

DOI: 10.16078/j.tribology.2018190

# MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-Mo<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub>/SiC 配对副的 摩擦磨损性能

颜建辉<sup>1,2\*</sup>, 康蓉<sup>2</sup>, 黄金鑫<sup>2</sup>, 汪异<sup>1,2</sup>, 康永海<sup>1,2</sup>

(1. 湖南科技大学 高温耐磨材料及制备技术湖南省国防科技重点实验室, 湖南 湘潭 411201;

2. 湖南科技大学 材料科学与工程学院, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:** MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-Mo<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub> 复合材料是一种很有发展前景的高温耐磨材料, 但 MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-Mo<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub>/SiC 配对副的干滑动摩擦磨损性能尚不清楚. 本文中通过销-盘式干滑动摩擦磨损试验, 考察了 MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-Mo<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub>/SiC 配对副在不同温度(25~1 000 °C)和载荷下(2.5~10 N)的摩擦学特性. 结果表明: 试验温度和载荷对 MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-Mo<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub>/SiC 配对副的摩擦系数影响较大, 而对其磨损率影响较小. 载荷为 5 N 时, 在 25~1 000 °C 区间, 摩擦系数和磨损率分别在 0.11~0.43 和 0.513×10<sup>-7</sup>~0.544×10<sup>-7</sup> mm<sup>3</sup>/(N·m) 范围; 在 25~400 °C 时, 磨损机制以轻微的氧化和黏着磨损为主, 在 600~1 000 °C 磨损机制主要表现为严重的氧化和黏着磨损. 在 1 000 °C 时, 随着载荷(2.5~10 N)的增加, 摩擦系数和磨损率分别为 0.29~0.38 和 0.540×10<sup>-7</sup>~0.547×10<sup>-7</sup> mm<sup>3</sup>/(N·m); 载荷为 2.5~10 N 时, 始终存在黏着和氧化磨损; 载荷为 7.5~10 N 时, 材料磨损表面还伴随碾压塑性变形的特征.

**关键词:** MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-Mo<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub>; SiC; 摩擦磨损; 磨损机制

中图分类号: TG172.2

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2019)03-0366-08

## Friction and Wear Properties of MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-Mo<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub> Composite against SiC

YAN Jianhui<sup>1,2\*</sup>, KANG Rong<sup>2</sup>, HUANG Jinxin<sup>2</sup>, WANG Yi<sup>1,2</sup>, KANG Yonghai<sup>1,2</sup>

(1. Hunan Provincial Key Defense Laboratory of High Temperature Wear Resisting Materials and Preparation Technology, Hunan University of Science and Technology, Hunan Xiangtan 411201, China

2. School of Material Science and Engineering, Hunan University of Science and Technology, Hunan Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-Mo<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub> composite is a promising wear resistance material at elevated temperature. However, the tribological properties of MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-Mo<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub> against SiC were not fully understood. In the present study, the friction and wear properties of the composite at 25~1 000 °C and 2.5~10 N were investigated using a ball-on-disk sliding tests. The results show that both test temperatures and applied loads had significant effect on the coefficient of friction (COF), while have insignificant effect on the wear rate. The COFs and wear rates of the MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-Mo<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub> composite at 25~1 000 °C were in the ranges of 0.11~0.43 and 0.540×10<sup>-7</sup>~0.547×10<sup>-7</sup> mm<sup>3</sup>/(N·m), respectively. The mild oxidation and adhesive wears were main wear mechanisms for the composite tested below 400 °C. At 600~1 000 °C, the wear mechanisms were dominated by severe oxidation wear and adhesive wear. The COFs and wear rates of the composite, at 1 000 °C under load of 2.5~10 N, were in the ranges of 0.29~0.38 and 0.540×10<sup>-7</sup>~0.547×10<sup>-7</sup> mm<sup>3</sup>/(N·m),

Received 13 December 2018, revised 16 February 2019, accepted 19 February 2019, available online 28 May 2019.

\*Corresponding author. E-mail: jhyan@hnust.edu.cn, Tel: +86-13107120255.

The project was supported by National Natural Science Foundation of China (51475161) and Natural Science Foundation of Hunan Provincial (2018JJ2119).

国家自然科学基金项目(51475161)和湖南省自然科学基金项目(2018JJ2119)资助.

respectively. The dominant wear mechanisms of the composite at 2.5~10 N were adhesive wear and oxidation wear, and accompanied with plastic deformation at 7.5~10 N.

**Key words:** MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-Mo<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub>; SiC; friction and wear; wear mechanism

二硅化钼(MoSi<sub>2</sub>)具有高熔点、高硬度,以及优异的高温抗氧化性能和耐磨性能等优良特性,因而引起国内外研究学者的极大兴趣<sup>[1-2]</sup>. MoSi<sub>2</sub>有望成为燃气轮机发动机转子叶片、涡轮增压器转子和定子叶片的高温结构材料. 由于SiC陶瓷常被用作高性能喷气发动机的混合轴承组件,作为高温部件的MoSi<sub>2</sub>会与SiC在干摩擦条件下产生相对滑动. 所以, MoSi<sub>2</sub>的摩擦学行为的研究显得较为重要. 近年来, MoSi<sub>2</sub>在耐磨材料中的应用受到了广泛的关注. 以往的研究表明, MoSi<sub>2</sub>在恶劣的二体磨料磨损环境中表现出极高的耐磨性能<sup>[3-4]</sup>; 水润滑条件下的MoSi<sub>2</sub>比干滑动条件下的摩擦系数要低<sup>[5]</sup>; 另外, 在1 000 °C与Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>和SiC陶瓷对磨时, MoSi<sub>2</sub>表现出优异的高温耐磨性能<sup>[6]</sup>. 此外, MoSi<sub>2</sub>涂层也能明显改善钢或镍基合金<sup>[7-8]</sup>基体的耐磨性能,表现出较好的应用前景.

然而, MoSi<sub>2</sub>的强度与韧性不够高,还不能满足实际应用的需求<sup>[9]</sup>. 近年来,研究表明添加TiB<sub>2</sub><sup>[10]</sup>、TiC<sup>[11]</sup>和SiC<sup>[12]</sup>等陶瓷增强剂可以提高MoSi<sub>2</sub>的耐磨性;进行金属元素合金化,如W<sup>[13]</sup>或Nb<sup>[4]</sup>可以大幅度提高MoSi<sub>2</sub>的硬度、断裂韧性和强度. 此外,由于Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>同时存在金属键和共价键, MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>复合材料能够表现出更好的韧性、高硬度和弹性模量<sup>[14-15]</sup>. 在氧化环境下, Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>在700~900 °C容易氧化生成MoO<sub>2</sub>和MoO<sub>3</sub>晶体以及非晶态SiO<sub>2</sub>, 这些氧化物在较宽的温度范围内表现出较低的摩擦系数<sup>[16-17]</sup>,使MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>复合材料具有高温自润滑作用. 因此, MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>是一种极具应用潜力的高温自润滑结构材料. 然而, MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>在高温下的抗氧化性较差,阻碍了其作为耐磨材料的实际应用.

为了提高MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>复合材料的高温抗氧化性能,改善Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>的高温抗氧化性是一种行之有效的方法. 已有文献<sup>[18-20]</sup>研究表明,添加适量B,由于生成了抗氧化性能优越的Mo<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub>,能大幅度改善Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>在800~1500 °C的高温抗氧化性能. 与没有掺杂B的合金

相比,掺杂B的合金具有更好的抗蠕变能力、高温强度和断裂韧性,这归因于Mo<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub>的高度强度和抗蠕变能力优于MoSi<sub>2</sub><sup>[21]</sup>. 最近,我们发现加入微量B的MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>复合材料比MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>表现出更好的力学性能和高温抗氧化性能<sup>[22]</sup>. 然而, B掺杂改性的MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-Mo<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub>复合材料的摩擦学特性尚不清楚,还有待深入的探索.

本文中采用Mo、Si和B单质元素粉末为原料,采用放电等离子烧结技术(SPS)制备MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-Mo<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub>复合材料,评价了试验温度(25~1 000 °C)和外加载荷(2.5~10 N)对复合材料摩擦磨损性能的影响,揭示其相关磨损机理,为高温结构耐磨材料的开发提供理论依据和基础数据.

## 1 试验部分

以Mo(质量分数99.0%,粒径2~4 μm), Si(质量分数99.5%,粒径2~4 μm)和B(质量分数99.9%,粒径10~20 μm)粉末为原料,按照74.5% Mo、24.5% Si和1% B的质量比配置粉末,通过机械混合获得混合均匀的粉末. 再采用等离子放电烧结炉(SPS-20T-10)把混合粉末真空烧结成MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-Mo<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub>复合材料,烧结工艺详见文献<sup>[21]</sup>. 用线切割机将SPS烧结体加工成所需尺寸试样,并用金相砂纸抛光试样表面. 分别采用维氏硬度计、压痕法和三点弯曲法分别测量复合材料的硬度、断裂韧性和抗弯强度.

采用GHT-1000型高温摩擦磨损试验机测试MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-Mo<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub>复合材料的干摩擦磨损性能. 下试样圆盘为MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-Mo<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub>复合材料( $R_a=1.6 \mu\text{m}$ ), 配对副为 $\phi 5 \text{ mm}$ 的SiC陶瓷球( $HV=28.40 \text{ GPa}$ ,  $R_a=0.2 \mu\text{m}$ ,  $\rho=3.21 \text{ g/cm}^3$ ). 摩擦磨损试验主要是考察温度和载荷对MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-Mo<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub>/SiC配对副摩擦磨损性能的影响,测试条件列于表1中. 试样的磨损体积和磨损率分别按 $V=LA$ 和 $K=V/SF$ 格式计算. 其中 $V, \text{mm}^3$ 和 $K, \text{mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$ 分别为磨损体积和磨损率;

表1 干摩擦磨损试验参数

Table 1 Parameters of dry sliding friction and wear test

Number	Rotation speed/(r/min)	Rotation radius/mm	Sliding time/min	Test temperatures/°C	Applied load/N
1	300	3.0	25	25, 200, 400, 600, 800, 1 000	5
2	300	3.0	25	1 000	2.5, 5, 7.5, 10

$L$ , mm为磨痕的半径;  $A$ ,  $\text{mm}^2$ 为磨痕截面面积, 磨痕截面采用轮廓仪(NanoMaP500-LS, USA)测量;  $S$ , m为总滑行距离;  $F$ , N为施加载荷. SiC的体积磨损用SiC磨损前后质量的变化除以其密度近似估算. 摩擦因素由高温摩擦磨损试验机上的计算模块自动给出, 取摩擦达到相对稳定状态时的平均数值作为材料的摩擦因素.

采用XRD仪器(XRD, D8 Advanced, Cu K $\alpha$ ), 扫描电镜(JSM-6380LV)和电子探针X射线显微分析仪(EPMA-1720)表征材料的物相组成、表面磨损形貌和微区成分.

## 2 结果与分析

### 2.1 MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-Mo<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub>复合材料微观结构和力学性能

MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-Mo<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub>样品的背散射电子(BSE)微观组织如图1所示, 材料的微观结构具有典型的多相组织特征. 图1中微观组织中, 暗、灰、白不同衬度区域分别为MoSi<sub>2</sub>、Mo<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub>和Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>相. 采用排水法分析测量并计算MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-Mo<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub>复合材料的相对致密度约为98.72%, 复合材料内部还存在少量的孔隙. 孔隙产生主要归因于在本试验烧结工艺条件下, 空位的移动和原子在晶界间的扩散不太充分, 导致晶粒间的空隙闭合不完全. 与纯MoSi<sub>2</sub><sup>[23]</sup>相比, MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-Mo<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub>复合材料的硬度(11.6 GPa)、弯曲强度(341 MPa)和断裂韧性(5.28 MPa·m<sup>1/2</sup>)得到明显提高.

### 2.2 不同温度下MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-Mo<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub>/SiC配对副摩擦学特性

#### 2.2.1 摩擦磨损性能

图2为MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-Mo<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub>复合材料与SiC对摩擦时, 摩擦系数与试验温度之间的关系. 可见, 试验温度

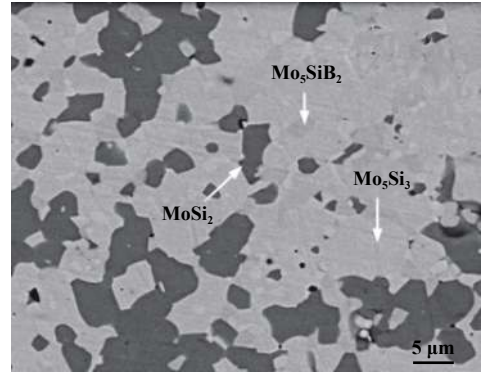
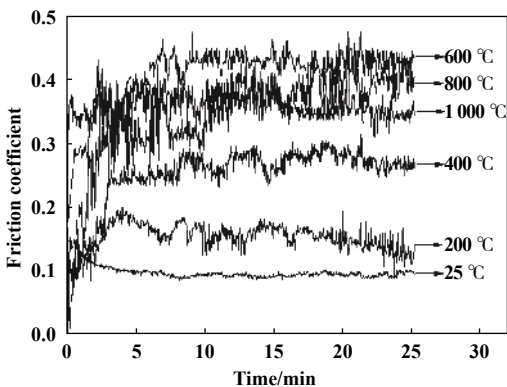


Fig. 1 Microstructural image (BSE) of the MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-Mo<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub> composite

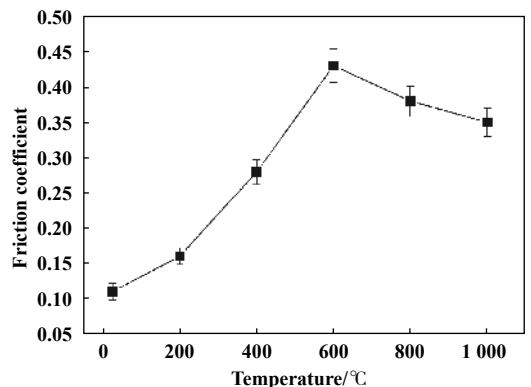
图1 MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-Mo<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub>复合材料微观组织(BSE)

对MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-Mo<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub>/SiC之间的摩擦系数影响很大. 从图2(a)可知, 在不同的试验温度, 复合材料经过约5 min的摩擦阶段后, 摩擦系数达到一个相对稳定的数值. 另外, 从图2(b)可以看出, 随着试验温度的升高, 材料的平均摩擦系数呈先增后降的趋势; 25 °C时, 摩擦系数最小仅为0.11, 600 °C时摩擦系数最大为0.43, 而1 000 °C时又降低为0.35. 这种摩擦系数的变化规律与不同温度下材料的表面的磨损状态有较大的关联, 这将在后文中通过磨损表面形貌进行分析.

图3为MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-Mo<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub>复合材料和SiC对磨球的磨损率与温度变化的关系曲线. 随着温度的升高(25~400 °C), 磨损率由 $0.513 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 稍微增加到 $0.516 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ ; 随着温度的继续升高(400~800 °C), 磨损率增加稍快, 800 °C时的磨损率为 $0.544 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ ; 当温度继续升高至1 000 °C时, 磨损率稍微降低到 $0.538 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ . 另外, 从图3中还可看出, 在25~600 °C时, SiC的磨损率表现为失重, 25 °C时磨损率最大为 $0.547 \times 10^{-9} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ , 随温度的升高



(a) Change of coefficients of friction with time



(b) Average friction coefficients at elevated temperatures

Fig. 2 Friction coefficients of MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-Mo<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub>/SiC at elevated temperatures

图2 MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-Mo<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub>/SiC在不同温度下的摩擦系数:

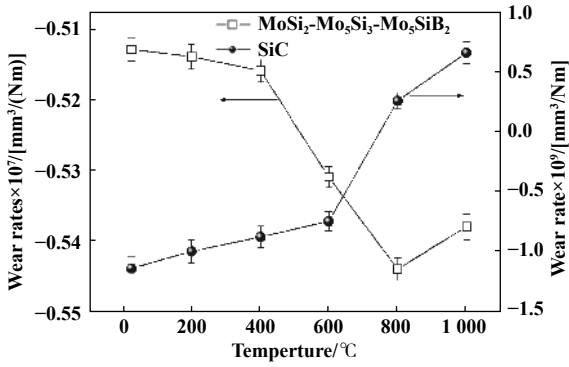


Fig. 3 Wear rates of MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-Mo<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub> and SiC at elevated temperatures

图3 MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-Mo<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub>和SiC在不同温度下的磨损率

磨损率逐渐降低;在800~1 000 °C时, SiC表现为磨损增重, 在1 000 °C时的磨损率为0.640×10<sup>-9</sup> mm<sup>3</sup>/(N·m). 由此可见, 环境温度对MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-Mo<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub>复合材料的磨损率影响较小, 而对摩擦副SiC的影响较大.

### 2.2.2 磨损机理

为了分析MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-Mo<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub>在不同温度下的氧化产物对摩擦磨损性能的影响, 模拟了复合材料在不同测试温度下摩擦磨损试验的加热过程, 分析了这些复合材料表面的氧化产物, 其XRD结果如图4所示. 可知, 当温度在25~400 °C时, 由于温度低且保温时间短, 复合材料表面仅生成了极少量的SiO<sub>2</sub>; 而当温度升至600 °C时, 复合材料表面生成了大量的SiO<sub>2</sub>和MoO<sub>3</sub>; 随着温度继续升高至800 °C或1 000 °C, 复合材料中SiO<sub>2</sub>衍射峰逐渐增强, 还伴有少量的B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>生成; 在800~1 000 °C时, 材料表面检测不到MoO<sub>3</sub>衍射峰, 这是由于试验温度较高, MoO<sub>3</sub>在高温时发生挥发所致.

图5为不同温度下MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-Mo<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub>复合材料的表面磨损形貌. 结合图4可知, 当试验温度为25~

200 °C时, 材料表面氧化产物极少, 磨损表面仍然平整光滑且无黏着物产生[见图5(a-b)], 摩擦系数较低; 轻微的脆性断裂剥落导致材料磨损率较小. 当试验温度为400 °C时, 摩擦过程中脱落的磨屑并没有发生塑性变形, 呈颗粒状堆积在材料表面, 黏着现象的加剧导致摩擦系数升高. 当试验温度为600 °C时, 根据图4材料的氧化产物可知, 材料表面生成的SiO<sub>2</sub>和MoO<sub>3</sub>等氧化物残留在材料表面, 这些氧化产物和脱落的磨屑堆积在材料表面, 使得材料表面更加凹凸不平, 表现出更为明显的黏着磨损, 使得摩擦系数进一步增大, 而部分脱落的磨屑使得材料的磨损率增加. 当试验温度升高到800 °C时[见图5(e)], 此温度下材料的氧化加剧, 氧化产物MoO<sub>3</sub>大量的挥发导致材料磨损表面出现一些孔洞, 导致材料磨损率进一步增大, 但自润滑性的SiO<sub>2</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>氧化膜却降低了其摩擦系数<sup>[24]</sup>. 而当温度升至1 000 °C时, 氧化产物和磨屑经过不断和碾压和热黏着作用, 形成一层光滑致密的自润滑效应的复合膜[见图5(f)], 导致摩擦系数稍微降低; 这些氧化膜避免了配对副之间的直接接触, 有效防止了材料的磨损, 使磨损率稍微降低. 对于SiC配对副来说, 在25~600 °C表现为失重, 归因于复合材料对其产生的磨削所致; 而在800~1 000 °C表现为增重, 这是因为SiC氧化增重大于磨损失重. 为了进一步了解材料的磨损机理, 对不同温度下的磨损表面的部分区域做了EPMA元素分析, 其结果如表2所示. 可知, 磨损后表面都由不同含量的Mo、Si、B、O、C和N元素组成, 这进一步证实了在不同试验温度下的摩擦磨损过程中, MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-Mo<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub>复合材料发生了不同程度的氧化磨损和黏着磨损.

### 2.3 不同载荷下 MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-Mo<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub>/SiC配对副的摩擦磨损性能

#### 2.3.1 摩擦磨损性能

在1 000 °C, MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-Mo<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub>/SiC配对副的摩擦系数与载荷关系如图6所示. 可知, 经过跑合阶段之后, 摩擦系数逐渐达到相对稳定的磨损阶段. 随着载荷的增加, 摩擦系数逐渐降低. 载荷为2.5和10 N时, 稳态平均摩擦系数分别为0.38和0.29. 可见, 载荷对MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-Mo<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub>/SiC配对副界面的摩擦系数影响较大. 图7为载荷与复合材料和SiC的磨损率之间的关系. 试验温度为1 000 °C时, 随着载荷的增加, MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-Mo<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub>的磨损率稍微增加, 且表现为磨损失重. 载荷为2.5和10 N时, MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-Mo<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub>磨损率分别为0.540×10<sup>-7</sup>和0.547×10<sup>-7</sup> mm<sup>3</sup>/(N·m). 可见, 在

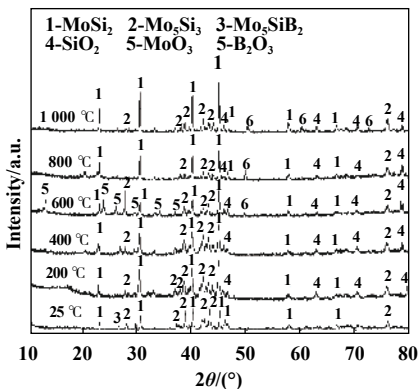


Fig. 4 XRD patterns of surface of composites at elevated temperatures

图4 不同温度下复合材料的表面XRD图谱



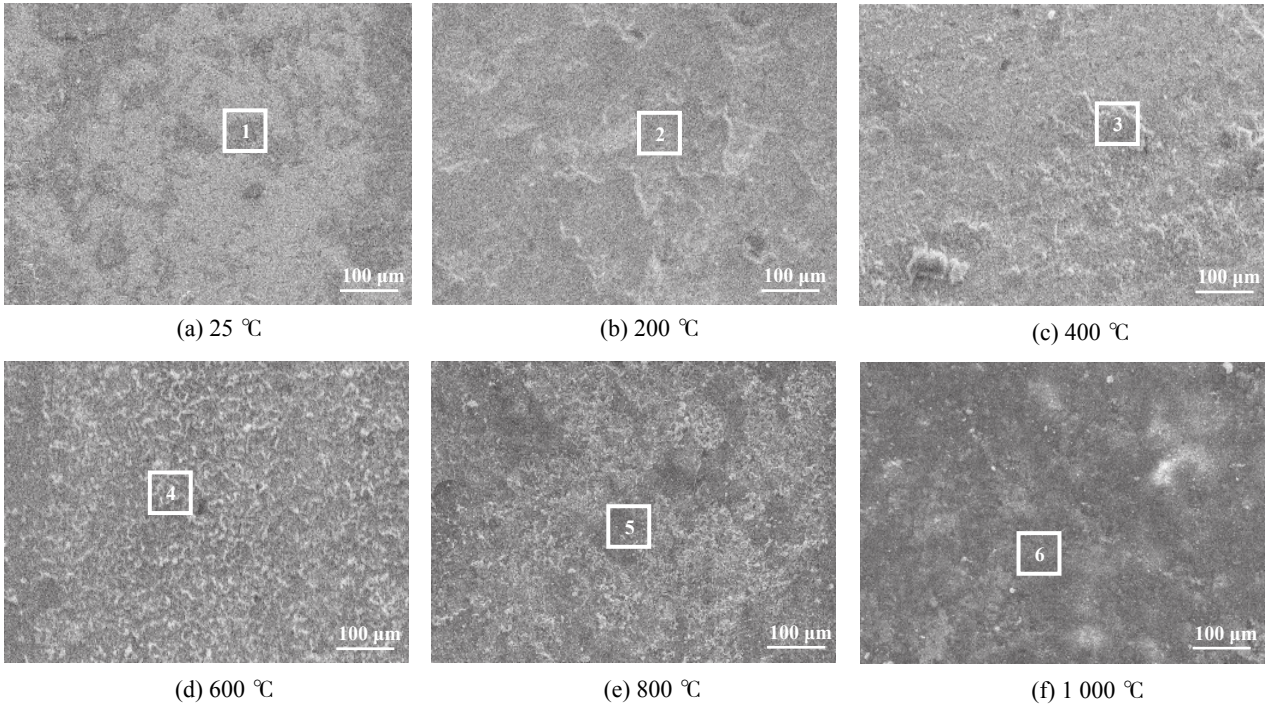


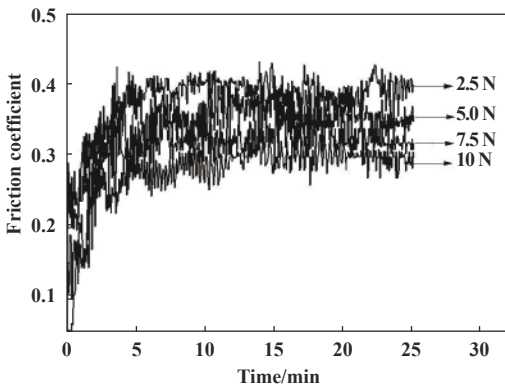
图 5 SEM 微graphs of the worn surface for MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-Mo<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub> at elevated temperatures

图 5 MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-Mo<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub> 复合材料在不同温度下磨损表面形貌

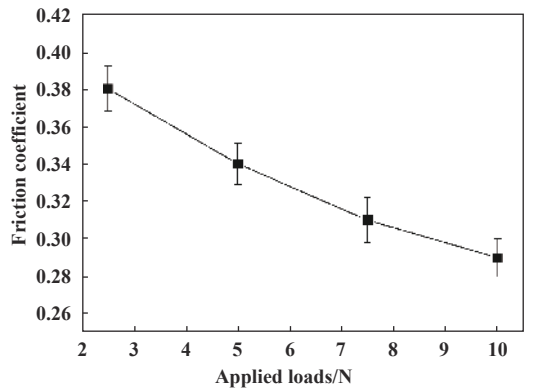
表 2 磨损表面不同区域的 EPMA 结果

Table 2 EPMA results of the different zones for the worn surfaces

Zone	Atomic fraction/%				
	Mo	Si	O	C	B
Zone 1 in Fig 5 (a)	33.83	56.10	2.56	4.08	3.43
Zone 2 in Fig 5 (b)	32.08	54.72	4.12	5.96	3.12
Zone 3 in Fig 5 (c)	24.94	42.28	28.20	4.88	1.26
Zone 4 in Fig 5 (d)	15.48	34.85	43.93	4.62	1.12
Zone 5 in Fig 5 (e)	9.55	27.10	58.62	1.37	3.36
Zone 6 in Fig 5 (f)	8.46	22.68	63.80	1.24	3.82



(a) Change of coefficients of friction with time



(b) Average coefficients of friction at different loads

Fig. 6 Coefficients of friction of MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-Mo<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub>/SiC at different loads:

图 6 MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-Mo<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub>/SiC 在不同载荷下的摩擦系数

1 000 °C 时, 载荷对 MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-Mo<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub> 复合材料的磨损影响较小。另外, 随着载荷的增加, SiC 陶瓷球的

磨损增重逐渐增大, 增重率在  $0.512 \times 10^{-9} \sim 0.570 \times 10^{-9} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ 。综上可知, MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-Mo<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub> 复合材料的

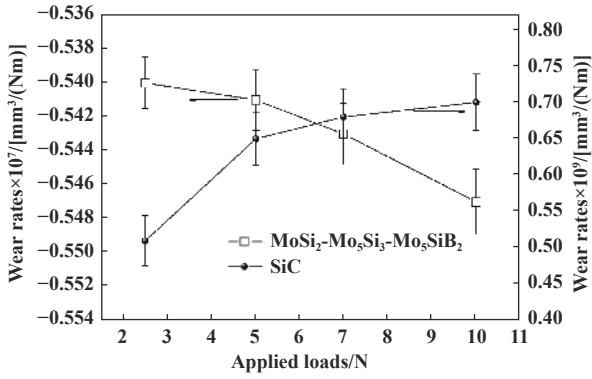


Fig. 7 Wear rates of MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-Mo<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub> composite and SiC ceramics at different loads

图7 MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-Mo<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub>和SiC在不同载荷下的磨损率

磨损率接近Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>强韧化的Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>复合材料<sup>[16]</sup>, 其摩擦系数和磨损率均小于NiAl金属间化合物<sup>[25]</sup>, 耐磨性能也优于Ni<sub>3</sub>Al基高温自润滑复合涂层<sup>[26]</sup>. 可见, MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-Mo<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub>复合材料在高温时表现出较好的高温自润滑应用潜力.

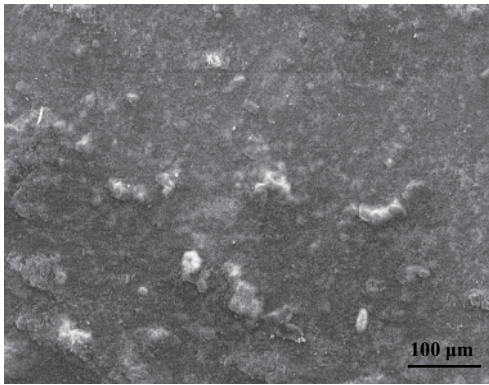
### 2.3.2 磨损机理

在试验温度为1 000 °C时, 不同载荷作用下MoSi<sub>2</sub>-

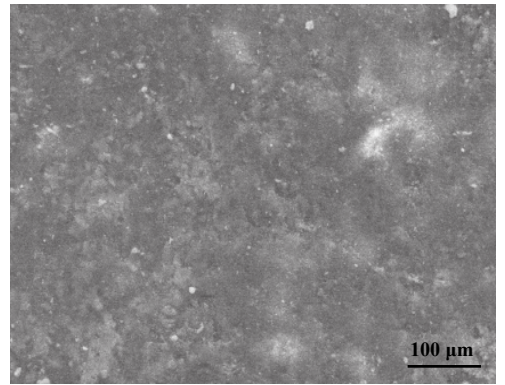
Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-Mo<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub>复合材料与SiC对摩后的磨损表面形貌如图8所示. 可以看出, 当载荷为2.5 N时[见图8(a)], 复合材料磨损后的表面大部分区域平整, 少部分区域出现团聚状颗粒, 表现为明显的黏着磨损特征, 导致其摩擦系数较大(0.38). 当载荷增至5 N时, 复合材料磨损表面大的团聚状颗粒消失[见图8(b)], 表面所黏着物质尺寸细小且分布均匀, 摩擦系数有所下降, 磨损率稍有增加. 当载荷增加至7.5~10 N时, 复合材料磨损表面出现一层平整且光滑塑性变形层[见图8(c~d)], 这主要是因为7.5~10 N载荷作用下, 氧化产物和磨损产物在磨损过程中遭受强烈的碾压作用, 使得氧化产物和磨损产物发生高温塑性变形, 形成具有自润滑性能的薄膜. 这些光滑的薄膜避免了摩擦副之间的直接接触, 从而进一步减小摩擦系数, 降低磨损率<sup>[27-28]</sup>.

### 3 结论

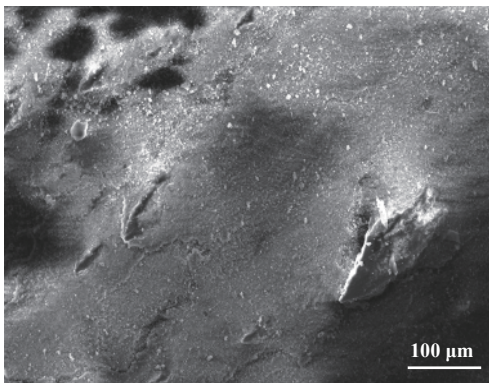
a. 在外加载荷为5 N时, 试验温度对MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-Mo<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub>/SiC配对副的磨损率的影响较小, 而对摩擦系数的影响较大. 随着试验温度(25~1 000 °C)的升高, 摩擦系数先增加后降低, 磨损率先增后降. 25~600 °C



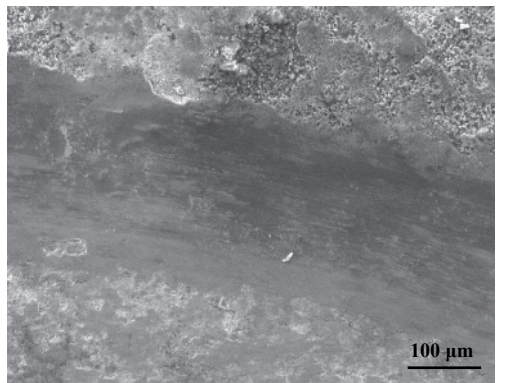
(a) 2.5 N



(b) 5.0 N



(c) 7.5 N



(d) 10 N

Fig. 8 SEM micrographs of the worn surface morphologies of the composite at different loads

图8 MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-Mo<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub>复合材料在不同载荷下的磨损表面形貌



时,温度越高,复合材料表面的黏着现象加剧,导致摩擦系数逐渐增加;在800~1000℃时,材料表面生成了具有自润滑效应氧化膜,导致其摩擦系数和磨损率降低.试验温度由25℃增至600℃时,磨损机理以轻微的氧化和黏着磨损为主;在800~1000℃时,材料表面严重的黏着磨损和氧化磨损为主要磨损机制.

b.在试验温度为1000℃时,载荷对MoSi<sub>2</sub>-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-Mo<sub>5</sub>SiB<sub>2</sub>/SiC配对副的摩擦系数影响较大,对磨损率的影响较小.随着载荷的增加(2.5~10N),摩擦系数从0.38逐渐降低到0.29,磨损率由0.540×10<sup>-7</sup>mm<sup>3</sup>/(N·m)稍微增加到0.547×10<sup>-7</sup>mm<sup>3</sup>/(N·m).在载荷为2.5~10N时,始终存在黏着磨损和氧化磨损;在载荷7.5~10N时,材料磨损表面还伴随塑性变形的特征.

## 参考文献

- [1] Vasudévan A K, Petrovic J J. A comparative overview of molybdenum disilicide composites[J]. *Materials Science and Engineering A*, 1992, 155(1-2): 1-17. doi: 10.1016/0921-5093(92)90308-N.
- [2] Li Henghao An lin, Wang Yalei, et al. Microstructure and mechanical properties of MoSi<sub>2</sub> prepared by spark plasma sintering[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2016, 26(11): 2296-2302 (in Chinese) [李恒郝, 安林, 王雅雷, 等. 放电等离子烧结MoSi<sub>2</sub>陶瓷的微观结构与力学性能[J]. *中国有色金属学报*, 2016, 26(11): 2296-2302].
- [3] Hawk J A, Alman D E. A comparative study of the abrasive wear behavior of MoSi<sub>2</sub>[J]. *Scripta Metallurgical et Materialia*, 1995, 32: 725-730. doi: 10.1016/0956-716X(95)91593-E.
- [4] Hawk J A, Alman D E. Abrasive wear behavior of a brittle matrix (MoSi<sub>2</sub>) composite reinforced with a ductile phase (Nb)[J]. *Wear*, 2001, 251(1-12): 890-900. doi: 10.1016/S0043-1648(01)00747-5.
- [5] Zhang H A, Hu X P, Yan J H, et al. Study of wear behavior of MoSi<sub>2</sub> under water lubrication[J]. *Materials Letters*, 2005, 59(50): 583-587.
- [6] Zhang H A, Gu S Y, Xie N P. Effect of La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on the wear behavior of MoSi<sub>2</sub> at high temperature[J]. *Journal of Rare Earths*, 2011, 29(4): 370-373. doi: 10.1016/S1002-0721(10)60462-0.
- [7] La P Q, Xue Q J, Liu W M. Tribological properties of MoSi<sub>2</sub>-MoSi<sub>2</sub> coatings coupling with SAE 52100 steel under reciprocating sliding[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2001, 135(2-3): 118-125. doi: 10.1016/S0257-8972(00)00995-6.
- [8] Yan J H, Zhang Z, Liu L F, et al. Effect of nano-ZrO<sub>2</sub> on the microstructure and high Temperature tribological properties of MoSi<sub>2</sub> coating[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2013, 22(6): 873-881. doi: 10.1007/s11666-013-9924-9.
- [9] Petrovic J J. Mechanical behavior of MoSi<sub>2</sub> and MoSi<sub>2</sub> composites[J]. *Materials Science and Engineering A*, 1995, 192-193: 31-37. doi: 10.1016/0921-5093(94)03246-7.
- [10] Jayasingh E M, Tantri P S, Bhaskaran T A, et al. Performance of monolithic and TiB<sub>2</sub> reinforced MoSi<sub>2</sub> in dry sliding contact with steel[J]. *Materials Letters*, 2002, 53: 379-383. doi: 10.1016/S0167-577X(01)00511-0.
- [11] Sun L, Pan P, Lin C. Wear behavior of TiC-MoSi<sub>2</sub> composites[J]. *Materials Letters*, 2003, 57: 1239-1243. doi: 10.1016/S0167-577X(02)00965-5.
- [12] La P Q, Xue Q J, Liu W M. Study of wear resistant MoSi<sub>2</sub>-SiC composites fabricated by self-propagating high temperature synthesis casting[J]. *Intermetallics*, 2003, 11: 541-550. doi: 10.1016/S0966-9795(03)00041-4.
- [13] Zhang H A, Hu X P, Yan J H, et al. Dry sliding wear behaviors of La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-WSi<sub>2</sub>-MoSi<sub>2</sub> composite against alloy steel[J]. *Wear*, 2006, 260(7-8): 903-908. doi: 10.1016/j.wear.2005.06.014.
- [14] Chen H, Shao X, Wang C Z, et al. Mechanical and wear properties of Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-Mo<sub>3</sub>Si-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites[J]. *Intermetallics*, 2017, 85: 15-25. doi: 10.1016/j.intermet.2017.01.013.
- [15] Pan Y, Wang P, Zhang C M. Structure, mechanical, electronic and thermodynamic properties of Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> from first-principles calculations[J]. *Ceramics International*, 2018, 44(11): 12357-12362. doi: 10.1016/j.ceramint.2018.04.023.
- [16] Iizuka T, Kita H. Tribological behavior of Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> particle reinforced Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> matrix composites[J]. *Wear*, 2005, 258: 877-889. doi: 10.1016/j.wear.2004.09.048.
- [17] Li Zhen, Zhang Yali, Zhou Jiansong, et al. Tribological properties of Ni-based high temperature self-lubricating composite[J]. *Tribology*, 2018, 38(2): 161-169 (in Chinese) [李珍, 张亚丽, 周健松, 等. Ni-Mo基高温自润滑复合材料摩擦学性能的研究[J]. *摩擦学学报*, 2018, 38(2): 161-169]. doi: 10.16078/j.tribology.2018.02.006.
- [18] Li Bin, Lin Xiaohui, Li Rui, et al. High-temperature oxidation resistance of Mo-Si-B alloys with different B contents[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2018, 54(12): 1792-1800 (in Chinese) [李斌, 林小辉, 李瑞, 等. 不同B含量Mo-Si-B合金的高温抗氧化性能[J]. *金属学报*, 2018, 54(12): 1792-1800]. doi: 10.11900/0412.1961.2018.00015.
- [19] Kmeyer M, Akmc M. Oxidation behavior of boron-modified Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> at 800-1300°C[J]. *Journal of American Ceramic Society*, 1996, 79: 938-944. doi: 10.1111/jace.1996.79.issue-4.
- [20] Taleghani P R, Bakhshi S R, Erfanmanesh M, et al. Improvement of MoSi<sub>2</sub> oxidation resistance via boron addition: fabrication of MoB/MoSi<sub>2</sub> composite by mechanical alloying and subsequent reactive sintering[J]. *Powder Technology*, 2014, 254: 241-247. doi: 10.1016/j.powtec.2014.01.034.
- [21] Ito K, Ihara K, Tanaka K, et al. Physical and mechanical properties of single crystals of the T2 phase in the Mo-Si-B system[J]. *Intermetallics*, 2001, 9: 591-602. doi: 10.1016/S0966-9795(01)00049-8.
- [22] Yan J H, Huang J X, Li K L, et al. Effect of boron content on microstructure, mechanical properties, and oxidation resistance of

- Mo-Si-B composites[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2018, 27(11): 6218–6226. doi: [10.1007/s11665-018-3652-8](https://doi.org/10.1007/s11665-018-3652-8).
- [23] Han X X, Wang Y L, Xiong X, et al. Microstructure, sintering behavior and mechanical properties of SiC/MoSi<sub>2</sub> composites by spark plasma sintering[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2018, 28(5): 957–965. doi: [10.1016/S1003-6326\(18\)64730-2](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(18)64730-2).
- [24] Rynio C, Hattendorf H, Klöwer J, et al. The evolution of tribolayers during high temperature sliding wear[J]. *Wear*, 2014, 315(1-2): 1–10. doi: [10.1016/j.wear.2014.03.007](https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.03.007).
- [25] Yu Y J, Zhou J S, Ren S F, et al. Tribological properties of laser cladding NiAl intermetallic compound coatings at elevated temperatures[J]. *Tribology International*, 2016, 104: 321–327. doi: [10.1016/j.triboint.2016.09.014](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.09.014).
- [26] Li Wensheng, Fan Xiangjuan, Yang Jun, et al. Preparation and tribological properties of Ni<sub>3</sub>Al matrix self-lubricating composite coating[J]. *Tribology*, 2018, 38(6): 626–634 (in Chinese) [李文生, 范祥娟, 杨军, 等. Ni<sub>3</sub>Al基高温自润滑复合涂层的制备和摩擦学性能[J]. *摩擦学学报*, 2018, 38(6): 626–634]. doi: [10.16078/j.tribology.2018033](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018033).
- [27] Lohfeld S, Schütze. Oxidation behaviour of particle reinforced MoSi<sub>2</sub> composite at temperatures of up to 1700°C Part I : Literature review[J]. *Materials and Corrosion*, 2005, 56: 93–97. doi: [10.1002/maco.200403831](https://doi.org/10.1002/maco.200403831).
- [28] Wang Y, Hsu S M. The effects of operating parameters and environment on the wear and wear transition of alumina[J]. *Wear*, 1996, 195: 90–99. doi: [10.1016/0043-1648\(95\)06794-9](https://doi.org/10.1016/0043-1648(95)06794-9).