

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20190102001

石墨烯在 PAO 基础油中的摩擦学性能

孔 尚^{1,2}, 胡文敬^{1,2}, 李久盛¹

(1. 中国科学院上海高等研究院 先进润滑材料实验室, 上海 201210; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 为了改善石墨烯在润滑油中的分散稳定性, 利用一种高分子量丁二酰亚胺(分散剂 A)辅助石墨烯分散于聚 α -烯烃(PAO4)基础油中, 采用紫外-可见分光光度法对其分散稳定性进行了监测, 并使用 UMT-3 多功能摩擦试验仪和 ContourGT-K 型三维轮廓仪考察了石墨烯/PAO4 分散液的摩擦磨损性能, 利用扫描电子显微镜(SEM)、能谱仪(EDS)和 X 射线光电子能谱(XPS)对磨痕表面的形貌和元素组成进行定性和定量分析。结果表明: 分散剂 A 可有效提高石墨烯在 PAO4 中的分散稳定性, 加入分散剂 A 后, 石墨烯/PAO4 分散液静置一周后的相对浓度为 0.667, 是未加分散剂的分散液的 7.8 倍; 石墨烯作为润滑油添加剂能显著提升摩擦磨损性能, 添加 0.8 mg/mL 的石墨烯和质量分数为 0.2% 的分散剂 A, 跑合期从 670 s 缩短至 250 s, 磨损体积减少了 55%。

关键词: 石墨烯; 分散性; 摩擦学性能; 跑合期

中图分类号: TG115.58

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2019)03-0162-08

Tribological Properties of Graphene in PAO Base Oil

KONG Shang^{1,2}, HU Wenjing^{1,2}, LI Jiusheng¹

(1. Advanced Lubricant Laboratory, Shanghai Advanced Research Institute, Shanghai 201210, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To improve the dispersibility of graphene in lubricating oil, a high molecular weight succinimide (dispersant A) was used as dispersant to assist the graphene to disperse into PAO4 base oil steadily. The dispersibility was characterized by UV-Vis spectroscopy, and the tribological properties of graphene/PAO4 dispersion were investigated by UMT-3 Tribological Tester and ContourGT-K 3D Profiler. Scanning electron microscopy (SEM), energy spectrometer (EDS) and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) were used to observe and evaluate the morphology and elemental composition of the wear scar surface, respectively. The results show that dispersant A can effectively improve the dispersibility of graphene in PAO4. When dispersant A is used, the relative concentration of graphene/PAO4 laid aside for one week is 0.667, which is 7.8 times that of the disperse system without dispersant A. Graphene, as a lubricating oil additive, can significantly reduce the friction and wear. When 0.8 mg/mL of graphene and 0.2% of dispersant A are added, the running-in period decreases from 670 s to 250 s, and the wear volume reduced by 55%.

Keywords: graphene; dispersibility; tribological property; running-in period

0 引 言

石墨烯作为一种前沿新材料, 具有十分优异的热学、电学和力学特性, 在许多领域有着广阔的应用前景, 近些年关于石墨烯的制备、性能及

应用前景方面的研究都取得了显著进展^[1-5]。石墨烯在耐腐蚀涂层、透明导电薄膜、抗菌材料等方面的应用研究趋势使其受到了表面工程界的青睐^[6-7]。在摩擦学领域, 石墨烯因其独特的结构特

收稿日期: 2019-01-02; 修回日期: 2019-06-02

通信作者: 李久盛(1974—), 男(汉), 研究员, 博士; 研究方向: 润滑油合成基础油、分子添加剂、摩擦改进剂和防锈剂的分子设计与合成;
E-mail: lij@sari.ac.cn

基金项目: 山西省科技厅重大专项国际合作项目(GJ2016-01)

Fund: Supported by Major International Cooperation Program of ShanXi Science and Technology Department(GJ2016-01)

引用格式: 孔尚, 胡文敬, 李久盛. 石墨烯在 PAO 基础油中的摩擦学性能[J]. 中国表面工程, 2019, 32(3): 162-169.

KONG S, HU W J, LI J S. Tribological properties of graphene in PAO base oil[J]. China Surface Engineering, 2019, 32(3): 162-169.

征、具有自润滑特性以及作为润滑油添加剂表现出良好的摩擦磨损性能也引起了广泛的关注和研究^[8-13]。然而, 石墨烯在溶液中由于片层间强烈的相互作用而极易团聚沉淀, 难以形成稳定的分散体系, 这使其作为润滑油添加剂的应用受到了限制。如何实现石墨烯在润滑油中的高效、稳定分散, 成为了亟待解决的难题。

目前多数研究者主要通过共价改性技术来提高石墨烯在润滑油中的分散稳定性^[14]。Zhang 等^[15]使用油酸改性石墨烯, 将其作为聚 α -烯烃 (PAO9) 的添加剂, 研究发现: 较低浓度的油酸改性石墨烯可有效地分散在 PAO9 中, 改善润滑油的摩擦学性能。Choudhary 等^[16]使用烷基胺对氧化石墨烯改性制备得到不同烷基链长度的烷基化石墨烯, 结果显示: 随着烷基链长度的增加, 改性石墨烯的分散性随之提高, 并且可有效改善正十六烷的摩擦学性能。Ismail 等^[17]通过铜催化叠氮端炔环加成反应 (CuAAC) 对氧化石墨烯改性获得了高油溶性氧化石墨烯, 试验结果表明, 当改性氧化石墨烯质量分数为 0.01% 时, 基础油的减摩抗磨性能得到显著提升。Eswaraiah 等^[18]通过聚焦太阳辐照技术制备了可稳定分散于润滑油中的疏水石墨烯, 当其浓度为 0.025 mg/mL 时, 使摩擦因数和磨斑直径分别减少了 80% 和 33%。通过共价改性技术虽然可以提高石墨烯在润滑油体系中的分散稳定性, 但制备工艺复杂, 应用成本高, 而且改性共价键会破坏石墨烯的本征结构, 使其力学性能受到影响, 因此需要研究更为简易可行的应用方法。

分散剂可以使物料颗粒均匀分散于介质中, 阻止颗粒沉降和凝聚, 有助分散体系的相对稳定。作为一种纳米材料, 石墨烯以固体颗粒的形式分散于润滑油中, 可以通过使用分散剂来改善其在润滑油中的分散稳定性, 同时还能维持石墨烯本体结构和优良性能不被破坏。无灰分散剂是润滑油的主要添加剂之一, 它的主要功能是分散和增溶作用, 将积炭、烟灰和油泥等微小固态颗粒分散在油中, 防止其沉积和团聚而引起润滑油变质, 最终延长润滑油的使用寿命^[19]。在本研究中, 采用了一种高分子量丁二酰亚胺 (分散剂 A) 无灰分散剂将石墨烯均匀稳定地分散在合成基础油 PAO4 中, 考察了分散剂的含量对石墨烯分散

稳定性的影响, 并研究了这一分散体系的摩擦学性能, 最后探索了石墨烯在基础油中的润滑机理。

1 试验

1.1 材料

试验所用物理法石墨烯购于上海利物盛集团有限公司。试验中所使用的基础油聚 α 烯烃-4(PAO4) 购于美孚公司, 主要理化性质见表 1。分散剂 A 购于上海海润添加剂有限公司, 其主要理化性质见表 2。其他试剂均为分析纯。

表 1 PAO4 基础油的主要理化性质

Table 1 Main physical and chemical properties of PAO4			
Properties		Indexes Testing standard	
Kinematic viscosity (100 °C) / (mm ² ·s ⁻¹)		4.1	GB / T265
Kinematic viscosity (40 °C) / (mm ² ·s ⁻¹)		19	GB / T265
Pour point / °C		-66	GB / T3535
Flash point / °C		220	GB / T3536

表 2 分散剂 A 的主要理化性质

Table 2 Main physical and chemical properties of dispersant A			
Properties		Indexes Testing standard	
Kinematic viscosity (100 °C) / (mm ² ·s ⁻¹)		400	GB / T265
TBN mg KOH / g		25	SH / T0251
Nitrogen content		1.0%	GB / T9170
Flash point / °C		200	GB / T3536
Moisture		0.05%	GB / T260

1.2 石墨烯的表征

采用 Phenom Pro 扫描电子显微镜 (SEM) 和 Veeco Multimode 原子力显微镜 (AFM) 分析石墨烯微观结构与形貌。使用 Thermo Fisher 公司生产的 DXR 激光共焦显微拉曼光谱仪对石墨烯进行 Raman 分析, 波长 532 nm, 扫描范围: 0~3500 cm⁻¹, 精度: ± 0.2 cm⁻¹。粒度分析用 Microtrac 公司生产的 S3500 型激光粒度分析仪, 测量范围: 0.02~1000 μ m。

1.3 石墨烯分散体系的制备和稳定性评价

1.3.1 石墨烯/PAO4 分散液

将石墨烯分别以不同浓度 (0.08、0.4、0.8、1.6 和 3.2 mg/mL) 添加到 PAO4 基础油中, 在室温条件下, 磁力搅拌 1 h, 超声 1 h, 形成均匀的分散液。

1.3.2 分散剂 A-石墨烯/PAO4 分散液

将分散剂 A 分别以不同质量分数 (0.05%、0.1%、0.2%、0.4% 和 1.6%) 加入到 PAO4 中, 磁力搅拌 1 h, 得到透明均匀的溶液; 将浓度为 0.8 mg/mL 的石墨烯添加到上述溶液中, 在室温下, 磁力搅拌 1 h, 然后用超声仪超声 1 h, 得到均匀的分散液。

1.3.3 分散稳定性

采用紫外-可见分光光度计 (UH5300, HITACHI) 监测基础油中石墨烯的浓度随时间的变化关系。取分散液上层液体 5 mL, 稀释 10 倍, 测定吸光度, 将数据转化为对应的相对浓度, 以此评价石墨烯在 PAO4 中的分散稳定性。

1.4 摩擦学性能测试

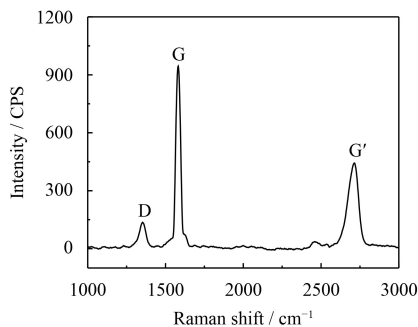
使用 Bruker 公司的 UMT-3 摩擦试验仪考察不同样品的摩擦学性能。采用球-盘往复模式进行摩擦试验, 所用载荷、频率、振幅和时间分别为 5 N、4 Hz、5 mm 和 30 min。试验所用上试样钢球 (Φ 8 mm) 材质为轴承钢 GCr15, 下试样钢块 (50 mm×25 mm×2 mm) 为 304 不锈钢。采用 CONTOURGT-K 型三维轮廓仪测量下试样钢块摩擦测试后磨痕的宽度和磨损体积, 以此来评价样

品的抗磨性能。利用 HITACHI S-4800 扫描电子显微镜、Quantax400 能谱仪 (EDS) 和 ESCALAB 250Xi X 射线光电子能谱 (XPS) 对下试样磨痕表面的形貌和元素组成进行定性和定量分析。

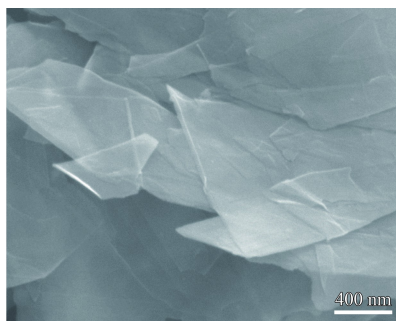
2 结果与讨论

2.1 石墨烯的表征

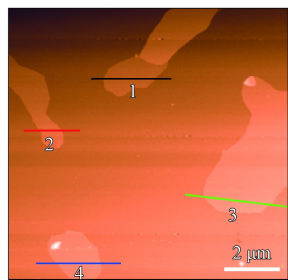
图 1(a) 给出了石墨烯的拉曼光谱分析谱图。图中 1582 cm^{-1} 附近和 2700 cm^{-1} 附近处的吸收峰对应石墨烯两个典型的拉曼特征吸收峰, 即 G 峰和 G' 峰, 其强度比可用来作为石墨烯层数的判断依据^[20]。图中 $I_G/I_{G'}$ 约为 2.1, 表明石墨烯的多层结构。位于 1350 cm^{-1} 附近的缺陷 D 峰, 被认为是石墨烯的无序振荡峰, I_D/I_G 约为 0.14, 说明石墨烯缺陷较少^[21]。图 1(b) 是石墨烯的 SEM 图像。从图中可以看出: 石墨烯层数较多, 层与层之间相互堆叠, 紧密排列, 表面较为平坦。图 1(c) 为石墨烯的 AFM 图像和相应的片层厚度分析曲线, 可以看出, 石墨烯横向尺寸约为几十微米, 片层厚度在 4~5 nm 之间。单层石墨烯理论厚度约为 0.34 nm, 因此石墨烯的层数约为 10 层。图 1(d) 为石墨烯的粒度分布, 平均粒径为 $16.2\text{ }\mu\text{m}$, 与



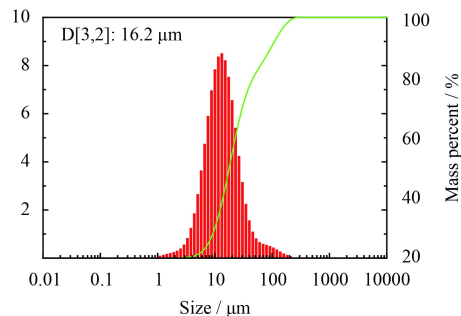
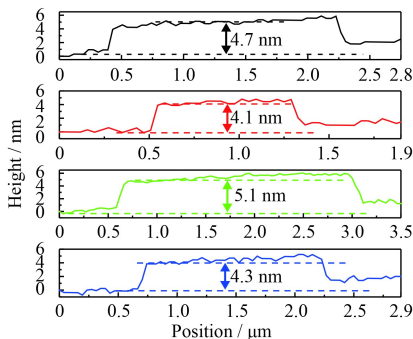
(a) Raman spectrum at 532 nm of graphene



(b) SEM image of graphene



(c) AFM image of graphene with thickness analysis



(d) Graphene particle size distribution

图 1 石墨烯的结构和形态

Fig.1 Morphologies and structure of graphene

AFM 和 SEM 观察结果一致。

综合以上数据, 石墨烯具有超薄的纳米层状结构和较大的比表面积, 这将使其易于进入摩擦接触面之间阻止摩擦副的直接接触。另外, 层状结构的石墨烯在摩擦力作用下容易在层与层之间产生滑移, 加之具有高的力学强度和承载能力, 使其具有优异的润滑和抗磨性能。

2.2 石墨烯的分散性研究

石墨烯在润滑油中的分散稳定性是限制其应用的关键问题, 采用分散剂 A 对石墨烯进行分散, 研究其在 PAO4 基础油中的分散稳定性。将石墨烯分别加入到 PAO4 基础油中和添加了分散剂 A(质量分数为 0.1%) 的基础油中配制成浓度为 0.02 mg/mL 的石墨烯分散液, 超声分散之后, 石墨烯可在两种溶剂中均匀分散。

静置一周, 两种样品出现不同程度的沉淀, 如图 2 所示, 添加了分散剂的分散液底部沉淀明显少于未加分散剂的样品。

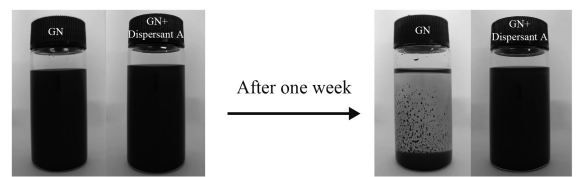


图 2 石墨烯的分散性观察试验

Fig.2 Optical images of GN and GN+ dispersant A dispersed in PAO4 at different time

由 Lambert-Beer 定律可知, 光被吸收的量正比于光程中产生光吸收的分子数目, 即物质的吸光度与该吸光物质的浓度成正比。利用紫外-可见分光光度计测试分散液的吸光度随时间的变化关系, 以此评价石墨烯添加剂的分散稳定性^[22]。图 3 为石墨烯在 PAO4 基础油中和在添加了分散剂的基础油中的相对浓度随时间变化的曲线图。在相同初始浓度的条件下, 静置一周后, 未加分散剂的分散液相对浓度降到 0.085, 而添加了分散剂的分散液相对浓度为 0.667, 由此说明, 分散剂 A 可显著提升石墨烯在 PAO4 基础油中的分散稳定性。分散剂 A 作为一种高聚物, 其分散机理可用空间位阻稳定机制来解释, 即分散剂分子在固体颗粒表面形成吸附膜而产生空间排斥效应, 阻止颗粒间互相接近和团聚, 实现分散作用^[23]。

另外, 分散剂的含量显著影响石墨烯的分散

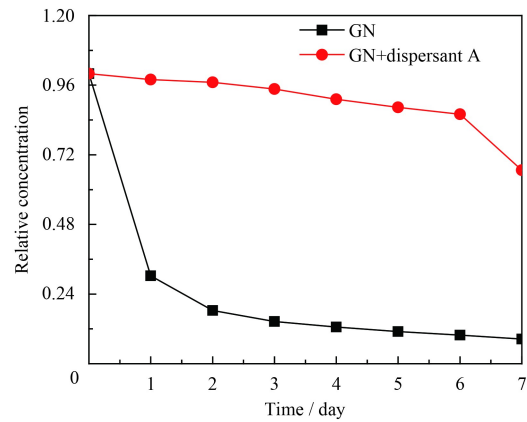


图 3 石墨烯在 PAO4 和添加了分散剂的 PAO4 中的相对浓度随时间的变化

Fig.3 Relative concentration of GN and GN+ dispersant A dispersed in PAO4 at different time

性^[14], 分别研究了不同质量分数的添加剂 (0.05%、0.1%、0.2%、0.4% 和 1.6%) 对浓度为 0.8 mg/mL 的石墨烯在基础油中的分散稳定性的影响, 结果如图 4 所示。当分散剂质量分数为 0.2% 时, 浓度为 0.8 mg/mL 的石墨烯分散液在静置一周后有最大的相对浓度, 具有最好的分散稳定性。

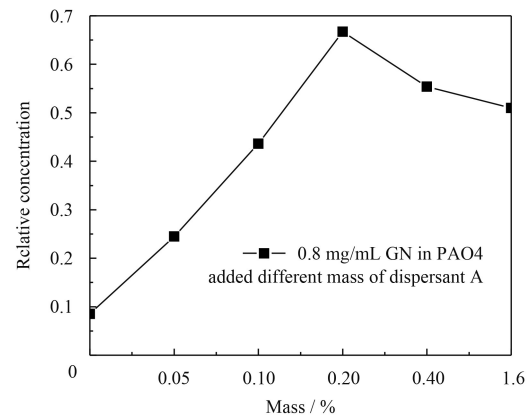


图 4 石墨烯的相对浓度随分散剂质量分数的变化

Fig.4 Relative concentration of GN dispersed in PAO4 added different mass of dispersant A

2.3 摩擦学性能研究

图 5 是在 PAO4 中添加不同浓度石墨烯的分散液的摩擦因数。随着摩擦试验的进行, 摩擦因数呈现先增大后减小的趋势, 平稳期的摩擦因数约为 0.12。当石墨烯的添加量小于 0.4 mg/mL 时, 相对于基础油的摩擦因数并没有表现出明显的变化, 随着浓度继续增加, 摩擦试验跑合期明显缩短, 且跑合期的平均摩擦因数降低。当石墨

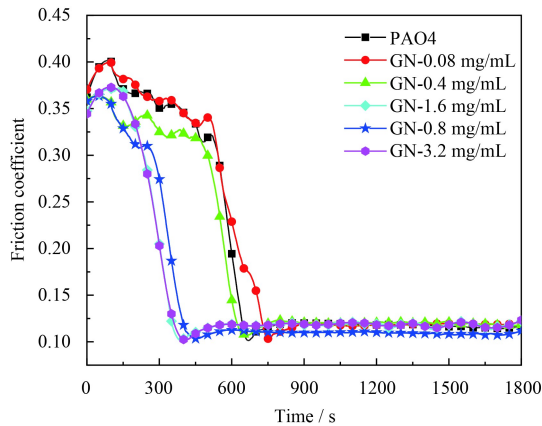


图5 不同浓度石墨烯加入到 PAO4 中的摩擦因数

Fig.5 Friction coefficient curves of different concentration of GN in PAO4

烯浓度为 0.8 mg/mL 时, 跑合期由 670 s 缩短至 450 s, 当浓度进一步增加, 跑合期并没有继续缩短。由于摩擦副表面存在宏观和微观缺陷, 粗糙度大, 在启动摩擦时, 表面微凸体互相接触, 实际接触峰点压力高, 摩擦因数大。石墨烯能够吸附并填充至摩擦副表面的凹坑, 降低粗糙度, 改善接触表面的形态, 从而提升摩擦性能、缩短跑合期并降低摩擦因数。而随着浓度的进一步增加, 石墨烯固体颗粒易发生团聚, 不利于减摩性能的提升。

图 6 是同时添加了分散剂 A(质量分数为 0.2%) 和不同浓度石墨烯的基础油分散液的摩擦因数。可以看出, 在 PAO4 基础油中只添加分散剂 A, 润滑油初始阶段的摩擦因数会降低, 跑合期也会明显缩短。这是因为分散剂 A 分子结构中存在极性的多乙烯多胺基团, 这有助于其在摩擦过程中吸附在摩擦表面, 形成分子膜而具有润滑性。在此基础上加入石墨烯, 浓度达到 0.8 mg/mL

后, 跑合期可进一步缩短, 相比只加入分散剂 A 的基础油, 缩短了 200 s 左右。随着试验的进行, 几种样品的摩擦因数均稳定在 0.12 左右, 说明分散剂 A 和石墨烯并不能降低润滑油在稳定摩擦阶段的摩擦因数。上述结果表明: 在一定浓度范围内, 石墨烯可有效缩短润滑油的摩擦跑合期。分散剂 A 不仅可以提升石墨烯在油中的分散稳定性, 同时也可以缩短润滑油的跑合期。

为了进一步探究石墨烯和分散剂 A 对润滑油摩擦学性能的影响, 测试了含有 0.8 mg/mL 石墨烯和 0.2% 分散剂 A 的 PAO4 分散液在不同载荷下的摩擦因数, 结果如图 7 所示。在 10、15 和 20 N 载荷下, 润滑油的摩擦跑合期分别从 2600、3300 和 4200 s 缩短至 900、1200 和 2100 s。这个结果表明, 石墨烯和分散剂 A 在试验条件范围内可有效缩短摩擦跑合期, 改善润滑油的减摩性能。

通过测试钢板磨痕的磨损体积, 研究了石墨

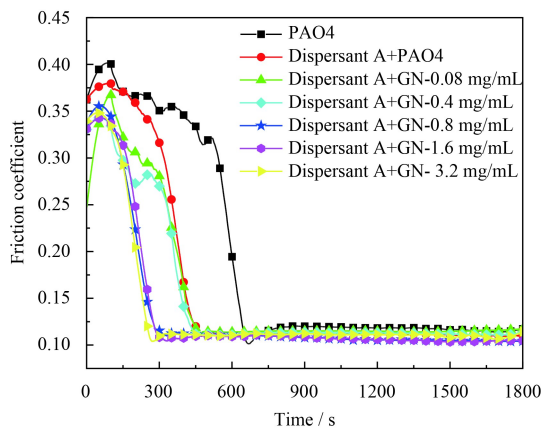


图6 不同浓度石墨烯加入到添加了分散剂的 PAO4 中的摩擦因数

Fig.6 Friction coefficient curves of different concentration of GN in PAO4 added dispersant A

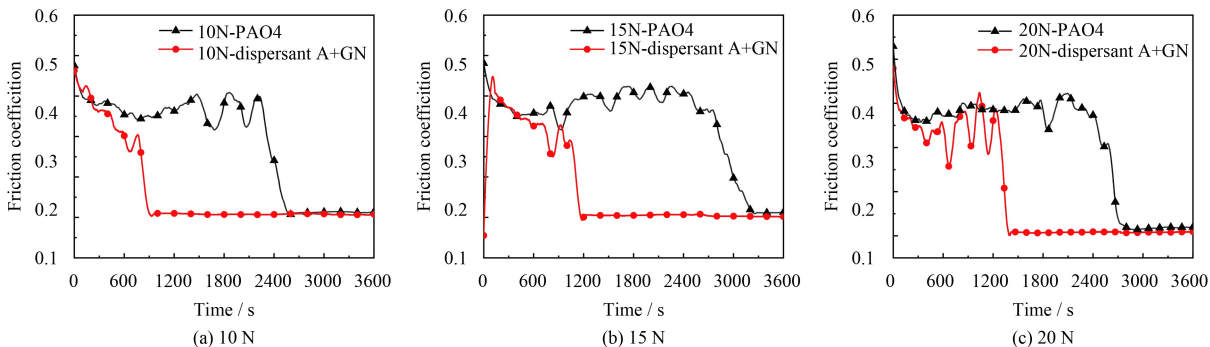


图7 PAO4, 添加了 0.2% 分散剂和 0.8 mg/mL 石墨烯的 PAO4 在不同载荷下的摩擦因数

Fig.7 Friction coefficient curves of PAO4 and PAO4 added 0.2% dispersant and 0.8 mg/mL GN at various applied loads

烯和分散剂 A 对基础油抗磨性能的影响, 结果如图 8 所示。只添加石墨烯的分散液样品, 钢板的磨损体积在石墨烯浓度为 0.8 mg/mL 时最低, 相比 PAO4 基础油降低了 40%, 继续增加浓度, 磨损体积反而变大。这是因为石墨烯浓度过高, 容易自身团聚或与金属磨屑团聚, 形成磨粒磨损, 从而降低抗磨性能^[15-16, 18]。当在润滑油中添加分散剂 A, 磨损体积明显降低, 再加入石墨烯之后, 磨损体积进一步减小, 相比 PAO4 基础油最多减少了 55%。同时添加石墨烯和分散剂 A 获得了最小的磨损量, 这说明二者联用具有抗磨协同作用。值得一提的是, 使用分散剂后, 随着石墨烯的浓度继续增加, 钢板的磨损体积并没有变大。推测原因是分散剂 A 使石墨烯在润滑油中稳定分散, 克服团聚问题, 不易形成磨粒磨损。

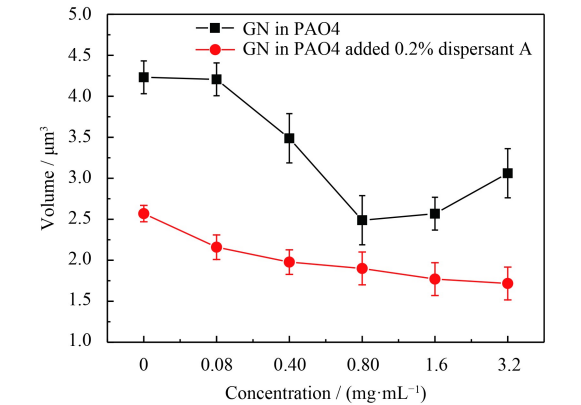


图 8 石墨烯在 PAO4 和添加了分散剂的 PAO4 中的浓度对磨损体积的影响

Fig.8 Wear volume as a function of the concentration of GN in PAO4 and PAO4 added dispersant A

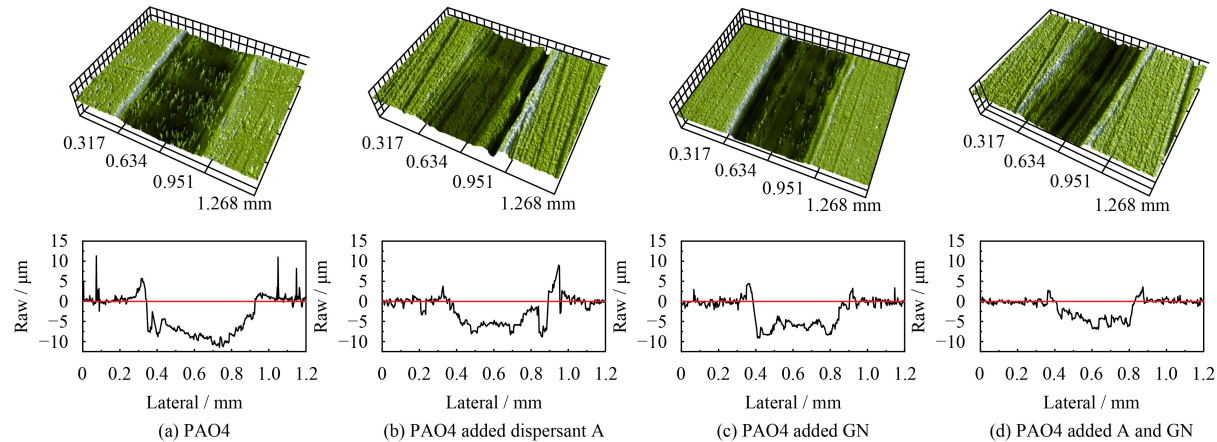


图 9 不同样品磨痕的 3D 形貌和相应的磨痕深度曲线

Fig.9 3D micrographs and corresponding height profile images of wear tracks lubricated by different samples

图 9 给出不同样品的磨痕三维轮廓图和相应的磨痕深度。对比发现, PAO4 基础油摩擦试验产生的磨痕宽度较宽, 深度最大达到约 15 μm; 分别添加了一定浓度的分散剂 A 或石墨烯后, 磨痕宽度有所减小, 深度大致在 10 μm; 同时添加 0.2% 的分散剂 A 和最佳浓度 (0.8 mg/mL) 的石墨烯后, 磨痕宽度和深度达到最小, 最深在 8 μm 左右。这进一步说明了分散剂 A 和石墨烯协同作用提升润滑油的抗磨性能。

图 10 是不同样品进行摩擦试验的磨损表面 SEM 及 EDS 分析结果。研究发现, 仅用 PAO4 基础油作润滑剂时, 磨痕表面凹凸不平, 平整度差; 当加入分散剂 A 和石墨烯后, 磨痕处粗糙度大大降低; 同时加入 0.2% 分散剂 A 和 0.8 mg/mL 石墨烯的样品具有最好的抗磨效果, 磨痕表面较平滑。EDS 结果表明, 抗磨效果最好的样品磨痕表面 C 元素含量和 O 元素含量明显高于其他样品。

图 11 为对应的 XPS 分析谱图, 结果显示, 添加石墨烯和分散剂 A 的样品磨痕表面的 C 元素和 O 元素较高, 这与 EDS 结果一致, 说明摩擦表面的 C、O 元素含量越高, 样品的减摩抗磨性能越好。推测原因是石墨烯在金属表面发生吸附, 并有部分填充至表面凹坑, 表面碳氧含量增加, 石墨烯在表面形成减摩层, 有效阻止摩擦副的直接接触, 从而达到减摩抗磨效果。Fe 2p 在 710 eV 位置的峰值证明氧化铁的存在^[24], Fe 元素含量有所下降说明石墨烯吸附在金属表面减少了金属摩擦副表面在摩擦过程中的氧化。

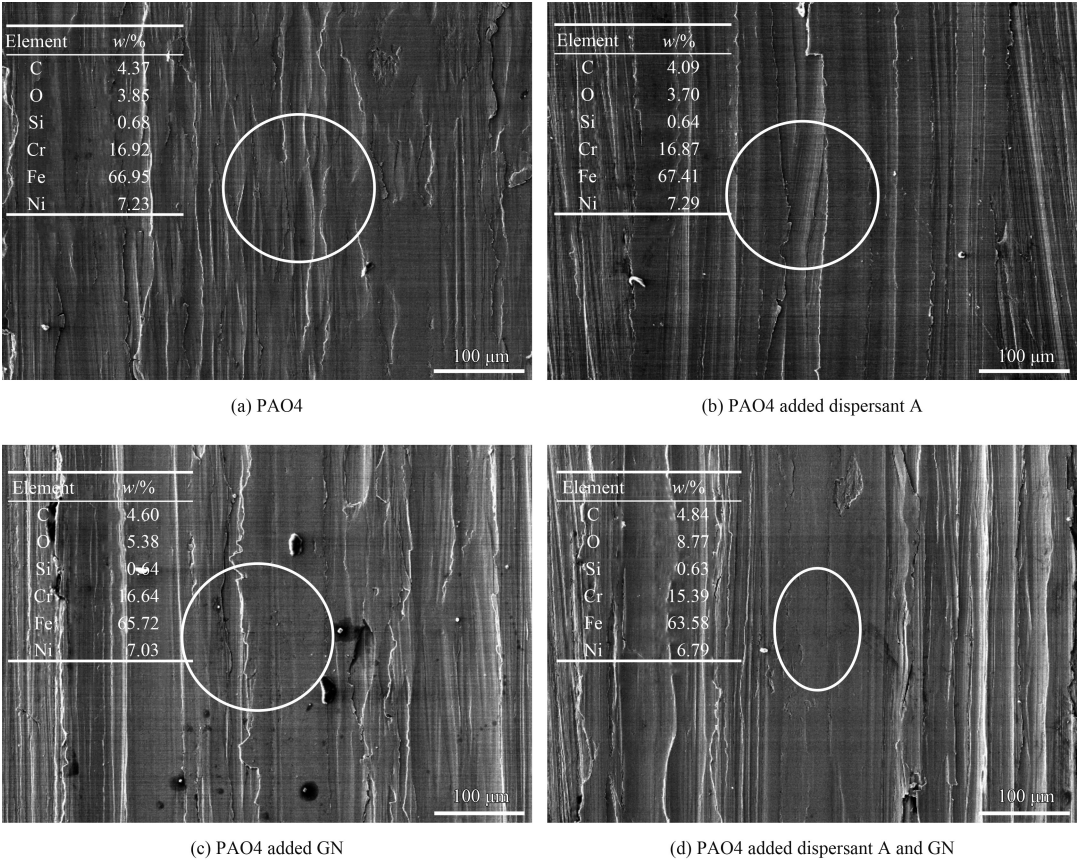


图 10 不同样品磨痕的 SEM 形貌和 EDS 分析结果

Fig.10 SEM micrographs and EDS analysis of wear tracks lubricated by different samples

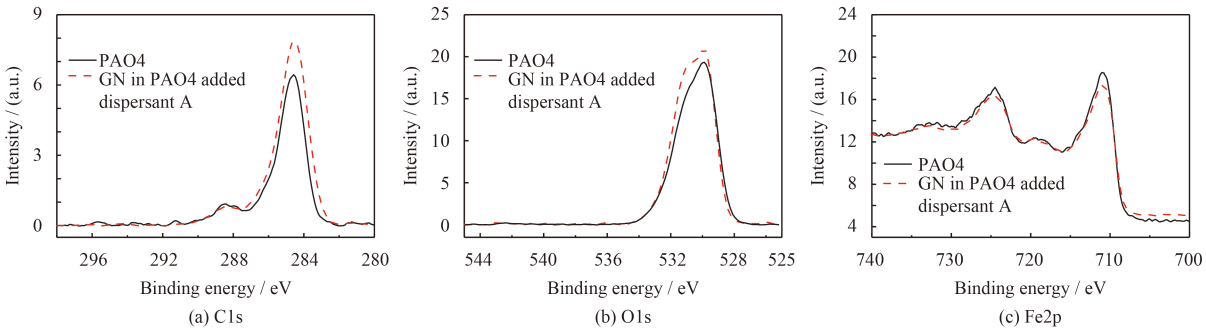


图 11 不同样品磨痕表面的 XPS 谱图的 C1s, O1s 和 Fe2p

Fig.11 XPS spectra of C1s, O1s, Fe2p of wear tracks of different samples

3 结 论

(1) 采用超声将石墨烯均匀分散在 PAO4 基础油中，分散剂 A 可显著提升石墨烯在基础油中的分散稳定性。当分散剂 A 质量分数为 0.2% 时，可使 0.8 mg/mL 的石墨烯稳定分散在基础油中，分散液静置一周后相对浓度保持在 0.65 以上。

(2) 石墨烯和分散剂 A 均可提升基础油的减摩抗磨性能。当同时添加 0.2% 分散剂 A 和 0.8 mg/mL 石墨烯，减摩抗磨性能最佳，相比 PAO4 基础

油，跑合期缩短了 60%，磨损体积减少了 55%。

(3) 分散剂 A 克服石墨烯在基础油中的团聚问题，抑制磨粒磨损的发生，二者联用具有协同作用，显著改善基础油的摩擦学性能。

参考文献

[1] GEIM A K N, NOVOSELOV K S. The rise of graphene[J]. Nature Materials, 2007, 6(3): 183191.
[2] LEE C, WEI X, KYSAR J W, et al. Measurement of the

- elastic properties and intrinsic strength of mon-olayer graphene[J]. *Science*, 2008, 321(5887): 385-388.
- [3] STANKOVICH S, DIKIN D A, PINER R D, et al. Synthesis of graphene-based nanosheets via chemical reduction of exfoliated graphite oxide[J]. *Carbon*, 2007, 45(7): 1558-1565.
- [4] 傅强, 包信和. 石墨烯的化学研究进展[J]. 科学通报, 2009, 54(18): 2657-2666.
- FU Q, BAO X H. Progress in graphene chemistry[J]. *Chinese Science Bulletin (Chinese Ver)*, 2009, 54(18): 2657-2666 (in Chinese).
- [5] 陈永胜, 黄毅. 纳米科学与技术: 石墨烯——新型二维碳纳米材料[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- CHEN Y S, HUANG Y. Graphene: new two dimensional carbon nanomaterial[M]. Beijing: Science Press, 2015 (in Chinese).
- [6] 耿浩, 李金华, 刘宣勇. 石墨烯在表面工程领域的研究进展[J]. *中国表面工程*, 2015, 28(1): 4-14.
- GENG H, LI J H, LIU X Y. Research Progress on Graphene in Surface Engineering[J]. *China Surface Engineering*, 2015, 28(1): 4-14 (in Chinese).
- [7] 董世运, 徐滨士, 王玉江, 等. 石墨烯制备和应用中的表面科学与技术[J]. 中国表面工程, 2013, 45(11): 1421-1428.
- DONG S Y, XU B S, WANG Y J, et al. Surface Science and Technology on Preparation and Applications of Graphene[J]. *China Surface Engineering*, 2013, 45(11): 1421-1428 (in Chinese).
- [8] BERMAN D, ERDEMIR A, SUMANT A V. Few layer graphene to reduce wear and friction on sliding steel surfaces[J]. *Carbon*, 2013, 54(54): 454-459.
- [9] BERMAN D, ERDEMIR A, SUMANT A V. Reduced wear and friction enabled by graphene layers on sliding steel surfaces in dry nitrogen[J]. *Carbon*, 2013, 59(8): 167-75.
- [10] DOU X, KOLTONOW A R, HE X, et al. Self-dispersed crumpled graphene balls in oil for friction and wear reduction[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(6): 1528.
- [11] FILLETER T, MCCHESENEY J L, BOSTWICK A, et al. Friction and dissipation in epitaxial graphene films[J]. *Physical Review Letters*, 2009, 102(8): 086102.
- [12] LIN J, WANG L, CHEN G. Modification of graphene platelets and their tribological properties as a lubricant additive[J]. *Tribology Letters*, 2011, 41(1): 209-215.
- [13] 贾园, 颜红侠, 公超, 等. 石墨烯的表面改性及其在摩擦领域中的应用[J]. *材料导报*, 2013, 27(5): 18-21.
- JIA Y, YAN H X, GONG C, et al. The surface modification of graphene and its application in the friction field[J]. *Materials Review*, 2013, 27(5): 18-21 (in Chinese).
- [14] 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 of tribology of graphene and graphene-based composite lubricating materials[J]. *Tribology*, 2014, 34(1): 93-112 (in Chinese).
- [15] ZHANG W, ZHOU M, ZHU H, et al. Tribological properties of oleic acid-modified graphene as lubricant oil additives[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2011, 44(20): 205303.
- [16] CHOUDHARY S, MUNGSE H P, KHATRI O P. Dispersion of alkylated graphene in organic solvents and its potential for lubrication applications[J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2012, 22(39): 21032.
- [17] ISMAIL N A, BAGHERI S. Highly oil-dispersed functionalized reduced graphene oxide nanosheets as lube oil friction modifier[J]. *Materials Science & Engineering B*, 2017, 222: 34-42.
- [18] ESWARAIH V, SANKARANARAYANAN V, RAMAPRABHU S. Graphene-based engine oil nanofluids for tribological applications[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2011, 3(11): 4221-4227.
- [19] 张荷, 黄卿, 周旭光. 无灰分散剂的合成现状及研究进展[J]. 润滑油, 2017, 32(6): 26-33.
- ZHANG H, HUANG Q, ZHOU X G. Synthesis status and research progress of ashless dispersant[J]. *Lubricating Oil*, 2017, 32(6): 26-33.
- [20] 吴娟霞, 徐华, 张锦. 拉曼光谱在石墨烯结构表征中的应用[J]. 化学学报, 2014, 72(3): 301-318.
- WU J X, XU H, ZHANG J. Raman spectroscopy of graphene[J]. *Acta Chimica Sinica*, 2014, 72(3): 301-318 (in Chinese).
- [21] FERRARI A C, BASKO D M. Raman spectroscopy as a versatile tool for studying the properties of graphene[J]. *Nature Nanotechnology*, 2013, 8(4): 235-246.
- [22] 郑帅周, 周琦, 杨生荣, 等. 氟化石墨烯的制备及其作为润滑油添加剂的摩擦学性能研究[J]. 摩擦学学报, 2017, 37(3): 402-408.
- ZHENG S Z, ZHOU Q, YANG S R, et al. Preparation and tribological properties of fluorinated graphene nanosheets as additive in lubricating oil[J]. *Tribology*, 2017, 37(3): 402-408 (in Chinese).
- [23] 刘景富, 陈海洪, 夏正斌, 等. 纳米粒子的分散机理、方法及应用进展[J]. *合成材料老化与应用*, 2010, 39(2): 36-40, 60.
- LIU J F, CHEN H H, XIA Z B, et al. Advance on the nanoparticles, dispersion mechanism, methods and application[J]. *Synthetic Materials Aging and Application*, 2010, 39(2): 36-40, 60.
- [24] ZHANG H, XIA Y, LIU X, et al. Effect of nitrogen atoms number and spatial location on tribological properties of nucleobase derivatives[J]. *Tribology Letters*, 2016, 61(3): 30(1-10).