Region A



(b) Region B



(c) Region C



(d) Region D

Fig. 4 EDS spectra of different areas on wear track in Fig. 3

图4 图3中不同磨痕区域的EDS能谱分析

损率进一步降低;而此时合金表面磨痕边缘有明显的塑性挤出变形,表明此温度下,合金有可能出现软化,很容易被剪切,导致其磨损率进一步增加.

文献报道,除了在如高速<sup>[9]</sup>、与金刚石配副<sup>[10]</sup>等少数条件下,Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> 在室温并未表现出良好的自润滑性. 同样,本试验中 Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>/Inconel 718 摩擦副在室温下也具有较高的摩擦系数,主要是因为脱落的 Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> 晶粒在摩擦界面造成磨粒磨损,随着温度的升高,Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> 与 Inconel 718 的塑性愈加明显,也愈容易剪切变形;Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> 磨损降低,磨屑减少,磨粒磨损减轻,表面更加光滑;合金表面粘附的机械混合

层经高温烧结、氧化后更为致密、光滑,从而起到减摩作用,这些因素共同导致高温下摩擦系数的降低. 在 800 °C 下,Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>/Inconel 718 摩擦副表现出优异的摩擦学性能.

### 3 结论

a. 从室温至 800 °C ,Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>/Inconel 718 摩擦副的摩擦系数和 Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> 的磨损率随温度的升高而降低,而 Inconel 718 合金的磨损率则先降低至出现负磨损,后增大.

b. Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>/Inconel 718 摩擦副随温度变化表

现出不同的摩擦学性能,其磨损机理与  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$  晶粒的脱落、材料的转移以及高温塑性变形等因素有关.

c. 800 °C 时,  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2/\text{Inconel 718}$  摩擦副表现出优异的摩擦学性能.

#### 参考文献:

- [ 1 ] Xue Q J, Lv J J. Research status and developing trend of solid lubrication at high temperatures [ J ]. Tribology, 1999, 19 ( 1 ): 91 - 96 ( in Chinese ) [ 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 ].
- [ 2 ] Li Y F, Ouyang J H, Zhou Y. Research and development status of high temperature solid lubricant materials [ J ]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2007, 28 ( 6 ): 2 - 5 ( in Chinese ) [ 李玉峰, 欧阳家虎, 周玉. 高温固体润滑材料研究的发展现状 [ J ]. 热处理技术与装备, 2007, 28 ( 6 ): 2 - 5 ].
- [ 3 ] A Giri L. Foil air/gas bearing technology - an overview. ASME Publication 97 - GT - 347.
- [ 4 ] Yang J H, Xia K, Yao Y X, *et al.* New high temperature solid lubricant coatings applied to foil air bearings [ J ]. Lubrication Engineering, 2003, 5: 34 - 36 ( in Chinese ) [ 杨金焕, 夏葵, 姚艳霞, 等. 用于箔片空气轴承的新型高温固体润滑镀层 [ J ]. 润滑与密封, 2003, 5: 34 - 36 ].
- [ 5 ] S Gupta, D Filimonov, T Palanisamy, *et al.*  $\text{Ta}_2\text{AlC}$  and  $\text{Cr}_2\text{AlC}$  Ag - based composites - New solid lubricant materials for use over a wide temperature range against Ni - based superalloys and alumina [ J ]. Wear, 2007, 262: 1 479 - 1 489.
- [ 6 ] Ren S F. Synthesis and tribological properties of  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$  [ D ]. Lanzhou, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2010 ( in Chinese ) [ 任书芳.  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$  的制备及其摩擦学性能研究 [ D ]. 兰州, 中国科学院兰州化学物理研究所, 2010 ].
- [ 7 ] M Radovic, M W Barsoum, T El - Raghy, *et al.* Tensile creep of coarse - grained  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$  in the 1 000 ~ 1 200 °C temperature range [ J ]. Journal of Alloys and Compounds, 2003, 361: 299 - 312.
- [ 8 ] Zhang Z F, Sun Z M, Zhang H, *et al.* Micron - scale deformation and damage mechanisms of  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$  crystals induced by indentation [ J ]. Advanced Engineering Materials, 2004, 6 ( 12 ): 980 - 983.
- [ 9 ] Huang Z Y, Zhai H X, Guan M L, *et al.* Oxide - film - dependent tribological behaviors of  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$  [ J ]. Wear, 2007, 262: 1 079 - 1 085.
- [ 10 ] Zhang Y, Ding G P, Zhou Y C, *et al.*  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$  - a self - lubricating ceramic [ J ]. Materials Letters, 2002, 55: 285 - 289.