

# GO-TiO<sub>2</sub> 对磷酸盐粘结涂层耐磨损性能的影响

卞达<sup>1</sup>, 倪自丰<sup>1</sup>, 钱善华<sup>1</sup>, 王永光<sup>2</sup>, 赵永武<sup>1</sup>

(1.江南大学 a.机械学院 b.江苏省先进食品制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122;  
2.苏州大学 机电工程学院, 江苏 苏州 215006)

**摘要:** **目的** 提高磷酸盐粘结涂层的耐磨损性能。**方法** 以 3-氨基丙基三乙氧基硅烷为纽带, 制备氧化石墨烯-二氧化钛复合材料 (GO-TiO<sub>2</sub>), 并作为增强相加入涂层中。通过 SEM 和 FTIR, 对 GO-TiO<sub>2</sub> 的微观结构和官能团进行表征, 采用维氏硬度计对涂层显微硬度进行测量, 利用摩擦磨损试验机测试涂层的摩擦学行为, 采用白光干涉仪和 SEM 对涂层磨痕微观结构进行表征。**结果** 二氧化钛和氧化石墨烯通过化学键连接在一起, 且由于二氧化钛的存在, 氧化石墨烯表面变得粗糙, 从而加强机械啮合作用, 提高了涂层其他组分与氧化石墨烯的界面结合力。随着 GO-TiO<sub>2</sub> 的加入, 涂层的显微硬度增加。未添加 GO-TiO<sub>2</sub> 涂层的显微硬度为 207.4HV<sub>0.3</sub>, 添加 1.0% (质量分数) GO-TiO<sub>2</sub> 时, 涂层的显微硬度增加至 260.4 HV<sub>0.3</sub>。涂层的摩擦因数随着 GO-TiO<sub>2</sub> 的加入稍微降低, 而涂层的耐磨损性能显著增加。未添加 GO-TiO<sub>2</sub> 涂层的摩擦因数为 0.51 左右, 磨损率为 2.17×10<sup>-4</sup> mm<sup>3</sup>/(N·m), 当添加 1.0% GO-TiO<sub>2</sub> 时, 涂层摩擦因数和磨损率分别降低至 0.45 和 0.51×10<sup>-4</sup> mm<sup>3</sup>/(N·m)。**结论** 涂层磨损主要是由脆性剥落引起的, 而且 GO-TiO<sub>2</sub> 的添加并未改变涂层磨损机制。GO-TiO<sub>2</sub> 通过抑制裂纹的拓展, 提高了涂层的耐磨损性能。

**关键词:** 氧化石墨烯; 粘结涂层; 磨损; 裂纹; 界面结合

**中图分类号:** TH117.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)04-0056-06

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.04.004

## Influence of GO-TiO<sub>2</sub> on Wear Resistance Properties of Phosphate Bonded Coating

BIAN Da<sup>1</sup>, NI Zi-feng<sup>1</sup>, QIAN Shan-hua<sup>1</sup>, WANG Yong-guang<sup>2</sup>, ZHAO Yong-wu<sup>1</sup>

(1.a.College of Mechanical Engineering, b.Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;  
2.College of Mechanical Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, China)

**ABSTRACT:** To improve the wear resistance of phosphate bonded coating, graphene oxide-titanium dioxide (GO-TiO<sub>2</sub>) was prepared with 3-Aminopropyltriethoxysilane as bridge and added into phosphate bonded coating as the reinforcement. SEM and

收稿日期: 2021-01-15; 修订日期: 2021-03-16

Received: 2021-01-15; Revised: 2021-03-16

基金项目: 国家自然科学基金 (51675232); 江苏省自然科学基金 (BK20190611); 中国博士后基金 (2020M681482)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51675232); Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20190611) and China Postdoctoral Science Foundation (2020M681482)

作者简介: 卞达 (1990—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为表面技术。

Biography: BIAN Da (1990—), Male, Doctor, Lecturer, Research focus: surface technology.

通讯作者: 赵永武 (1962—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为表面技术。邮箱: zhaoyw@jiangnan.edu.cn

Corresponding author: ZHAO Yong-wu (1962—), Male, Doctor, Professor, Research focus: surface technology. E-mail: zhaoyw@jiangnan.edu.cn

引文格式: 卞达, 倪自丰, 钱善华, 等. GO-TiO<sub>2</sub> 对磷酸盐粘结涂层耐磨损性能的影响[J]. 表面技术, 2021, 50(4): 56-61.

BIAN Da, NI Zi-feng, QIAN Shan-hua, et al. Influence of GO-TiO<sub>2</sub> on wear resistance properties of phosphate bonded coating[J]. Surface technology, 2021, 50(4): 56-61.

FTIR was used to study the microstructure and phase of GO-TiO<sub>2</sub>. In addition, the hardness and tribological behavior were tested with Vickers hardness tester and a tribometer, respectively. Besides, the microstructure of worn surface was studied by SEM and white light interferometer. The results show that TiO<sub>2</sub> is grafted to GO through chemical bonds. Besides, the surface of GO becomes rough with the presence of TiO<sub>2</sub>, which can strengthen mechanical joggle and improve the interfacial adhesive between GO and the coating matrix. The hardness of the coating is improved with the introduction of GO-TiO<sub>2</sub>. The hardness of the coating without GO-TiO<sub>2</sub> is 207.4 HV<sub>0.3</sub>, while the hardness reaches to 260.4 HV<sub>0.3</sub> with the introduction of 1.0% GO-TiO<sub>2</sub>. In addition, the friction coefficient slightly decreases with GO-TiO<sub>2</sub>. However, the wear resistance of the coating is obviously increase. The friction coefficient and wear rate of the coating without GO-TiO<sub>2</sub> are 0.51 and 2.17×10<sup>-4</sup> mm<sup>3</sup>/(N·m), respectively. When added 1.0% GO-TiO<sub>2</sub>, the friction coefficient and wear rate decrease to 0.45 and 0.51×10<sup>-4</sup> mm<sup>3</sup>/(N·m), respectively. The wear is mainly attributed to brittle delamination, and the wear resistance of coating is improved because cracks propagation is inhibited by GO-TiO<sub>2</sub>.

**KEY WORDS:** graphene oxide; bonded coating; wear; crack; interfacial adhesive

粘结涂层是一种由粘结剂、填料和增强剂制备所得的涂层，由于其具有固化温度低、涂敷施工简易、施工对象形状尺寸无限制等优点，在表面技术领域得到广泛关注<sup>[1-3]</sup>。通过使用有机粘结剂形成的有机粘结涂层，展示出良好的耐腐蚀和耐磨损性能<sup>[4-5]</sup>。有机粘结剂中，有机溶剂容易给环境带来污染，而且有机粘结涂层耐高温、抗氧化、抗辐照等能力差，大大限制了此类粘结涂层在复杂工况中的应用<sup>[6-7]</sup>。

采用无机粘结剂（如磷酸盐粘结剂和硅酸盐粘结剂）制备的无机粘结涂层克服了有机粘结涂层的缺点，在航空航天、核电和能源领域得到广泛应用<sup>[10]</sup>。然而无机粘结剂脆性大，抵抗裂纹能力差，耐磨损性能不如有机粘结剂。为了提高无机粘结涂层的耐磨损性能，对无机粘结剂改性成为一种行之有效的方法<sup>[9-10]</sup>。翁亶等<sup>[11]</sup>发现借助硅溶胶中纳米 SiO<sub>2</sub> 表面含有的羟基等活性基团，与磷酸盐通过活性羟基基团相交联，同样可以提升磷酸盐粘结陶瓷涂层的力学性能和稳定性。此外，在无机粘结涂层中添加增强剂，也可以有效提高涂层力学性能和耐磨损性能，如纤维、黑磷等<sup>[12-13]</sup>。碳纤维和石墨烯具有优异的力学性能，也是无机粘结涂层增强剂的理想选择。笔者课题组将石墨烯加入磷酸二氢铝基粘结涂层中，并对其摩擦学行为进行分析，发现石墨烯可显著提高涂层的耐磨损性能<sup>[14-15]</sup>。增强剂借助自身优异的力学性能，承载涂层服役过程产生的应力，达到增强的效果。因此在涂层设计时，除了选择优异力学性能的增强剂，还应考虑增强剂与涂层其他组分间的界面结合，保证应力的传递效果。

基于此，本文对氧化石墨烯表面进行改性，制备氧化石墨烯-二氧化钛复合材料（GO-TiO<sub>2</sub>），提高氧化石墨烯与涂层其他组分的界面结合。将 GO-TiO<sub>2</sub> 添加入磷酸盐基无机粘结涂层中，并对其进行摩擦学性能表征，揭示 GO-TiO<sub>2</sub> 对涂层摩擦学性能的影响机制。该研究成果对于氧化石墨烯等增强剂在涂层表面技术中的应用提供了理论依据和指导。

1 试验

1.1 试样制备

1.1.1 GO-TiO<sub>2</sub> 制备

将 3-氨基丙基三乙氧基硅烷（国药集团）、去离子水 and 无水乙醇（国药集团）按质量比 5：2：18 配制混合溶液，然后按质量分数 2.5% 向混合溶液中加入纳米二氧化钛（国药集团），再加入 12.5 倍混合溶液质量的无水乙醇。将最终混合液体超声分散 0.5 h。超声分散后，将混合液倒入三口烧瓶中，在 80 ℃、磁力搅拌条件下回流 6 h。回流结束后，用无水乙醇和去离子水洗涤数次，得到改性二氧化钛。随后，将改性后的二氧化钛和氧化石墨烯（苏州碳丰石墨烯科技有限公司）按质量比 1：4 加入二甲基甲酰胺中，超声分散 0.5 h，要求氧化石墨烯和改性二氧化钛总质量分数为 2%。将分散液在 105 ℃、磁力搅拌条件下回流 3 h。最后，用无水乙醇和去离子水洗涤数次，放入 70 ℃干燥箱中，干燥 15 h 以上。

1.1.2 涂层制备

涂层成分配比见表 1，其中磷酸二氢铝粘结剂购买于新乡伯马风帆实业有限公司，氧化铝、氧化锌和硅酸锆来自国药集团。首先将氧化铝、氧化锌、硅酸锆和 GO-TiO<sub>2</sub> 按照比例加入球磨机（QM-3SP4，南京南大仪器厂）混料 4 h。将混好的粉末按照表 1 比例加入磷酸二氢铝粘结剂中，并搅拌。随后通过喷涂方式将涂层涂敷于 Q235 基体表面。最后对涂敷的涂层进行固化，固化工艺为：室温干燥 5 h，100 ℃保温

表 1 涂层制备原料配比  
Tab.1 Raw materials of coatings wt. %

No.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZnO	ZrSiO <sub>4</sub>	GO-TiO <sub>2</sub>	AP binder
1	45	5	5	0.0	45
2	44.5	5	5	0.5	45
3	44.0	5	5	1.0	45

2 h, 200 °C 保温 1 h, 300 °C 保温 1 h。固化后涂层厚度由 DT-156 测厚仪 (华盛昌科技实业股份有限公司, 中国深圳) 测得, 约为  $(100 \pm 2) \mu\text{m}$ 。

## 1.2 性能表征与测试

采用维氏硬度计 (hvs-1000zcm-xy, 上海索岩检测仪器仪表有限公司) 测量涂层的显微硬度, 载荷为 30 g, 保载时间为 15 s。采用扫描电子显微镜 (SEM, 蔡司 EVO18) 对 GO-TiO<sub>2</sub> 的微观结构进行表征。通过红外光谱仪 (美国赛默飞, 尔 Nicolet is10) 对 GO-TiO<sub>2</sub> 官能团结构进行研究。利用 RTEC 多功能摩擦试验机往复模块对涂层的摩擦学性能进行表征, 试验条件: 法向载荷为 20 N, 频率为 1 Hz, 对磨副为直径 9 mm 的氮化硅小球, 试验时间为 30 min。通过 MFD-D 型白光干涉仪和 SEM 对磨痕形貌进行表征。

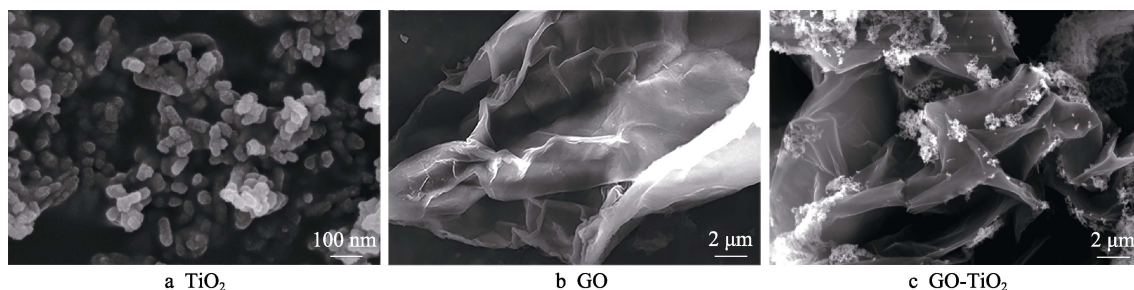


图 1 SEM 微观形貌  
Fig.1 SEM microscopic morphology

GO 和 GO-TiO<sub>2</sub> 红外光谱见图 2。从 GO 的图谱可看出, 在 1047、1224、1630、1725、2852、3413 cm<sup>-1</sup> 处存在特征峰, 这些峰分别为 C—O—C、C—O、C=C、C=O、—CH<sub>2</sub> 和 —OH<sup>[16-17]</sup>。通过 GO-TiO<sub>2</sub> 的图谱分析可以发现, 在 663 cm<sup>-1</sup> 出现一个新特征峰, 为 Ti—O—Ti 特征峰。此结果表明, GO-TiO<sub>2</sub> 存在二氧化钛结构。此外, 在 1095 cm<sup>-1</sup> 处存在 Si—O—C 特征峰, 而 1047 cm<sup>-1</sup> 和 3413 cm<sup>-1</sup> 处特征峰减弱, 因此可以说明 3-氨基丙基三乙氧基硅烷通过与 GO 上环氧基和羟基反应, 产生化学键相连。而 3-氨基丙基三

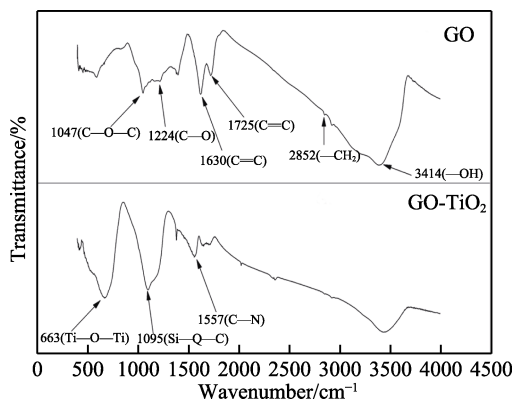


图 2 GO 和 GO-TiO<sub>2</sub> 红外光谱  
Fig.2 Infrared spectra of GO and GO-TiO<sub>2</sub>

## 2 结果与分析

### 2.1 GO-TiO<sub>2</sub> 表征

TiO<sub>2</sub>、GO 和 GO-TiO<sub>2</sub> 的微观结构如图 1 所示。由图 1a 可以看出, TiO<sub>2</sub> 颗粒呈扁状, 大部分颗粒尺寸均小于 50 nm, 达到纳米级别尺寸。从图 1b 可以明显看出, GO 呈片状结构, 而且表面十分光滑, 无颗粒吸附。图 1c 结果表明, 在制备 GO-TiO<sub>2</sub> 的过程中, GO 片状结构并没有被破坏, 而且表面存在很多纳米二氧化钛。纳米二氧化钛的存在, 使原本光滑的 GO 表面变得粗糙, 增大了 GO 与涂层其他组分的接触面积、机械啮合作用、界面结合, 为应力传递提供了可靠桥梁。

乙氧基硅烷另一部分又与二氧化钛表面羟基反应产生化学键。由此可判断出, 3-氨基丙基三乙氧基硅烷作为纽带, 通过化学键将二氧化钛嫁接到 GO 表面, 形成如图 1c 所示的 GO-TiO<sub>2</sub>。

涂层表面和截面微观形貌如图 3 所示。从图 3a 可看出, 涂层内粘结相将骨料氧化铝紧密粘结在一起, 形成致密的磷酸盐粘结涂层。图 3b 结果表明, 涂层和基体界面结合处无明显裂纹等微观缺陷, 表明涂层和基体界面结合良好。

### 2.2 涂层摩擦学性能

由于涂层硬度与涂层的摩擦学性能关系密切, 首先对涂层的硬度进行表征, 结果如图 4 所示。未添加 GO-TiO<sub>2</sub> 时, 涂层显微硬度为 207.4HV<sub>0.3</sub>。当添加 0.5% 和 1.0% (质量分数) GO-TiO<sub>2</sub> 时, 涂层的显微硬度分别增加到 250.6HV<sub>0.3</sub> 和 260.4HV<sub>0.3</sub>, 显微硬度增幅最大为 25.5%。这主要是由于加入 GO-TiO<sub>2</sub> 后, 在硬度测量时, 复合材料承担部分载荷, 而 GO-TiO<sub>2</sub> 具有优异的力学性能, 当载荷消失时, 不会发生形变, 从而提高了涂层的显微硬度。

各涂层的摩擦因数曲线如图 5 所示。通过分析可以发现, 不含 GO-TiO<sub>2</sub> 时, 摩擦因数最大, 在 0.51 左右; 加入 GO-TiO<sub>2</sub> 后, 摩擦因数降低。当 GO-TiO<sub>2</sub>

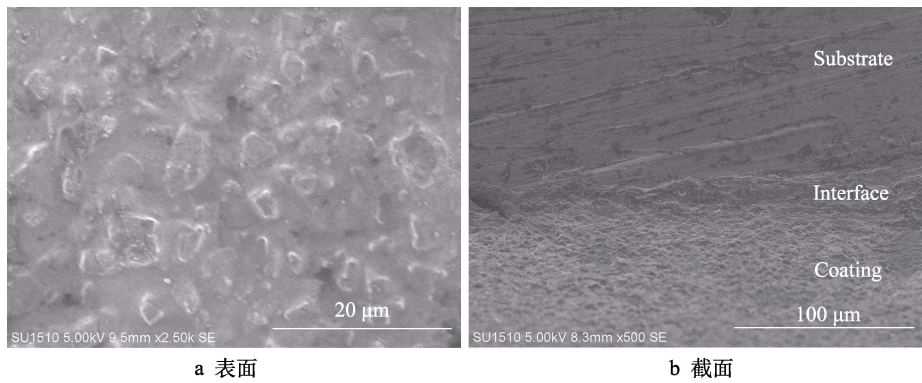


图 3 涂层表面和涂层截面 SEM 形貌  
Fig.3 SEM morphology of surface and cross-section of coating

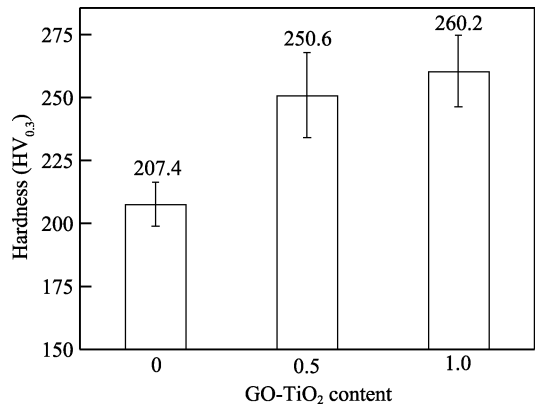


图 4 涂层显微硬度和 GO-TiO<sub>2</sub> 的关系  
Fig.4 The relationship between microhardness and GO-TiO<sub>2</sub>

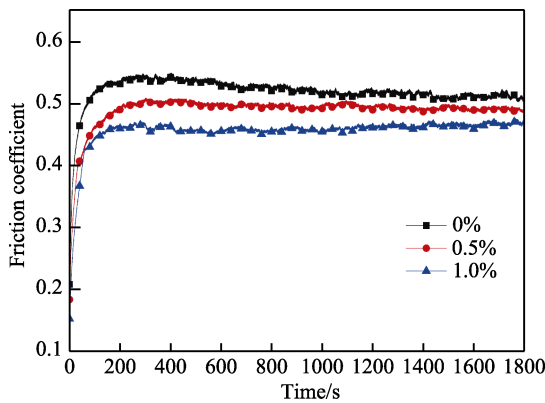


图 5 不同 GO-TiO<sub>2</sub> 含量涂层的摩擦因数  
Fig.5 Friction coefficient of the coating with different GO-TiO<sub>2</sub> content

含量为 1.0% 时,涂层的摩擦因数为三种样品中最低,在 0.45 左右。这主要是由于氧化石墨烯具有减摩效果,当磨痕表面存在氧化石墨烯时,可降低摩擦因数。摩擦因数虽然降低,但降低幅度不大。

涂层磨痕的表面二维形貌如图 6 所示。从图 6 中可以看出,不含 GO-TiO<sub>2</sub> 的涂层磨痕深度最高,宽度也最大。随着 GO-TiO<sub>2</sub> 的加入,涂层宽度减小。此外,磨痕深度也随着 GO-TiO<sub>2</sub> 的加入而明显降低,这与涂层的硬度有一定关系。不含 GO-TiO<sub>2</sub> 的涂层硬度最

低,抵抗压入能力低,因此在对磨小球压入并摩擦时,磨痕宽度和深度大。当加入 GO-TiO<sub>2</sub> 后,涂层硬度增加,抵抗压入能力变强,磨痕宽度和深度也随之减小。从磨痕的二维形貌可以看出,随着 GO-TiO<sub>2</sub> 的添加,涂层耐磨损性能得到显著提升。根据磨痕形貌计算出的磨损率如图 7 所示。从图 7 中可发现,当未添加 GO-TiO<sub>2</sub> 时,涂层磨损率为  $2.17 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。当添加 0.5%GO-TiO<sub>2</sub> 时,涂层磨损率急剧降低至  $1.04 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。相比未添加 GO-TiO<sub>2</sub> 的涂层,降低约

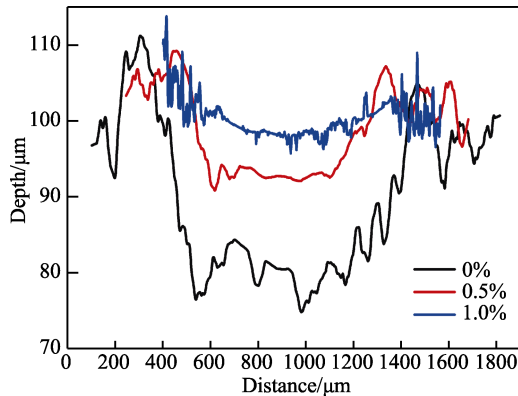


图 6 不同 GO-TiO<sub>2</sub> 含量涂层的磨痕二维形貌  
Fig.6 Two-dimensional morphologies of worn surface with different GO-TiO<sub>2</sub> content

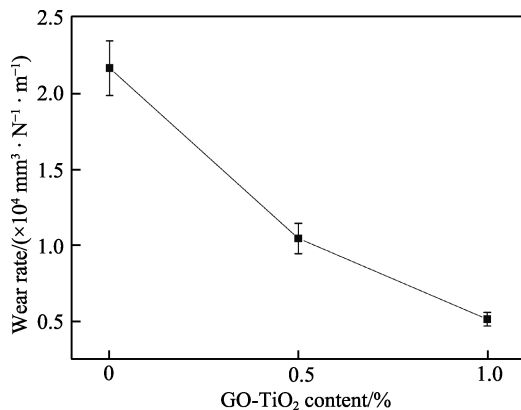


图 7 不同 GO-TiO<sub>2</sub> 含量涂层的磨损率  
Fig.7 Wear rate of the coating with different GO-TiO<sub>2</sub> content



1/2, 涂层耐磨损性能得到显著提升。当添加 1.0% GO-TiO<sub>2</sub> 时, 涂层磨损率进一步下降至  $0.51 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ , 约为未添加 GO-TiO<sub>2</sub> 的涂层磨损率的 1/4。

为了揭示 GO-TiO<sub>2</sub> 对涂层耐磨损性能的增强机制, 对磨痕微观形貌进行表征, 如图 8 所示。图 8a 为不含 GO-TiO<sub>2</sub> 的涂层磨痕表面, 可以看到有许多凹坑, 这是涂层表面材料剥落引起的, 此外还有一些裂纹, 但没有明显的划痕出现。这说明涂层磨损主要是裂纹引起的脆性剥落, 而非磨粒磨损。图 8b 为添加 0.5% GO-TiO<sub>2</sub> 的涂层磨痕表面。磨痕表面特征与未添加 GO-TiO<sub>2</sub> 的磨痕表面一致, 说明涂层磨损仍是裂纹引起的脆性剥落, 而非磨粒磨损, 但凹坑的数量明显减少。当添加 1% 的 GO-TiO<sub>2</sub> 时, 磨痕表面仍然存在凹坑, 但没有划痕, 而且凹坑数量进一步减少, 如图 8c 所示。这表明 GO-TiO<sub>2</sub> 的添加并未改变涂层的磨损形式, 而是降低了脆性剥落, 提高了涂层耐磨损性能。为了进一步阐明这一点, 对不含 GO-TiO<sub>2</sub> 和含 1% GO-TiO<sub>2</sub> 的涂层磨痕表面的微观形貌进行放大研究。由于摩擦的往复运动, 可以发现磨痕表面出现裂纹。未添加 GO-TiO<sub>2</sub> 的涂层磨痕表面的裂纹情况如图

8a 所示, 随着摩擦的往复运动, 这些裂纹会进一步扩展。当形成一圈封闭裂纹时, 加之磨痕亚表层的微裂纹, 封闭裂纹内部的材料就会剥落, 从而形成凹坑。图 8a 中 A 区域是即将形成的封闭裂纹。当添加 GO-TiO<sub>2</sub> 时, 磨痕表面仍然存在裂纹, 但裂纹的数量明显降低 (见图 8c)。这说明 GO-TiO<sub>2</sub> 的添加可以遏制裂纹的萌生和扩展, 从而提高涂层的耐磨损性能。

含 1% GO-TiO<sub>2</sub> 的涂层截面形貌如图 9 所示。从 EDS 图谱可以看出, 中间片状物为 GO-TiO<sub>2</sub>。还可以看出, GO 与涂层其他组分界面结合良好。此外, 由于氧化石墨烯具有较高的强度, 裂纹无法击穿氧化石墨烯继续拓展。当裂纹拓展遇到 GO-TiO<sub>2</sub> 的阻挡, 就会被迫转移方向, 而裂纹方向的转移可以消耗断裂能。由于 GO-TiO<sub>2</sub> 中氧化石墨烯表面粗糙, 其与涂层界面结合良好, 因此裂纹沿着涂层与 GO-TiO<sub>2</sub> 界面拓展消耗的能量比沿着涂层与光滑表面的纯氧化石墨烯界面拓展消耗的能量大, 断裂能完全消耗时, 可以发现沿着界面拓展的裂纹终止拓展。由此可见, 改变裂纹拓展方向以及增强界面结合能力消耗更多断裂能, 是 GO-TiO<sub>2</sub> 使得涂层产生的裂纹少的主要原因。

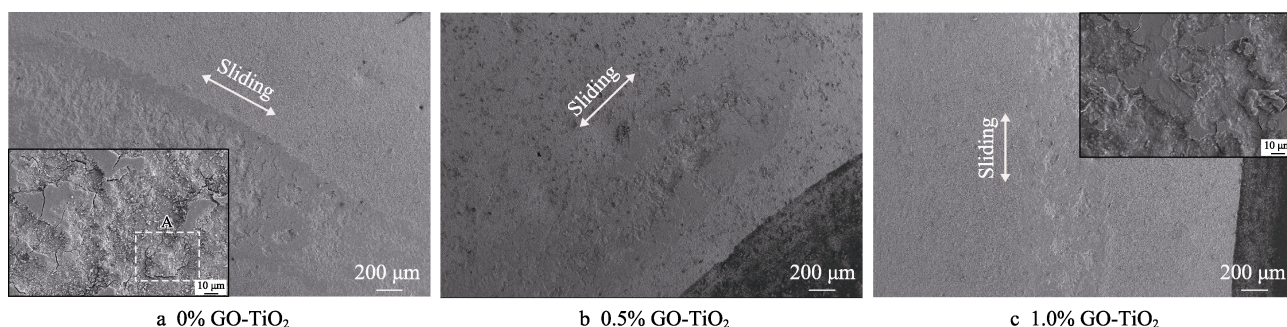


图 8 磨痕表面 SEM 形貌  
Fig.8 SEM morphology of worn surface

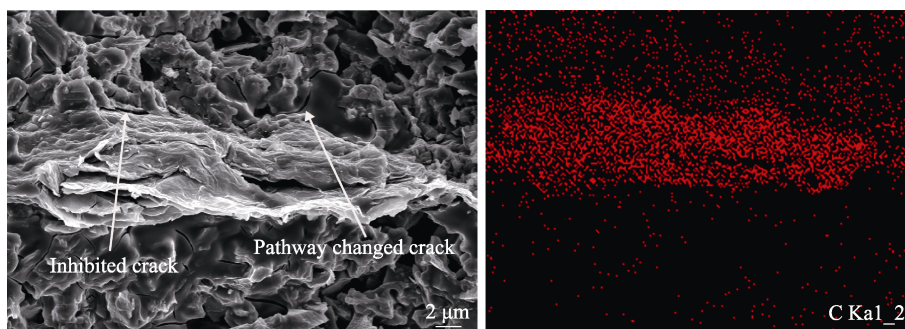


图 9 含 1% GO-TiO<sub>2</sub> 的涂层截面微观结构及 EDS 分析  
Fig.9 SEM and EDS of the cross-section with 1% GO-TiO<sub>2</sub>

综上所述, 磷酸盐粘结陶瓷涂层磨损是由于涂层在往复摩擦运动中产生裂纹而引起的脆性剥落。当添加 GO-TiO<sub>2</sub> 后, 由于氧化石墨烯的强度, 裂纹拓展遇到 GO-TiO<sub>2</sub> 而被迫转移拓展方向, 会消耗一部分断裂能。当裂纹沿着涂层与 GO-TiO<sub>2</sub> 界面传播时, 由

于 GO-TiO<sub>2</sub> 中氧化石墨烯表面更粗糙, 其与涂层其他组分的界面结合强度比光滑表面的纯氧化石墨烯与涂层其他组分的界面结合强度高, 因此可以消耗更多断裂能, 从而抑制裂纹的拓展, 提高涂层耐磨损性能。

### 3 结论

1) 以 3-氨基丙基三乙氧基硅烷为纽带, 通过化学键将二氧化钛嫁接于氧化石墨烯表面, 制备 GO-TiO<sub>2</sub>。嫁接二氧化钛后, 氧化石墨烯表面变得粗糙, 提高了 GO-TiO<sub>2</sub> 与涂层其他组分的界面结合。

2) 加入 GO-TiO<sub>2</sub> 后, 涂层摩擦因数稍微降低, 但涂层的耐磨损性能得到显著提升。添加 1.0% GO-TiO<sub>2</sub> 的涂层磨损率仅为未添加 GO-TiO<sub>2</sub> 涂层的 1/4。

3) 磷酸盐粘结涂层的磨损主要由脆性剥落引起。GO-TiO<sub>2</sub> 通过改变裂纹拓展方向以及增强氧化石墨烯与涂层其他组分的界面结合强度, 消耗更多沿界面拓展的裂纹的断裂能, 达到遏制裂纹的拓展, 增强涂层耐磨损性能的目的。

#### 参考文献:

- [1] 李为民, 彭超义, 杨金水, 等. PTFE/epoxy 全有机超疏水涂层制备[J]. 材料工程, 2020, 48(7): 162-169.  
LI Wei-min, PENG Chao-yi, YANG Jin-shui, et al. Preparation of all-organic superhydrophobic PTFE/epoxy composite coating[J]. Materials engineering, 2020, 48(7): 162-169.
- [2] 赵书华, 陈宏, 王树立, 等. 石墨烯对硅酸盐富锌防腐涂层性能的影响[J]. 腐蚀与防护, 2018, 39(12): 930-935.  
ZHAO Shu-hua, CHEN Hong, WANG Shu-li, et al. Effect of graphene on properties of silicate zinc-rich anti-corrosion coating[J]. Corrosion and protection, 2018, 39(12): 930-935.
- [3] WANG M Z, MA R N, DU A, et al. Corrosion resistance of black phosphorus nanosheets composite phosphate coatings on Q235 steel[J]. Materials chemistry and physics, 2020, 250: 123056.
- [4] JOUYANDEH M, RAHMATI N, MOVAHEDIFAR E, et al. Properties of nano-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> incorporated epoxy coatings from cure Index perspective[J]. Prog org coat, 2019, 133: 220-228.
- [5] KUMAR A M, KHAN A, KHAN M Y, et al. Hierarchical graphitic carbon nitride-ZnO nanocomposite: Viable reinforcement for the improved corrosion resistant behavior of organic coatings[J]. Mater chem phys, 2020, 251: 12.
- [6] DING Z, LI Y Y, XU M R, et al. Electrochemical properties of aluminum tripolyphosphate modified chemically bonded phosphate ceramic anticorrosion coating[J]. Constr build mater, 2020, 251: 10.
- [7] LYON S B, BINGHAM R, MILLS D J. Advances in corrosion protection by organic coatings: What we know and what we would like to know[J]. Prog org coat, 2017, 102: 2-7.
- [8] 张定军, 鲜彦博, 马彦军, 等. 无机磷酸盐基复合涂层在表面防护技术中的研究现状及应用进展[J]. 表面技术, 2020, 49(7): 68-75.  
ZHANG Ding-jun, XIAN Yan-bo, MA Yan-jun, et al. Research progress of inorganic phosphate-based composite coatings in the surface protection fields[J]. Surface technology, 2020, 49(7): 68-75.
- [9] JIA Y L, CHEN L, FENG X Z, et al. Tribological behavior of molybdenum disulfide bonded solid lubricating coatings cured with organosiloxane-modified phosphate binder[J]. RSC advances, 2015, 5(85): 69606-69615.
- [10] 秦真波, 夏大海, 吴忠, 等. 磷酸盐无机涂料及其研究进展[J]. 表面技术, 2019, 48(12): 34-42.  
QIN Z B, XIA D H, WU Z, et al. Phosphate inorganic coating and its research progress[J]. Surface technology, 2019, 48(12): 34-42.
- [11] 翁宣, 秦真波, 周潼, 等. 硅溶胶对无机磷酸铝涂料防腐性能的影响[J]. 涂料工业, 2018, 48(5): 7-13.  
WENG Quan, QIN Zhen-bo, ZHOU Tong, et al. Effect of silica sol on corrosion resistance of aluminum phosphate composite coatings[J]. Coatings industry, 2018, 48(5): 7-13.
- [12] HE L P, CHEN D C, SHANG S P. Fabrication and wear properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiC ceramic coatings using aluminum phosphate as binder[J]. Journal of materials science, 2004, 39(15): 4887-4892.
- [13] WANG W, XIE G X, LUO J B. Black phosphorus as a new lubricant[J]. Friction, 2018, 6: 116-142.
- [14] BIAN D, ARADHYULA T V, GUO Y X, et al. Improving tribological performance of chemically bonded phosphate ceramic coatings reinforced by graphene nanoplatelets[J]. Ceramics international, 2017, 43(15): 12466-12471.
- [15] 秦卢梦, 卞达, 徐晓燕, 等. 石墨烯/碳纳米管增强氧化铝陶瓷涂层的制备及摩擦学性能的研究[J]. 摩擦学学报, 2017, 37(6): 798-805.  
QIN Lu-meng, BIAN Da, XU Xiao-yan, et al. Preparation and tribological properties of graphene/carbon nanotubes reinforced alumina ceramic coating[J]. Acta tribology, 2017, 37(6): 798-805.
- [16] NETHRAVATHI C, RAJAMATHI M. Chemically modified graphene sheets produced by the solvothermal reduction of colloidal dispersions of graphite oxide[J]. Carbon, 2008, 4(14): 1994-1998.
- [17] WAN Q, LI Q H, CHEN Y J, et al. Fabrication and ethanol sensing characteristics of ZnO nanowire gas sensors[J]. Applied physics letters, 2004, 84(18): 3654-3656.