

石墨烯量子点/纳米 Al_2O_3 协同生长润滑转移膜机制*

王 壮 张建军 梁 森 郭 峰 郑少梅 车清论

(青岛理工大学汽车与机械工程学院 青岛 266525)

摘要: 为改善环氧树脂(EP)的摩擦学性能,将氮掺杂的石墨烯量子点(N-GQDs)和 Al_2O_3 纳米颗粒(Nano- Al_2O_3) 杂化物添加到环氧树脂中制备 EP 纳米复合材料。利用 MRH-1A 摩擦试验机考察纳米复合材料在 PAO 润滑油条件下的摩擦磨损性能,结合磨损表面的形貌及摩擦化学分析,研究界面转移膜的形成机理和润滑效应。试验结果表明,3N-GQDs-1Nano- Al_2O_3 /EP 纳米复合材料获得了最好的摩擦学性能,其最低摩擦因数和磨损率分别为 0.08 和 $7.4 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ 。同时对偶金属表面上能够观察到一层均匀的转移膜,其中 C、N、O 元素主要分布于沟壑,而 N、Al 元素则集中于高台区域。机理分析表明,N-GQDs 和 Nano- Al_2O_3 有效促进了转移膜的生成,从而避免了摩擦界面的直接接触。

关键词: N-GQDs; Nano- Al_2O_3 ; EP 纳米复合材料; 转移膜; 摩擦学性能

中图分类号: TH117

Synergistic of Graphene Quantum Dots/nano- Al_2O_3 Growing Lubricous Tribofilm

WANG Zhuang ZHANG Jianjun LIANG Sen GUO Feng ZHENG Shaomei CHE Qinglun

(School of Automotive and Mechanical Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

Abstract: Nitrogen-doped graphene quantum dots and Al_2O_3 nanoparticles hybrids were added to epoxy resin to prepare high tribological performance EP nanocomposites. Tribometer with Plate-on-Ring mode was used to investigate the tribological properties of the nanocomposite under PAO lubrication condition. The morphology and tribochemistry of worn surface were analyzed, the mechanisms governing the formation and anti-friction performance of the tribofilm were explored. The results showed that the lowest friction coefficient and wear rate of 0.08 and $7.4 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ are obtained when 3N-GQDs-1Nano- Al_2O_3 /EP rubbed with the steel counterpart. A continuous and thin tribo-film is distributed on the the steel countersurface, in which the C, N and O elements are mainly distributed in the gully, while the N and Al elements are concentrated in the plateau area. It is demonstrated that a tribofilm promoted by N-GQDs and Al_2O_3 effectively avoided direct contact of friction pair.

Keywords: N-GQDs; Nano- Al_2O_3 ; nanocomposites; tribofilm; tribological performance

0 前言

随着高技术工业的迅速发展,汽车、海运船舶等零部件长期运转于高负载、频繁启停的恶劣工况中,从而对运动机构的服役寿命和可靠性提出了严峻的挑战,因此,发展高性能摩擦副材料具有重要的理论与现实意义^[1-2]。环氧树脂(EP)因具有良好的机械强度和高化学稳定性,广泛应用于交通运输和航空

航天等领域^[3]。然而,纯 EP 作为自润滑材料其力学强度较差,摩擦磨损较为严重,难以满足苛刻工况。研究发现,在聚合物基体中添加功能性填料可以提高材料的承载能力,降低摩擦副的真实接触面积和黏着力,从而改善复合材料的摩擦学性能^[4]。

功能性纳米颗粒因具有独特的结构和性能,作为聚合物复合材料的增强相可以有效增强复合材料的强度及韧性,起到阻止裂纹扩展的作用^[5]。此

* 山东省重点研发计划(2019GSF109094)和山东省自然科学基金(ZR2020ME135)资助项目。

Fund: Supported by Key Research Project of Shandong Province (2019GSF109094) and Natural Science Foundation of Shandong Province (ZR2020ME135).

20210419 收到初稿,20210830 收到修改稿

外,在常规聚合物基体(例如 PEEK 和 PR)中添加无机纳米颗粒(例如 Al_2O_3 、 ZrO_2 和 SiO_2)能够进一步提高其摩擦学性能^[6-7]。Nano- Al_2O_3 是一种典型的纳米颗粒,研究表明 Nano- Al_2O_3 不仅能够提高聚合物的力学性能^[8],还在摩擦过程中具有抛光和承载作用^[9]。祁渊等^[10]发现在摩擦过程中复合材料中的 Nano- Al_2O_3 与 PEEK 和 PTFE 等传统材料之间存在协同作用,Nano- Al_2O_3 易于释放到接触界面,通过摩擦烧结形成稳健、均匀的纳米陶瓷转移膜,从而抑制摩擦副的直接接触。然而,单一的纳米颗粒难以达到优异的减摩抗磨作用,可能需要两种或两种以上的纳米颗粒复合协同效应来提高聚合物复合材料力学性能和摩擦学性能。近期,研究者发现 N-GQDs 作为一种独特的新型零维石墨烯材料,其表面含有丰富的羧基和羟基等官能团,与树脂的特定官能团形成化学键合,从而有效提高了其在聚合物基体中分散性^[8,11]。研究表明单一的 N-GQDs 填充 EP 复合材料获得了优异的减摩性能,其抗磨性能较差。研究者分析认为纳米复合材料中释放的 N-GQDs 未能在摩擦界面上形成稳定的转移膜,从而引起严重的磨损。基于以上综合分析,推测 Nano- Al_2O_3 和 N-GQDs 杂化物填充 EP 纳米复合材料可能会形成协同效果,有利于提高复合材料的力学性能和摩擦学性能。

因此,本文将尿素作为氮源制备 N-GQDs,并将其与 Nano- Al_2O_3 杂化共同引入 EP 基体中。利用 MRH-1A 摩擦试验机研究 N-GQDs-Nano- Al_2O_3 杂化物对 EP 纳米复合材料摩擦学性能的影响,深入分析在边界润滑状态下界面转移膜的纳米结构,进一步揭示 N-GQDs-Nano- Al_2O_3 杂化物对摩擦界面转移膜形成机理。

1 试验

1.1 试验材料

环氧树脂(EP),南通星辰合成材料有限公司产品,环氧当量 182~192 g/mol,密度 1.18 g/mm³;三乙四胺(TETA)固化剂,国药集团化学试剂有限公司产品;Nano- Al_2O_3 ,宣城晶瑞新材料有限公司产品,粒径尺寸约为 30 nm;聚 α 烯烃(PAO)基础油,金盾石化集团有限公司产品;尿素(H_2NCONH_2)与一水合柠檬酸,国药集团化学试剂有限公司产品。

1.2 N-GQDs 的制备

根据文献[12]中的方法合成 N-GQDs,先将 0.21 g 一水合柠檬酸与 0.42 g 尿素加入 5 ml 去离

子水中,充分搅拌直至完全溶解,再将混合溶液转移至内衬为聚四氟乙烯的水热反应釜中,水热反应温度为 160 ℃,持续时间 4 h,然后自然冷却至室温,最终得到褐色溶液。再将褐色溶液离心,5 000 r/min,15 min,用去离子水洗涤直至没有沉淀,取上清液透析,然后刮下滤纸上的粉末放入冷冻干燥机中干燥,最后得到 N-GQDs。

1.3 EP 复合材料的制备

首先称取一定质量 EP 和 Nano- Al_2O_3 置于烘箱中,加热至 100 ℃,保温 24 h,以备后期使用。将干燥好的 EP 放置于真空高速搅拌机(Dispermat CN-10,VMA-Getzmann,德国)中真空搅拌 5 min,去除液体 EP 中部分气泡。在真空度为 -95 kPa,转速为 3 000 r/min 条件下分散 5 min。其次,称取一定量的 N-GQDs 和 Nano- Al_2O_3 粉末倒入球磨罐,由于两种粉末表面都含有特定官能团,球磨过程中产生的机械力促使 N-GQDs 粘附在 Nano- Al_2O_3 表面,从而得到 N-GQDs-Nano- Al_2O_3 杂化物。再者,将不同含量 N-GQD 的杂化物加入到上述液体 EP 中,抽真空至 -95 kPa,并将转速调至 5 000 r/min,得到均匀分散的 EP 纳米复合材料。最后,将固化剂 TETA(EP:TETA=100:13)加入到 EP 中,在真空高速下搅拌均匀,随后将混合液移至模具中,室温下放置 2 h,在 100 ℃下固化 2 h 得到 EP 纳米复合材料。为了进行试验对比,试验前用同样的方式制备得到了纯 EP 和 N-GQDs/EP 复合材料。表 1 给出了不同组分 EP 纳米复合材料。

表 1 EP 复合材料的成分组成
Table 1 Composition of EP composite

Composition/wt. %	EP	N-GQDs	Nano- Al_2O_3
EP	100	—	—
0.5N-GQDs/EP	99.5	0.5	—
1N-GQDs/EP	99	1	—
3N-GQDs/EP	97	3	—
0.5N-GQDs-1Nano- Al_2O_3 /EP	98.5	0.5	1
1N-GQDs-1Nano- Al_2O_3 /EP	98	1	1
3N-GQDs-1Nano- Al_2O_3 /EP	96	3	1

1.4 摩擦性能测试

使用 MRH-1A(Plate-on-Ring,POR,济南益华科技有限公司)摩擦试验机对几种纳米复合材料进行了摩擦学性能的测试。每个样品至少重复三次摩擦试验,试验测试时间为 3 h,POR 测试方式示意图 1。试样尺寸为 50 mm×10 mm×5 mm,轴承钢(GCr15)作为对偶件,圆环直径为 70 mm,试验前用 W28 金相砂纸打磨对偶件,打磨后其表面粗糙度约

为 $0.2\ \mu\text{m}$, 原因在于购买所得的钢环表面是未经统一处理的, 使用 W28 金相砂纸打磨的目的是最大程度上减小不同钢环之间的差异性, 保证钢环表面具有一致的粗糙度, 所造成的原始划痕对试验结果影响较小。所用试样和对偶件均用石油醚超声清洗。摩擦试验均在室温 ($20\ ^\circ\text{C}$, 环境湿度为 $20\sim 60\%$) 下进行, 测试条件如下: 载荷为 $50\sim 200\ \text{N}$, 速度为 $0.05\ \text{m/s}$, 时间为 $3\ \text{h}$, 浸油润滑。通过传感器及计算机计算得出摩擦因数, 每组试验至少重复三次, 纳米复合材料试样的磨损率 W_s 由下式计算:

$$W_s = \frac{L' \left[R^2 \arcsin\left(\frac{W}{2R}\right) - \frac{W}{4} \sqrt{4R^2 - W^2} \right]}{FL}$$

式中, L' 为试样宽度 (mm), R 为轴承钢环的直径 (mm), W 为磨痕的宽度, F 为施加于试样上的载荷 (N), L 为滑动距离 (m)。

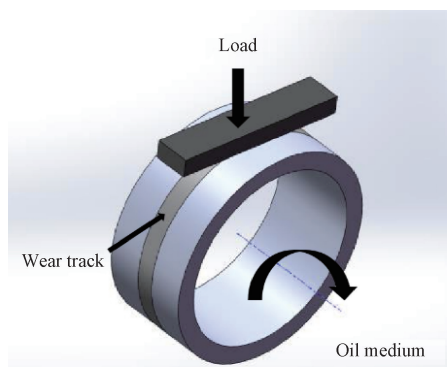


图1 滑块式的摩擦接触方式

Fig. 1 Contact schematic of POR test

1.5 材料和磨损表面的表征

利用高分辨率透射电子显微镜 (HR-TEM, Tecnai G2 TF20, FEI) 和傅里叶变换红外光谱 (ATR-FTIR, Nicolet 6700, Thermo Fisher Scientific) 对 N-GQDs 的化学结构进行分析, 使用场发射扫描电子显微镜 (FE-SEM, Mira3, Tescan, 工作电压 $1\sim 10\ \text{kV}$, 放大倍数 $200\sim 2\ 000$)、能量色散 X 射线光谱仪 (SEM-EDX, Energy350, Oxford) 和 ATR-FTIR 分别对金属磨损表面形貌和化学结构进行分析。

2 结果与讨论

2.1 材料的显微结构

董永强等研究表明, 氮掺杂的 GQDs 对不同波段的光响应是区别其光学性质的有效手段^[13-14]。因此, 笔者将使用不同波长的光源照射 N-GQDs 水溶液, 在自然光 ($228\ \text{nm}$) 照射条件下, N-GQDs 水溶液呈棕色 (见图 2a); 而将 N-GQDs 水溶液置于紫外

线光 ($365\ \text{nm}$) 环境中, 观察到 N-GQDs 水溶液发出淡蓝色的荧光 (见图 2b)。图 2c 是 N-GQDs 结构的 TEM 图, 显示合成制备的 N-GQDs 尺寸大约为 $3\ \text{nm}$, 形状呈规则的圆形, 且分布均匀。进一步利用 ATR-FTIR 光谱对 N-GQDs 的化学结构进行了表征 (如图 2d 所示), 在 $3\ 188\ \text{cm}^{-1}$ 和 $3\ 080\ \text{cm}^{-1}$ 位置处的光谱峰分别为 $-\text{OH}$ 和 $\text{N}-\text{H}$ 伸缩振动, 表明 N-GQDs 表面存在大量的氨基和羟基, 为 N 元素成功掺杂 GQDs 提供了直接证据。在 $1\ 582\ \text{cm}^{-1}$ 和 $1\ 402\ \text{cm}^{-1}$ 位置处的光谱峰与 $\text{C}=\text{O}$ 双键和 $\text{C}-\text{N}$ 单键的拉伸振动相呼应, 而 $1\ 120\ \text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰对应 $\text{C}-\text{C}$ 的伸缩振动, 进一步证明了 N-GQDs 的成功制备。上述结果表明在 N-GQDs 中存在大量的羟基和羧基等含氧和含氮的官能团, 因此, 带有大量官能团的 N-GQDs 表面可以在 EP 树脂材料中较好的分散^[15]。如图 2e 所示, 将 N-GQDs 和 Nano- Al_2O_3 粉末加入球磨罐, 在机械力作用下粉末相互碰撞使 N-GQDs 粘附到 Nano- Al_2O_3 表面形成 N-GQDs-Nano- Al_2O_3 杂化体, N-GQDs 复合后的纳米粒子相对于原始的 Nano- Al_2O_3 表面其表面被氮掺杂石墨烯量子点包裹^[16]。

2.2 油润滑状态下 EP 纳米复合材料的摩擦学性能

图 3 和图 4 展示了油润滑条件下 EP 纳米复合材料在不同载荷条件下的摩擦因数与磨损率。在速度为 $0.05\ \text{m/s}$ 的条件下, 图 3a 与 3b 展示了两种载荷和 N-GQDs 含量条件下 EP 纳米复合材料摩擦学行为。在低载 ($50\ \text{N}$) 条件下, 在磨合阶段纯 EP 的摩擦因数呈现上升趋势, 随后摩擦因数逐渐稳定于 0.12 (如图 3a)。然而, 将 N-GQDs 引入到 EP 中其摩擦因数随 N-GQDs 质量分数的增加而降低。从图 3b 中可以看出, 在高载 ($100\ \text{N}$) 条件下, 3N-GQDs/EP 纳米复合材料表现出更短的磨合时间和更低的摩擦因数。有文献研究表明, Nano- Al_2O_3 在摩擦过程中易于释放到摩擦界面, 不仅具有抛光和承载作用, 并且在摩擦力的作用下易于在摩擦界面烧结形成具有润滑特性和牢固吸附的转移膜^[10]。基于此, 笔者研究了不同含量 N-GQDs 与 $1\% \text{Al}_2\text{O}_3$ 复合杂化对 EP 摩擦因数的影响 (如图 3c 所示), $0.5\text{N-GQDs}-1\text{Nano-Al}_2\text{O}_3/\text{EP}$ 的摩擦因数高于 EP 树脂材料, 当添加的质量分数提高到 1.0% 时, 纳米复合材料摩擦因数显著降低至 0.08 , 这是由于杂化物的加入缩短了磨合时间, 两者之间的协同作用发挥了减摩效果。

笔者研究了不同载荷对于 EP 纳米复合材料磨损率。从图 4a 和 4b 可以看出纯 EP 和 EP 纳米复合材料

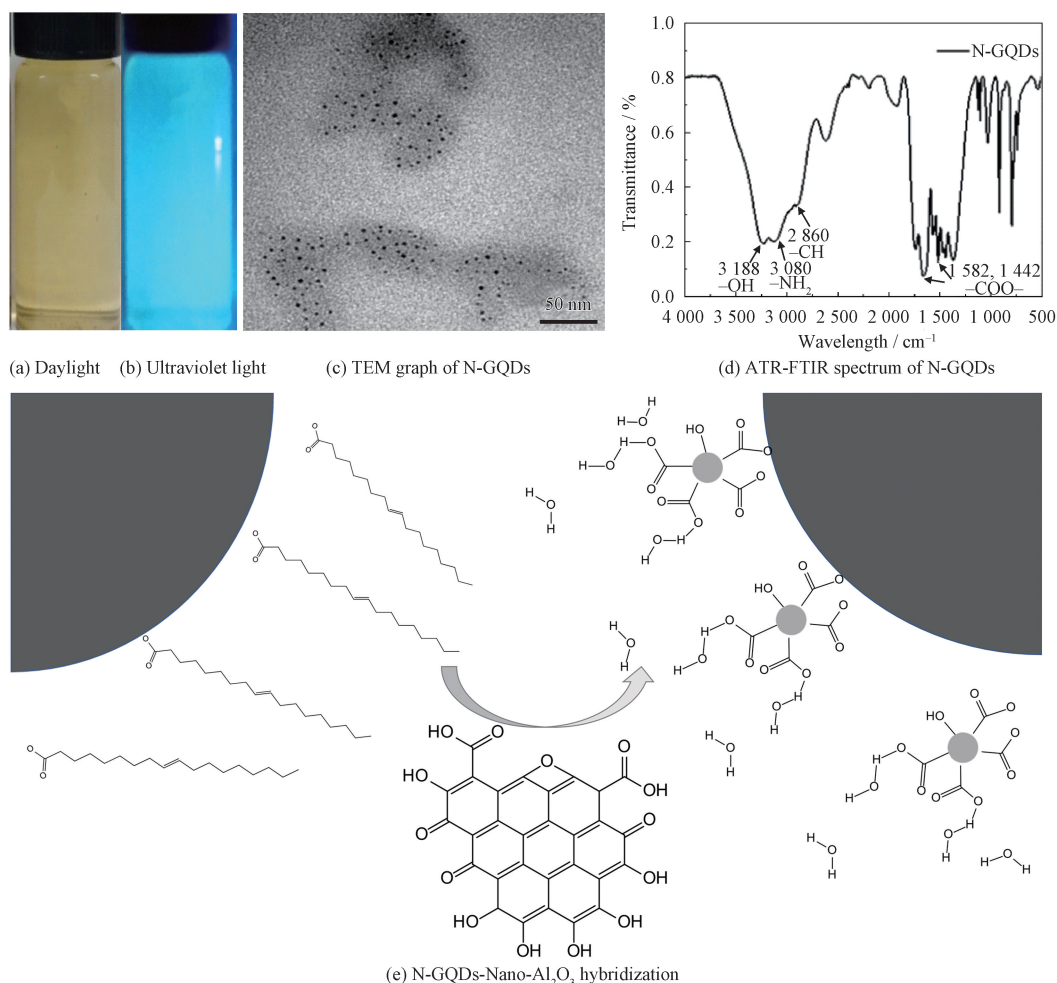


图2 N-GQDs 的光学性质、形貌、红外表征及杂化示意图

Fig. 2 Schematic diagram of optical properties, morphology, infrared characterization and hybridization of N-GQDs

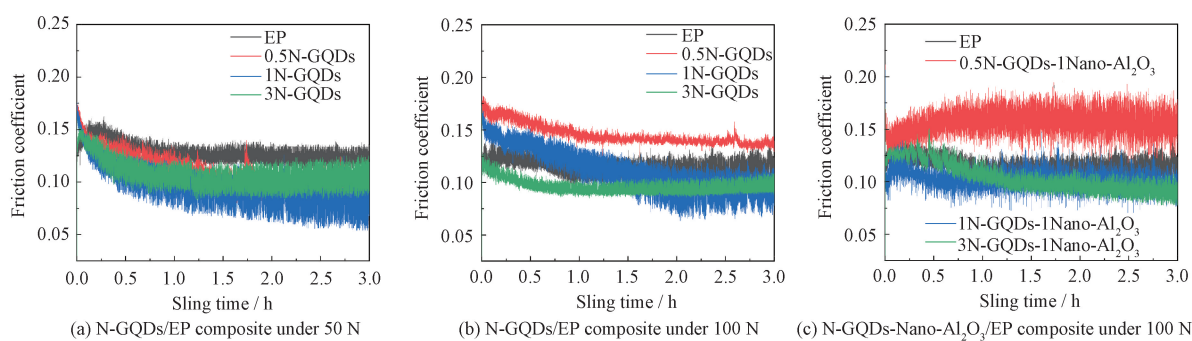


图3 不同 EP 复合材料的摩擦因数随时间变化曲线

Fig. 3 Friction coefficient curve of different EP composites with time

的磨损率随着载荷的增加而增加,其中 N-GQDs 和其杂化物的加入表现出显著的抗磨作用。3N-GQDs-1Nano-Al₂O₃ 杂化物的加入使纯 EP 的磨损率从 $1.23 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 降到了 $7.4 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$,显著提高了纯 EP 的耐磨性。其中,3N-GQDs-1Nano-Al₂O₃/EP 纳米复合材料比纯 EP 的磨损率降低了约 50%,而且还低于 N-GQDs/EP 复合材料的磨损率。结果表明,杂化物的协同效应起到了优异的抗

磨效果,可以延长材料的使用寿命。

通过试验对比发现,纯 EP 的摩擦学性能较差,可能是在摩擦过程中容易发生界面粘附,导致跑和时间较长,而且在金属对偶表面不易形成转移膜,导致减摩抗磨效果较差^[17-18]。而 N-GQDs 具有显著的减摩效果,结果表明,在摩擦过程中 N-GQDs 及其杂化物会从 EP 中释放到摩擦界面形成了润滑性的转移膜,延缓了摩擦表面的直接接触。特别是,

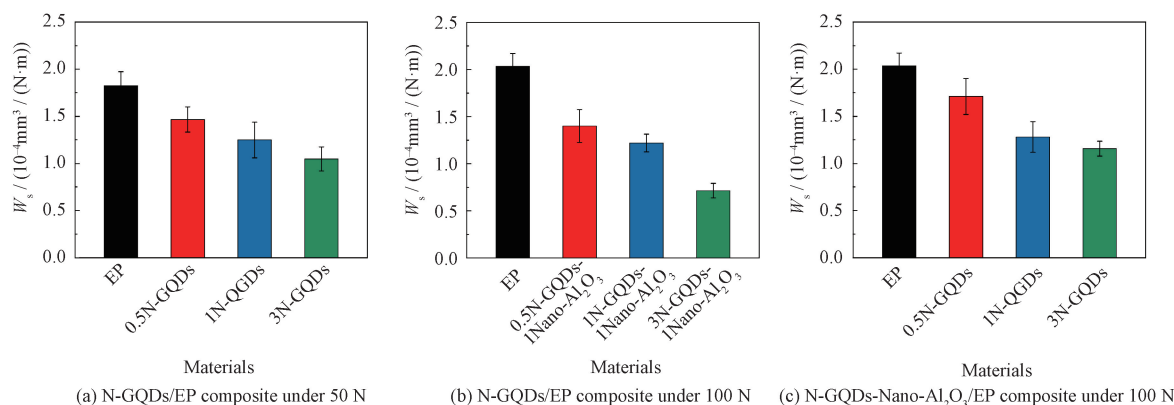


图4 不同 EP 复合材料的磨损率

Fig. 4 Wear rate of different EP composites

杂化物的协同效应使纳米复合材料的抗磨提高了50%,同时起到了稳定摩擦因数的作用。结果表明,杂化物的协同作用应归因于 Nano- Al_2O_3 提高了摩擦界面转移膜的稳健性和鲁棒性,N-GQDs 提高了转移膜的润滑特性。

2.3 磨损表面转移膜的形貌及物相

在摩擦过程中 N-GQDs 和 N-GQDs-Nano- Al_2O_3 杂化物的加入起到了显著的减摩抗磨作用,主要归因于其对界面转移膜结构的影响,因此,通过 SEM 和 EDS 对磨损表面转移膜的形貌和成分进行分析显得十分必要。图 5 为 EP 纳米复合材料与金属对磨后金属磨损表面的 SEM 照片。图 5a 给出了金属与纯 EP 摩擦后磨损表面形貌,在金属表面上几乎没有观察到转移膜的存在,且表面刮擦较为严重,导

致纯 EP 存在较高的摩擦因数和磨损率。显然,随着 N-GQDs/EP 纳米复合中 N-GQDs 填料含量的增加,观察到金属表面的转移膜所占比例明显增加(见图 5b、5c 中箭头所示),转移膜的增加与减摩抗磨作用相呼应(见图 3 和图 4),表明 N-GQDs 促进了润滑特性转移膜在金属表面上的生长。而进一步将 N-GQDs-Nano- Al_2O_3 杂化物引入后,随着 N-GQDs 填料含量的增加,N-GQDs 和 Nano- Al_2O_3 协同作用更加显著,观察到转移膜几乎覆盖了整个磨损表面,金属表面生长了一层具有润滑特性的转移膜,有效延缓了其表面的刮擦,使其金属表面保留了大部分原始的划痕(见图 5d~5f),进一步证明转移膜的存在起到了更好的减摩抗磨效果。结果表明,N-GQDs-Nano- Al_2O_3 杂化物的加入有利于金属表面生

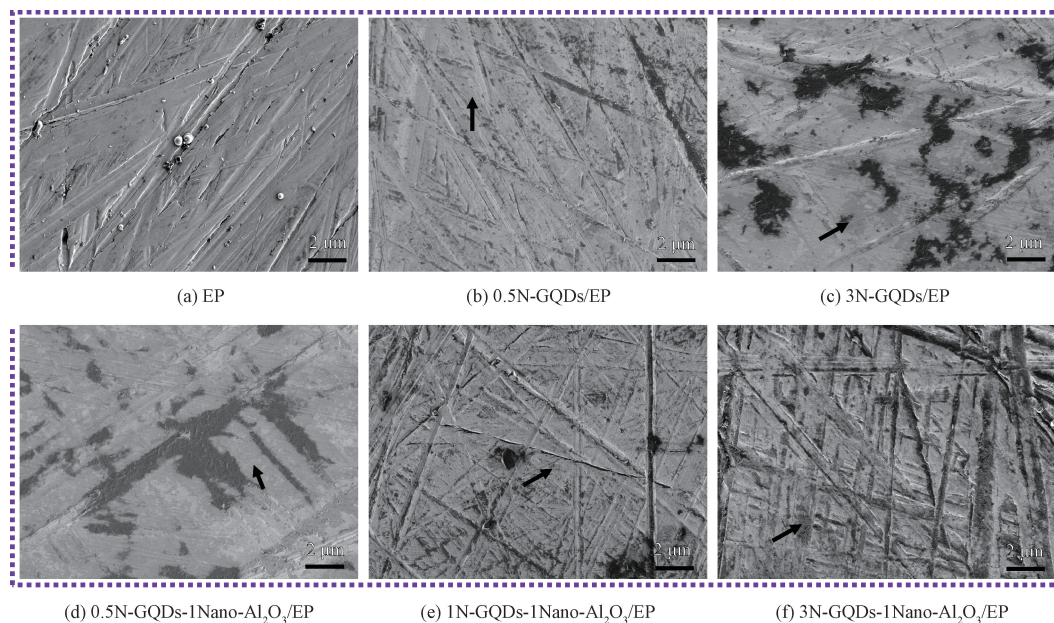


图5 EP 复合材料 GCr15 对磨损后金属表面转移膜形貌的 SEM 照片

Fig. 5 SEM micrographs of the steel surfaces rubbed with EP composite

长一层连续的润滑特性杂化转移膜。

摩擦界面生成的转移膜结构和成分是影响纳米复合材料摩擦磨损性能的一个重要因素^[19-20],本文利用 SEM 和 EDS 分析磨损金属表面生长转移膜的结构和成分。图 6 和图 7 分别给出了在油润滑条件下金属与 0.5N-GQDs/EP、3N-GQDs/EP 和 3N-GQDs-1Nano- Al_2O_3 /EP 纳米复合材料对摩后其表面 SEM 图和 EDS 元素分布图像。金属与 0.5N-

GQDs/EP 纳米复合材料对摩后其磨损表面刮擦较为严重(见图 6a),图 6b、6c 和 6d 元素 EDS 图像显示金属磨损表面主要以 C、N、O 三种元素分布为主,表明金属表面生长的转移膜以 EP 树脂为主,抗刮擦和承载能力低,减摩抗磨能力较差。同时,观察到摩擦界面存在较大的氧化铁平台。上述结果表明,填料 N-GQDs 含量的增加,能够促进金属表面生长优异润滑特性的转移膜,明显起到了减摩抗磨作用。

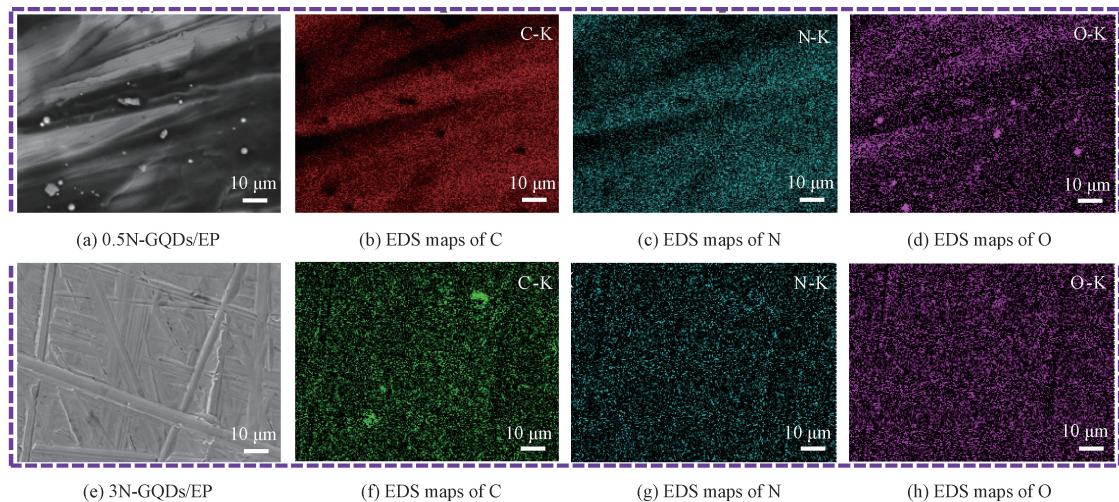


图 6 EP 纳米复合材料滑动钢表面后磨损表面 SEM、EDS 照片

Fig. 6 SEM micrograph and EDS map of the steel surface rubbed with EP composite

金属与 3N-GQDs-1Nano- Al_2O_3 /EP 纳米复合材料滑动后其磨损表面形貌基本保持了原始的划痕(见图 7a)。元素分布 EDS 图像显示金属表面的沟壑主要以 C、N、O 元素填充为主(见图 7b、7c、7d、7f),而平台区域的 C 元素信号减弱,N 和 Al 元素均

匀地分布在平台区域,表明 Nano- Al_2O_3 在机械力和热的作用下与残余的碳材料在金属表面烧结形成陶瓷基转移膜,在摩擦时可以使转移膜承载高剪切力和载荷;随着 N-GQDs 含量的增加,N-GQDs 与高承载的陶瓷基转移膜的复合使其具有更加优异的润滑

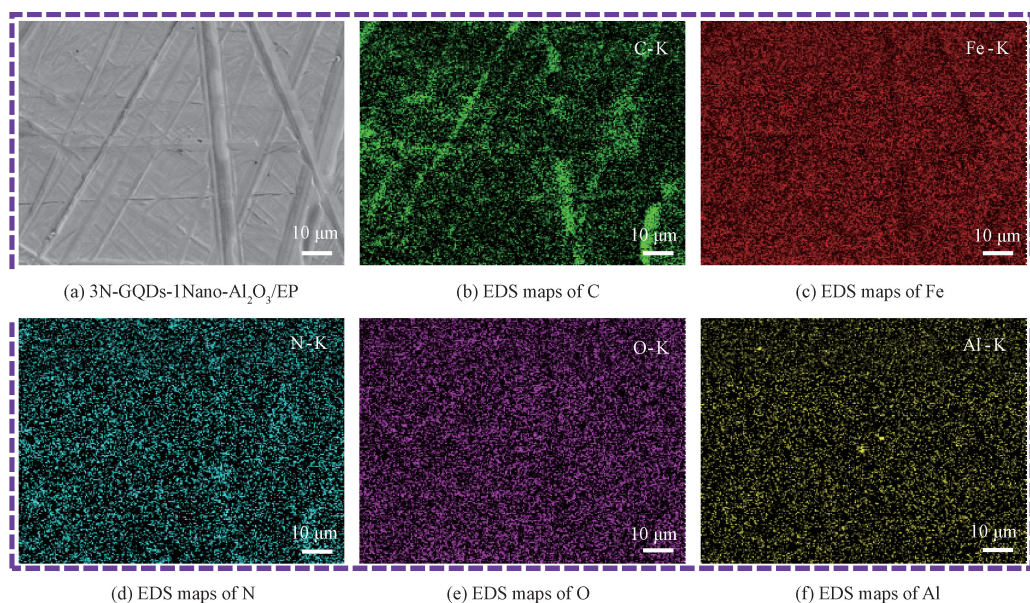


图 7 金属与 3N-GQDs-1Nano- Al_2O_3 /EP 对摩后材料滑动钢表面后磨损表面 SEM、EDS 照片

Fig. 7 SEM micrograph and EDS map of the steel surface rubbed with 3N-GQDs-1Nano- Al_2O_3 /EP

特性(见图3和4)。研究表明,相比与单独添加 N-GQDs, N-GQDs-Nano- Al_2O_3 杂化物更有助于促进金属表面生长具有优异抗刮擦力、高承载力、优异润滑特性的杂化转移膜,可以明显降低纳米复合材料的摩擦因数和磨损率。

2.4 转移膜的化学结构

为了阐明金属表面转移膜的化学结构与 N-GQDs 和 Nano- Al_2O_3 的相关性,通过 ATR-FTIR 对钢与 3N-GQDs-1Nano- Al_2O_3 /EP 纳米复合材料对磨损后其表面转移膜的化学结构进行了表征。如图8所示,在 620 cm^{-1} 和 760 cm^{-1} 位置处的红外图谱吸收峰对应 Al^{3+} 离子六配位的吸收峰^[21],证明 Nano- Al_2O_3 在摩擦过程中转移到金属表面的转移膜中;在 $1\,250\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\,300\text{ cm}^{-1}$ 位置处的红外图谱吸收峰对应 C-O 的对称拉伸振动和非对称芳香族拉伸振动^[22],表明 EP 也是转移膜组成一部分;在 $3\,080\text{ cm}^{-1}$ 位置处的显著红外图谱吸收峰对应 N-H 的伸缩振动,分析表明 N-GQDs 也参与了转移膜的形成。红外图谱分析结果表明,在机械力和热的作用下摩擦烧结形成了高性能杂化转移膜是由 N-GQDs、残余树脂和 Nano- Al_2O_3 组成。

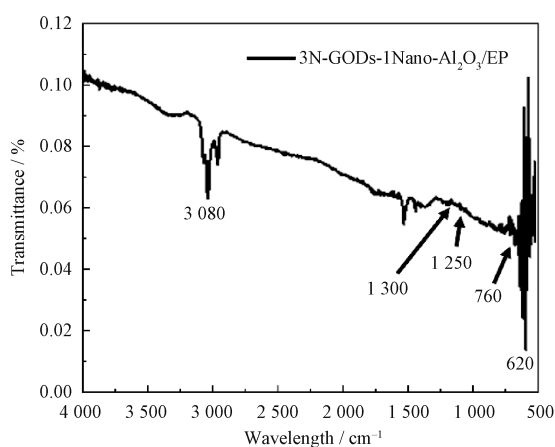


图8 3N-GQDs-1Nano- Al_2O_3 /EP 转移膜的 ATR-FTIR 图谱

Fig. 8 ATR-FTIR spectrum of the tribofilm of 3N-GQDs-1 Nano- Al_2O_3 /EP

3 结论

(1) N-GQDs-Nano- Al_2O_3 杂化物的加入明显改善了 EP 树脂在边界以及混合润滑条件下的减摩抗磨性能。其中 3N-GQDs-1Nano- Al_2O_3 /EP 纳米复合材料获得了最好的摩擦学性能,促进了摩擦副表面转移膜的形成,证明 N-GQDs 和 Nano- Al_2O_3 在 EP 纳米复合材料减摩抗磨方面具有协同作用。

(2) 在机械力和热作用下,从 N-GQDs-Nano-

Al_2O_3 /EP 纳米复合材料中释放的 N-GQDs 在摩擦界面上形成了具有润滑特性的转移膜,提高了系统的润滑性能;而释放的 Nano- Al_2O_3 在摩擦界面上烧结形成了陶瓷基转移膜,可以增强杂化转移膜的承载力和抗刮擦能力;避免纳米复合材料与金属表面的直接接触,从而使纳米复合材料获得优异的摩擦学性能。

(3) 对进一步提升树脂纳米复合材料在恶劣工作条件下的摩擦学性能具有一定的指导价值,为构建具有优异润滑特性的转移膜提供了参考。

参 考 文 献

- [1] ZHANG G, WETZEL B, WANG Q, et al. Tribological behavior of PEEK-based materials under mixed and boundary lubrication conditions[J]. Tribology International, 2015, 88: 153-161.
- [2] ERDEMIR A. Review of engineered tribological interfaces for improved boundary lubrication [J]. Tribology International, 2005, 38 (3): 249-256.
- [3] YAO D D, PENG N K, ZHENG Y P, Enhanced mechanical and thermal performances of epoxy resin by oriented solvent-free graphene/carbon nanotube/ Fe_3O_4 composite nanofluid [J]. Composites Science and Technology, 2018, 167: 234-242.
- [4] 胡超, 徐静, 余家欣, 等. 氧化石墨烯/聚酰亚胺复合材料摩擦学行为及机理研究[J]. 摩擦学学报, 2020, 40 (1): 12-20.
HU C, XU J, YU J X, et al. Tribological performance and mechanism of graphene oxide/polyimide [J]. Tribology, 2020, 40 (1): 12-20. (in Chinese)
- [5] DOMUN N, HADAVINIA H, ZHANG T, et al. Improving the fracture toughness and the strength of epoxy using nanomaterials-a review of the current status [J]. Nanoscale, 2015, 7 (23): 10294-10329.
- [6] CHE Q L, ZHANG G, ZHANG L G, et al. Switching brake materials to extremely wear-resistant self-lubrication materials via tuning interface nanostructures [J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2018, 10 (22): 19173-19181.
- [7] LI G T, QI H M, ZHANG G, et al. Significant friction and wear reduction by assembling two individual PEEK composites with specific functionalities [J]. Materials & Design, 2017, 116: 152-159.
- [8] ALMASLOW A, GHAZALI M J, TALIB R J, et al. Effects of epoxidized natural rubber-alumina nanoparticles (ENRAN) composites in semi-metallic brake friction materials [J]. Wear, 2013, 302 (1-2): 1392-1396.
- [9] JIAO D, ZHENG S H, WANG Y Z, et al. The tribology properties of alumina/silica composite nanoparticles as lubricant additives [J]. Applied Surface Science, 2011, 257 (13): 5720-5725.
- [10] 祁渊, 龚俊, 杨东亚, 等. 纳米 Al_2O_3 填料增强 PEEK-PTFE

- 复合材料基于环-块摩擦结构的摩擦过程研究[J]. 材料导报, 2019, 33 (10): 1756-1761.
- QI Y, GONG J, YANG D Y, et al. Study on tribological properties evolution of ptfe composites filled with PEEK and nano- Al_2O_3 based on block-on-ring friction model[J]. Materials Reports, 2019, 33(10): 1756-1761. (in Chinese)
- [11] SHANG W, WU F, WEN Y Q, et al. Corrosion resistance and mechanism of graphene oxide composite coatings on magnesium alloy[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2018, 58 (3): 1200-1211.
- [12] QU D, ZHENG M, ZHANG L, et al. Formation mechanism and optimization of highly luminescent N-doped graphene quantum dots[J]. Sci Rep, 2014, 4(1): 5294.
- [13] DONG Y Q, SHAO J W, CHEN C Q, et al. Blue luminescent graphene quantum dots and graphene oxide prepared by tuning the carbonization degree of citric acid[J]. Carbon, 2012, 50 (12): 4738-4743.
- [14] HUANG H, YANG S, LI Q, et al. Electrochemical cutting in weak aqueous electrolytes: The strategy for efficient and controllable preparation of graphene quantum dots [J]. Langmuir, 2018, 34 (1): 250-258. (in Chinese)
- [15] LI Y, ZHAO Y, CHENG H, et al. Nitrogen-doped graphene quantum dots with oxygen-rich functional groups[J]. Journal of the American Chemical Society, 2012, 134 (1): 15-18.
- [16] YU Z, ZHANG L, WANG X, et al. Fabrication of ZnO/carbon quantum dots composite sensor for detecting NO gas [J]. Sensors, 2020, 20(17): 4961.
- [17] 王春红, 王利剑, 任子龙, 等. SiO_2 -竹纤维协同改性对环氧树脂基复合材料摩擦磨损性能的影响[J]. 复合材料学报, 2019, 36 (7): 1633-1639.
- WANG C H, WANG L J, REN Z L, et al. Effect of SiO_2 - bamboo fiber synergistic modification on friction and wear properties of epoxy resin matrix composites[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2019, 36(7): 1633-1639. (in Chinese)
- [18] 郝松松, 孙晓峰, 宋巍, 等. 石墨烯改性环氧树脂涂层的制备及其性能[J]. 中国表面工程, 2018, 31 (3): 108-115.
- HAO S S, SUN X F, SONG W, et al. Preparation and properties of graphene modified epoxy resin coating [J]. China Surface Engineering, 2018, 123 31(3): 108-115. (in Chinese)
- [19] GUO Y X, GUO L H, LI G T, et al. Solvent-free ionic nanofluids based on graphene oxide-silica hybrid as high-performance lubricating additive[J]. Applied Surface Science, 2019, 471: 482-493.
- [20] QI H M, ZHANG G, CHANG L, et al. Ultralow friction and wear of polymer composites under extreme unlubricated sliding conditions[J]. Advanced Materials Interfaces, 2017, 4 (13): 1601171.
- [21] BOUMAZA A, FAVARO L, LÉDION J, et al. Transition alumina phases induced by heat treatment of boehmite: An X-ray diffraction and infrared spectroscopy study[J]. Journal of Solid State Chemistry, 2009, 182 (5): 1171-1176.
- [22] GUO L H, LI G T, GUO Y X, et al. Extraordinarily low friction and wear of epoxy-metal sliding pairs lubricated with ultra-low sulfur diesel[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2018, 6 (11): 15781-15790.

作者简介: 车清论(通信作者),男,1984年出生,博士研究生,副教授。主要研究方向为聚合物智能润滑材料制备及纳米润滑材料合成。

E-mail: cheqinglun@163.com