

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20190318001

烷基胺边缘功能化氧化石墨烯 Pickering 乳液的摩擦学行为

杨红梅, 李久盛, 曾祥琼

(中国科学院大学 中国科学院上海高等研究院, 上海 200120)

摘要: 为探究氧化石墨烯 (GO) 在金属加工液领域的应用潜能, 采用改进 Hummers 法合成了 GO, 对其进行正辛胺的边缘功能化修饰, 并构建了基于功能化 GO 的 Pickering 乳液。研究了功能化 GO 在液-液界面的油水界面行为, 以及 GO 基 Pickering 乳液在固-液界面的摩擦学行为。利用全自动界面张力仪研究了功能化 GO 在不同油水界面的界面张力; 利用 UMT-tribolab 和白光干涉仪研究了 GO 基 Pickering 乳液在 CoCrMo 合金和 304 不锈钢表面的界面润滑性能; 利用 Micro-Raman 和 XPS 分析金属摩擦副表面的润滑膜组成, 以阐明 GO 基 Pickering 乳液的润滑作用机理。研究结果表明: GO 基 Pickering 乳液比空白乳液的减摩性能好, 且胺功能化 GO 在 CoCrMo 合金上比在 304 不锈钢上展现出更优的润滑性能。对比空白乳液, 在对摩擦副为 CoCrMo 合金时, GO 乳液可降低 35.9% 的平均摩擦因数和 46.7% 的钢球磨损率, 而 Oct-N-GO 乳液则可降低 48.7% 的平均摩擦因数和 73.0% 的钢球磨损率。机理分析表明, 功能化 GO 良好的界面润湿性能使其所构建的 Pickering 乳液可以在金属表面形成良好的界面润滑膜; 其结构中的烷基胺在摩擦过程中更易发生剪切, 降低界面剪切力而起减摩作用; 同时, 其所形成的润滑膜组分中含有较高的 C—O—C/C—OH 和 C=O, 更好地吸附或填补到金属表面而起抗磨作用。

关键词: 氧化石墨烯; 边缘功能化; 界面张力; Pickering 乳液; 摩擦学行为

中图分类号: TH117

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2019)05-0151-09

Triobological Behavior of Pickering Emulsions Stabilized with Alkylamine Edge-functionalized Graphene Oxide

YANG Hongmei, LI Jiusheng, ZENG Xiangqiong

(Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, University of Chinese Academy Sciences, Shanghai 200120, China)

Abstract: In order to explore the potential application of graphene oxide (GO) in the field of metalworking fluid, GO was synthesized by improved Hummers' method, followed by edge-functionalization with n-octan-1-amine, and Pickering emulsions based on functionalized GO were constructed. The oil-water interfacial behaviors of functionalized GO at liquid-liquid interfaces, together with the tribological behaviors of GO-based Pickering emulsions at solid-liquid interfaces were respectively studied. The interfacial tension of functionalized GO at different oil-water interfaces was studied by full-automatic interfacial tension tester. And the interfacial lubricating properties of GO-based Pickering emulsions on CoCrMo alloy and 304 stainless steel were studied by UMT-tribolab and white light interferometer. To clarify the lubricating mechanism of GO-based Pickering emulsions, the composition of lubricating films on metal friction pairs was analyzed by Micro-Raman and XPS. The results show that the friction-reducing properties of GO-based Pickering emulsions are better than that of base emulsion, and alkylamine functionalized GO shows better lubrication performance on CoCrMo alloy than on that 304 stainless steel. Compared with base emulsion, when the friction counterpart is CoCrMo alloy, GO emulsion can reduce the average friction

收稿日期: 2019-03-18; **修回日期:** 2019-07-10

通信作者: 曾祥琼 (1979—), 女 (汉), 研究员, 博士; **研究方向:** 功能性界面润滑材料; **E-mail:** zengxq@sari.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金 (21703279)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (21703279)

引用格式: 杨红梅, 李久盛, 曾祥琼. 烷基胺边缘功能化氧化石墨烯 Pickering 乳液的摩擦学行为[J]. 中国表面工程, 2019, 32(5): 151-159.

YANG H M, LI J S, ZENG X Q. Triobological behavior of Pickering emulsions stabilized with alkylamine edge-functionalized graphene oxide[J]. China Surface Engineering, 2019, 32(5): 151-159.

coefficient and the steel ball wear rate by 35.9% and 46.7% respectively, while Oct-N-GO emulsion can reduce the average friction coefficient (COF) and the wear rate of steel ball by 48.7% and 73.0% respectively. The mechanism analysis shows that the good interfacial wettability of functionalized GO enables its Pickering emulsion to form a better interfacial lubricating film on metal surfaces. The alkylamine chains at GO edges are more prone to be sheared during friction, which reduces the interfacial shear force and results in reducing friction. At the same time, the lubricating film formed by Oct-N-GO contains higher content of C—O—C/C—OH and C=O, which can adsorb or fill the metal surfaces and play an anti-wear role.

Keywords: graphene oxide; edge-functionalization; interfacial tension; Pickering emulsion; tribological behavior

0 引言

近年来,水基润滑由于具有冷却性好、成本低、环保等优点,已经被广泛地应用于切削、磨削、拉拔、轧制等金属加工领域,并有逐步取代油基润滑剂之势^[1]。但水基润滑剂含因大量的水而具有粘度小、粘压系数低的特点,导致其在摩擦过程中难以形成有效的润滑膜,存在润滑性较差的缺陷^[2]。而水基乳化液则可兼具冷却和润滑的作用,成为控制金属加工工艺中的摩擦学问题、提高生产速率和产品表面质量的关键手段^[3-4]。

将微纳米材料与润滑技术相结合,研制出兼具减摩、抗磨和修复功能的润滑材料是近年来摩擦与润滑领域研究的热点^[5-6]。氧化石墨烯(GO),作为一种微纳米石墨烯基材料,因超细的层状结构而具有优异的摩擦学特性^[7]。目前研究主要集中在考察GO作为固体润滑膜^[8]、纳米复合薄膜^[9-10]、GO/聚合物复合材料^[11-12]以及GO复合水凝胶^[13]等的摩擦学行为。也有研究者考察了GO作为水基润滑材料的摩擦学行为,如Luo等^[14]研究发现GO作为水润滑添加剂时,其层状结构可使陶瓷对偶的摩擦跑合期由纯水润滑时的2000 s缩短至250 s,并显著降低摩擦因数;崔庆生等^[15]对比了不同载荷作用下GO水分散体系的减摩抗磨性能,发现GO水分散体系的减摩抗磨性能与纯水相比均有明显改善,当载荷为15 N时,GO水分散体系的摩擦因数和磨损体积与纯水相比可分别

降低45.0%和23.7%。此外,GO的两亲性^[16-17]使其具有良好的分散性^[18-19];同时亦能在油水界面进行自组装,降低界面张力,形成由固体颗粒稳定的Pickering乳液^[20-24]。同时,Pickering乳液应用于金属加工液可有效解决传统乳液废液的处理难题,并大大降低处理成本。

然而,GO能乳化的油相多为毒性较大的芳香烃,不适合在金属加工液中使用。通过对GO表面的含氧官能团进行功能化修饰,可调节其与烷烃的润湿能力,从而改善GO对烃类合成基础油的乳化能力。基于前期功能化GO的分子结构设计,文中将对对比考察烷基醇与胺边缘功能化GO在不同油水界面的界面行为,以及其所构建的Pickering乳液在不同金属摩擦副表面的摩擦学行为。

1 试验

1.1 样品制备

GO及正辛胺边缘功能化GO(Oct-N-GO)的合成与表征详见前期工作^[25]。选用增长最快的合成基础油之一——聚 α -烯烃(PAO)为油相,按照表1所示的配方制备了GO基Pickering乳液,具体步骤如下:分别称取30.0 mg GO和Oct-N-GO于277.62 g纯水中超声分散10 min,加入0.45 g U20,待其完全溶胀后200 r/min机械搅拌并加热;同时称取12.00 g TW20和9.00 g PAO8于烧

表 1 GO 基 Pickering 乳液的配方
Table 1 Formulation of GO-based Pickering emulsions

Sample	Description	Content, w/%
GO-based materials	GO or Oct-N-GO	0.01
U20	Acrylates/C10-30 alkyl acrylate crosspolymer	0.15
TW20	Polyoxyethylene (20) sorbitan monolaurate	4.00
PAO8	Poly α -olefin	3.00
H ₂ O	Pure water	to 100.00
NaOH	10% sodium hydroxide solution	to pH~7

杯中, 200 r/min 磁力搅拌并加热; 待油水两相温度均达 60 ℃ 时, 将油相缓慢加入水相, 600 r/min 快速搅拌乳化 30 min, 滴加事先配好的质量分数 10% NaOH 溶液调节 pH=7; 停止加热, 800 r/min 搅拌冷却至室温, 9000 r/min 均质 2 min 后装瓶。

1.2 性能测试

1.2.1 油水界面张力测试

利用德国 Kruss 公司的全自动表面张力仪 K100, 参照 Wilhelmy 吊片法^[26] 测定添加浓度分别为 0.00 mg/mL、0.05 mg/mL、0.10 mg/mL、0.20 mg/mL、和 0.50 mg/mL GO 及 Oct-N-GO 的水分散液与不同极性溶剂间的界面张力, 并与传统的表面活性剂吐温 20(TW20) 进行对比。所选取的油相分别为乙酸乙酯 (Ethyl acetate)、甲苯 (Toluene) 和正己烷 (n-Hexane), 界面张力的测试结果为室温下 10 次测量的平均值。

1.2.2 Pickering 乳液稳定性测试

利用美国 Brookfield 公司的旋转粘度计 DV2T 和上海蔡康公司的光学显微镜 CK-330C 分别测定乳液刚制备好时、以及制备后 1、7、30 和 90 d 的粘度和粒径以监测其稳定性。同时, 采用美国 TA 公司的流变仪 AR-G2 测定乳液的流变特性, 即粘度随剪切速率 (0.01~30 rad/s) 的变化。

1.2.3 Pickering 乳液摩擦学行为测试

利用美国 Bruker 公司的 UMT-Tribolab 中的旋转模式考察所制备的 GO 基 Pickering 乳液在钢球 (304 不锈钢) 对金属板 304 不锈钢 (304 vs. 304) 和 CoCrMo 合金 Stellite21(304 vs. S21) 的摩擦学行为, 并对比转速为 30、60、100 及 200 r/min 时对乳液润滑区域的影响。测试所用钢球的直径为 5 mm, 表面粗糙度 (Ra) 为 0.5 μm; 金属板的 Ra 为 0.1 μm, 304 和 S21 的硬度分别为 180 HV 和 119 HV; 测试载荷和行程分别为 2 N(~500 MPa 的接触应力) 和 100 m。所有试验至少重复 3 次, 以确保数据的可靠性。分析所用平均摩擦因数数据均为测试到达稳定期以后的摩擦因数平均值。

利用 Bruker 公司的白光干涉仪 Counter-GT 对摩擦测试后钢球磨斑处的磨损体积进行测量, 根据公式: 磨损率=磨损体积/(载荷×行程)^[27] 计算出相应的磨损率。

利用美国 Thermo Fisher 公司的 DXR™ xi 型拉曼光谱成像仪在 532 nm 的激光光源下观察摩擦

测试后钢板磨痕处的激光共聚焦形貌 (Confocal 图), 并测得相应磨痕处的 Micro-Raman 谱。同时采用英国 Kratos 公司的 AXIS UltraDLD 型 X 射线光电子能谱仪 (XPS) 以 Al Kα 射线在 29.35 eV 的激发源下测定了钢球磨斑处的化学组成。

2 结果与讨论

图 1 为功能化 GO 在不同油水界面的界面张力测试结果。当油相为极性的烷基酯 (乙酸乙酯) 时, GO 和 TW20 对界面张力无明显影响, 而 Oct-N-GO 则可降低油水界面张力 (见图 1(a))。当油相为非极性的芳烃 (甲苯) 时, GO 对界面张力无明显影响; Oct-N-GO 则可大幅降低界面张力, 且其降低界面张力的能力随添加量的增加而增强; 而 TW20 则使界面张力升高, 且其升高界面张力的能力随添加量的增加而增强 (见图 1(b))。当油相为非极性的烷烃 (正己烷和 PAO8) 时, GO 对界面张力的影响仍不显著; 而 Oct-N-GO 和 TW20 则表现出较强的降低界面张力的能力, 其中 Oct-N-GO 在正己烷-水的界面展现出比 TW20 更强的降低界面活性, 且随其添加量的增加, 界面张力呈现先下降后趋于平稳的趋势 (见图 1(c) 和 1(d))。GO 经正辛胺边缘功能化后, 其芳香环骨架结构仍保留, 而接枝的烷基链则不仅降低了 GO 的亲水性, 还增加了其在非极性油相的溶解性, 所以 Oct-N-GO 在甲苯-水、正己烷-水和 PAO8-水中均能降低界面张力; 而 TW20 因疏水链为烷基链, 故仅能在正己烷-水和 PAO8-水中表现出降低界面张力的能力。

图 2 分别给出了 GO 基 Pickering 乳液的外观、粒径和粘度随时间的变化图、以及流变特性。从图 2(a) 和图 2(b) 中可以看出, 乳液外观细腻, GO 和 Oct-N-GO 分散均匀, 且随储存时间的增加 (0~90 d) 外观无明显变化。如图 2(c) 所示, 乳液粒径分布在 0.2~0.5 μm 之间, 随着时间的增加 (0~90 d), 粒径略有减小。当乳液室温放置 3 个月, GO 基乳液的粒径小于空白乳液, 表明其稳定性优于空白乳液。由图 2(d) 可知, 乳液粘度随时间的增加无明显变化, 表明其稳定性良好。图 2(e) 的流变数据显示, 乳液粘度随剪切速率的升高而下降, 具有非牛顿流体剪切稀化的特性, 且 GO 基乳液的粘度随剪切速率升高而下降的速率低于空白乳液, 亦表明其稳定性优于空白乳液。

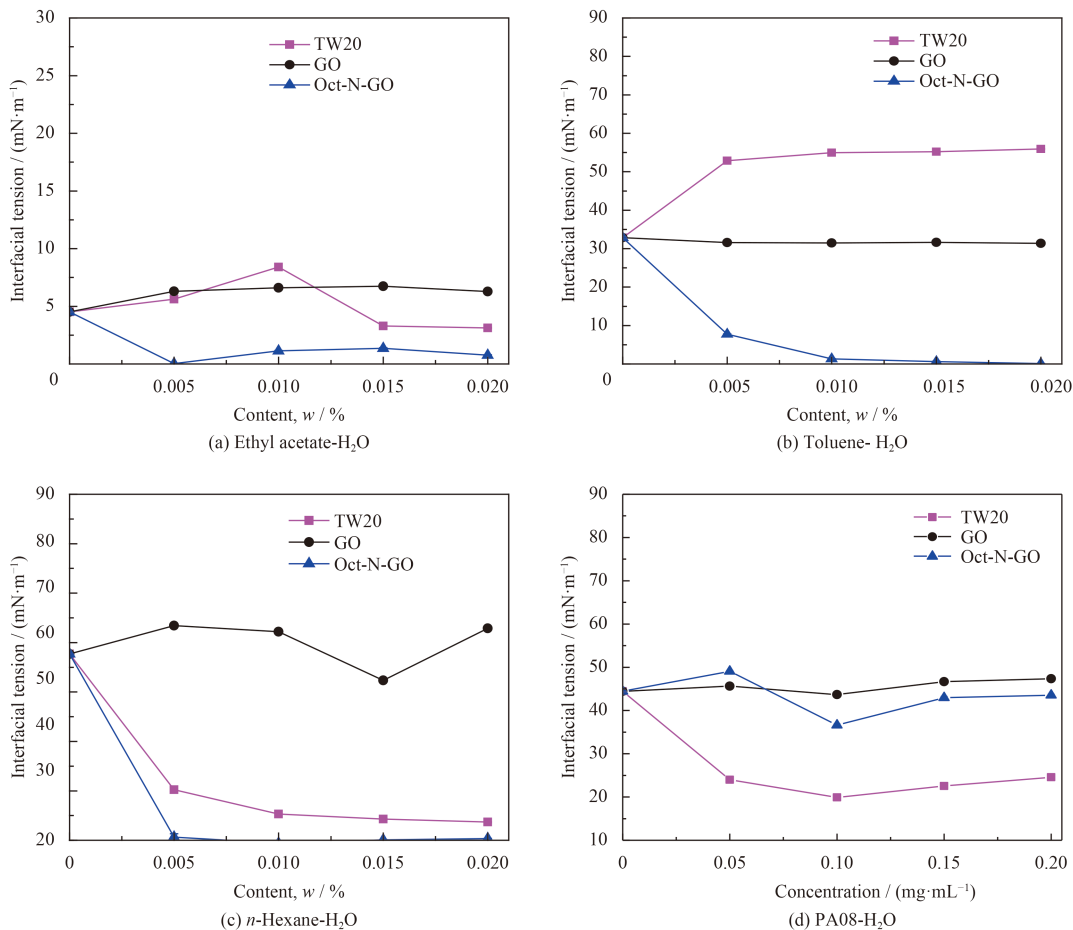


图1 功能化GO在不同油水界面的界面张力

Fig.1 Interfacial tension of functionalized GO at different oil-water interfaces

图3给出了对摩擦副材料分别为304和S21时各乳液润滑时的平均摩擦因数和上钢球的磨损率与转速的关系。乳液润滑时,平均摩擦因数和钢球磨损率总体上呈现随转速的增加而降低的趋势。空白乳液和GO乳液在对摩擦副为S21上的平均摩擦因数高于在304上的;而Oct-N-GO乳液则相反,即304上的平均摩擦因数高于S21上的。此外,空白乳液和GO乳液在S21上的钢球磨损率远高于在304上的;而Oct-N-GO乳液在304上的钢球磨损率则高于在S21上的。

为了探究不同乳液在不同金属表面的摩擦学行为,图4对比了200 r/min测试时的摩擦曲线、不同乳液的减摩抗磨性能、以及GO乳液在不同金属表面所形成的润滑膜经摩擦测试后的拉曼响应。

无论304 vs. S21还是304 vs. 304时,摩擦跑合期后GO基Pickering乳液的摩擦因数均低于空白乳液,如图4(a)和图4(b)所示,表明GO基

Pickering乳液比空白乳液的减摩性能好。对比空白乳液(图4(c)和图4(d)),GO乳液在304 vs. S21时可降低35.9%的平均摩擦因数和46.7%的钢球磨损率,其在304 vs. 304时则降低40.4%的平均摩擦因数和82.4%的钢球磨损率;Oct-N-GO乳液在304 vs. S21时可降低48.7%的平均摩擦因数和73.0%的钢球磨损率,但其在304 vs. 304时则只能降低摩擦因数而不可降低钢球磨损率。

对比GO乳液润滑后的S21和304板上磨痕处的拉曼响应(图4e)可知,两者均有GO的拉曼信号,且304板上的GO信号更强,表明304板上的GO残留更多或GO骨架结构破坏的更少。此外,304板上还在660 cm⁻¹处出现了FeO和Fe₃O₄的Raman信号^[28],说明GO乳液润滑的304板在摩擦过程中会生成铁氧化物保护膜。前述摩擦学测试的结果显示GO乳液在304上比在S21上所展现的减摩抗磨性能更优,说明完整的

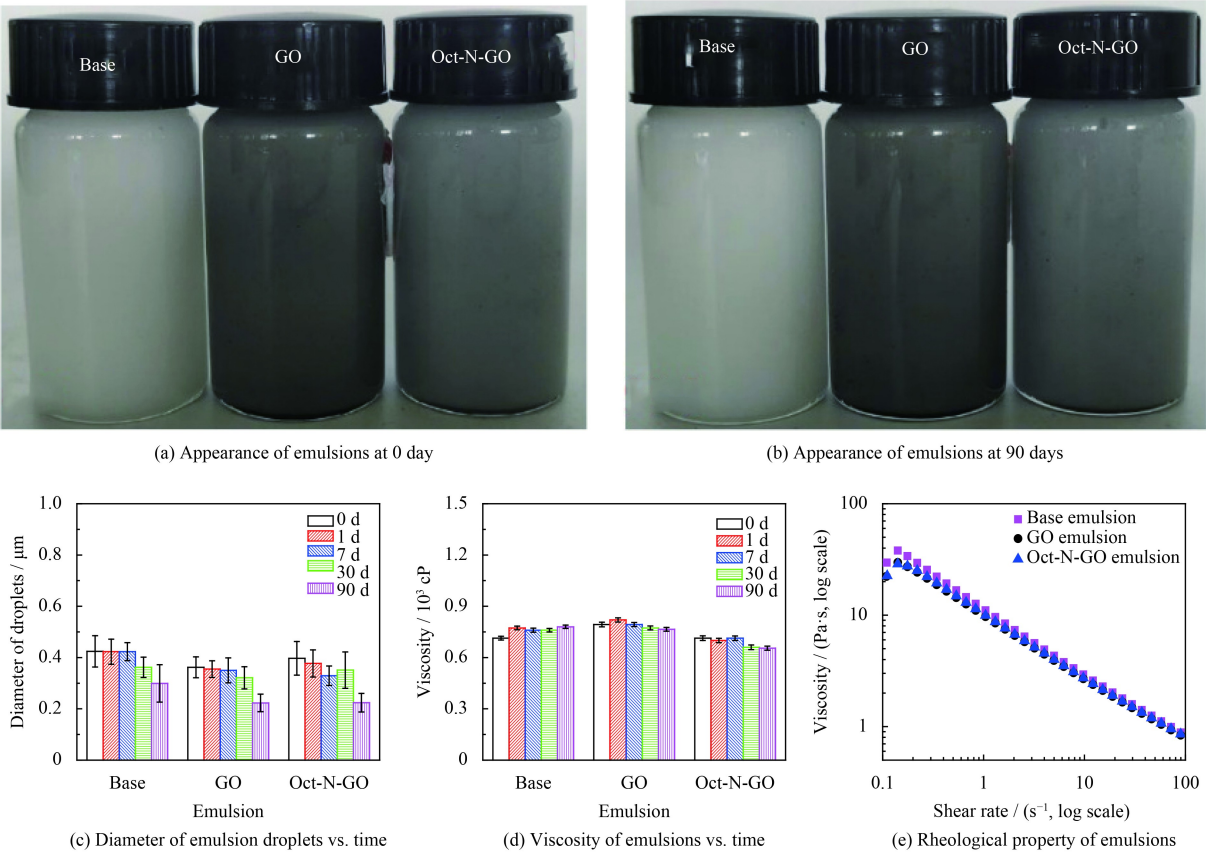


图 2 GO 基 Pickering 乳液的稳定性监测
Fig.2 Stability monitoring of GO-based Pickering emulsions

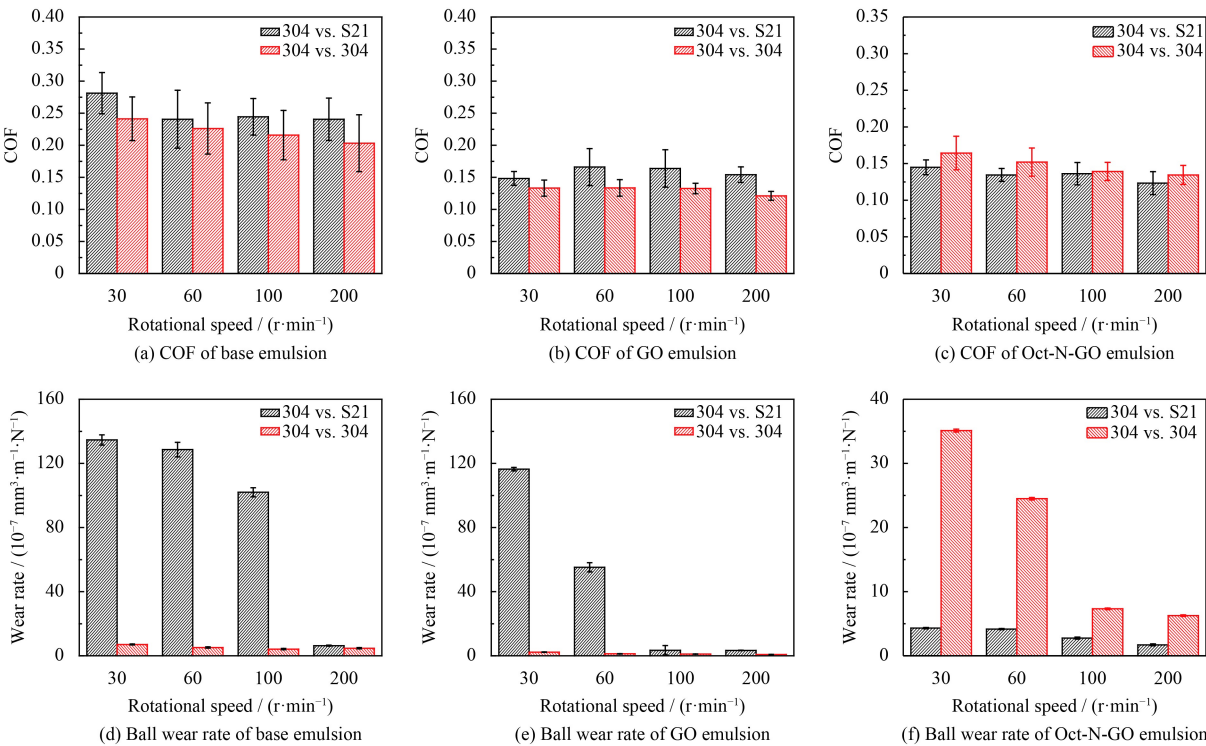


图 3 不同摩擦副上乳液摩擦学性能与转速的关系
Fig.3 Tribological properties of emulsions vs. rotational speed under different friction pairs

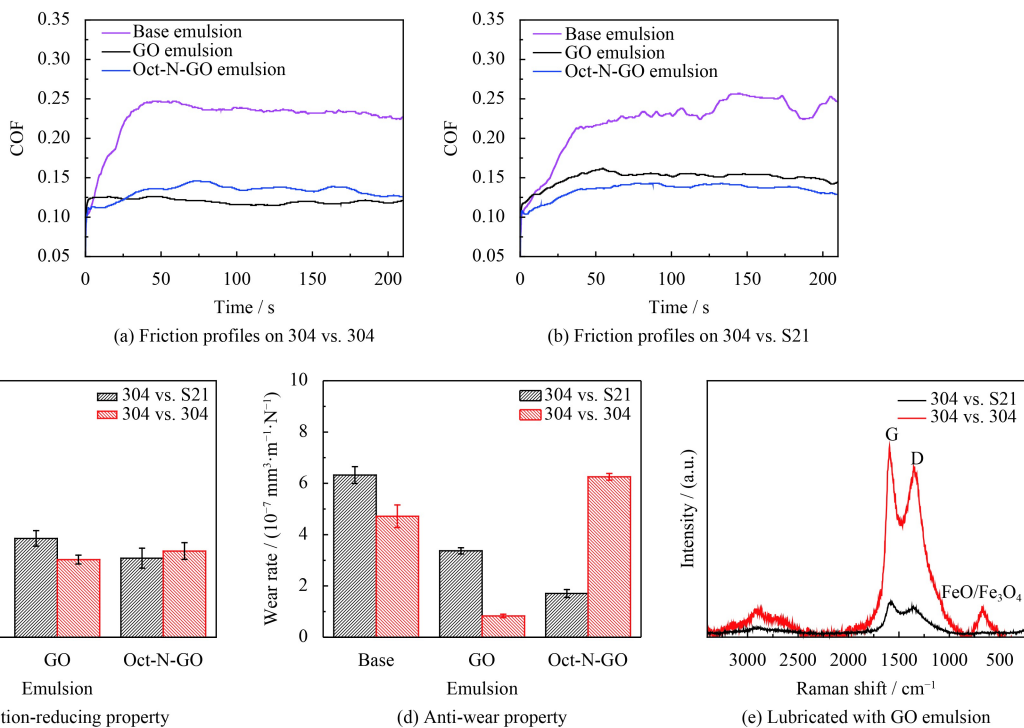


图4 GO基Pickering乳液在不同摩擦副上的摩擦学性能对比(200 r/min)以及板磨痕处的微拉曼响应

Fig.4 Comparison of tribological properties of GO-based Pickering emulsion on different friction pairs at 200 r/min and micro-Raman response of wear scars on plates

GO骨架结构是其乳液表现良好润滑性能的保障。

观察GO基Pickering乳液润滑下304钢板磨痕处(200 r/min测试后)的Confocal形貌(图5(a))可以发现, Oct-N-GO乳液比GO乳液润滑的钢板表面磨痕的宽度更窄、且深度更浅, 表明其抗磨性能更优。此外, 乳液润滑的磨痕处均有一定程度的深色沉积物残留。进一步对比磨痕处的Micro-Raman响应(图5(b))与图5(c)中GO基材料的Raman表征(图中 I_D/I_G 为D峰和G峰的强度比)可知, GO乳液润滑后的表面仍呈现明显的GO骨架信号, 表明GO在摩擦过程中可存在于界

面处以降低剪切强度; 而Oct-N-GO乳液润滑的表面则出现由含氧官能团和烷基链构成的 sp^3 杂化D峰近乎消失, 且骨架G峰的强度亦有明显变弱, 说明功能化GO在摩擦过程中会因剪切掉含氧基团或烷基链而导致结构的缺失。

为探明GO基Pickering乳液的润滑作用机理, 采用XPS对钢球表面磨斑处润滑膜的组成进行测定, 结果如图6所示。XPS的元素测定结果显示, Oct-N-GO乳液在304 vs. 304上的摩擦膜组成为70.49% C、21.80% O、6.87% N和0.84% Fe, 而其在304 vs. S21上的摩擦膜则由76.50%

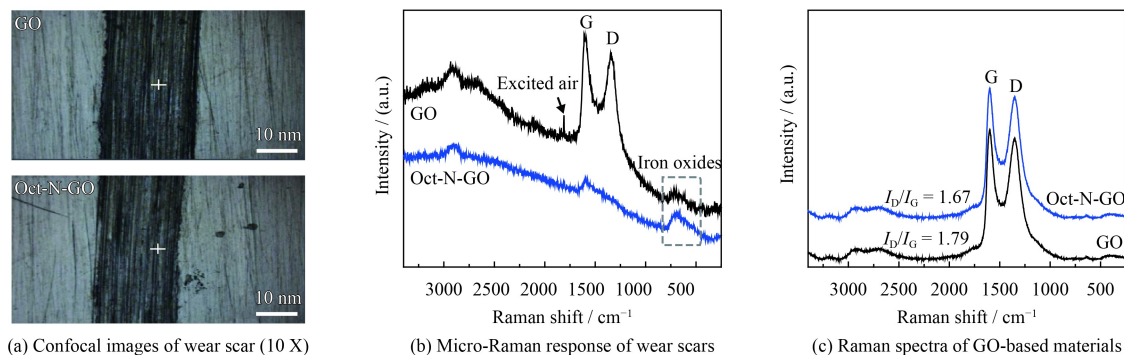


图5 GO基Pickering乳液在304钢板及304摩擦测试后板上磨痕处的表面分析

Fig.5 Surface analysis of wear scars lubricated with GO-based Pickering emulsions on 304 vs. 304 after tribological tests

C、17.08% O 和 6.42% N 组成。该结果表明不同摩擦副上的摩擦膜主要由 C、O 和 N 元素组成, 即润滑膜的有效组分为 Oct-N-GO。其中, Oct-N-GO 乳液在 304 vs. 304 上的摩擦膜含 Fe 元素, 而 304 vs. S21 上的摩擦膜则不含 Fe 元素。

由图 6 中 C1s 和 O1s 谱图和表 2 中组分数据可知, Oct-N-GO 在 304 vs. 304 上和 304 vs. S21 上形成的润滑膜的 C、O 组成相似, 但各组分的含量不同。Oct-N-GO 在 304 vs. S21 上比在 304 vs. 304 上乳液润滑后钢球表面膜中 C—O—C/ C—OH 和 C=O 组分的含量高。结合图 4(c) 中显

示的 Oct-N-GO 在 304 vs. S21 时乳液的减摩抗磨效果更好, 表明润滑膜组分中 C—O—C/C—OH 和 C=O 的含量越高, 其润滑性能越好。图 6 中 N1s 谱图显示, Oct-N-GO 在 304 vs. S21 上出现 C—N 和 N—H 键的峰, 而在 304 vs. 304 上时则仅出现 N—H 键的峰, 表明其在硬度更大的 304 上更易发生剪切生成相应的烷基胺, 造成结构的破坏。根据 GO 乳液在不同金属表面的显微拉曼表征结果, 完整的 GO 骨架结构是其乳液表现出良好润滑性能的保障, 故 Oct-N-GO 乳液在硬度较小的 S21 上展现出更优的抗磨性能。

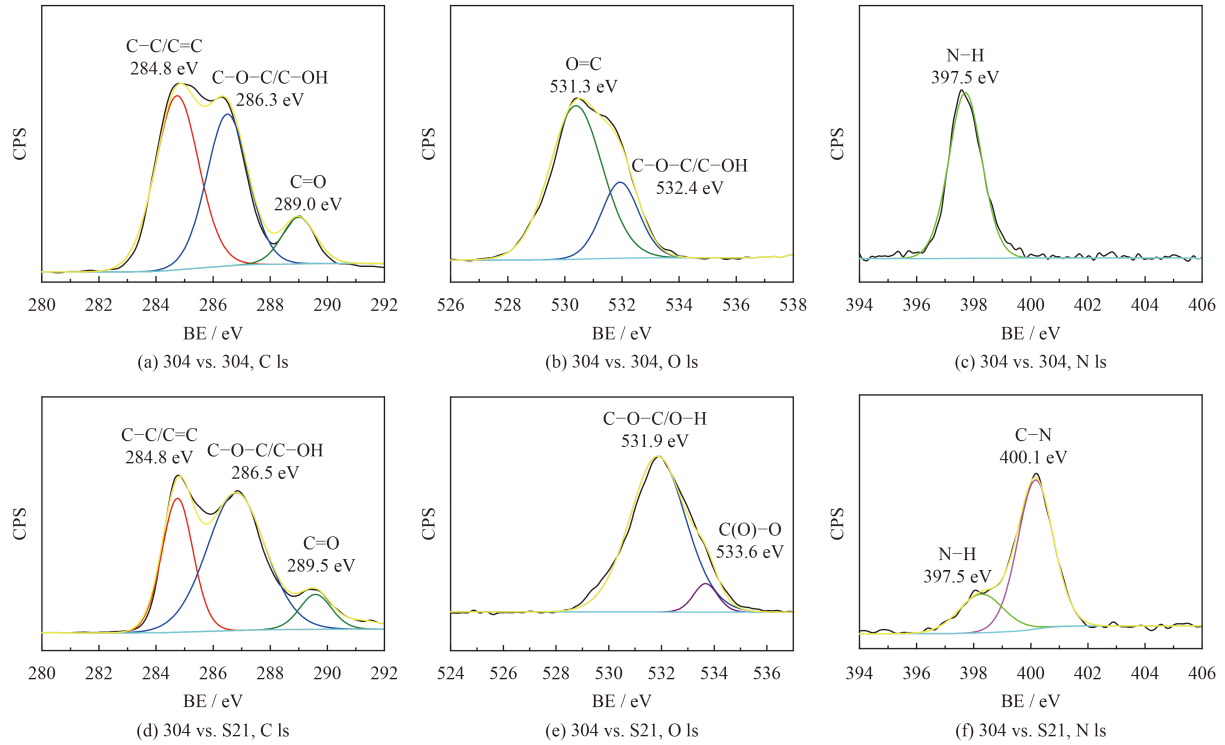


图 6 Oct-N-GO 乳液在钢球形成表面润滑膜的主要元素的 XPS 谱图

Fig.6 XPS spectra of typical elements of the lubricating film formed by Oct-N-GO emulsion on steel balls

表 2 XPS 分析 Oct-N-GO 乳液在钢球表面形成润滑膜的组成

Table 2 Composition of the lubricating film formed by Oct-N-GO emulsion on steel balls using XPS

Elements	C 1s			O 1s			N 1s	
Binding energy/eV	~285	~286	~289	~531	~532	~533	~398	~400
Corresponding bond content/%	C—C / C=C	C—O—C / C—OH	C=O	O=C	C—O—C / O—H	C(O)—O	N—H	N—C
304 vs. 304	49.06	40.73	10.21	58.70	41.30		100.00	
304 vs. S21	30.53	58.72	10.76		92.70	7.30	24.47	75.53

3 结 论

(1) 功能化 GO 的界面润湿性能优于 GO, 能大幅降低乙酸乙酯-水、甲苯-水及正己烷-水的界面张力, 且表现出比传统乳化剂 TW20 更强的界

面活性。

(2) 功能化 GO 可均匀分散于乳液体系, 其所构建的 Pickering 乳液的稳定性优于空白乳液, 且 GO 基 Pickering 乳液在不同的金属表面均表现出

良好的润滑性能。相对于空白乳液而言,在对摩擦副为 CoCrMo 合金时,GO 乳液可降低 35.9% 的平均摩擦系数和 46.7% 的钢球磨损率,而 Oct-N-GO 乳液则可降低 48.7% 的平均摩擦系数和 73.0% 的钢球磨损率。

(3) 功能化 GO 良好的界面润湿性能使其所构建的 Pickering 乳液可以在金属表面形成良好的界面润滑膜;其结构中的烷基胺在摩擦过程中更易发生剪切,降低界面剪切力而起减摩作用;同时,其所形成的润滑膜组分中含有较高的 C—O—C/C—OH 和 C=O,更好地吸附或填补到金属表面而起抗磨作用。

参考文献

- [1] 郑哲方, 王建华, 江泽琦, 等. 新型水溶性润滑添加剂的研究进展[J]. 摩擦学学报, 2017, 37(3): 409-420.
ZHENG Z F, WANG J H, JIANG Z Q, et al. Research progress of new water-soluble lubricating additives[J]. Journal of Tribology, 2017, 37(3): 409-420 (in Chinese).
- [2] SCHIMID R M, LAUGIER M, LEGRAND N. Lubrication with emulsions[J]. Encyclopedia of Tribology, Springer, 2013, doi: 10.1007/978-0-387-92897-5_1183.
- [3] 郭太雄. 乳化液使用性能对轧后带钢表面清洁度的影响[J]. 轧钢, 2005, 22(1): 56-58.
GUO T X. Effect of emulsion performance on surface cleanliness of rolled strip[J]. Rolled Steel, 2005, 22(1): 56-58 (in Chinese).
- [4] LIU N N, SUN J L, ZHU Z X, et al. Research of lubrication model and surface quality in cold-rolling copper alloy using O/W emulsions[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2015, 44(8): 1845-1850.
- [5] 张博, 徐滨士, 许一, 等. 润滑剂中微纳米润滑材料的研究现状[J]. 摩擦学学报, 2011, 3(2): 194-204.
ZHANG B, XU B S, XU Y, et al. Research status of micro/nano lubricating materials in lubricants[J]. Journal of Tribology, 2011, 3(2): 194-204 (in Chinese).
- [6] LU Y D, SUN J L, ZHANG B T. Preparation and lubricating properties of a new antibacterial emulsion containing nano-TiO₂ for cold rolling strips[J]. China Petroleum Processing and Petrochemical Technology, 2016, 18(3): 110-118.
- [7] 蒲吉斌, 王立平, 薛群基. 石墨烯摩擦学及石墨烯基复合润滑材料的研究进展[J]. 摩擦学学报, 2014, 34(1): 93-112.
PU J B, WANG L P, XUE Q J. Progress in the study of graphene tribology and graphene-based composite lubricating materials[J]. Journal of Tribology, 2014, 34(1): 93-112 (in Chinese).
- [8] LIANG H Y, BU Y F, ZHANG J Y, et al. Graphene oxide film as solid lubricant[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2013, 5(13): 6369-6375.
- [9] VALENTINI L, BON S B, MONTICELLI O, et al. Deposition of amino-functionalized polyhedral oligomeric silsesquioxanes on graphene oxide sheets immobilized onto an amino-silane modified silicon surface[J]. Journal of Materials Chemistry, 2012, 22(13): 6213-6217.
- [10] OU J F, LIU L, WANG J Q, et al. Fabrication and tribological investigation of a novel hydrophobic polydopamine/graphene oxide multilayer film[J]. Tribology Letters, 2012, 48(3): 407-415.
- [11] TAI Z X, CHEN Y F, AN Y F, et al. Tribological behavior of uhmwpe reinforced with graphene oxide nanosheets[J]. Tribology Letters, 2012, 46(1): 55-63.
- [12] VINOD S, TIWARY C S, SAMANTA A, et al. Graphene oxide epoxy (GO-xy): GO as epoxy adhesive by interfacial reaction of functionalities[J]. Advanced Materials Interfaces, 2018, 5(2): 1700657.
- [13] 荣明明, 马栓红, 蔡美荣, 等. 两亲性氧化石墨烯/聚(丙烯酸-甲基丙烯酸甲酯)复合水凝胶的制备及介质调控的摩擦学性能研究[J]. 摩擦学学报, 2018, 38(3): 309-318.
RONG M M, MA S H, CAI M R, et al. Preparation and tribological properties of amphiphilic graphene oxide/poly (acrylic acid-methyl methacrylate) composite hydrogel[J]. Journal of Tribology, 2018, 38(3): 309-318 (in Chinese).
- [14] LIU Y H, WANG X K, PAN G S, et al. A comparative study between graphene oxide and diamond nanoparticles as water-based lubricating additives[J]. Science China Technological Sciences, 2012, 56(1): 152-157.
- [15] 崔庆生. 石墨烯/氧化石墨烯水分散体系摩擦学性能研究[D]. 北京: 装甲兵工程学院, 2013.
CUI Q S. Tribological properties of graphene/graphene oxide aqueous dispersion system[D]. Beijing: Academy of Armored Forces Engineering, 2013 (in Chinese).
- [16] KIM J, COTE L J, KIM F, et al. Graphene oxide sheets at interfaces[J]. Journal of the American Chemical Society, 2010, 132(23): 8180-8186.
- [17] LUO J Y, COTE L J, VINCENT C T, et al. Graphene oxide nanocolloids[J]. Journal of the American Chemical Society, 2010, 132(50): 17667-17669.
- [18] WAHID M H, CHEN X, GIBSON C T, et al. Amphiphilic graphene oxide stabilisation of hexagonal BN and MoS₂ sheets[J]. Chemical Communications, 2015, 51(58): 11709-11712.
- [19] LI Y L, YANG J, ZHAO Q H, et al. Dispersing carbon-based nanomaterials in aqueous phase by graphene oxides[J]. Langmuir, 2013, 29(44): 13527-13534.

[20] FANG S W, CHEN T, CHEN B, et al. Graphene oxide at oil-water interfaces: Adsorption, assembly & demulsification[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2016, 511: 47-54.

[21] HE Y Q, WU F, SUN X Y, et al. Factors that affect pickering emulsions stabilized by graphene oxide[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2013, 5(11): 4843-4855.

[22] SUN Z W, FENG T, RUSSELL T P. Assembly of graphene oxide at water/oil interfaces: tessellated nanotiles[J]. Langmuir, 2013, 29(44): 13407-13413.

[23] THICKETT S C, ZETTERLIND P B. Graphene oxide (GO) nanosheets as oil-in-water emulsion stabilizers: Influence of oil phase polarity[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2015, 442: 67-74.

[24] ZHANG L, SHI T, TAN D, et al. Pickering emulsion polymerization of styrene stabilized by the mixed particles of graphene oxide and NaCl[J]. Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures, 2014, 22(8): 726-737.

[25] YANG H M, LI J S, ZENG X Q. Correlation between molecular structure and interfacial properties of edge or basal plane modified graphene oxide[J]. ACS Applied Nano Materials, 2018, 1(6): 2763-2773.

[26] HEERTJES P M, SMET E C, WITVOET W C. The determination of interfacial tensions with the Wilhelmy plate method[J]. Chemical Engineering Science, 1971, 26(9): 1479-1480.

[27] GOLCHIN A, WIKNER A EMAMI N. An investigation into tribological behaviour of multi-walled carbon nanotube/graphene oxide reinforced UHMWPE in water lubricated contacts[J]. Tribology International, 2016, 95: 156-161.

[28] THIBEAU R J, BROWN C W, HEIDERSBACH R H. Raman spectra of possible corrosion products of iron[J]. Applied Spectroscopy, 1978, 32(6): 532-534.



• 本刊讯 •

《中国表面工程》关于参考文献著录的要求

本刊参考文献符合国标 GB/T7714—2015，采用顺序编码著录，依照其在文中出现的先后顺序用阿拉伯数字标出，并将序号置于方括号内，排列于文后。参考文献应尽量引用国内外正式公开发表的引文且各项信息齐全，作者的英文名采用姓前名后格式，姓用全称且全部字母大写，名用缩写且保留首字母大写，作者在 3 名以上只列前 3 名，后加“等”；题名后应标注文献标识类型；期刊名称（包括英文期刊）采用全称；著录期刊的年、卷、期信息应齐全。具体格式如下：

- ①期刊：[序号] 作者. 文名 [J]. 刊名, 出版年, 卷 (期): 起止页码.
- ②论文集：[序号] 作者. 题名 [C]. 编者. 文集名, 出版地: 出版者, 出版年.
- ③学位论文：[序号] 作者. 题名 [D]. 保存地: 学位授予单位, 授予年份.
- ④专著：[序号] 著者. 书名 [M]. 版本. 出版地: 出版者, 出版年: 起止页码.
- ⑤报告：[序号] 作者. 报告题名 [R]. 出版地: 出版者, 出版年.
- ⑥标准：[序号] 著者. 标准名: 标准顺序号-发布年 [S]. 出版地: 出版者, 出版年, 起止页码.
- ⑦专利：[序号] 专利所有者. 专利题名: 专利号 [P]. 公告日期或公开日期.
- ⑧报纸：[序号] 作者. 题名 [N]. 报纸名, 出版日期 (版次).
- ⑨电子文献：[序号] 作者名. 题名 [J/OL] ([EB/OL] 或 [DB/OL]). 发表或更新日期 [引用日期]. 获取和访问路径.

另为适应国际数据库的要求，从 2014(6) 期开始，本刊要求原属中文的参考文献需同时标出其对应的英文格式。例如：

[1] 何家文. 追溯历史评表面形变纳米化[J]. 中国表面工程, 2014, 27(5): 1-13.

HE J W. Comments on nano-treatment of surface attrition via historical review[J]. China Surface Engineering, 2014, 27(5): 1-13 (in Chinese).

(本刊编辑部 供稿)