

# 胆碱氨基酸离子液体改性生物质基碳量子点 复合润滑剂的制备及性能

刘超<sup>1,4,5</sup>, 杨仓<sup>2</sup>, 唐雨凡<sup>2</sup>, 鲍艳<sup>1,3</sup>,  
焦真<sup>4</sup>, 狄宁宇<sup>5</sup>, 陆云峰<sup>5\*</sup>

[1. 陕西科技大学 轻工科学与工程学院 (柔性电子学院), 陕西 西安 710021; 2. 陕西科技大学 化学与化工学院, 陕西 西安 710021; 3. 陕西科技大学 西安市绿色化学品与功能材料重点实验室, 陕西 西安 710072; 4. 东南大学 化学化工学院, 江苏 南京 211189; 5. 浙江博菲电气股份有限公司, 浙江 嘉兴 314000]

**摘要:** 以生物质材料 (茶叶渣) 为原料制备了碳量子点 (CQDs), 以氯化胆碱和 L-瓜氨酸为原料制备了胆碱氨基酸离子液体 (ILs); 采用 ILs 修饰 CQDs 制备了复合润滑材料 CDILs; 将 CDILs 溶于去离子水中, 配制了 CDILs 水基润滑剂。采用 FTIR、NMR、TEM 对 CDILs 进行了表征, 以摩擦系数和体积磨损率为指标, 通过摩擦实验考察了 CDILs 质量分数对 CDILs 水基润滑剂摩擦学性能的影响, 通过对摩擦实验前后 CDILs 水基润滑剂进行了 XPS 表征, 推测了 CDILs 水基润滑剂的润滑机理。结果表明, CDILs 质量分数 0.3% 的水基润滑剂的摩擦系数和体积磨损率最低, 分别为 0.14 和  $1.91 \times 10^{-9} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ , 比去离子水分别降低了 33.3% 和 67%。在摩擦过程中, CDILs 发挥了优异的协同作用, 平均粒径 2.0 nm 的准球形 CQDs 极易填充到金属表面的凹陷结构中, 降低了其表面粗糙度, 并起到“纳米滚珠”作用, 使滑动摩擦变为滚动摩擦, 从而减小了摩擦系数, 降低了体积磨损率; 此外, ILs 表面的阴离子可以与金属表面的正电荷通过静电作用形成边界润滑吸附层, 从而提升了 CDILs 水基润滑剂的润滑持久性, 在金属摩擦表面形成连续、均匀、牢固的自润滑转移膜, 防止了对磨表面的直接接触。

**关键词:** 生物质; 碳量子点; 离子液体; 润滑; 摩擦学; 功能材料

中图分类号: TB34 文献标识码: A 文章编号: 1003-5214 (2026) 01-0069-09

## Preparation and properties of choline amino acid ionic liquid modified biomass based carbon quantum dots composite lubricant

LIU Chao<sup>1,4,5</sup>, YANG Cang<sup>2</sup>, TANG Yufan<sup>2</sup>, BAO Yan<sup>1,3</sup>,  
JIAO Zhen<sup>4</sup>, DI Ningyu<sup>5</sup>, LU Yunfeng<sup>5\*</sup>

[1. College of Bioresources Chemical & Materials Engineering (College of Flexible Electronics), Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, Shaanxi, China; 2. College of Chemistry and Chemical Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, Shaanxi, China; 3. Xi'an Key Laboratory of Green Chemicals and Functional Materials, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, Shaanxi, China; 4. School of Chemistry and Chemical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, Jiangsu, China; 5. Zhejiang Bofei Electric Co., Ltd., Jiaying 314000, Zhejiang, China]

**Abstract:** Carbon quantum dots (CQDs) were prepared from biomass material (tea residue), while choline amino acid ionic liquid (ILs) was prepared from choline chloride and L-citrulline. Composite lubricant CDILs was then synthesized by modifying CQDs with ILs, and further dissolved into deionized water to obtain CDILs water-based lubricant, which was characterized by FTIR, NMR and TEM. The influence of

收稿日期: 2024-11-08; 定用日期: 2024-12-20; DOI: 10.13550/j.jxhg.20240848

基金项目: 国家自然科学基金项目 (22008145); 陕西省重点研发计划项目 (2023-YBGY-482); 陕西省教育厅科研计划项目 (21JY004)

作者简介: 刘超 (1988—), 男, 副教授, E-mail: lc1010158@163.com. 联系人: 陆云峰 (1975—), 男, 高级工程师, E-mail: 156390948@qq.com.

CDILs mass fraction on the tribological properties of CDILs water-based lubricant was analyzed through friction experiments using friction coefficient and volume wear rate as indexes, and the lubrication mechanism was deduced based on XPS characterization of CDILs. The results showed that the water-based lubricant with 0.3% CDILs displayed the lowest friction coefficient and volume wear rate, 0.14 and  $1.91 \times 10^{-9} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ , respectively, which were 33.3% and 67% lower than that of deionized water. It was found that CDILs played an excellent synergistic role in the friction process. Quasi-spherical CQDs with an average particle size of 2.0 nm easily filled the concave structure of the metal surface, reduced its surface roughness, and played the role of "nano ball", thus changing the sliding friction to rolling friction, thereby reducing the friction coefficient and the volume wear rate. In addition, the anion on the surface of ILs formed a boundary lubricating adsorption layer with the positive charge on the metal surface through electrostatic interaction, thereby improving the lubrication durability of CDILs water-based lubricant, and forming a continuous, uniform and firm self-lubricating transfer film on the friction surface of the metal, preventing direct contact with the grinding surface.

**Key words:** biomass; carbon quantum dots; ionic liquids; lubricate; tribology; functional materials

随着全球工业化的加速,机械设备在运行过程中带来的能源损耗及零部件间的摩擦磨损越来越大<sup>[1]</sup>。润滑液的使用是减少摩擦磨损最有效方式之一。与油基润滑剂相比,水基润滑剂价格低廉、冷却性能优良、阻燃和环保性能突出,在食品工业、电子工业和医疗器械领域备受关注。然而,水基润滑剂普遍存在润滑性不足和抗腐蚀性能差等问题,这些问题严重制约了水基润滑体系的发展与应用<sup>[2-3]</sup>。采用合适的添加剂是改善水基润滑剂润滑性能、拓宽其应用场景的一种广泛使用的便捷途径<sup>[4]</sup>。

碳量子点(CQDs)是一种新型的碳基纳米材料,具有独特的零维结构、可控的功能表面、优良的自润滑性及小尺寸效应等特性,在润滑领域备受关注<sup>[5-6]</sup>。一方面,CQDs独特的准球形结构可以将零部件之间的滑动摩擦变为滚动摩擦,减少磨损;另一方面,CQDs沉积在磨损表面,形成有效的自润滑膜,进一步起到减摩抗磨作用<sup>[7-9]</sup>。然而,CQDs极易团聚,难以在水中均匀分散,严重影响其在水基润滑剂领域的应用。研究发现,采用尺寸形状控制、表面修饰、元素掺杂等手段对CQDs进行改性,可有效改善其水分散性和润滑性<sup>[10-12]</sup>。WANG等<sup>[13]</sup>采用水热法制备了银掺杂碳量子点(Ag-CQDs),并考察了其润滑性能。结果表明,当Ag-CQDs质量分数为0.05%时,制备的复合润滑油摩擦系数、体积磨损率分别比基础油降低了42.2%、35.3%。XUE等<sup>[14]</sup>利用两性离子多巴胺磺酸盐(ZDS)修饰CQDs表面得到了CQDs-ZDS。与纯水相比,质量分数1%的CQDs-ZDS可以将其平均摩擦系数从0.50降低到0.11,体积磨损率降低了44%,承载能力可达5~15 N。尽管银元素掺杂和磺酸盐改性能够提升CQDs的润滑性能,但银元素掺杂成本更高,而磺酸盐改性的

承载力较低,两种方法均难以广泛适用于日益复杂的环境。离子液体(ILs)是一种由阳离子和阴离子组成的熔融液体盐,具备结构可调性,还具有优异的热稳定性和化学稳定性,以及优异的润滑性和抗磨性等,已成为润滑剂和润滑添加剂的良好选择<sup>[15-17]</sup>。TERAN等<sup>[18]</sup>以吡啶基离子液体为环烷基润滑脂的润滑添加剂。结果显示,当添加质量分数5%时润滑效果最好,相比于纯润滑脂,摩擦系数减少了20%,体积磨损率减少10%。张铭建等<sup>[19]</sup>以不同链长的二元脂肪酸为阴离子、二异丙醇胺为阳离子,制备了4种羧酸铵型离子液体(CAILs),将其加入到水-二乙二醇(WDG)中作为润滑添加剂。结果表明,4种CAILs在WDG中均有良好的溶解性、稳定性及减摩性能。此外,在摩擦过程中,ILs独特的离子结构使其在金属表面具有较强的吸附能力。所以,ILs常作为CQDs的改性剂,以增加CQDs在摩擦副表面上的吸附能力或改善其在基体中的分散性<sup>[20-22]</sup>。WANG等<sup>[23]</sup>采用有机铵阳离子对碳点(CD)进行离子改性,制备了碳点基离子液体(CDIL)。研究表明,CDIL在室温和高温下均具有比传统ILs更好的润滑性能。将CQDs与ILs相结合,不仅能够提高单一材料的润滑性和界面结合能力,而且能够发挥零维和流体材料的协同润滑作用<sup>[24-25]</sup>。但目前大多数文献报道的CQDs和ILs以石化资源及其衍生物为原料,不可避免地加剧了资源枯竭、环境污染等问题<sup>[26-28]</sup>。因此,如何开发一种生物质基润滑剂具有重要的研究意义。

本文拟以可降解的生物质为原料,来制备CQDs和胆碱氨基酸ILs,用此ILs化学修饰CQDs来改善其分散性,同时进一步提升其润滑性能。最后,将修饰后的CQDs加入到水中来制备全生物质水基润

滑剂。系统考察 CDILs 添加量对该水基润滑剂润滑性能的影响及其减少摩擦磨损机理, 以期为生物质基润滑剂的制备提供参考。

## 1 实验部分

### 1.1 材料、试剂与仪器

八角亭普洱茶, 云南农垦集团勐海八角亭茶业有限公司。

1-乙基-(3-二甲基氨基丙基)碳二亚胺盐酸盐 (EDCI)、L-瓜氨酸、氯化胆碱, AR, 上海麦克林生化科技股份有限公司; 乙腈、丙酮, AR, 国药集团化学试剂有限公司; KOH、AR, 天津市北联精细化学品开发有限公司; 无水乙醇, AR, 广东光华科技股份有限公司。

VECTOR 22 型傅里叶变换红外光谱仪 (FTIR)、AVANCE NEO 600 MHz 型核磁共振波谱仪 (NMR), 德国 Bruker 公司; Tecnai G2F20 型透射电子显微镜 (TEM), 美国 FEI 公司; AXIS Supra 型 X 射线光电子能谱仪 (XPS), 英国 Kratos 公司; KH-8700 型超景深三维显微镜, 日本 Hirox 公司; JY92-IIN 型超声波细胞粉碎机、SCIENTZ-10N 型冷冻干燥机, 宁波新芝超声设备有限公司; Zetasizer Nano-ZS90 型纳米粒度及 Zeta 电位分析仪, 英国 Malvern 公司; MMUD-1B 型材料超高温摩擦磨损试验机, 济南恒旭试验机技术有限公司。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 CQDs 的制备

首先, 八角亭普洱茶经 3 次沸水冲泡后获取茶叶渣, 烘干备用。将少量茶叶渣置于马弗炉中, 升温 (5 °C/min) 至 350 °C, 保温 2 h 后取出, 得到深黑色固体物; 接着, 将此固体物研碎, 将 0.20 g 加入到 20 mL 去离子水中, 并超声 (325 W) 处理 60 min; 最后, 对其进行抽滤 (滤纸孔径为 0.22 μm), 将得到的清液冷冻干燥 (-60 °C, 48 h), 得到淡黄色粉末 0.03 g, 即 CQDs。

#### 1.2.2 ILs 的制备

首先, 将 69.81 g (0.5 mol) 氯化胆碱溶于 170 mL 无水乙醇中, 得到氯化胆碱乙醇溶液; 再将 28.06 g (0.5 mol) KOH 溶于 130 mL 无水乙醇中, 得到 KOH 乙醇溶液。将氯化胆碱乙醇溶液转移至连有冷凝管的三口烧瓶中, 然后逐滴滴入 KOH 乙醇溶液 (搅拌转速 300 r/min), 滴加时溶液出现白色沉淀, 全部滴入后, 升温至 75 °C 反应 12 h, 随着反应的进行, 白色沉淀逐渐变黄, 最终转变为棕黑色。反应结束后, 抽滤, 得到棕黑色滤液。将滤液置于真空干燥箱中除去乙醇, 最终得到 8.67 g 黄色黏稠液体, 即氢氧化胆碱。将 20 mL 氢氧化胆碱溶于 30 mL 去离子水中, 得到氢氧化胆碱水溶液。

将 87.60 g (0.5 mol) L-瓜氨酸加入到 200 mL 去离子水中, 得到 L-瓜氨酸水溶液; 然后, 将制备的氢氧化胆碱水溶液逐滴滴入到 L-瓜氨酸水溶液中, 在 60 °C 下以 300 r/min 的转速持续搅拌 24 h; 接着, 将反应液通过旋蒸除去其中的水, 再加入 100 mL 乙腈/乙醇混合液 (体积比 9 : 1) 搅拌约 1 h 沉淀出过量氨基酸, 过滤, 收集滤液; 最后, 将获得的滤液经过蒸馏脱溶剂得到黄色黏稠液体, 即胆碱氨基酸 ILs, 记为 ILs。

#### 1.2.3 CDILs 的制备

首先, 按  $m(\text{CQDs}) : m(\text{ILs}) = 1 : 20$ , 将制备的 0.10 g CQDs 和 2.00 g ILs 混合, 再向其中加入与 ILs 相同质量的 EDCI; 然后, 在 25 °C 下磁力搅拌 (350 r/min) 10 h, 得到淡黄色产物溶液; 最后, 将产物溶液经过滤和真空干燥 (60 °C, 12 h) 后, 得到深棕色黏稠液体, 即复合润滑材料, 记为 CDILs。其制备流程示意图如图 1 所示。

#### 1.2.4 水基润滑剂的制备

将一定质量的 CDILs 溶于去离子水中, 并超声 10 min, 配制质量分数分别为 0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5% 的 CDILs 水溶液, 即 CDILs 水基润滑剂, 记为 0.1% CDILs、0.2% CDILs、0.3% CDILs、0.4% CDILs、0.5% CDILs。

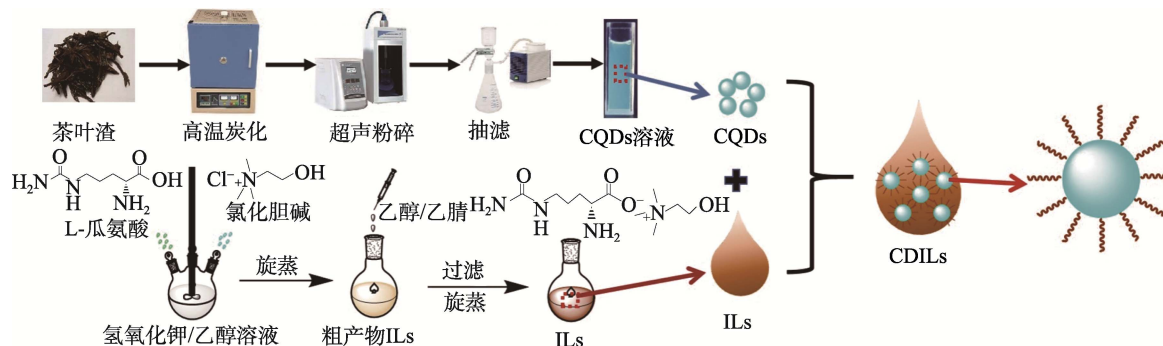


图 1 CDILs 的制备流程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of preparation process of CDILs

将一定质量的 CQDs 溶于去离子水中，并超声 10 min，配制质量分数分别为 0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5% 的 CQDs 水溶液，即 CQDs 水基润滑剂，记为 0.1% CQDs、0.2% CQDs、0.3% CQDs、0.4% CQDs、0.5% CQDs。

### 1.3 表征方法与性能测试

FTIR 测试：KBr 压片法，波数范围 4000~500  $\text{cm}^{-1}$ ，分辨率 4  $\text{cm}^{-1}$ ，扫描次数 32 次。NMR 测试：以氘代重水 ( $\text{D}_2\text{O}$ ) 为溶剂。粒径测定：用去离子水将少量样品稀释 1000 倍后，测定样品的粒径。TEM 测试：工作电压 220 kV，分辨率 0.24 nm。XPS 测试：Al  $K_{\alpha}$  为射线源，并以 C 1s (284.8 eV) 为基准对数据进行校正。

### 1.4 降摩擦性能测试

端面摩擦副(45#钢)为外径 26 mm、内径 20 mm 的摩擦环。测试温度(20±5) °C，相对湿度 45%±5%。测试前，用 1000 目砂纸打磨对磨件及摩擦副表面，并用丙酮擦拭干净，分别测试 3 个平行试样，结果取算术平均值。根据式 (1) 计算体积磨损率 [ $\omega$ ,  $\text{mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$ ]:

$$\omega/\% = (m_1 - m_2)/(\rho \times F \times L) \quad (1)$$

式中： $m_1$  为对磨件测试前的总质量，g； $m_2$  为对磨件测试后的总质量，g； $\rho$  为对磨件的密度， $\text{g}/\text{mm}^3$ ； $F$  为载荷，N； $L$  为滑动距离，m。

## 2 结果与讨论

### 2.1 CDILs 结构表征

图 2a 为 CQDs、ILs 和 CDILs 的 FTIR 谱图。

从图 2a 可以看出，在 CQDs 的 FTIR 谱图中，3700~3100  $\text{cm}^{-1}$  范围内宽的吸收峰归属于 O—H 和 N—H 的伸缩振动<sup>[29]</sup>；1641  $\text{cm}^{-1}$  附近的吸收峰归属于 C=O 键的伸缩振动，表明 CQDs 表面含有一OH、—NH<sub>2</sub> 和—C=O 等官能团。在 ILs 的 FTIR 谱图中，3700~3075  $\text{cm}^{-1}$  范围内宽的吸收峰归属于氢氧化胆碱的 O—H 和 L-精氨酸的 N—H 的伸缩振动；1090 和 952  $\text{cm}^{-1}$  处为 C—N 和 N—CH<sub>3</sub> 的伸缩振动吸收峰，表明 ILs 已初步合成<sup>[30-31]</sup>。

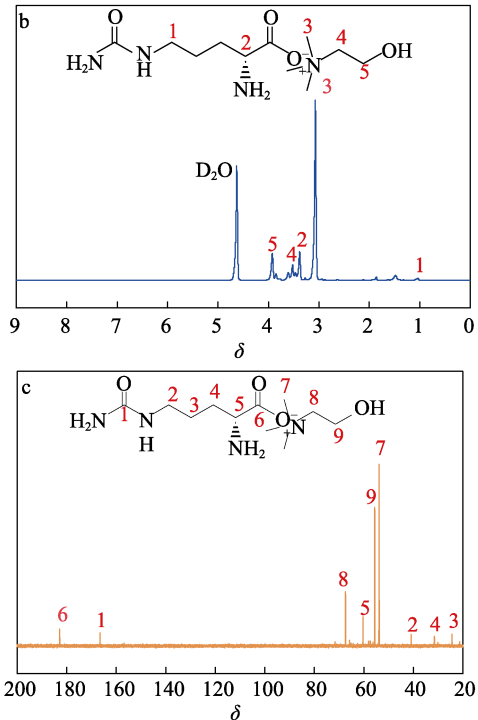
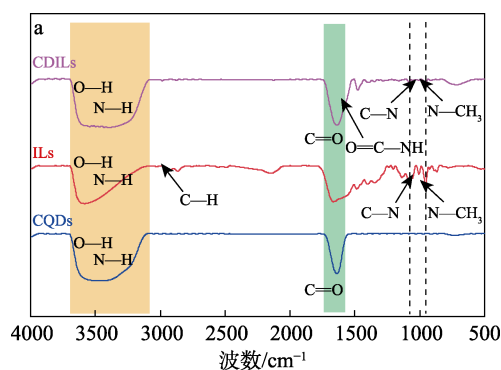


图 2 CQDs、ILs 和 CDILs 的 FTIR 谱图 (a)；ILs 的 <sup>1</sup>H NMR (b) 和 <sup>13</sup>C NMR (c) 谱图

Fig. 2 FTIR spectra of CQDs, ILs and CDILs (a); <sup>1</sup>H NMR (b) and <sup>13</sup>C NMR (c) spectra of ILs

CDILs 的 FTIR 谱图同样在 3700~3100  $\text{cm}^{-1}$  范围内出现了 O—H 和 N—H 的伸缩振动吸收峰，其中还存在酰胺键中的 N—H 键的伸缩振动吸收峰。同时，在 1571  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰为酰胺键中 N—H 键的弯曲振动，表明 ILs 中的氨基与 CQDs 的羧基反应生成了酰胺键。此外，在 1090 和 952  $\text{cm}^{-1}$  处出现了 C—N 和 N—CH<sub>3</sub> 的伸缩振动吸收峰，表明 ILs 已经成功连接在 CQDs 表面，初步说明 CDILs 已成功制备<sup>[32]</sup>。

图 2b 为 ILs 的 <sup>1</sup>H NMR 谱图。

从图 2b 可以看出，ILs 中 H 原子的化学位移分布在  $\delta$  1.09~3.99 范围内，其中， $\delta$  3.99~3.84 处为胆碱阳离子 CH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>N 的 H 化学位移，3.57 处为 L-瓜氨酸阳离子结构中—CH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>OH 上的 H 化学位移， $\delta$  3.37 处为 L-瓜氨酸阴离子结构中 N—CH 上的 H 化学位移， $\delta$  3.18~3.10 处为胆碱阳离子结构中 N—(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub> 上的 H 化学位移<sup>[33-34]</sup>。

图 2c 为 ILs 的 <sup>13</sup>C NMR 谱图。

从图 2c 可以看出，ILs 的 C 原子的化学位移分布在  $\delta$  24.44~182.77 范围内，其中，L-瓜氨酸阴离子结构中—CH(NH<sub>2</sub>)—COO—的 C 峰在  $\delta$  182.77，L-瓜氨酸阴离子结构中—NHCONH<sub>2</sub> 的 C 峰  $\delta$  166.50，胆碱阳离子结构中—CH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>OH 中 C 峰在  $\delta$  67.39，胆碱阳离子结构中 N—(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub> 中 C 的峰在  $\delta$  53.85<sup>[35]</sup>。

以上结果与 FTIR 谱图分析结果基本一致, 进一步证实 ILs 的成功制备。

## 2.2 CDILs 的形貌、粒径表征

图 3 为 CQDs 和 CDILs 的 TEM 图和粒径分布曲线。

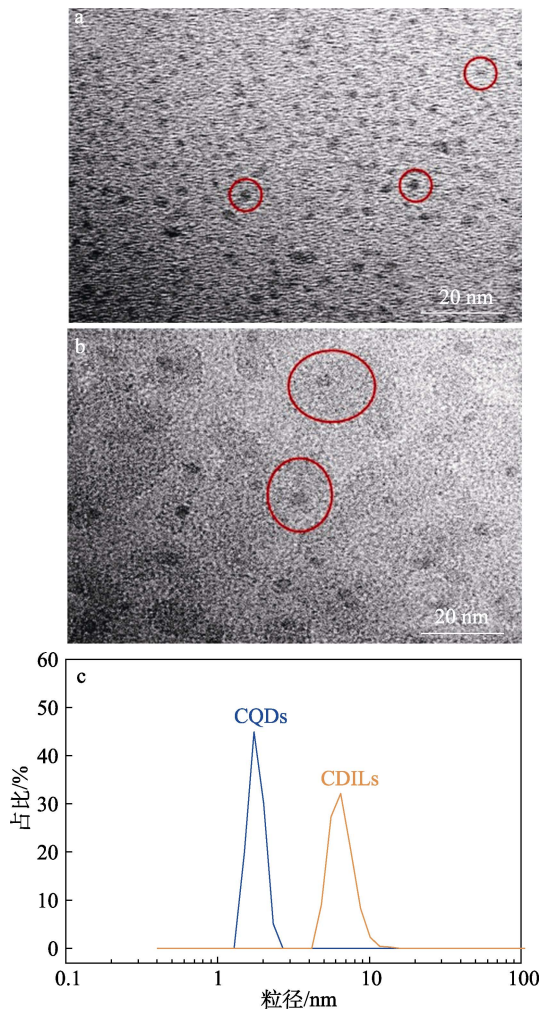


图 3 CQDs (a) 和 CDILs (b) 的 TEM 图; CQDs 和 CDILs 的粒径分布曲线 (c)

Fig. 3 SEM images of CQDs (a) and CDILs (b); Particle size distribution curves of CQDs and CDILs (c)

从图 3 可以看出, CQDs 为球形或准球形(图 3a), 其粒径分布均匀, 平均粒径为 2.0 nm(图 3c)。相比 CQDs, CDILs 外部接枝了一层灰色的 ILs(图 3b), 其平均粒径增至 7 nm(图 3c)。这可能是因为, CQDs 的表面被 ILs 壳层所包裹, 因此, 粒径变大, 这也进一步证实 ILs 成功修饰了 CQDs。

## 2.3 CDILs 的水分散稳定性分析

图 4 为 0.3% CDILs 静置不同时间和 10000 r/min 高速离心后的稳定性照片。

从图 4 可以看出, 0.3% CDILs 在水中能够均匀分散, 即使静置 48 h 后也未出现分层或沉淀现象(图 4a)。



图 4 0.3% CDILs 静置不同时间 (a) 和离心后 (b) 的数码照片

Fig. 4 Digital photos of 0.3% CDILs standing for different time (a) and centrifugation (b)

经过 10000 r/min 高速离心后, 0.3% CDILs 仍未出现分层或沉淀现象(图 4b)。结果表明, 0.3% CDILs 具有优异的稳定性, 这主要是因为, CQDs 表面的 ILs 与水具有良好的相容性<sup>[36]</sup>。

## 2.4 润滑剂的摩擦学性能分析

图 5 为 CQDs 水基润滑剂的摩擦系数随时间的变化和平均摩擦系数。

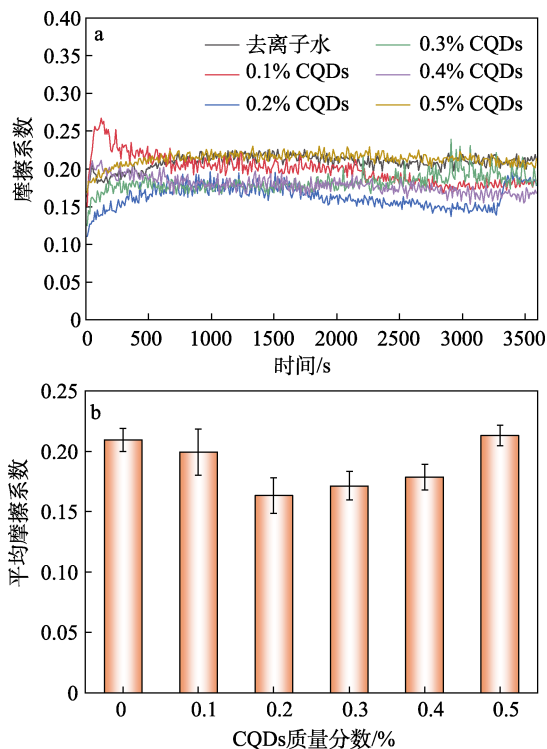


图 5 CQDs 水基润滑剂的摩擦系数随时间的变化 (a) 及平均摩擦系数 (b)

Fig. 5 Change of friction coefficient of CQDs water-based lubricant over time (a) and average friction coefficient (b)

从图 5a 可以看出, 与纯水基润滑剂相比, CQDs 水基润滑剂的摩擦系数明显降低。随着 CQDs 质量分数的增加, CQDs 水基润滑剂的平均摩擦系数呈先降低后升高的趋势, 当 CQDs 质量分数为 0.2% 时, 其水基润滑剂的平均摩擦系数最低, 为 0.16(图 5b),

比去离子水 (0.21) 下降了 23.8%。而 0.1% CQDs 的平均摩擦系数只比水下降了 4.8%，这可能是因为，当 CQDs 质量分数过低时，难以在润滑剂中起到滚珠的作用，无法提供较好的润滑效果。而 0.5% CQDs 的平均摩擦系数为 0.21，与去离子水相当。这可能是因为，CQDs 的质量分数过高时容易发生团聚，从而造成水基润滑剂摩擦系数的提高<sup>[37-38]</sup>。

图 6 为 CDILs 水基润滑剂的摩擦系数随时间的变化和平均摩擦系数。

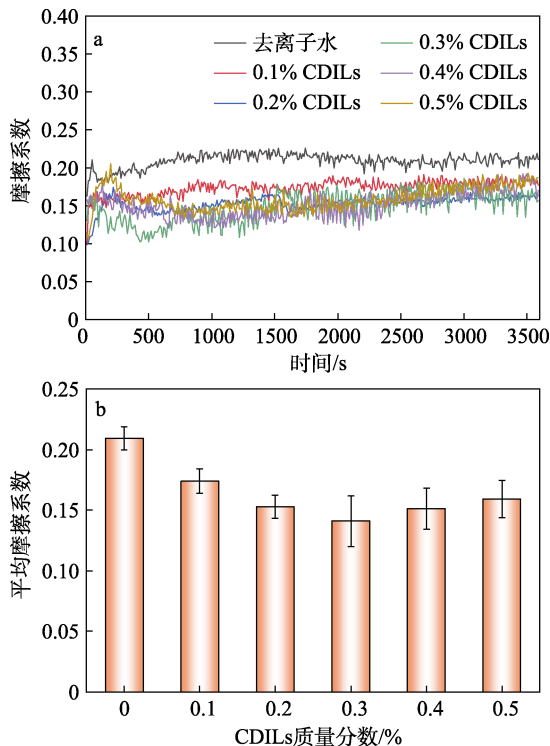


图 6 CDILs 水基润滑剂的摩擦系数随时间的变化 (a) 和平均摩擦系数 (b)  
Fig. 6 Change of friction coefficient of CDILs water-based lubricant over time (a) and average friction coefficient (b)

从图 6a 可以看出，与纯水基润滑剂相比，CDILs 水基润滑剂的摩擦系数显著降低。随着 CDILs 质量分数的增加，CDILs 水基润滑剂的平均摩擦系数呈先降低后升高的趋势 (图 6b)。0.3% CDILs 的平均摩擦系数最低，为 0.14，比去离子水 (0.21) 下降了 33.3%。这可能是由于，在摩擦过程中，CQDs 与 ILs 发挥了协同润滑作用。ILs 独特的离子结构不仅使 CQDs 能够更好地分散在水中充分发挥滚珠作用，而且能够促使 CDILs 吸附在金属摩擦副表面形成一层边界润滑膜，从而进一步减小摩擦，降低水基润滑剂的摩擦系数<sup>[39-41]</sup>。

图 7 为不同载荷条件下，0.3% CDILs 的摩擦系数随时间的变化和平均摩擦系数 (转速 100 r/min)。

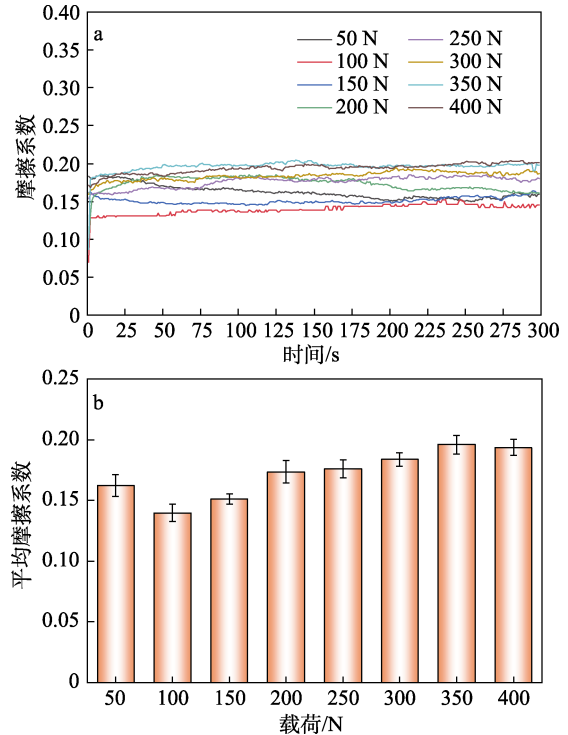
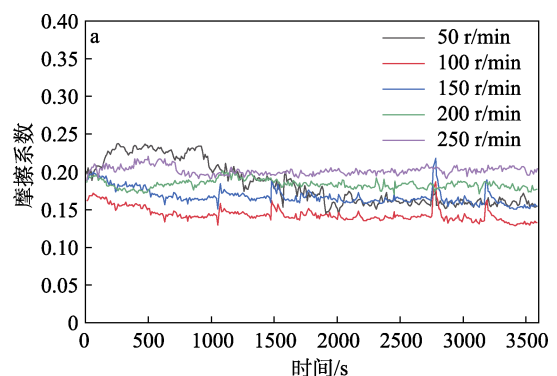


图 7 不同载荷条件下 0.3% CDILs 的摩擦系数随时间的变化 (a) 和平均摩擦系数 (b)  
Fig. 7 Changes of friction coefficient (a) and average friction coefficient (b) of 0.3% CDILs under different load conditions

从图 7a 可以看出，随着载荷从 50 N 增至 400 N，0.3% CDILs 的摩擦系数增大，但摩擦系数曲线较为平稳。平均摩擦系数呈先降低后迅速增加的趋势 (图 7b)，表明 0.3% CDILs 在高载荷条件下仍具有良好的减摩性能<sup>[42-43]</sup>。然而，当载荷增至 400 N 时，摩擦磨损试验机发出剧烈卡咬的声音。结果表明，0.3% CDILs 的最大承载力约为 400 N。

图 8 为不同转速条件下，0.3% CDILs 的摩擦系数随时间的变化和平均摩擦系数 (载荷 100 N)。

从图 8a 可以看出，当转速由 50 r/min 提高至 250 r/min 时，0.3% CDILs 的摩擦系数随之增加，且摩擦系数曲线的波动幅度随之减小，但总体上 0.3% CDILs 的平均摩擦系数呈先降低后升高的趋势 (图 8b)。



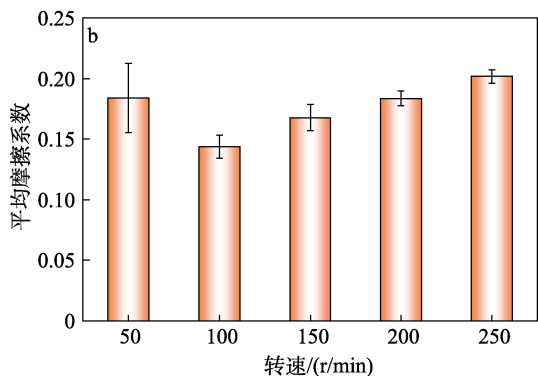


图 8 不同转速条件下 0.3% CDILs 的摩擦系数随时间的变化 (a) 和平均摩擦系数 (b)

Fig. 8 Change of friction coefficient with time (a) and average friction coefficient (b) of 0.3% CDILs at different rotational speeds

这可能是因为, 在低转速时, 润滑膜的厚度可能不均, 这会导致摩擦系数出现波动。而在高转速条件下, 摩擦产生的巨大热量难以及时转移, 导致摩擦界面的润滑膜遭到破坏, 使对磨件与金属摩擦副直接接触<sup>[44-45]</sup>。当转速增至 250 r/min 时, 摩擦磨损试验机发出剧烈卡咬的声音且摩擦系数较大。结果表明, 0.3% CDILs 能够服役的最大转速为 250 r/min。

### 2.5 磨损面形貌分析

图 9 为去离子水、0.3% CQDs 和 0.3% CDILs 在 45#对磨钢片上磨痕的光学照片及去离子水和 CDILs 水基润滑剂磨损表面的三维光学形貌图。

从图 9 可以看出, 去离子水润滑的磨痕面粗糙且较宽 (图 9a<sub>1</sub>), 表明其主要磨损机理是黏着磨损与疲劳磨损<sup>[46]</sup>。0.3% CQDs 对磨件表面的磨痕明显变窄且浅 (图 9a<sub>2</sub>), 体积磨损率从去离子水的  $5.87 \times 10^{-9} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$  减小至  $4.26 \times 10^{-9} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ , 降低了 27%。表明在摩擦过程中, CQDs 形成的润滑膜对对磨件发挥了保护作用。

同时, 准球形结构起到“纳米滚珠”的功能, 将摩擦副与对磨件之间的摩擦类型由滑动摩擦变为滚动摩擦, 从而降低摩擦, 减小体积磨损率<sup>[47]</sup>。相比 0.3% CQDs, 0.3% CDILs 的磨痕更窄且更浅 (图 9a<sub>3</sub>), 体积磨损率更小 [ $1.91 \times 10^{-9} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ ], 比去离子水降低了 67%, 较 0.3% CQDs 降低了 55%。这是因为, 在摩擦过程中, 均匀分散的 CDILs 能够在摩擦界面上吸附并形成一层自润滑转移膜。这层膜有效减少了金属摩擦副与对磨件表面之间的直接接触, 并为摩擦过程提供持续的润滑<sup>[23,48]</sup>。从图 9 还可以看出, 去离子水基磨损表面具有较深、较宽的犁沟 (图 9b<sub>1</sub>), 这是因为, 在摩擦过程中, 对磨件与摩擦副表面直接接触, 使摩擦表面产生了较深的磨痕<sup>[48]</sup>。

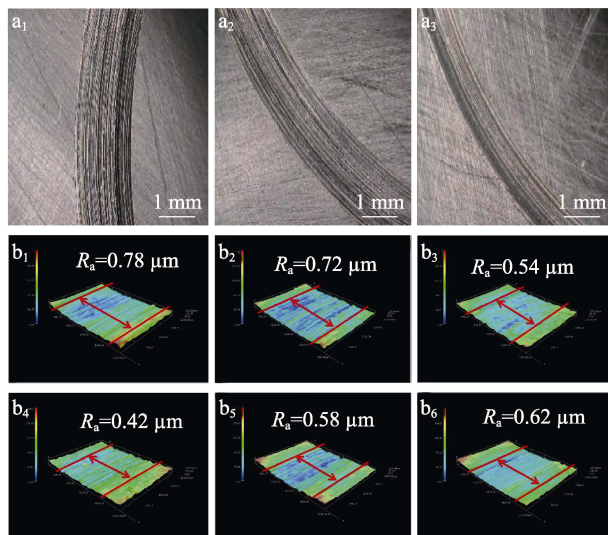


图 9 去离子水 (a<sub>1</sub>)、0.3% CQDs (a<sub>2</sub>) 和 0.3% CDILs (a<sub>3</sub>) 在对磨件上磨痕的光学照片; 去离子水 (b<sub>1</sub>)、0.1% CDILs (b<sub>2</sub>)、0.2% CDILs (b<sub>3</sub>)、0.3% CDILs (b<sub>4</sub>)、0.4% CDILs (b<sub>5</sub>)、0.5% CDILs (b<sub>6</sub>) 磨损表面的三维光学形貌图

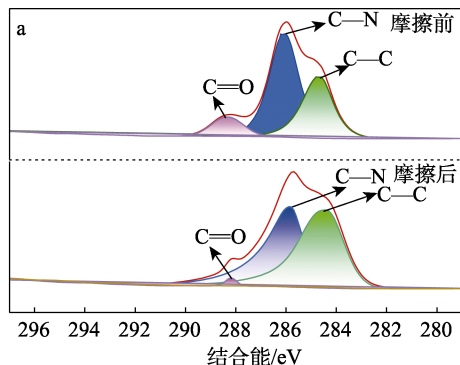
Fig. 9 Optical photos of wear marks of deionized water (a<sub>1</sub>), 0.3% CQDs (a<sub>2</sub>), 0.3% CDILs (a<sub>3</sub>) on the antigrinding parts; Three-dimensional optical morphology photos of deionized water (b<sub>1</sub>), 0.1% CDILs (b<sub>2</sub>), 0.2% CDILs (b<sub>3</sub>), 0.3% CDILs (b<sub>4</sub>), 0.4% CDILs (b<sub>5</sub>), 0.5% CDILs (b<sub>6</sub>) wear surface

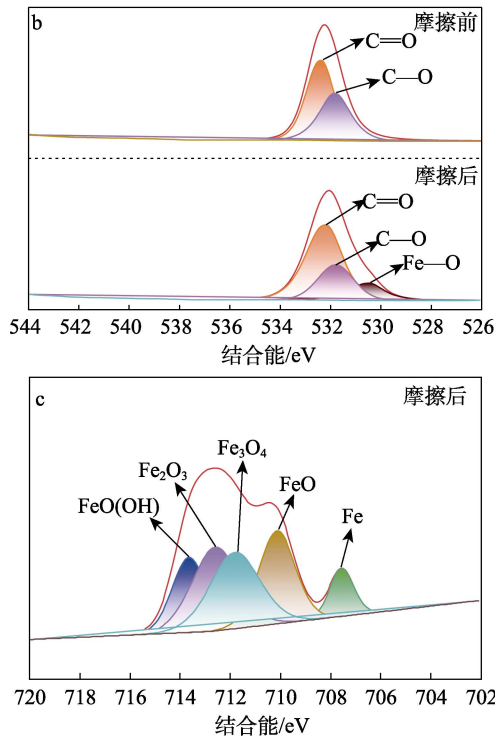
当添加 CDILs 水基润滑剂后, 其磨损表面的磨痕逐渐变窄和变浅, 平均粗糙度 ( $R_a$ ) 随之降低 (图 9b<sub>2</sub>~b<sub>6</sub>)。其中, 0.3% CDILs (图 9b<sub>4</sub>) 的磨损表面磨痕最浅, 且可以观察有一条较深的边界磨痕, 这可能是在摩擦过程中, 在磨痕边界处形成了一层边界润滑膜, 这可以阻止摩擦副与对磨件的直接接触, 从而减小磨痕宽度和深度。

综合三维光学形貌结果与摩擦学实验结果, 证实 CDILs 能够在润滑界面上形成摩擦保护膜, 显著减少了摩擦磨损<sup>[49-50]</sup>。

### 2.6 润滑机理推测

图 10 为 0.3% CDILs 摩擦前后的 XPS 谱图。





a—C 1s 的高分辨 XPS 谱图；b—N 1s 的高分辨 XPS 谱图；c—Fe 2p 的高分辨 XPS 谱图

图 10 摩擦前后 0.3% CDILs 润滑表面的 XPS 谱图  
Fig. 10 XPS spectra of 0.3% CDILs lubricated surface before and after friction

从图 10a 可以看出，0.3% CDILs 的 C 元素主要以 3 种化学价态存在，分别为 C—C（结合能 284.8 eV）、C—N（结合能 286.1 eV）和 C=O（结合能 288.3 eV）。值得注意的是，摩擦后 0.3% CDILs 的 C—C 峰明显增强，而 C=O 和 C—N 峰明显减弱，这可能是在摩擦过程中，CDILs 发生了部分炭化，表明 CDILs 参与了摩擦化学反应<sup>[51]</sup>。

从图 10b 可以看出，摩擦前 0.3% CDILs 的 O 1s

分峰谱图中的特征峰分别为 C—O（结合能 531.8 eV）和 C=O（532.3 eV）；摩擦后 0.3% CDILs 的 O 1s 中分峰谱图在 530.5 eV 出现了 1 个 Fe—O 的新特征峰。可见摩擦后，0.3% CDILs 中存在碳氧化物和 FeO 组成的含氧物质<sup>[31,52]</sup>。而摩擦前 0.3% CDILs 中未出现 Fe 元素。

从图 10c 可以看出，结合能 707.5 eV 处为单质 Fe 的峰，结合能 710.2 eV 处为 FeO 的峰，结合能 711.8 eV 处为 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 的峰，结合能 712.5 eV 处为 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的峰，结合能 713.6 eV 处为 FeO(OH) 的峰，可见摩擦副在摩擦过程中 Fe 元素发生了氧化反应。

以上 XPS 谱图分析结果表明，0.3% CDILs 在摩擦过程中参与了摩擦化学反应，并形成了由 C、N、O、Fe 等元素组成的边界润滑膜<sup>[53-54]</sup>。

根据对磨件表面磨痕和 XPS 结果分析，推测了 CDILs 水基润滑剂的润滑机理，如图 11 所示。CDILs 水基润滑剂在摩擦过程中，首先，由于 CQDs 尺寸极小，因而极易填充到金属表面的凹陷结构中，从而降低其表面粗糙度；同时，CQDs 的准球形结构能够起到“纳米滚珠”作用，使滑动摩擦变为滚动摩擦，从而减小摩擦系数，降低体积磨损率；再者，ILs 表面的阴离子可以与金属表面的正电荷通过静电作用形成边界润滑吸附层，提高其润滑膜牢固性，从而提升 CDILs 水基润滑剂的润滑持久性。因此，通过 ILs 改性 CQDs，能够发挥二者优异的协同润滑作用，在金属摩擦表面形成一层连续、均匀、牢固的自润滑转移膜，有效减少磨损表面的直接接触，从而提升其减摩和耐磨性。

同时，CQDs 与 ILs 的结合能够调整润滑剂的黏度和流变特性，使其适应不同的摩擦条件，以实现更高效、持久的润滑效果。

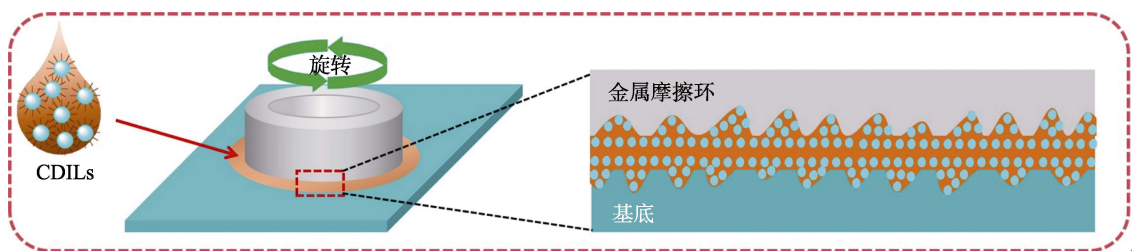


图 11 CDILs 水基润滑剂的润滑机理示意图  
Fig. 11 Schematic diagram of lubrication mechanism of CDILs water-based lubricant

### 3 结论

利用生物质材料制备了茶叶渣基碳量子点（CQDs）和胆碱氨基酸离子液体（ILs），并以 ILs 修饰 CQDs 制备了 CDILs。

(1) CDILs 作为水基润滑添加剂时具有良好的

摩擦学性能。0.3% CDILs 的摩擦系数和体积磨损率均达到最低，分别为 0.14 和  $1.91 \times 10^{-9} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。

(2) ILs 修饰的 CQDs 能够发挥协同润滑作用。CDILs 可以在摩擦表面形成连续、均匀、牢固的自润滑转移膜，从而使 CDILs 水基润滑剂表现出更持久的减摩和耐磨性能。

## 参考文献:

- [1] GE X Y, CHAI Z Y, SHI Q Y, *et al.* Graphene superlubricity: A review[J]. *Friction*, 2023, 11(11): 1953-1973.
- [2] LIU C (刘超), TANG Y F (唐雨凡), XUE X (薛新), *et al.* Preparation of Ga-based liquid metal@COFs and tribological properties of its polyimide composite coatings[J]. *Fine Chemicals (精细化工)*, 2025, 42(1): 95-102, 232.
- [3] LUAN Z Q, XIA Y, ZHANG R C, *et al.* Study on pH-dependence of electroosmosis effect and tribological behavior of water-based lubricants at friction interfaces[J]. *Tribology International*, 2024, 191: 109151.
- [4] PAN L, LI Z, CHEN Y H, *et al.* Effect of ellipsoidal particle shape on tribological properties of lubricants containing nanoparticles[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2024, 37(1): 80.
- [5] WANG D, JIA X H, ZHANG Y P, *et al.* Nitrogen-doped carbon quantum dots assembled on layered  $Ti_3C_2T_x$  exhibit excellent tribological properties[J]. *Tribology International*, 2023, 190: 109023.
- [6] ZHAO C H (赵聪慧), ZHANG C X (张传祥), ZHANG X Q (张晓琪), *et al.* Research progress of carbon quantum dot in tribology[J]. *Surface Technology (表面技术)*, 2023, 52(10): 1-19.
- [7] TU Z Q, HU E Z, WANG B B, *et al.* Tribological behaviors of Ni-modified citric acid carbon quantum dot particles as a green additive in polyethylene glycol[J]. *Friction*, 2020, 8(1): 182-197.
- [8] BILAS P, NOMEDE M N, MATHIEU G, *et al.* Tribological properties of Sargassum carbon dots as additives in water-based lubricants[J]. *Materials Letters*, 2024, 354: 135411.
- [9] LIU C, LI X, LIN Y, *et al.* Tribological properties of bismaleimide-based self-lubricating composite enhanced by  $MoS_2$  quantum dots/graphene hybrid[J]. *Composites Communications*, 2021, 28: 100922.
- [10] TENG J H (滕家皇), ZOU S (邹帅), PENG M H (彭茂璋), *et al.* Research progress on lubrication mechanism and applications of carbon quantum dots as lubricant additives[J]. *Lubrication Engineering (润滑与密封)*, 2024, 49(7): 168-180.
- [11] JIANG Z Q, SUN Y K, LIU B K, *et al.* Research progresses of nanomaterials as lubricant additives[J]. *Friction*, 2024, 12(7): 1347-1391.
- [12] NORA N, NURIA E. Functionalized carbon nanostructures as lubricant additives-A review[J]. *Carbon*, 2023, 201: 1200-1228.
- [13] WANG J H, LI X R, DENG Y Y, *et al.* Carbon quantum dots doped with silver as lubricating oil additive for enhancing tribological performance at various temperatures[J]. *Applied Surface Science*, 2022, 599: 154029.
- [14] XUE S H, CUI Y H, CHEN X, *et al.* Zwitterionic dopamine sulfonate functionalized carbon quantum dots as water-based lubricant additive for friction and wear reduction[J]. *Applied Surface Science*, 2023, 615: 165411.
- [15] CHEN Y, RENNER P, LIANG H. A review of current understanding in tribochemical reactions involving lubricant additives[J]. *Friction*, 2022, 11(4): 489-512.
- [16] MOHAMED K A A, MOHAMED A A A, KRISHN C, *et al.* A review of recent advances of ionic liquids as lubricants for tribological and thermal applications[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2023, 237(1): 3-26.
- [17] DAKESHW A K V, YEESTEDEV D, KUMAAR A S, *et al.* Ionic liquids as green and smart lubricant application: An overview[J]. *Ionics*, 2022, 28(11): 4923-4932.
- [18] TERAN C A M, MOUSTFA C, LUU J, *et al.* Pyrylium-and pyridinium-based ionic liquids as friction modifiers for greases[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16: 13346-13351.
- [19] ZHANG M J (张铭建), CHEN Y L (陈云龙), LI W M (李维民), *et al.* Tribological properties of dimer acid ionic liquids as lubricant additives in water-based fluid[J]. *Tribology (摩擦学学报)*, 2024, 44(12): 1739-1751.
- [20] CHEN L, ZHU H, SHI D, *et al.* Macroscale ultradurable antiwear achieved on graphene - based films via multiphase combination[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2024, 26(13): 2400411.
- [21] HE J Q, SUN J L, CUI J H, *et al.* Synthesis of N-doped carbon quantum dots as lubricant additive to enhance the tribological behavior of  $MoS_2$  nanofluid[J]. *Friction*, 2023, 11(3): 441-459.
- [22] ZHANG W L, LI T H, AN R, *et al.* Delivering quantum dots to lubricants: Current status and prospect[J]. *Friction*, 2022, 10(11): 1751-1771.
- [23] WANG H C, LI Y, ZHANG S W, *et al.* Outstanding lubrication properties of carbon dot-based ionic liquids[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2023, 376: 121458.
- [24] ZHU H W, LIU Z, CHENG Z L. Stable dispersed N-doped carbon quantum dots-decorated 2D Ni-BDC nanocomposites towards the tribological application[J]. *Applied Surface Science*, 2022, 582: 152428.
- [25] WANG B G, YAO L P, DAI S S, *et al.* Astonishingly distinct lubricity difference between the ionic liquid modified carbon nanoparticles grafted by anion and cation moieties[J]. *Friction*, 2022, 11(6): 949-965.
- [26] RUAN X X, CHEN H Y, JIAO C C, *et al.* Simultaneous low friction and ultra-low wear enabled by a 2,5-furandicarboxylic acid derived bio-based ionic liquid[J]. *Tribology International*, 2022, 174: 107683.
- [27] ALVAREZ S D, LOPEZ D I, HURTADO V M, *et al.* A review on the menagerie of green fluids and nanoparticles to develop sustainable biolubricant technologies[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2024, 33: 103532.
- [28] YU Q L, YANG Z Q, HUANG Q, *et al.* Lignin composite ionic liquid lubricating material as a water-based lubricating fluid additive with excellent lubricating, anti-wear and anti-corrosion properties[J]. *Tribology International*, 2022, 174: 107742.
- [29] QIANG R B (强睿斌), HOU K M (侯凯明), WANG J Q (王金清), *et al.* Preparation and tribological properties of nitrogen-doped carbon quantum dots[J/OL]. *Tribology (摩擦学学报)*, 2024, 1-16[2024-09-25]. DOI: 10.16078/j.tribology.2020194.
- [30] DOU M Y, FENG Q, YANG J, *et al.* Evaluation of rheological properties and tribological properties of choline/acetyl amino acid ionic liquids at different frequencies[J]. *Wear*, 2024, 540: 205247.
- [31] SUN X M (孙学敏), LIU X (刘骁), GUO P X (郭平霞), *et al.* Tribological mechanism of environment-friendly amino acid-based ionic liquids as water lubrication additives[J]. *Tribology (摩擦学学报)*, 2024, 45(4): 514-524.
- [32] LI F T, WANG Z K, ZHOU Y, *et al.* Improvement of carbon dots corrosion inhibition by ionic liquid modification: Experimental and computational investigations[J]. *Corrosion Science*, 2023, 224: 111541.
- [33] LI Y T, YANG F, LI Y, *et al.* Choline amino acid ionic liquids: A novel green potential lubricant[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2022, 360: 119539.
- [34] SUN X M, LIU X, CHEN Q, *et al.* Amino acid-based ionic liquids as water-ethylene glycol additives towards superior lubricity and corrosion resistance[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2024, 401: 124706.
- [35] LI Y A (李宇傲). Physical and chemical properties of 1-butyl-2,3-dimethylimidazole amino acid ionic liquids[D]. Shenyang: Liaoning University (辽宁大学), 2023.
- [36] LI C Y, WANG G Q, HAN Q G, *et al.* Effects of current-carrying conditions on lubrication and tribological performance of ionic liquid[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2022, 367: 120471.
- [37] JIANG H D, WANG Y Z, XIONG Z P, *et al.* Graphene enhances the loading capacity and lubrication performance of ionic liquids: A molecular dynamics study[J]. *Materials*, 2023, 16(14): 4942.
- [38] CHEN B B, ZHANG M J, ZHANG K, *et al.* Mono-dispersed Ag nanoparticles decorated graphitic carbon nitride: An excellent lubricating additive as PPEsk composite film[J]. *Friction*, 2022, 10(5): 717-731.
- [39] WANG R Z, SUN C F, YAN X Y, *et al.* Influence of the molecular structure on the tribological properties of choline-based ionic liquids as water-based additives under current-carrying lubrication[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2023, 369: 120868.
- [40] GUO J, CHENG J, TAN H, *et al.* Constructing a novel and high-performance liquid nanoparticles additive from Ga-based liquid metal[J]. *Nanoscale*, 2020, 12: 9208-9218.
- [41] WANG B G, ZHANG L L, WANG N, *et al.* Tribological properties of a series of carbon dots modified by ionic liquids with various anion species: Experimental findings and density functional theory calculations[J]. *Dalton Transactions*, 2021, 50(26): 9185-9197.