

## 摩擦磨损与润滑

# MoS<sub>2</sub>/Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 对磷酸盐涂层宽温域 摩擦学性能的影响

方媛, 闫嘉琪, 赵顺强, 曾立军, 吴燕

(陕西科技大学 a.材料科学与工程学院

b.陕西省无机材料绿色制备与功能化重点实验室, 西安 710021)

**摘要:**目的 以 MoS<sub>2</sub>/Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 为固体润滑剂, 在 25(室温)~400 °C 下制备具有优异摩擦学性能的 MoS<sub>2</sub>/Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 磷酸盐涂层, 并研究它在不同温度下的减摩抗磨机制。方法 以氢氟酸为 MAX 相 (Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub>) 粉体的蚀刻剂, 制备具有“手风琴”形貌的 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> MXene。以硫脲、钼酸铵、MXene 为原料, 制备 MoS<sub>2</sub>/Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 复合材料。以 Al(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> 为黏结剂, 以 CuO 为固化剂, 分别以 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 和 MoS<sub>2</sub>/Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 为固体润滑剂, 制备 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 磷酸盐涂层和 MoS<sub>2</sub>/Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 磷酸盐涂层。通过高温摩擦磨损试验机和光学数码显微镜测试涂层在 25~400 °C 时的摩擦因数和磨损率, 采用扫描电子显微镜和显微共焦激光拉曼光谱仪分析磨痕表面形貌、物相, 进而探讨磨损机理。结果 当 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 与 Al(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> 的质量比为 2:1 时, Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 磷酸盐涂层在室温 (25 °C) 下的摩擦因数和磨损率均最低, 分别为 0.38 和 2.75×10<sup>-4</sup> mm<sup>3</sup>/(N·m)。在 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 表面负载 MoS<sub>2</sub>, 将 MoS<sub>2</sub>/Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 作为固体润滑剂, 能够显著降低磷酸盐涂层在 25~400 °C 下的摩擦因数, 同时磨损率也有所降低。MoS<sub>2</sub>/Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 磷酸盐涂层在室温下的摩擦因数低至 0.11, 相较于 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 磷酸盐涂层降低了 71.1%, 其磨损率相较于 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 磷酸盐涂层降低了 1 个数量级。在 25~400 °C 范围内, MoS<sub>2</sub>/Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 磷酸盐涂层的摩擦因数均低于 0.21。随着温度的升高, 摩擦因数呈先减小后增大的趋势, 磨损率整体上呈增大趋势。结论 相较于 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 磷酸盐涂层, MoS<sub>2</sub>/Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 磷酸盐涂层在 25~400 °C 下的摩擦学性能均得到显著提升。

**关键词:** Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>; 宽温域; 摩擦磨损性能; 磷酸盐涂层; 磨损机制

中图分类号: TB37 文献标志码: A 文章编号: 1001-3660(2024)01-0056-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2024.01.005

## Effect of MoS<sub>2</sub>/Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> on Tribological Properties of Phosphate Coating at Elevated Temperature

FANG Yuan, YAN Jiaqi, ZHAO Shunqiang, ZENG Lijun, WU Yan

(a. School of Material Science & Engineering, b. Shaanxi Key Laboratory of Green Preparation and Functionalization  
for Inorganic Materials, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

**ABSTRACT:** As a typical environmental-friendly inorganic coating, the phosphate coating is widely used in aerospace,

收稿日期: 2022-10-24; 修订日期: 2023-05-18

Received: 2022-10-24; Revised: 2023-05-18

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFB3809000); 国家自然科学基金 (51705300); 陕西省科技厅自然科学基金基础研究计划 (2022JM-267); 陕西科技大学博士科研启动基金 (2017BJ-05)

Fund: The National Key Research and Development Program of China (2022YFB3809000); The National Natural Science Foundation of China (51705300); The Natural Science Foundation of Shaanxi Province (2022JM-267); The Scientific Research Fund of Shaanxi University of Science & Technology (2017BJ-05)

引文格式: 方媛, 闫嘉琪, 赵顺强, 等. MoS<sub>2</sub>/Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 对磷酸盐涂层宽温域摩擦学性能的影响[J]. 表面技术, 2024, 53(1): 56-64.

FANG Yuan, YAN Jiaqi, ZHAO Shunqiang, et al. Effect of MoS<sub>2</sub>/Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> on Tribological Properties of Phosphate Coating at Elevated Temperature[J]. Surface Technology, 2024, 53(1): 56-64.

petroleum pipelines and marine equipment because of its strong adhesion, outstanding thermal stability and good corrosion resistance. In the present study, a phosphate bonding solid lubricant coating with excellent tribological properties at room temperature 25 (RT)-400 °C was prepared with  $\text{MoS}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  as solid lubricant, and its friction reduction and anti-wear mechanisms at different temperature were investigated in detail.  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  MXene with "accordion" shape was prepared with hydrofluoric acid as etching agent from MAX phase ( $\text{Ti}_3\text{AlC}_2$ ) powders. And then  $\text{MoS}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  powders were prepared with thiourea, ammonium molybdate and MXene as raw materials. A  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  phosphate coating and A  $\text{MoS}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  phosphate coating were prepared with  $\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$  as binder and CuO as curing agent, and  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  and  $\text{MoS}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  as solid lubricant filler respectively. The friction coefficients and wear rates of the coatings at 25-400 °C were investigated with a high-temperature friction and wear tester and an optical digital microscope. The surface morphology and phase of the wear scars were analyzed with a scanning electron microscope (SEM), a confocal laser Raman spectrometer and an X-ray diffractometer (XRD) respectively, and then the wear mechanisms at different temperature were discussed in detail. The main results were as follows. When the mass ratio of  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  to  $\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$  was 2 : 1, The friction coefficient and wear rate of the  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  phosphate coating were the lowest at RT, which were 0.38 and  $2.75 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ , respectively. As the temperature increased, the friction coefficient of the  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  phosphate coating increased from 0.38 at RT (25 °C) to 0.79 at 400 °C, and the wear rate increased from  $2.75 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$  to  $7.34 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ . Compared with the  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  phosphate coating, the  $\text{MoS}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  phosphate coating had significantly reduced coefficients at 25-400 °C and reduced wear rates. The  $\text{MoS}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  phosphate coating showed a low friction coefficient of 0.11 at RT, which was 71.1% lower than that of the  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  phosphate coating. Moreover, the wear rate of the  $\text{MoS}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  phosphate coating was  $6.77 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ , which was an order of magnitude lower than that of the  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  phosphate coating. Continuous lubricating films with a small quantity of furrows could be observed on the sliding surface at RT, which showed that the main wear mechanism was abrasive wear. As the sliding temperature ranged from RT to 400 °C, the friction coefficient of the  $\text{MoS}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  phosphate coating was kept below 0.21. With the increase of temperature, the friction coefficient of the  $\text{MoS}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  phosphate coating showed a trend of decreasing firstly and then increasing, and the wear rate showed an overall increasing trend. The furrows on the wear scar gradually disappeared, and the formed lubricating films became smooth. From the Raman spectrum, mild oxidation could be found on the worn surface when the temperature was below 200 °C, and the oxidation products were  $\text{Ti}_3\text{O}_5$  and a small amount of  $\text{MoO}_3$ . With the further increase of temperature, the oxidation degree of worn surfaces of the  $\text{MoS}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  phosphate coating intensified. When the temperature was higher than 300 °C, the oxidation products were  $\text{TiO}_2$  and  $\text{MoO}_3$ . Owing to the synergistic lubrication of  $\text{MoS}_2$  and  $\text{MoO}_3$ , the  $\text{MoS}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  phosphate coating still has significant anti-friction property and improved wear resistance compared with the  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  phosphate coating at 400 °C.

**KEY WORDS:**  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ ; wide temperature range; friction and wear properties; phosphate coating; wear mechanism

磷酸盐涂层作为典型的绿色无机涂层,具有突出的热稳定性及良好的耐磨性能,被广泛用于航空航天、石油管道及海洋设备等领域<sup>[1-4]</sup>。在实际应用过程中,由于磷酸盐涂层存在力学性能较低、固化温度高等缺陷,因此其应用受到影响<sup>[5-6]</sup>。

研究表明,通过添加不同的功能性填料对磷酸盐涂层进行改性,可以有效提升涂层的性能<sup>[7-9]</sup>。为了提高磷酸盐涂层的力学性能,宋婧等<sup>[10]</sup>将莫来石纤维多孔陶瓷作为添加剂,加入磷酸铝黏结剂中,研究了磷酸铝浓度对材料抗压强度的影响。研究表明,当磷酸铝的质量分数为 25% 时,材料的抗压强度最佳,为 2.02 MPa。为了降低磷酸盐涂层的固化温度,李良锋等<sup>[11]</sup>研究了固化剂 CuO 的添加量对磷酸盐涂层固化温度的影响。研究表明,当 CuO 的添加量(质量分数)不低于 8% 时,涂层的固化时间最短,且固化温度最低,分别为 2.5 h 和 170 °C。二硫化钼和石墨等

二维层状材料因其独特的纳米片状结构,可作为理想的自润滑材料赋予磷酸盐涂层优异的摩擦学性能<sup>[12]</sup>。为了进一步提升磷酸盐涂层的摩擦学性能,丁勇<sup>[13]</sup>以二硫化钼为磷酸盐涂层的固体润滑剂,探究了其添加量对涂层摩擦学性能的影响。研究表明,当二硫化钼的添加量(质量分数)为 30% 时,磷酸盐涂层的摩擦因数最低,为 0.13。刘灿灿等<sup>[14]</sup>制备了以石墨为添加剂,以磷酸铝铬为黏结剂的磷酸盐润滑涂层,涂层在 100~110 °C 之间表现出最佳的摩擦学性能,摩擦因数达到 0.11。

近年来, MXene 作为一种新型的二维材料,受到研究者的广泛关注。MXene 是由 MAX 相材料通过刻蚀其中的 A 层而得到的具有类石墨烯结构的二维层状材料<sup>[15-20]</sup>。MXene 具有独特的二维结构及较弱的层间结合力,在载荷作用下极易产生滑移<sup>[21]</sup>,因此 MXene 在固体润滑领域具有良好的应用前景<sup>[22]</sup>。司晓

阳等<sup>[23]</sup>制备了  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x/\text{Cu}$  复合材料,研究表明,其摩擦因数仅为对照组的 46%,其磨损率比对照组的磨损率降低了 1 个数量级。康瑞洋等<sup>[24]</sup>以  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  为环氧树脂的固体润滑剂,制备了 MXene 环氧树脂复合材料。研究表明,在  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  的质量分数仅为 0.5% 时,材料就展现出优异的摩擦学性能,与基体相比,其摩擦因数降低了 80%。

$\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  作为典型的 MXene 材料,具有优异的物理化学性能,但它在制备和使用过程中易发生堆叠和聚集,且极易被氧化<sup>[25]</sup>。研究表明,通过引入金属氧化物制备 MXene 纳米基复合材料,可以使材料的理化性能更加稳定。 $\text{MoS}_2$  优异的自润滑性能使其作为理想的室温、中温固体润滑添加剂被广泛应用。由此可见,在  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  表面负载  $\text{MoS}_2$ ,将  $\text{MoS}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  复合材料作为磷酸盐涂层的固体润滑填料,有望进一步提高磷酸盐涂层的宽温域摩擦学性能<sup>[26]</sup>。

文中采用真空烧结法制备  $\text{Ti}_3\text{AlC}_2$  MAX 相前驱体粉体。以氢氟酸为刻蚀剂得到二维层状  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  MXene,以硫脲、钼酸铵及  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  为原料合成  $\text{MoS}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 。在此基础上,分别制备以  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  和  $\text{MoS}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  为固体润滑填料的磷酸盐涂层。系统对比并探讨二者在 25(室温)~400 °C 下的摩擦学行为,并通过磨痕,分析其磨损机理及润滑机理,探讨  $\text{MoS}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  对磷酸盐涂层在 25~400 °C 下摩擦学性能的影响机制。

## 1 实验

### 1.1 涂层制备

#### 1.1.1 $\text{Ti}_3\text{AlC}_2$ 粉体的制备

以  $\text{TiC}$  粉体(上海卜微应用材料技术有限公司,纯度 99.9%,粒径 48  $\mu\text{m}$ )、 $\text{Al}$  粉(国药集团化学试剂有限公司,纯度 99.9%,粒径 48  $\mu\text{m}$ )、 $\text{Ti}$  粉(西安宝德粉末冶金有限公司,纯度 99.9%,粒径 48  $\mu\text{m}$ )为原料,按照摩尔比 2 : 1.2 : 1 进行配料,采用真空烧结,烧结温度为 1 350 °C,并保温 2 h,得到  $\text{Ti}_3\text{AlC}_2$  粉体材料。

#### 1.1.2 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 的制备

将 5 g  $\text{Ti}_3\text{AlC}_2$  粉末缓慢加入 40 mL HF(国药集团化学试剂有限公司,体积分数为 40%)刻蚀剂中,并进行剥离,在室温下搅拌 24 h。用去离子水多次离心,分离刻蚀产物,直至上层清液的 pH 约为 6,随后在真空干燥箱(上海一恒科学仪器有限公司)中干燥 24 h,得到  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  MXene 粉体。

#### 1.1.3 $\text{MoS}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 的制备

将 1.3 g  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  粉末、0.71 g  $\text{H}_2\text{NCSNH}_2$ (国药集团化学试剂有限公司,纯度 99.9%)、0.60 g

$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (西陇科学有限公司,分析纯)溶解在 25 mL 去离子水中,并在 200 °C 条件下水浴加热 18 h,随后用去离子水和乙醇多次纯化产物,并真空干燥 12 h,得到  $\text{MoS}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  复合材料。

#### 1.1.4 磷酸盐涂层的制备

以  $\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$ (鑫盛化工有限公司,液体,质量分数 40%)为黏结剂,以纳米  $\text{CuO}$ (拓普金属材料,纯度 99.5%)为固化剂,分别以  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  和  $\text{MoS}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  为固体润滑剂,制备不同含量固体润滑剂的磷酸盐涂层,并擦涂在经喷砂处理后的 718 钢基体上,在温度 200 °C 下固化 1 h,得到平整的磷酸盐涂层。

## 1.2 材料表征及性能测试

采用 HT-1000 型高温摩擦磨损试验机(兰州中科凯华科技开发有限公司),实验选择  $\phi 6$  mm 的  $\text{Si}_3\text{N}_4$  对偶球(浙江杰奈尔新材料有限公司),采用旋转摩擦法,摩擦半径为 3 mm,摩擦线速度为 0.23 m/s,载荷为 3 N,实验时间为 20 min。在相同条件下至少重复实验 3 次,摩擦因数和磨损率取其平均值。采用 FEI Verios460 型扫描电子显微镜(FEI,美国)、D/max2200pc 型 X 射线衍仪(Rigaku,日本)、Renishaw-invia 型显微共焦激光拉曼光谱仪(Renishaw,英国)对材料的微观形貌和物相进行分析。使用 Olympus DEX series 光学数码显微镜测量样品磨痕的横截面积。样品的磨损率通过式(1)计算。

$$W_d = \frac{2\pi R_d S}{Nvt} \quad (1)$$

式中: $W_d$ 为样品的磨损率, $\text{mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$ , $R_d$ 为旋转半径,mm; $v$ 为线速度,m/s; $N$ 为载荷,N; $S$ 为磨痕横截面积, $\text{mm}^2$ ; $t$ 为滑动时间,s。

## 2 结果及分析

### 2.1 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 和 $\text{MoS}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 的制备

通过真空烧结制备的  $\text{Ti}_3\text{AlC}_2$  粉体的微观形貌如图 1a 所示,其层状结构明显,层与层之间结构紧密。通过腐蚀剥离得到的  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  MXene 粉体的微观形貌

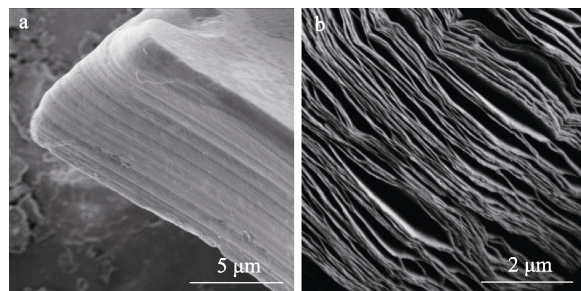


图1  $\text{Ti}_3\text{AlC}_2$  (a) 和  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  (b) 的 SEM 图  
Fig.1 SEM images of  $\text{Ti}_3\text{AlC}_2$  (a) and  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  (b)

如图 1b 所示, 可以观察到类似“手风琴”的层状结构<sup>[27]</sup>。经 HF 刻蚀前后,  $\text{Ti}_3\text{AlC}_2$  的 XRD 对比图谱如图 2a 所示。可以看出, (104)晶面对应的特征峰消失, 表明 Ti-Al 键已断裂。 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  的拉曼图谱如图 2b 所示, 其中在 155.3、268.8、411.9、612.3  $\text{cm}^{-1}$  处的峰与  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  拉曼光谱的特征峰一致。以上结果表明,  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  已被成功制备。

$\text{MoS}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  纳米复合材料的 SEM 图如图 3a 所示, 可以看出, 在层状结构的  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  纳米片上成功负载了球状结构的  $\text{MoS}_2$ 。 $\text{MoS}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  纳米复合材料的 XRD 图谱如图 3b 所示, 可以看出, 图谱中不仅出现了  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  的特征峰, 也出现了  $\text{MoS}_2$  的 (004)、(100)、(110) 晶面特征峰。根据  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  和  $\text{MoS}_2$  的特征峰强度, 采用  $K$  值法进行计算,  $\text{MoS}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  复合材料中  $\text{MoS}_2$  的质量分数约为 27.3%。以上结果表明,  $\text{MoS}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  已被成功合成。

## 2.2 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 含量对 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 磷酸盐涂层摩擦学行为的影响

制备  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  与  $\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$  的质量比分别为 1 : 1、1.5 : 1、2 : 1、2.5 : 1、3 : 1 的磷酸盐涂层, 依次命名为 MX1.0、MX1.5、MX2.0、MX2.5、MX3.0。在室温 (25  $^{\circ}\text{C}$ ) 下, MX1.0-MX3.0 磷酸盐涂层的摩

擦因数随时间的变化曲线如图 4a 所示。可以看出, 当  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  与  $\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$  的质量比在 1 : 1 与 2 : 1 之间时, 涂层在摩擦过程中的跑合期较短, 约为 5 min, 且摩擦因数曲线波动较小。随着涂层中  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  含量的增大, 当  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  与  $\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$  的质量比为 2 : 1 时, MX2.0 磷酸盐涂层的摩擦因数低至 0.38。继续增大  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  的添加量, 磷酸盐涂层的摩擦因数逐渐增大。当  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  与  $\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$  的质量比为 3 : 1 时, 涂层的摩擦因数最高, 为 1.12, 且摩擦因数波动较大。从图 4b 中可以看出, 与摩擦因数曲线变化规律相似,  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  磷酸盐涂层的磨损率随着  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  含量的增大呈先减小后增大的趋势。MX2.0  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  磷酸盐涂层的磨损率最低, 为  $2.75 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ , 因此后文皆以 MX2.0 的条件制备磷酸盐涂层。

## 2.3 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 磷酸盐涂层在不同温度下的摩擦学行为

在 25~400  $^{\circ}\text{C}$  下,  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  磷酸盐涂层的摩擦因数变化曲线如图 5a 所示。在 25~200  $^{\circ}\text{C}$  时,  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  磷酸盐涂层的跑合期较短, 摩擦因数非常平稳, 平均摩擦因数为 0.38~0.42。在 300、400  $^{\circ}\text{C}$  时,  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  磷酸盐涂层的跑合期较长, 且摩擦因数波动较大。在 300  $^{\circ}\text{C}$  时, 磷酸盐涂层的摩擦因数达到最高值 (0.82)。

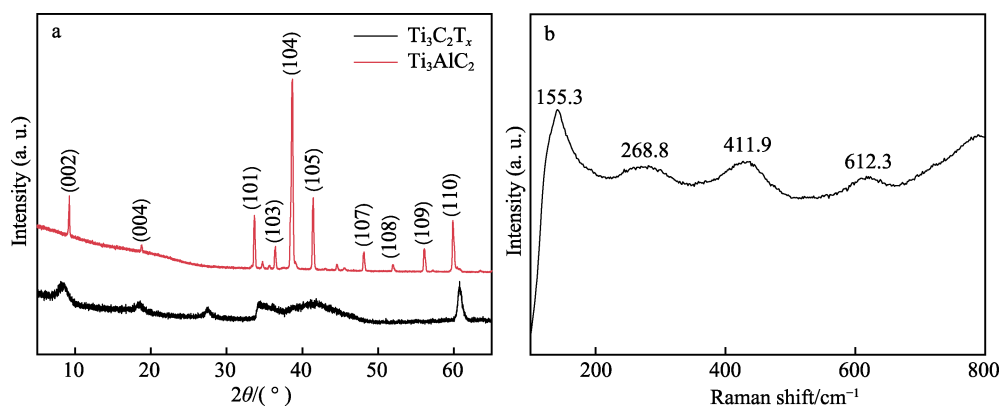


图 2  $\text{Ti}_3\text{AlC}_2$  和  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  的 XRD 图 (a) 及二维层状  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  的拉曼图 (b)  
Fig.2 XRD diagram of  $\text{Ti}_3\text{AlC}_2$  and  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  (a), Raman diagram of two-dimensional layered  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  (b)

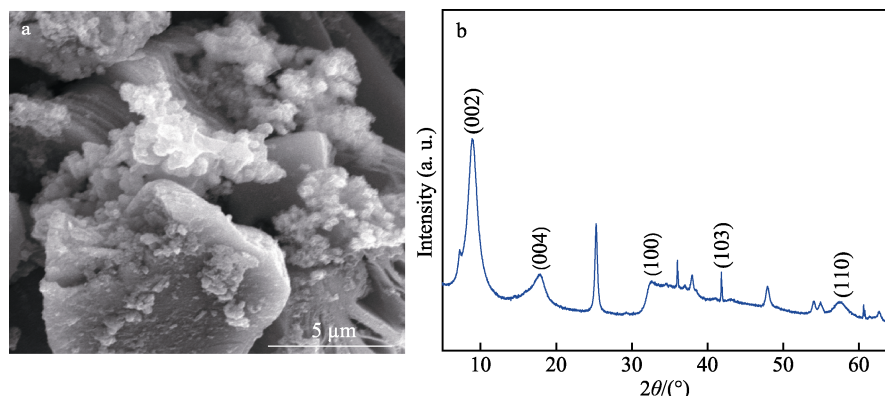


图 3  $\text{MoS}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  纳米复合材料的 SEM 图 (a) 和 XRD 图 (b)  
Fig.3 SEM image (a) and XRD pattern (b) of  $\text{MoS}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  nanocomposite



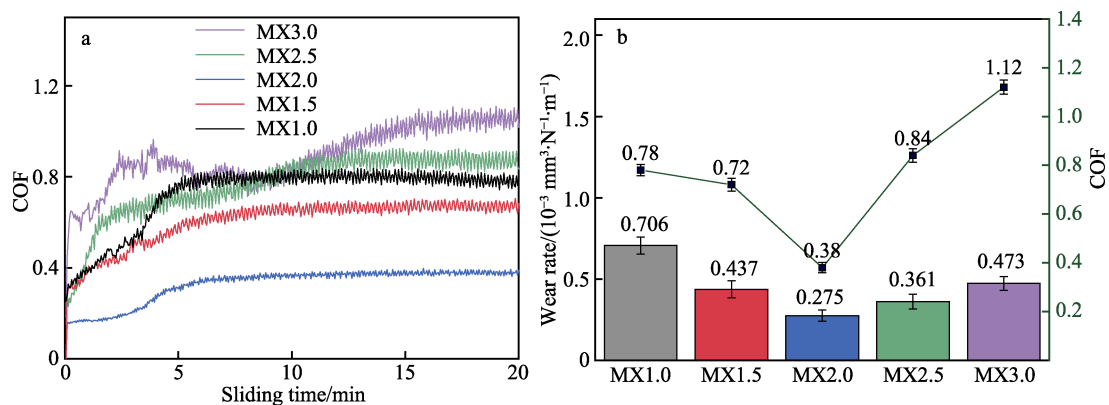


图4 室温条件下MX1.0-MX3.0  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  磷酸盐涂层的摩擦因数变化曲线 (a) 及平均摩擦因数、磨损率 (b)  
Fig.4 Friction coefficient curves (a), average friction coefficients and wear rates (b) of  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  phosphate coating at RT

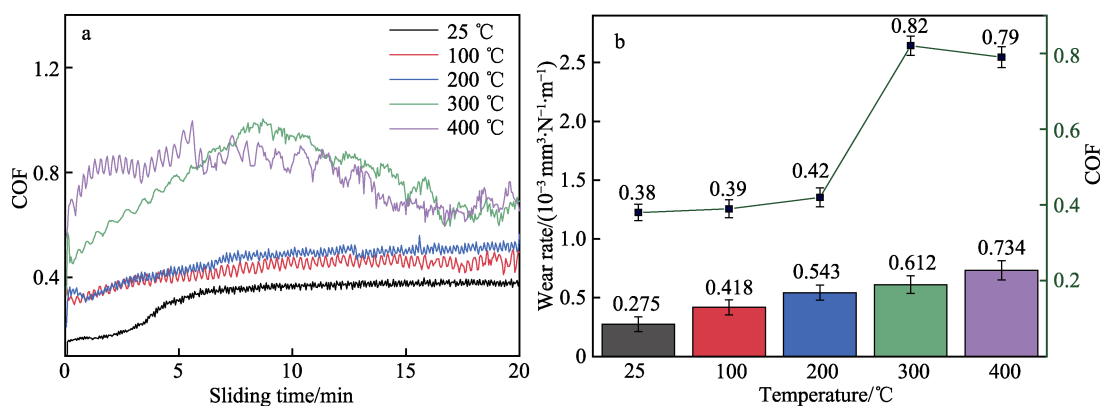


图5 MX2.0  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  磷酸盐涂层在 25~400 °C 下的摩擦因数变化曲线 (a) 及平均摩擦因数、磨损率 (b)  
Fig.5 Friction coefficient curves (a), average friction coefficients and wear rates (b) of MX2.0  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  phosphate coating at 25-400 °C

在 400 °C 时, 磷酸盐涂层的摩擦因数略降低。 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  磷酸盐涂层在 25~400 °C 下的磨损率和平均摩擦因数如图 5b 所示, 随着温度的升高,  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  磷酸盐涂层的磨损率呈逐渐增大的趋势, 从室温时的  $2.75 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$  增至 400 °C 时的  $7.34 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。

## 2.4 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 磷酸盐涂层在不同温度下的磨损机理

在室温下,  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  磷酸盐涂层磨斑的 SEM 形貌如图 6a、b 所示, 可以看出磨损表面形成了较为致密的摩擦膜。在室温下, 磨痕的高倍数 SEM 图如图 6b 所示, 颜色较亮区域 (A) 的平均化学组成 (以下均用原子数分数表示): Ti 17.96%、C 17.36%、O 39.98%; 颜色较深区域 (B) 的平均化学组成: Ti 15.63%、C 12.57%、O 46.32%。2 个部分的化学组成差距不大, 较明亮区域的形成是由磨屑在载荷作用下被碾压平实所致。此时磨痕表面分布着较多颗粒状的磨屑, 硬度较高的磨屑在载荷的作用下破坏了摩擦膜, 导致大量的微裂纹出现在磨痕表面, 此时磨粒磨损为主要磨损机制。在 300 °C 下,  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  磷酸盐涂层磨斑的 SEM 形貌如图 6c、d 所示。如图 6d 所示, 在磨斑的放大区域中, 颜色相对较深区域 (C) 的平

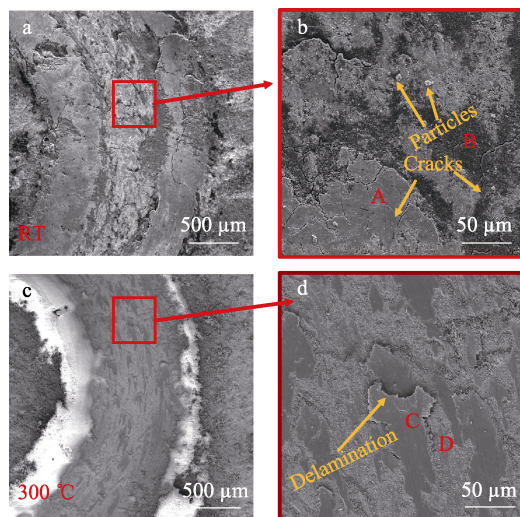


图6  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  磷酸盐涂层在室温 (a、b) 和 300 °C (c、d) 下磨损表面的 SEM 图

Fig.6 SEM images of worn surfaces of  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  phosphate coating at RT (a, b) and 300 °C (c, d)

均化学组成: Ti 3.29%、C 26.76%、O 39.45%、Ni 21.37%; 颜色相对较浅区域 (D) 的平均化学组成: Ti 3.84%、C 11.08%、O 16.86%、Ni 65.26%。可以看出, 两者的 Ti 元素含量与在室温下相比下降明显,

且都出现了基底中的 Ni 元素, 磨痕表面的摩擦膜出现层状脱落现象, 导致涂层的摩擦因数和磨损率升高, 此时机械磨损和疲劳磨损为主要磨损机理。在 25~400 °C 下, Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 磷酸盐涂层磨斑表面的拉曼图谱如图 7 所示。在温度低于 300 °C 时, Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 在摩擦过程中均出现了轻微氧化现象, 部分生成了润滑性能较差的 Ti<sub>3</sub>O<sub>5</sub>。随着温度的升高, 在磨痕中, Ti<sub>3</sub>O<sub>5</sub> 的含量逐渐增大, 导致涂层的摩擦因数升高。在温度高于 300 °C 时, Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 完全氧化为 TiO<sub>2</sub>, 这是此时摩擦因数和磨损率急剧升高的主要原因<sup>[28]</sup>。

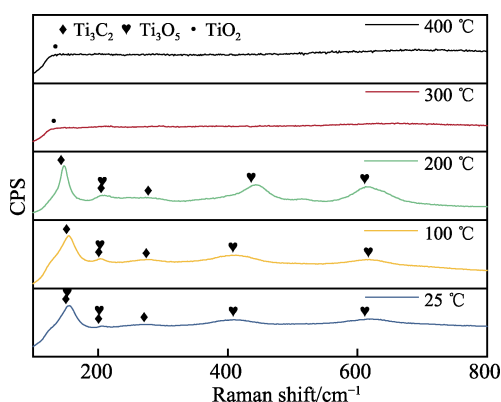


图 7 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 磷酸盐涂层在 25~400 °C 下磨痕表面的拉曼图谱

Fig.7 Raman spectrum of worn scars of Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> phosphate coating at 25-400 °C

## 2.5 MoS<sub>2</sub>/Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 磷酸盐涂层在不同温度下的摩擦学行为

在 25~400 °C 下, MoS<sub>2</sub>/Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 磷酸盐涂层的摩擦因数曲线及磨损率、平均摩擦因数如图 8 所示。可以看出, 负载 MoS<sub>2</sub> 可以显著提升 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 磷酸盐涂层在 25~400 °C 下的摩擦学性能。在室温下, MoS<sub>2</sub>/Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 磷酸盐涂层的平均摩擦因数和磨损率分别为 0.11 和  $6.77 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ , 相较于 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 磷酸盐涂层, 分别降低了 71.1% 和 1 个数量级。同时,

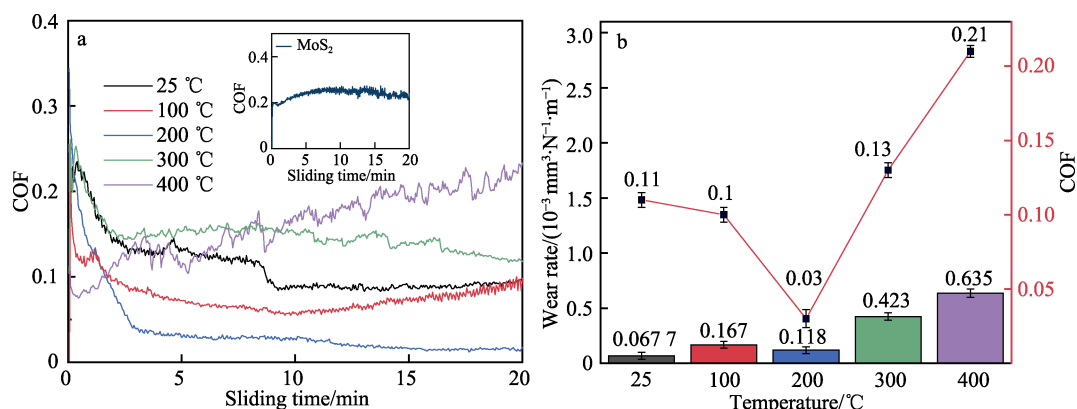


图 8 MoS<sub>2</sub>/Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 磷酸盐涂层在 25~400 °C 下的摩擦因数变化曲线 (a) 及平均摩擦因数、磨损率 (b)  
Fig.8 Friction coefficient curves (a), average friction coefficients and wear rates (b) of MoS<sub>2</sub>/Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> phosphate coating at 25-400 °C

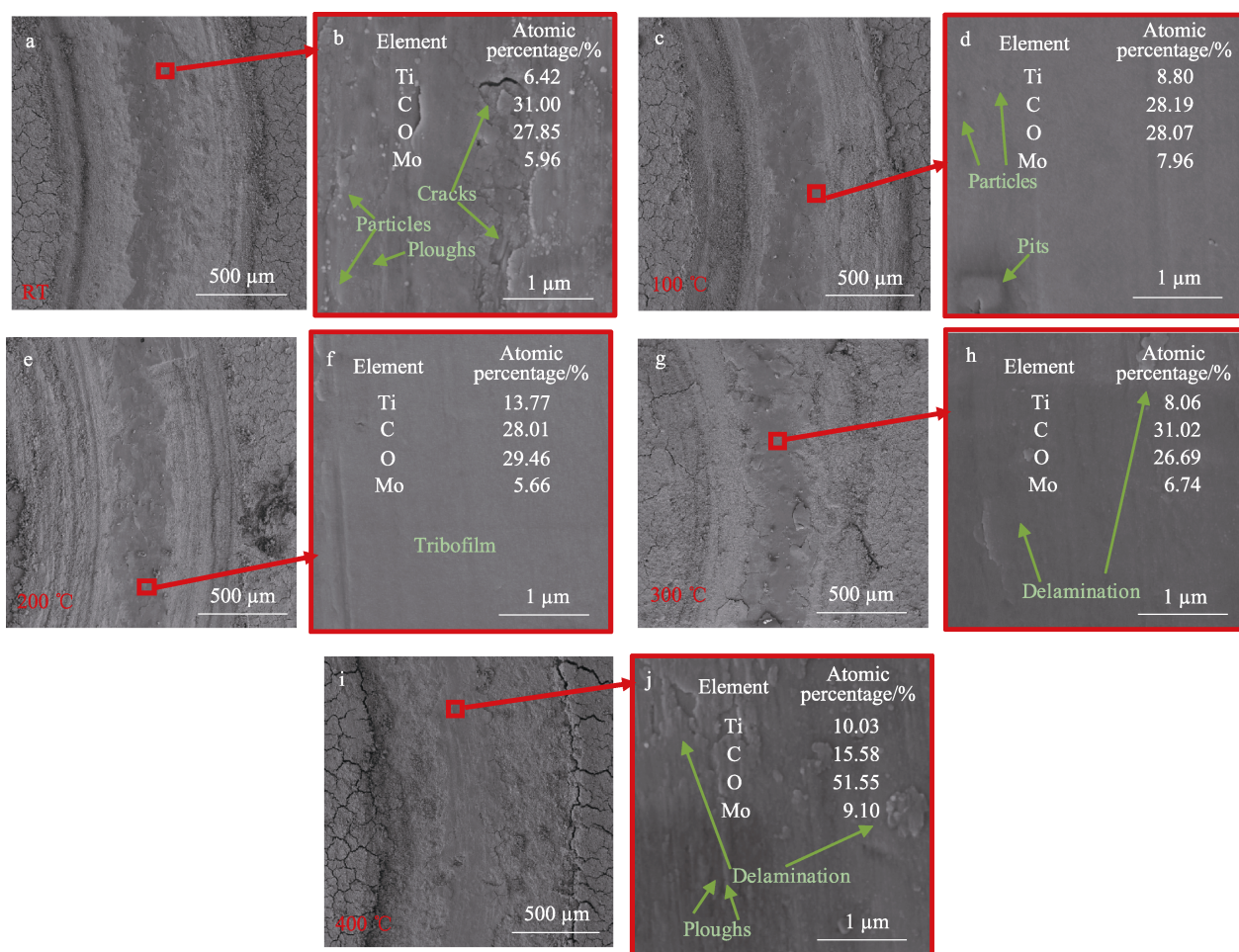
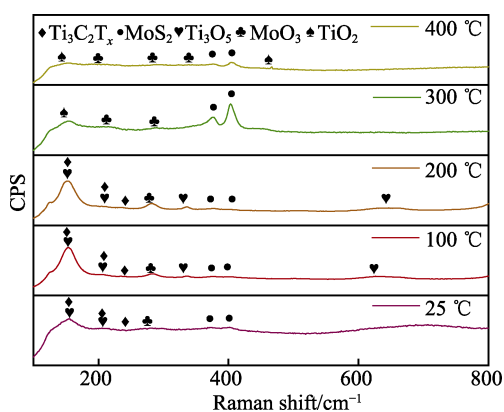
制备了相同含量的 MoS<sub>2</sub> 磷酸盐涂层, 并测试了它在相同条件下的摩擦学性能。在室温下, MoS<sub>2</sub> 磷酸盐涂层的平均摩擦因数为 0.22 (如图 8a 所示), 通过测量磨痕宽度计算其磨损率为  $3.53 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。可以看出, MoS<sub>2</sub>/Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 磷酸盐涂层在室温下的摩擦因数相较于 MoS<sub>2</sub> 磷酸盐涂层降低了 50%, 磨损率也减小 1 个数量级, 说明 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 和 MoS<sub>2</sub> 对磷酸盐涂层表现出明显的协同润滑作用。

随着温度的升高, MoS<sub>2</sub>/Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 磷酸盐涂层的摩擦因数呈先减小后增大的趋势, 磨损率整体呈增大趋势。在 200 °C 时, MoS<sub>2</sub>/Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 磷酸盐涂层的摩擦因数低至 0.03, 且较为平稳, 其磨损率为  $1.18 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。根据文献报道, MoS<sub>2</sub> 在干燥环境中的摩擦学性能较好<sup>[29]</sup>, 因此与 100 °C 相比, 在 200 °C 时 MoS<sub>2</sub>/Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 磷酸盐涂层周围环境中的水分子蒸发, 导致涂层的摩擦学性能得到提升, 因此涂层的摩擦因数和磨损率较低。当温度继续升高时, 涂层的摩擦因数从 200 °C 时的 0.03 增至 400 °C 时的 0.21, 其磨损率增至  $6.35 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。相较于 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 磷酸盐涂层, 在整个实验温度范围内 MoS<sub>2</sub>/Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 磷酸盐涂层的摩擦因数均低于 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 磷酸盐涂层的摩擦因数。在温度从 100 °C 升至 400 °C 时, MoS<sub>2</sub>/Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 磷酸盐涂层的摩擦因数相较于 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 磷酸盐涂层的摩擦因数分别降低了 74.4%、92.9%、84.1%、73.7%, 磨损率也大幅降低。说明以 MoS<sub>2</sub>/Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 为磷酸盐涂层的固体润滑填料有效起到了减摩抗磨作用。

## 2.6 MoS<sub>2</sub>/Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 磷酸盐涂层在不同温度下的磨损机理

在 25~400 °C 下, MoS<sub>2</sub>/Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 磷酸盐涂层磨斑表面及局部放大区域的 SEM 图如图 9 所示, 磨斑表面微区的化学元素分析结果如图 9b、d、f、h、j 所示, 不同温度下磨斑表面的拉曼图谱如图 10 所示。可以看出, 由于 MoS<sub>2</sub> 具有优良的润滑作用, 因此 MoS<sub>2</sub>/Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 磷酸盐涂层与 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 磷酸盐涂层相比,



图9 MoS<sub>2</sub>/Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>磷酸盐涂层在25~400 °C下磨损表面的SEM图Fig.9 SEM images of worn surfaces of MoS<sub>2</sub>/Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> phosphate coating at 25-400 °C图10 MoS<sub>2</sub>/Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>磷酸盐涂层在25~400 °C下磨损表面的拉曼图谱Fig.10 Raman spectrum of worn surfaces of MoS<sub>2</sub>/Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> phosphate coating at 25-400 °C

在整个实验温度范围内,其涂层磨损表面均变得更加光滑平整。在室温下磨损较平滑,在磨损表面能够观察到较连续的润滑膜。同时,磨损表面存在较多微粒状的磨屑,磨屑在载荷作用下,破坏了部分摩擦膜,导致磨损表面产生了少量的微裂纹和犁沟,使得室温下涂层的摩擦因数波动较大。此时,MoS<sub>2</sub>/Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>磷

酸盐涂层的主要磨损机理为磨粒磨损。分析拉曼图谱可知,在室温下MoS<sub>2</sub>/Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>磷酸盐涂层在摩擦过程中发生了轻微氧化,Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>和MoS<sub>2</sub>被部分氧化为Ti<sub>3</sub>O<sub>5</sub>、MoO<sub>3</sub>。继续升高温度,在100 °C时磨损表面的微粒状磨屑变少,摩擦膜表面存在少量凹坑,这是导致在100 °C时涂层的摩擦学性能相较于200 °C时较差的主要原因。在200 °C时,磨斑表面的犁沟和磨屑消失,润滑膜呈现更加光滑且平整的形貌,此时黏着磨损为主要的磨损机理。在温度200 °C以下时,磨斑表面的氧化产物均为Ti<sub>3</sub>O<sub>5</sub>和少量的MoO<sub>3</sub>。继续升高温度,涂层的氧化程度加剧。当温度高于300 °C时,涂层中的Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>被氧化为TiO<sub>2</sub>,MoS<sub>2</sub>特征峰增强。由于Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>与MoS<sub>2</sub>的协同润滑作用消失,因此涂层的摩擦因数和磨损率在300 °C时升高。在400 °C时,在磨损表面可以观察到更加连续、均匀的润滑膜,同时磨损表面出现少量的层状脱落现象和较浅的犁沟现象。根据摩擦膜的EDS结果可知,润滑膜中的氧元素含量明显升高,说明磨损表面的氧化程度更严重,此时疲劳磨损和氧化磨损为主要的磨损机理。通过分析拉曼图谱(图10)可知,润滑膜的主要组成为MoS<sub>2</sub>、TiO<sub>2</sub>、MoO<sub>3</sub>。MoS<sub>2</sub>作为理想的中、

低温固体润滑剂, 对磷酸盐涂层起到了有效的润滑作用。与此同时, 根据文献报道, 由于其氧化产物 MoO<sub>3</sub> 具有层状结构, 也能够起到减摩作用<sup>[29-30]</sup>, 因此在 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 和 MoS<sub>2</sub> 的协同润滑作用下, MoS<sub>2</sub>/Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 磷酸盐涂层在 25~400 °C 下均呈现出显著的减摩效果, 且其耐磨性相较于 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 磷酸盐涂层有所提高。

### 3 结论

1) Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 磷酸盐涂层的摩擦因数和磨损率均随着 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 添加量的增大呈现先减小后增大的趋势。当 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 与 Al(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> 的质量比为 2:1 时, 涂层的摩擦因数和磨损率最低, 分别为 0.38 和  $2.75 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。

2) 当温度低于 200 °C 时, Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 磷酸盐涂层的摩擦因数为 0.38~0.42, 且较为平稳。当温度高于 200 °C 时, 摩擦因数急剧增至 0.84 以上。Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 磷酸盐涂层的磨损率随着温度的升高而增大, 从室温时的  $2.75 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$  增至 400 °C 时的  $7.34 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。

3) 在 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 表面负载 MoS<sub>2</sub>, 并将其作为磷酸盐涂层的润滑相, 能够显著提升 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 磷酸盐涂层在 25~400 °C 下的摩擦学性能。在室温下, MoS<sub>2</sub>/Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 磷酸盐涂层的摩擦因数和磨损率分别为 0.11 和  $6.77 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ , 相较于 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 磷酸盐涂层分别降低了 71.1% 和 1 个数量级。同时, 在 25~400 °C 范围内, MoS<sub>2</sub>/Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 磷酸盐涂层的摩擦因数均低于 0.21, 相较于 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 磷酸盐涂层均降低了 70% 以上。

4) 可以观察到, MoS<sub>2</sub>/Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 磷酸盐涂层在各温度下其磨损表面均为较连续的润滑膜。在室温时, 主要磨损机理为磨粒磨损。在温度低于 200 °C 时, 涂层在摩擦过程中出现了轻微氧化, 部分 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 和 MoS<sub>2</sub> 被氧化为 Ti<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 MoO<sub>3</sub>。随着温度的升高, 氧化程度加剧, 在温度高于 300 °C 时, 氧化产物为 TiO<sub>2</sub> 和部分 MoO<sub>3</sub>, MoS<sub>2</sub> 和 MoO<sub>3</sub> 的润滑作用使得涂层在 400 °C 下仍具有较优异的自润滑性能。

### 参考文献:

[1] 国泰榕, 卢小鹏, 李岩, 等. 磷酸盐后处理对 Mg-Gd-Y 合金微弧氧化涂层耐蚀性能的影响[J]. 表面技术, 2021, 50(9): 278-285.  
GUO T R, LU X P, LI Y, et al. Effect of Phosphate Post-Treatment on Corrosion Resistance of Micro-Arc Oxidation Coating on Mg-Gd-Y Alloy[J]. Surface Technology, 2021, 50(9): 278-285.

[2] 程昱琳, 张卿和, 程英亮. 钼在磷酸盐中等离子体电解氧化涂层耐腐蚀性能研究[J]. 表面技术, 2021, 50(6): 32-40.

CHENG Y L, ZHANG Q H, CHENG Y L. Corrosion-Resistant Coatings on Tantalum Formed by Plasma Electrolytic Oxidation in Phosphate Electrolyte[J]. Surface Technology, 2021, 50(6): 32-40.

[3] GAO J L, SU Y C, QIN Y X. Calcium Phosphate Coatings Enhance Biocompatibility and Degradation Resistance of Magnesium Alloy: Correlating *in Vitro* and *in Vivo* Studies[J]. Bioactive Materials, 2021, 6(5): 1223-1229.

[4] ZHOU H L, LI J Y, LI J, et al. Calcium Phosphate Coating on Biomedical WE43 Magnesium Alloy Pretreated with a Magnesium Phosphate Layer for Corrosion Protection[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 401: 126248.

[5] 程明月, 林颖菲, 王超, 等. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 溶胶对铝基磷酸盐涂层组织及性能的影响[J]. 涂料工业, 2021, 51(9): 1-8.  
CHENG M Y, LIN Y F, WANG C, et al. Effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Sol on the Microstructure and Properties of Aluminum-Based Phosphate Coatings[J]. Paint & Coatings Industry, 2021, 51(9): 1-8.

[6] ZHOU Q Y, LIU S L. Fabrication of Magnesium Phosphate Coating by Electrochemical Cathodic Method for Corrosion Protection of Sintered NdFeB Magnets[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2021, 30(2): 1200-1206.

[7] WANG X, WU Q, LI S Y, et al. Lithium-Aluminum-Phosphate Coating Enables Stable 4.6 V Cycling Performance of LiCoO<sub>2</sub> at Room Temperature and beyond[J]. Energy Storage Materials, 2021, 37: 67-76.

[8] 黄海平, 揭晓华, 郑开宏, 等. 基料浓度对铝基磷酸盐涂层结构及耐腐蚀性的影响[J]. 涂料工业, 2020, 50(6): 34-39.  
HUANG H P, JIE X H, ZHENG K H, et al. Effect of Binder Concentration on Microstructure and Corrosion Resistance of Al-Based Phosphate Coatings[J]. Paint & Coatings Industry, 2020, 50(6): 34-39.

[9] 银怀, 黎红英, 陈基东, 等. 磷酸盐涂层研究进展及其应用[J]. 表面技术, 2021, 50(1): 232-241.  
YIN H, LI H Y, CHEN J D, et al. Research Progress and Application of Phosphate Coatings[J]. Surface Technology, 2021, 50(1): 232-241.

[10] 宋婧, 曾令可, 陈丙璇. 多孔蓄热材料基体的制备与性能研究[J]. 材料导报, 2008, 22(4): 143-145.  
SONG J, ZENG L K, CHEN B X. Preparation and Properties of Porous Heat Storage Material Matrix[J]. Materials Review, 2008, 22(4): 143-145.

[11] 李良锋, 吕福特, 马雪, 等. 固化剂对磷酸盐粘结剂固化行为的影响研究[J]. 人工晶体学报, 2014, 43(5): 1311-1316.  
LI L F, LV F T, MA X, et al. Study on Effects of Curing Agents on Curing Behavior of Phosphate Binder[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2014, 43(5): 1311-1316.

[12] 刘晓刚, 孙红, 刘林聪. 二维材料在摩擦机理和润滑应用方面的研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(S2): 33-37.  
LIU X G, SUN H, LIU L C. Research Progress of 2D Materials in Friction Mechanism and Lubrication



- Application[J]. *Materials Reports*, 2021, 35(S2): 33-37.
- [13] 丁勇. 高温润滑涂层的制备及性能研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2011: 23-28.  
DING Y. Preparation of High Temperature Lubricating Coating Phosphate and Study of Performance[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2011: 23-28.
- [14] 刘灿灿, 陈磊, 周健松, 等. 石墨-磷酸铝铬润滑涂层的制备及其摩擦学性能[J]. *中国表面工程*, 2013, 26(5): 96-102.  
LIU C C, CHEN L, ZHOU J S, et al. Preparation and Tribological Behaviors of Graphite-Phosphate Solid Lubricating Coatings[J]. *China Surface Engineering*, 2013, 26(5): 96-102.
- [15] YI M J, HU S Y, LI N, et al. Selenium Vacancy-Rich and Heteroatom-Doped  $\text{CoSe}/\text{Mo}_2\text{CT}_x$  MXene Prepared Using Ionic Liquid Dopants for PH-Universal Hydrogen Evolution and Flexible Supercapacitors[J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2022, 72: 453-464.
- [16] ZOU Z, NING M Q, LEI Z K, et al. 0D/1D/2D Architectural  $\text{Co}@\text{C}/\text{MXene}$  Composite for Boosting Microwave Attenuation Performance in 2–18 GHz[J]. *Carbon*, 2022, 193: 182-194.
- [17] 姚金辰, 王李波, 李浩楠, 等. MXene/聚合物复合材料的合成及其应用研究进展[J]. *复合材料学报*, 2022, 39(4): 1457-1468.  
YAO J C, WANG L B, LI H N, et al. Research Progress in Synthesis and Application of MXene/Polymer Composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(4): 1457-1468.
- [18] CHENG S, XIONG Q Q, ZHAO C X, et al. Synergism of 1D  $\text{CdS}/2\text{D}$  Modified  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  MXene Heterojunctions for Boosted Photocatalytic Hydrogen Production[J]. *Chinese Journal of Structural Chemistry*, 2022, 41(8): 2208058-2208064.
- [19] 李华鹏, 董旭晟, 孙彬, 等.  $\text{TiO}_2/\text{MXene}$  纳米复合材料的可控制备及在光催化和电化学中的应用研究进展[J]. *材料工程*, 2021, 49(8): 54-62.  
LI H P, DONG X S, SUN B, et al. Research Progress on Controllable Preparation of  $\text{TiO}_2/\text{MXene}$  Nanocomposites and Applications in Photocatalysis and Electrochemistry[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2021, 49(8): 54-62.
- [20] CAI Z, MA Y F, WANG M, et al. Engineering of Electrolyte Ion Channels in MXene/Holey Graphene Electrodes for Superior Supercapacitive Performances[J]. *Rare Metals*, 2022, 41(6): 2084-2093.
- [21] CAO W T, WANG Z, LIU X H, et al. Bioinspired MXene-Based User-Interactive Electronic Skin for Digital and Visual Dual-Channel Sensing[J]. *Nano-Micro Letters*, 2022, 14(1): 119.
- [22] TAN L W, WEI C L, ZHANG Y C, et al. Self-Assembled, Highly-Lithiophilic and Well-Aligned Biomass Engineered MXene Paper Enables Dendrite-Free Lithium Metal Anode in Carbonate-Based Electrolyte[J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2022, 69: 221-230.
- [23] 司晓阳, 陈凡燕, 邓启煌, 等. MXene/铜合金复合材料的制备与性能研究[J]. *无机材料学报*, 2018, 33(6): 603-608.  
SI X Y, CHEN F Y, DENG Q H, et al. Preparation and Property of MXene/Copper Alloy Composites[J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2018, 33(6): 603-608.
- [24] 康瑞洋, 张振宇, 郭梁超, 等.  $\text{Ti}_3\text{C}_2$  MXene 填充环氧树脂复合材料摩擦学性能研究[J]. *硬质合金*, 2019, 36(3): 213-220.  
KANG R Y, ZHANG Z Y, GUO L C, et al. Study on the Tribological Property of Epoxy Composites Filled with  $\text{Ti}_3\text{C}_2$  MXene[J]. *Cemented Carbide*, 2019, 36(3): 213-220.
- [25] KIM D P, WOO H G, HA H, et al. Fabrication and Properties of Thermal Insulating Glass Fiber Reinforced Composites from Low Temperature Curable Polyphosphate Inorganic Polymers[J]. *Composites Science and Technology*, 2003, 63(3/4): 493-499.
- [26] FENG P, REN Y P, LI Y T, et al. Synergistic Lubrication of Few-Layer  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x/\text{MoS}_2$  Heterojunction as a Lubricant Additive[J]. *Friction*, 2022, 10(12): 2018-2032.
- [27] 胡树郡.  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  及核壳结构  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x@\text{Ni}$  粉体的制备和电磁屏蔽性能研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021: 25-36.  
HU S J. Preparation and Electromagnetic Interference Shielding Properties of  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  and Core@shell Structured  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x@\text{Ni}$  Particles[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021: 25-36.
- [28] FANG Y, FENG Y X, LIU X H, et al. Influence of Mo Doping on the Tribological Behavior of  $\text{Ti}_3\text{AlC}_2$  Ceramic at Different Temperatures[J]. *Ceramics International*, 2021, 47(18): 25520-25530.
- [29] 裘子剑, 唐海鹏, 赵永武. 二硫化钼改性石墨基复合涂层在高温下的摩擦学行为[J]. *材料保护*, 2022, 55(9): 10-15.  
QIU Z J, TANG H P, ZHAO Y W. Tribological Behavior of Graphite-Based Composite Coating Modified by Molybdenum Disulfide at High Temperature[J]. *Materials Protection*, 2022, 55(9): 10-15.
- [30] YANG J S, LIU L W, WANG D Y, et al. Boosting K-Ion Kinetics by Interfacial Polarization Induced by Amorphous  $\text{MoO}_{3-x}$  for  $\text{MoSe}_2/\text{MoO}_{3-x}@\text{rGO}$  Composites[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2022, 115: 232-240.