碳纳米润滑添加剂的维度与尺寸对聚四氟乙烯-水润滑体系的摩擦学作用规律与机制研究

汤金柱^{1*}, 陈术清¹, 刘语¹, 李航¹, 赵安宁¹, 权鑫¹, 丁奇^{2*}

1. 长江师范学院材料科学与工程学院, 重庆 408100;

2. 中国科学院兰州化学物理研究所, 固体润滑国家重点实验室, 兰州 730000

* E-mail: tangjinzhu11@163.com; dingqi@licp.cas.cn

收稿日期: 2019-12-28; 接受日期: 2020-01-20; 网络版发表日期: 2020-04-17

重庆市科委基础研究与前沿技术计划(编号: cstc2018jcyjAX0755)、国家自然科学基金(批准号: 51705508)、春晖计划和固体润滑国家重点实验室开放课题(编号: LSL-1706)资助项目

摘要 选取二维氧化石墨烯、一维羧基化碳纳米管、零维碳纳米颗粒和碳点作为水润滑添加剂, 研究了碳纳米材料对聚四氟乙烯(PTFE)自配副水润滑性能的影响, 探讨了碳纳米材料维度与尺寸的作用机制. 结果表明: 去离子水润滑剂中添加一定量不同维度与尺寸的碳纳米材料可以有效抑制PTFE摩擦副的滑移和解脱, 且不同碳纳米材料因性能和形貌结构的差异展现出不同程度的作用效果. 其中片层状氧化石墨烯可以在摩擦副表面形成连续且相对致密的润滑膜, 较其他碳纳米材料展现出更优异的润滑性能; 由于黏附作用, 基于纳米轴承作用机理的碳纳米管、碳纳米颗粒和碳点难以发挥其减摩作用, 反而由于黏附层的磨粒作用和强层间作用, 使润滑体系的摩擦系数升高.

关键词 水润滑, PTFE, 碳纳米润滑添加剂, 摩擦, 磨损

1 引言

润滑剂的使用可以显著降低机械部件的摩擦磨损, 提高机械传动效率, 延长机械部件的使用寿命, 有力保障机械设备的安全、长效和稳定运行. 目前, 绝大多数液体润滑剂由矿物油组成, 存在能源危机和环境污染等问题. 随着世界石油储量的不断减少和环保法规要求日益严格, 研究与开发一种环境友好、可替代传统矿物基润滑油的高性能润滑剂势在必行.

水具有环保无污染、来源广泛、成本低廉、可再生、不燃烧、冷却性能好等优点, 在液压传动、金属加工、轴承等领域的润滑方面有着广阔的发展和应用前景, 是一种最具发展潜力的润滑介质, 因而许多国家都在大力发展水基润滑剂^[1]. 然而, 水是一种低黏度介质, 其润滑性能差, 且具有很强的腐蚀性, 容易引起金属摩擦副材料的腐蚀磨损, 这些缺点在很大程度上限制了水基润滑剂的使用范围. 在实际应用中, 必须向水润滑介质中添加水溶性添加剂, 以弥补水润滑介质

引用格式: 汤金柱, 陈术清, 刘语, 等. 碳纳米润滑添加剂的维度与尺寸对聚四氟乙烯-水润滑体系的摩擦学作用规律与机制研究. 中国科学: 技术科学, 2020, 50: 1115–1122
Tang J Z, Chen S Q, Liu Y, et al. Effects of dimensions and size of carbon nano-additives in water-based lubricants on the tribological behavior for polytetrafluoroethylene (PTFE) friction pair (in Chinese). Sci Sin Tech, 2020, 50: 1115–1122, doi: 10.1360/SST-2019-0440

的缺陷, 从而改善水润滑介质的综合性能. 因此, 研究开发高性能且环境友好型水基润滑添加剂是提升水基润滑剂综合性能, 拓展其使用范围的关键^[2].

基于对未来环境友好润滑体系的关注, 关于不含S和P的新型“绿色”水基润滑添加剂的设计已成为研究热点, 其中代表性的润滑添加剂是纳米微粒. 纳米材料具有特殊的表面效应、尺寸效应和界面效应, 在润滑添加剂方面展现环境友好性、良好的减摩抗磨作用和优异的承载能力^[3,4]. 在众多的纳米材料中, 碳纳米材料具有化学稳定性高、自润滑和力学性能优异等优点, 展现出最优的水基减摩抗磨效应^[5~11]. Kinoshita等人^[7]研究了氧化石墨烯(GO)水基润滑添加剂的摩擦学性能, 发现氧化石墨烯在不锈钢/碳化钨的摩擦副表面生成保护膜, 使摩擦系数和磨损率显著降低. Xie等人^[12]研究发现向水添加石墨烯和氧化石墨烯可以提高水润滑介质的减摩抗磨性能. Hao等人^[9]制备了聚丙烯酰胺改性碳纳米管, 通过摩擦实验考察其作为水基润滑添加剂的性能, 发现该水基润滑添加剂具有良好的承载能力和优异的减摩抗磨性能. 此外, 新型零维材料——碳点在水基润滑添加剂领域也展现出巨大的应用潜质^[6,8,10,11,13,14]. 如, Wang等人^[6]研究发现碳点对不锈钢-水润滑体系展现出优异的水基润滑性能和缓腐蚀性能. Liu等人^[11]研究发现离子液改性碳点具有优异的抗磨减摩性能, 显著降低轴承钢-水润滑体系的摩擦磨损. 但也有研究结果表明添加碳纳米材料恶化了水的润滑性能, 如Elomaa等人^[15]探究了氧化石墨烯作为水基润滑添加剂对不锈钢/DLC摩擦副摩擦学性能的影响, 研究结果表明添加氧化石墨烯可以降低润滑体系的摩擦系数和DLC薄膜的磨损率, 却增大了钢球对偶的磨损. 最近, 我们考察对比了氧化石墨烯和碳点两种碳纳米材料作为水基润滑添加剂的摩擦学性能, 发现添加氧化石墨烯恶化了润滑体系的摩擦学性能, 而碳点由于其纳米轴承作用和吸附修复作用, 在DLC自配副界面展现出优异的减摩抗磨效果^[8]. 可见, 碳纳米材料的水基润滑效果具有摩擦副敏感性, 且受尺寸和形貌的影响, 这主要是因为维度决定了其润滑机制, 如二维主要是剪切成膜, 球形碳纳米主要是“纳米轴承”等, 而摩擦副表面性能是影响纳米润滑添加剂作用效果的重要影响因素^[16].

从上述讨论可以看出, 对于常用水润滑摩擦副材料, 必须首先明确维度和尺寸对碳纳米材料润滑添加

剂作用效果的影响规律及作用机制. 在此基础上, 才能够通过碳纳米材料的表面构效关系进一步优化其作用性能. 然而, 系统研究碳纳米维度和尺寸的作用机制的工作相对较少. 基于此, 本文选取4种具有典型代表性结构的碳纳米材料作为水基润滑添加剂, 以聚四氟乙烯(PTFE)为摩擦副, 探究不同维度碳纳米材料的作用效果和机制, 并利用结构和形貌相似, 而尺寸不同的碳纳米颗粒和碳点, 明确尺寸对润滑效果的影响规律.

2 实验

2.1 实验材料的制备与选取

以去离子水为润滑介质, 选取4种具有典型代表性结构的碳纳米材料: 二维材料氧化石墨烯、一维材料羧基化碳纳米管(Carboxyl MWCNTs)、零维材料碳纳米颗粒(CNPs)和碳点(CDs)为润滑添加剂, 重点考察碳纳米材料的维度和尺寸对PTFE自配副水润滑性能的影响规律. 其中羧基化碳纳米管购买自南京先丰纳米材料有限公司, 其纯度为99.8%; 碳纳米颗粒购买自苏州碳丰石墨烯科技有限公司, 其纯度为99.9%; 以天然鳞片石墨为碳源, 利用改进的Hummers方法制备了氧化石墨烯和碳点^[8,17]. 除碳纳米颗粒水分散性较差外, 其他3种碳纳米材料具有良好的水分散性和稳定性, 尤其是氧化石墨烯和碳点具有良好的水溶性. 考虑到添加量是影响润滑添加剂作用效应的重要因素, 选取0.1 wt.%和1.0 wt.%两种代表性添加量, 分别在低添加量和高添加量条件下, 横向比较PTFE在不同维度碳纳米材料分散液中的摩擦学行为, 探究碳纳米材料的维度和尺度的作用规律, 对于同一种碳纳米材料, 则纵向对比PTFE在低添加量和高添加量分散液中的摩擦学性能, 明确碳纳米材料的润滑机制.

2.2 实验方法

利用UMT-Trilobal往复式球-盘摩擦磨损试验机考察碳纳米材料分散液的摩擦学性能. 试验条件为大气、室温环境, 相对湿度为RH 40%~42%, 环境温度为20℃~25℃. 对偶件采用Φ 6 mm的PTFE球, 载荷为5 N, 往复平均滑动速度为0.05 m/s, 测试时间为30 min, 总行程为90 m. 摩擦测试后, 超声清洗PTFE表面, 采用VHX-6000型超景深三维显微镜和JEM-5600LV型扫描电子显微镜对磨痕形貌进行分析.

3 结果与讨论

3.1 碳纳米材料形貌

利用Tecnai G2型透射电子显微镜(transmission electron microscope, TEM)对氧化石墨烯、羧基化碳纳米管、碳纳米颗粒和碳点进行形貌分析, 结果如图1所示. 从图1(a)可以看出, 氧化石墨烯具有很薄的卷曲片状多层结构, 其边缘存在翘起的片层和突起的褶皱. 羧基化碳纳米管为典型的中空层状结构, 具有均匀的纳米级孔径(内径为5.4 nm左右, 外径为13 nm左右). 如图1(b)所示, 羧基化碳纳米管存在弯曲和互相缠绕现象. 碳纳米颗粒具有典型的洋葱碳结构, 其平均粒径为30~40 nm. 从图1(d)中可以看出, 碳点是平均粒径8~10 nm的类球形洋葱碳.

本文拟利用氧化石墨烯、碳纳米管和碳纳米颗粒分析碳纳米材料的维度对PTFE-水润滑体系摩擦学行为的影响规律, 利用具有相似结构和形貌的碳纳米颗粒和碳点, 分析碳纳米材料尺寸的摩擦学作用机制. 对比图1(c)和(d)不难发现, 相对碳纳米颗粒的团聚现象, 碳点的介质分散性更好.

3.2 碳纳米材料对PTFE-水润滑体系摩擦磨损性能的影响

图2(a)和(b)分别为低添加量(0.1 wt.%)和高添加量(1.0 wt.%)的碳纳米材料悬浮液润滑条件下, PTFE摩擦副的摩擦系数(coefficient of friction, COF)动态曲线. 在所有的润滑体系中, 仅氧化石墨烯具有轻微的减摩作用, 而其他碳纳米材料均使润滑体系的摩擦系数显著升高, 表明碳纳米材料的维度对PTFE-水润滑体系的摩擦性能影响显著. 其中在高添加量羧基化碳

图1 透射电子显微镜照片, 插图为高分辨透射电子显微镜照片. (a) 氧化石墨烯; (b) 碳纳米管; (c) 碳纳米颗粒; (d) 碳点
Figure 1 TEM images with high resolution transmission electron microscope (HRTEM) images (inset) of (a) GO, (b) Carboxyl MWCNTs, (c) CNPs and (d) CDs.

纳米管分散液中, PTFE-水润滑体系具有最高摩擦系数, 其平均摩擦系数约为0.25, 相对纯去离子水润滑条件(0.14左右), 增幅约为78.6%. 碳纳米颗粒的增摩作用次之, 使润滑体系的平均摩擦系数增大至0.24左右, 增幅约为71.4%.

与碳纳米颗粒不同, 碳点的增摩作用并不显著, 尤其是在高添加量下, 仅使摩擦系数增大至0.15左右, 相对去离子水作用增幅约为7.4%, 表明碳纳米颗粒尺寸是影响其润滑作用机制的另一个重要影响因素. 对比图2(a)与(b)可以看出, 除碳纳米管, 在相同碳纳米材料悬浮液中, PTFE摩擦副在高添加量悬浮液中具有更低的摩擦动态曲线.

图3为PTFE摩擦副在低添加量和高添加量碳纳米材料分散液润滑条件下的磨损率. 如图3所示, 相对去

图2 (网络版彩图)PTFE摩擦副在(a)低添加量和(b)高添加量碳纳米材料分散液中的摩擦曲线

Figure 2 (Color online) COF variation in PTFE contacts with (a) low and (b) high additive concentrations as a function of sliding time.

图3 (网络版彩图)在低添加量和高添加量碳纳米材料分散液润滑条件下, PTFE摩擦副的磨损率

Figure 3 (Color online) Wear rates of PTFE contacts lubricated with water-dispersed carbon nanomaterials at low and high additive concentrations.

离子水作用, PTFE仅在高添加量氧化石墨烯悬浊液中具有较低的磨损率. 高添加量氧化石墨烯(1.0 wt.%)可以降低PTFE自配副的磨损率幅值为50%. 然而, 向去离子水中引入羧基化碳纳米管、碳纳米颗粒和碳点, 配副的磨损率均升高, 其中羧基化碳纳米管的增幅作用最大, 碳纳米颗粒次之, 碳点再次之. 需要指出的是, 与摩擦系数结果相似, 相对低添加量, PTFE摩擦副在高添加量碳纳米材料悬浮液中具有更低的磨损率.

对以上摩擦磨损实验结果进行综合分析可以看出: 对于同一种碳纳米润滑材料, 高添加量润滑体系具有更优的综合摩擦学性能; 在所有的润滑分散液中, 高添加量氧化石墨烯分散液展现出最优的减摩抗磨性能, 而其他碳纳米材料均不同程度地恶化了PTFE-水润滑体系的摩擦学性能. 可见, 浓度、维度和尺寸均是影响润滑体系的重要影响因素, 为方便讨论, 以高添加量润滑体系为研究对象, 分别从维度和尺寸两个角度探讨碳纳米材料作为水润滑添加剂的作用机制.

3.3 维度对PTFE-水润滑体系磨损形貌的影响

图4为高添加量碳纳米材料分散液润滑条件下, PTFE自配副进行滑动摩擦磨损试验之后, 表面磨痕光学显微镜照片和磨痕轮廓曲线. 从**图4(a)**中可以看出, 磨痕表面存在不连续较浅犁沟(最大深度约为13.2 μm), 向去离子水中引入氧化石墨烯后, 磨痕犁沟深度变浅(**图4(b)**, 约8.0 μm). 磨痕表面出现连续氧化

图4 (网络版彩图)在不同分散液摩擦后, PTFE摩擦副的磨痕光学显微镜照片和相应的二维轮廓曲线. (a) 去离子水; (b) 1.0 wt.%氧化石墨烯分散液; (c) 1.0 wt.%羧基化碳纳米管分散液; (d) 1.0 wt.%碳纳米颗粒分散液

Figure 4 (Color online) The optical micrographs of worn PTFE surfaces lubricated with (a) deionized water, (b) water with 1.0 wt% GO, (c) water with 1.0 wt% Carboxyl MWCNTs, and (d) water with 1.0 wt% CNPs; insets are corresponding surface profiles obtained by MicroXAM 3D profiler.

石墨烯保护膜, 有效隔绝了摩擦副间的直接接触, 起到减摩抗磨作用. 向去离子水中添加羧基化碳纳米管和碳纳米颗粒后, 磨痕表面发生明显变化, 存在大量的平行犁沟, 为典型的磨粒磨损形貌, 说明羧基化碳纳米管和碳纳米颗粒促进了摩擦副间的磨粒磨损. 相对羧基化碳纳米管分散液, PTFE在碳纳米颗粒分散液中的磨痕深度较浅, 说明碳纳米颗粒的磨粒作用相对较弱.

利用电子显微镜对PTFE表面磨痕形貌进行进一步分析, 结果如**图5**所示. 从**图5(a)**中可以看出, 在纯去离子水润滑条件下, PTFE磨痕表面存在大量形状不规则的凹坑, 为典型的黏着磨损形貌. 在氧化石墨烯分散液润滑条件下, PTFE磨痕表面光滑, 无裂纹、剥落等材料失效特征, 展现出优异的结构稳定性和低磨损特性, 这可能是由于氧化石墨烯在摩擦副表面形成保护膜. 向去离子水添加羧基化碳纳米管和碳纳米颗粒都可以抑制PTFE摩擦副的黏着磨损, 然而, 磨痕表面出现大量平行犁沟, 说明羧基化碳纳米管和碳纳米颗粒在接触界面充当磨粒, 促进了摩擦副的磨损. 如**图5(c)**和**(d)**所示, 磨痕表面黏附大量相应的碳纳米材料, 但与氧化石墨烯添加剂不同, 展现出间断性的纳米堆叠形貌, 显然与氧化石墨烯保护膜相比, 羧基化碳纳米管和碳纳米颗粒黏附层的保护作用较弱. 此外, 摩擦实验结果表明: 相对低添加量碳纳米悬浮液, 高添加量碳纳米悬浮液的摩擦学性能较好. 这一结果不符合

图5 不同分散液中摩擦后, PTFE摩擦副的磨痕SEM照片. (a) 去离子水; (b) 1.0 wt.%氧化石墨烯分散液; (c) 1.0 wt.%羧基化碳纳米管分散液; (d) 1.0 wt.%碳纳米颗粒分散液

Figure 5 SEM images of worn PTFE surfaces lubricated with (a) deionized water, (b) water with 1.0 wt% GO, (c) water with 1.0 wt% Carboxyl MWCNTs, and (d) water with 1.0 wt% CNPs.

材料磨粒磨损变化机制, 表明碳纳米材料在PTFE表面具有特殊的摩擦学作用.

为了进一步明确碳纳米材料润滑添加剂的作用机制, 利用高分辨电子显微镜对PTFE磨痕表面进行局域形貌细节分析, 结果如图6所示. 从图6(a)可以看出: PTFE在去离子水中的磨痕表面黏附着片状磨屑, 这主要是由于层状结晶结构的PTFE具有低内聚力和低黏附力, 在摩擦过程中, 分子层间易滑移和解脱^[18]. 而在氧化石墨烯悬浮液润滑条件下, 摩擦副表面连续致密保护膜的形成有效减少PTFE摩擦副界面间的直接接触, 从而起到抗磨作用(图6(b)). 此外, 氧化石墨烯具有层状纳米结构和良好的自润滑特性, 使得保护膜具有一定的减摩作用(图2(b)). 尽管羧基化碳纳米管和碳纳米颗粒均能黏附在PTFE表面形成纳米材料堆积层, 该堆积层可以阻碍摩擦副间的直接接触, 从而起到抑制摩擦副的黏着磨损的作用(图5(c)和(d)). 但是, 与氧化石墨烯形成的连续致密保护膜不同, 该黏附层主要以团聚体的形式存在, 如图6(c)和(d)所示, 摩擦后, 碳纳米管和碳纳米颗粒依然保持原有形貌, 堆积黏附在磨痕表面, 显然该黏附层易划伤摩擦副表面, 使润滑体系的摩擦系数和磨损率升高.

鉴于氧化石墨烯优异的摩擦学性能, 利用Raman光谱仪(Lab JY-HR800)表征氧化石墨烯保护膜的结构, 结果如图7所示, 磨痕表面出现氧化石墨烯特征谱图,

图6 摩擦后, PTFE摩擦副的磨痕高分辨SEM照片. (a) 去离子水; (b) 1.0 wt.%氧化石墨烯分散液; (c) 1.0 wt.%羧基化碳纳米管分散液; (d) 1.0 wt.%碳纳米颗粒分散液

Figure 6 High-magnification SEM images of worn PTFE surfaces lubricated with (a) deionized water, (b) water with 1.0 wt% GO, (c) water with 1.0 wt% Carboxyl MWCNTs, and (d) water with 1.0 wt% CNPs.

图7 (网络版彩图)氧化石墨烯保护膜的拉曼光谱

Figure 7 (Color online) Raman spectra of GO film on wear tracks.

进一步明确了氧化石墨烯在摩擦过程中形成保护膜机制. 然而, 相对原始石墨烯, 保护膜的G峰位置发生红移, 半峰宽明显增大, 且 I_D/I_G 的比值降低, 表明在摩擦过程中, 氧化石墨烯的结构趋于无序化. 这可能是由于摩擦力引起氧化石墨烯键合断裂使无序度增加.

3.4 尺寸对PTFE-水润滑体系磨损形貌的影响

如摩擦实验结果所示, 相对碳纳米颗粒, 小尺寸的碳点对PTFE-水润滑体系的增摩作用较弱. 图8给出了

图8 (网络版彩图)在1.0 wt.%碳点分散液中摩擦后, PTFE磨痕表面光学显微镜照片(a)和SEM照片(b)

Figure 8 (Color online) The optical micrographs (a) and the SEM images (b) of worn PTFE surfaces lubricated with water with 1.0 wt% CDs.

PTFE摩擦副在含碳点水润滑介质中摩擦后磨痕表面光学显微镜照片、SEM照片和高倍SEM照片。如图8(a)和(b)所示, 与碳纳米颗粒作用相似, 去离子水中添加碳点可以有效抑制PTFE的摩擦失效, 其磨损机制由黏着磨损转变为磨粒磨损。相对碳纳米颗粒悬浮液润滑条件, PTFE在碳点润滑介质中的犁沟深度更浅、宽度更窄(图7(a)和(b)), 这可能与碳纳米材料黏附状态和形貌有关。如图7(b)所示, 与黏附碳纳米颗粒的形貌不同, 黏附碳点为小颗粒, 主要分布在应力集中的犁沟底部。这与我们以前关于碳点水基润滑添加剂的研究结果相似, 主要是由于碳点分散性好(图1(d)), 仅在应力集中区域原位析出、团聚^[8]。

3.5 摩擦磨损机理讨论

基于以上讨论可知, 碳纳米材料润滑添加剂在PTFE摩擦副表面主要存在两种作用机制: 一方面, 充当磨粒, 恶化PTFE-水润滑体系的摩擦学性能, 使摩擦系数和磨损率升高; 另一方面, 在摩擦副表面形成黏附层, 减少摩擦副直接接触面积, 抑制PTFE的解脱和滑移, 降

低摩擦副的磨损。显然, 浓度、维度和尺寸是添加剂作用机制的主要影响因素。在低添加量碳纳米分散液润滑条件下, 处于接触界面的纳米材料数量有限, 无法减少/隔离PTFE摩擦副间的直接接触, 起不到抑制PTFE表面解脱作用, 反而以界面第三体存在于接触界面间, 划伤摩擦副表面, 恶化PTFE-水润滑体系的摩擦学性能。

对于高浓度碳纳米悬浮液, 黏附碳纳米材料的性能和形貌决定了碳纳米材料润滑添加剂的作用效果。如图9所示, 黏附碳纳米材料使接触界面由PTFE直接接触转变为黏附碳纳米材料直接接触和PTFE与黏附纳米颗粒间接触。对于层状氧化石墨烯, 由于剪切成膜特性, 易在摩擦副表面形成致密连续保护膜, 起到保护摩擦副的作用, 且氧化石墨烯具有自润滑特性, 不会因为接触界面材料的转变而使润滑体系的摩擦系数升高。对于羧基化碳纳米管和碳纳米颗粒, 由于黏附作用, 它们很难在摩擦副表面发生滚动, 而趋向于在界面间滑移, 因此基于“纳米轴承”机制的碳纳米材料失去其减摩效应, 反而因为接触界面材料的改变, 致使

图9 (网络版彩图)在摩擦过程中, 氧化石墨烯(a)、羧基化碳纳米管(b)和碳纳米颗粒(c)的作用机制

Figure 9 (Color online) Schematic of tribological action mechanisms of (a) GO, (b) Carboxyl MWCNTS and (c) CNPs during tribological tests.

润滑体系的摩擦系数升高. 相对易弯曲、缠绕且更大尺寸的羧基化碳纳米管(图1(c)), 碳纳米颗粒的界面滑移阻力较小, 展现出相对较小的摩擦阻力(图9(a)和(c)). 对于小尺寸碳点材料, 由于其原位析出、原位团聚的润滑特性, 相对碳纳米颗粒, 其黏附颗粒尺寸小、界面接触面积小, 减少了由于大颗粒的犁沟作用和界面材料转变的影响, 因此其增摩效应并不显著.

4 结论

本文选取4种典型碳纳米材料作为水基润滑添加剂, 考察了其维度和尺寸对聚四氟乙烯(PTFE)自配副摩擦过程中的作用效果和影响规律. 由于碳纳米材料

的黏附作用, 基于滚动润滑机制的羧基化碳纳米管、碳纳米颗粒和碳点丧失其润滑作用, 反而由于黏附层间强相互作用和黏附层的磨粒作用, 增大了摩擦力. 此外, 碳纳米材料形成的黏附层起到了隔离保护作用, 有效抑制了PTFE的滑移、解脱等结构失效形式的形成. 因此, 黏附层的形成与失效过程、致密性和分布决定了碳纳米材料的润滑效果. 高添加量氧化石墨烯水溶液具有稳定的黏附层形成, 其黏附层相对致密且具有自润滑作用, 因此展现出最优的减摩抗磨效应. 为进一步提高氧化石墨烯的水基润滑作用效果和明确其作用机制, 未来研究工作的重点是探究氧化石墨烯的结构和表面官能团对其黏附层的形成过程、致密性和分布的影响, 明确其构效关系.

参考文献

- 1 Ma L R, Zhang C H, Liu S H. Progress in experimental study of aqueous lubrication. *Chin Sci Bull*, 2012, 57: 2062–2069
- 2 Chinas-Castillo F, Lara-Romero J, Alonso-Núñez G, et al. Friction reduction by water-soluble ammonium thiometallates. *Tribol Lett*, 2007, 26: 137–144
- 3 Tang J Z, Ding Q, Zhang S W, et al. Improved tribological performance of amorphous carbon (a-C) coating by ZrO₂ nanoparticles. *Materials*, 2016, 9: 795
- 4 Kogovšek J, Kalin M. Various MoS₂, WS₂- and C-based micro- and nanoparticles in boundary lubrication. *Tribol Lett*, 2014, 53: 585–597
- 5 Kristiansen K, Zeng H, Wang P, et al. Microtribology of aqueous carbon nanotube dispersions. *Adv Funct Mater*, 2011, 21: 4555–4564
- 6 Hu Y, Wang Y, Wang C, et al. One-pot pyrolysis preparation of carbon dots as eco-friendly nanoadditives of water-based lubricants. *Carbon*, 2019, 152: 511–520
- 7 Kinoshita H, Nishina Y, Alias A A, et al. Tribological properties of monolayer graphene oxide sheets as water-based lubricant additives. *Carbon*, 2014, 66: 720–723
- 8 Tang J, Chen S, Jia Y, et al. Carbon dots as an additive for improving performance in water-based lubricants for amorphous carbon (a-C) coatings. *Carbon*, 2020, 156: 272–281
- 9 Pei X, Hu L, Liu W, et al. Synthesis of water-soluble carbon nanotubes via surface initiated redox polymerization and their tribological properties as water-based lubricant additive. *Eur Polym J*, 2008, 44: 2458–2464
- 10 Tang W, Wang B, Li J, et al. Facile pyrolysis synthesis of ionic liquid capped carbon dots and subsequent application as the water-based lubricant additives. *J Mater Sci*, 2019, 54: 1171–1183
- 11 Liu X, Huang Z, Tang W, et al. Remarkable lubricating effect of ionic liquid modified carbon dots as a kind of water-based lubricant additives. *Nano*, 2017, 12: 1750108
- 12 Xie H, Jiang B, Dai J, et al. Tribological behaviors of graphene and graphene oxide as water-based lubricant additives for magnesium alloy/steel contacts. *Materials*, 2018, 11: 206
- 13 Wang B, Tang W, Lu H, et al. Ionic liquid capped carbon dots as a high-performance friction-reducing and antiwear additive for poly(ethylene glycol). *J Mater Chem A*, 2016, 4: 7257–7265
- 14 Qiang R, Hu L, Hou K, et al. Water-soluble graphene quantum dots as high-performance water-based lubricant additive for steel/steel contact. *Tribol Lett*, 2019, 67: 64
- 15 Elomaa O, Singh V K, Iyer A, et al. Graphene oxide in water lubrication on diamond-like carbon vs. stainless steel high-load contacts. *Diamond Related Mater*, 2015, 52: 43–48
- 16 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. *Sci China Tech Sci*, 2013, 56: 152–157
- 17 Sun Y, Wang S, Li C, et al. Large scale preparation of graphene quantum dots from graphite with tunable fluorescence properties. *Phys Chem Chem Phys*, 2013, 15: 9907–9913
- 18 Li W J, You Y L, Li D X, et al. Tribological properties of PA6 composites modified with PTFE and UHMWPE (in Chinese). *Tribology*, 2013, 33: 123–128 [李文娟, 游一兰, 李笃信, 等. PTFE及UHMWPE改性PA6复合材料的摩擦学性能研究. *摩擦学学报*, 2013, 33: 123–128]

Effects of dimensions and size of carbon nano-additives in water-based lubricants on the tribological behavior for polytetrafluoroethylene (PTFE) friction pair

TANG JinZhu¹, CHEN ShuQing¹, LIU Yu¹, LI Hang¹, ZHAO AnNing¹, QUAN Xin¹ & DING Qi²

¹ College of Materials Science and Engineering, Yangtze Normal University, Chongqing 408100, China;

² State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

The tribological performances of two-dimensional graphene oxide (GO), one-dimensional carbon nanotubes (CNTs), zero-dimensional carbon nanoparticles (CNPs) and zero-dimensional carbon dots (CDs) as additives for water-lubricated PTFE/PTFE contacts are investigated, and the effects of dimensions and size on the tribological behavior carbon nano-additives are investigated systematically. The results show that the introduction of carbon nano-additives into water could inhibit slippage and stress crack of PTFE by form of the adhesive layer, but have different influence degree to the tribological actions due to the difference in properties and dimensions. Among all of carbon nano-additive, multilayer GO can be adsorbed and form a compact protective film on the surface of PTFE showing the most excellent tribological performance. CNTs, CNPs and CDs which usually show effect in friction-reducing based on nano-bearing effects, however, an adhesive layer which no slip and shear is observed form when friction occurs and cause undesirable abrasive wear.

water-based lubrication, PTFE, carbon nano-additives, friction, wear

doi: [10.1360/SST-2019-0440](https://doi.org/10.1360/SST-2019-0440)