

DOI: 10.3901/JME.2023.21.293

# 石墨烯及其复合纳米微粒作为润滑添加剂的研究进展\*

蒋正权<sup>1</sup> 杜新春<sup>1</sup> 金业铭<sup>1</sup> 余来贵<sup>2</sup> 闫明明<sup>3</sup> 仝玉萍<sup>1</sup>  
郝用兴<sup>1</sup> 张晟卯<sup>2</sup> 张平余<sup>2</sup>

(1. 华北水利水电大学材料学院 郑州 450045;  
2. 河南大学纳米材料工程研究中心 开封 475001;  
3. 华北水利水电大学机械学院 郑州 450045)

**摘要:** 自2004年石墨烯面世以来,世界各国对石墨烯的研究热情空前高涨,甚至有人将其称为“改变21世纪的材料”。综述了近年来石墨烯及其复合纳米微粒润滑添加剂的摩擦学研究进展,归纳总结了石墨烯单体结构、表面修饰以及复合纳米微粒的组成和润滑机制;指出石墨烯纳米微粒具有良好的摩擦学性能,是当前国际材料科学和摩擦学领域的研究热点之一,其产业化应用可望产生巨大的经济和社会效益;而石墨烯具有超薄纳米片层结构、优异的力学性能及突出的自润滑性能,在润滑添加剂领域的应用前景广阔。但石墨烯及其复合纳米微粒作为润滑添加剂目前仍然面临石墨烯的分散稳定性较差、摩擦过程中的实时服役状态不明确等问题;而实现纳米级石墨烯及其复合材料的绿色环保制备和应用,有助于推动节能减排和实现“双碳目标”,从而促进我国先进制造业的高质量发展。

**关键词:** 石墨烯; 复合纳米微粒; 润滑添加剂; 摩擦学

**中图分类号:** TH111

## Research Progress of Tribology for Graphene and Its Nanocomposites as Lubricating Additives

JIANG Zhengquan<sup>1</sup> DU Xinchun<sup>1</sup> JIN Yeming<sup>1</sup> YU Laigui<sup>2</sup> YAN Mingming<sup>3</sup>  
TONG Yuping<sup>1</sup> HAO Yongxing<sup>1</sup> ZHANG Shengmao<sup>2</sup> ZHANG Pingyu<sup>2</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045;  
2. Nanomaterials Engineering Research Center, Henan University, Kaifeng 475001;  
3. School of Mechanical Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045)

**Abstract:** Since the emergence in 2004, a great deal of enthusiasm has been dedicated to the research of graphene all over the world, and graphene is even named as "the material that changes the 21st century". The research progress in the tribology of graphene and its nanocomposite as lubricating additives is reviewed; and the monomer structure and surface modification of graphene as well as the composition and lubricating mechanism of graphene-based nanocomposite are summarized. It is pointed out that, as one of the hotspots in the field of material science and tribology, graphene nanoparticle has good tribological properties and its industrialization could give rise to enormous social and economic benefits; and graphene as a lubricating additive has promising prospect of

\* 国家自然科学基金(21805085)、河南省重点研发与推广专项(科技攻关)(212102210039)、中原科技创新领军人才(214200510024)和华北水利水电大学客座教授基金(4001-40734)资助项目。20221229 收到初稿, 20230509 收到修改稿

application, thanks to its ultra-thin nanosheet structure, excellent mechanical properties and outstanding self-lubricating ability. However, graphene and its nanocomposite as lubricating nano-additives still face problems such as poor dispersion stability of graphene, unclear real-time service state in the friction process, etc; and the realization of the preparation of nanoscale graphene and its composite by green and environmentally acceptable routes as well as their application could help to promote energy conservation and emission reduction, thereby promoting the achievement of the "carbon peaking and carbon neutralization goals" and the development of our country's advanced manufacturing industry at a high level.

**Key words:** graphene; nanocomposites; lubricating additive; tribology

## 0 前言

随着经济全球化的深入发展,生产要素在全球范围内不断流动,人们对能源的需求愈发强烈,同时也对机械设备的润滑性能提出了更高的要求。摩擦学作为机械工程的研究领域之一,通过减少或消除表面摩擦磨损造成的损失,提高经济效益,节约有效资源,践行“可持续发展”理念,维持人与环境之间的生态平衡。

随着我国从制造大国向制造强国的发展目标迈进,摩擦学专门知识对相关技术的指导作用及其重要性愈加凸显。摩擦和磨损是造成能量损失和机械失效的主要原因,主要发生在摩擦副的接触表面;在全球范围内,大约 25% 的能量损耗归因于摩擦,而近 80% 的机械失效归因于磨损。通过有效利用现有的润滑技术,有望将摩擦和磨损造成的能量损失分别减少约 40% 和 18%,同时减少 CO<sub>2</sub> 排放约 31.40 亿吨;相应的节约成本近百亿欧元<sup>[1-3]</sup>。而研制新型高性能润滑材料、开发先进润滑技术,既有利于减缓全球变暖速度,又可节省大量成本,有助于实现“碳达峰、碳中和”的目标。因此,实现对摩擦的调控以及可靠的润滑十分关键,研发具有完全自主知识产权的新型润滑材料和润滑技术意义重大。

使用润滑油脂进行合理润滑是降低摩擦、减少磨损的有效方式,而润滑添加剂则作为核心关键组分,大幅度影响着成品油脂的性能。传统润滑添加剂通常由小分子有机物组成,润滑能力有限,容易过热分解。为改善这一现状,新型的润滑剂不断出现,尤其是纳米添加剂的发现,为润滑添加剂提供了很多资源,可以起到更高效的减摩抗磨的作用。在润滑油脂中添加纳米微粒,如金属<sup>[4]</sup>、金属氧(硫)化物<sup>[5-6]</sup>、有机材料<sup>[7]</sup>、硅酸盐<sup>[8]</sup>、碳材料<sup>[9-10]</sup>等,使润滑油更加功能化,可显著提高其摩擦学性能。

自石墨烯发现以来,其以超薄的片层结构和优异的润滑性能而在摩擦学领域备受关注。当前,石

墨烯作为一种新型的碳纳米材料,在润滑领域中具有潜在的应用价值,同时石墨烯基复合纳米微粒代表了石墨烯的应用发展方向;相关研究取得了长足进展。

## 1 石墨烯纳米微粒

石墨烯是由  $sp^2$  杂化碳原子单层紧密排列形成的蜂巢晶格的一种新型碳材料,是目前世界公认的硬度最高的二维蜂窝状晶格结构的新材料<sup>[11]</sup>;其具有优良的电学<sup>[12]</sup>、热学、光学<sup>[13]</sup>等性能,在电子元件<sup>[14]</sup>、电池、液晶材料<sup>[15]</sup>、超级电容器、能源储存和传输器件<sup>[16-17]</sup>、传感器<sup>[18]</sup>、涂层<sup>[19]</sup>、储能转换器件<sup>[20-21]</sup>和润滑材料<sup>[22]</sup>等领域得到了广泛应用。石墨烯纳米微粒根据维度可以分为零维、一维、二维和三维四种微观结构,即石墨烯量子点、石墨烯纳米带、石墨烯纳米片和褶皱纸团状石墨烯。而不同的微观结构的石墨烯作为润滑油添加剂则具有不同的摩擦学性能。

### 1.1 零维结构——石墨烯量子点(GQDs)

石墨烯量子点是一种新型碳质纳米材料,其片层尺寸在 3~20 nm 之间,层数为 1~3 层,其微观结构如图 1 所示<sup>[23]</sup>。石墨烯量子点的制备方法主要有自上而下和自下而上两种,前者包括水热法、电化学法和化学剥离碳纤维法,后者则主要有溶液化学法、超声波法、微波法以及可控热解多环芳烃法。石墨烯量子点在生物、医药、新型半导体器件和润滑添加剂等领域占据不可替代的地位。

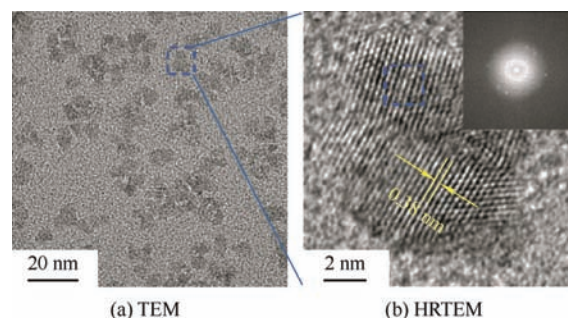


图 1 石墨烯量子点(GQDs)的透射电镜图<sup>[23]</sup>

## 1.2 一维结构 —— 石墨烯纳米带(GNRs)

一维石墨烯纳米微粒主要以石墨烯纳米带为代表。石墨烯纳米带是指石墨烯或单层石墨的狭长条纹, 其结构示意图如图 2 所示, 具有高电导率、高热导率和优异的润滑特性。石墨烯纳米带可通过化学法、声化学法、光刻法及碳纳米管解压法等制备。但目前 10 nm 以下的石墨烯纳米带的制备仍面临挑战<sup>[24]</sup>。

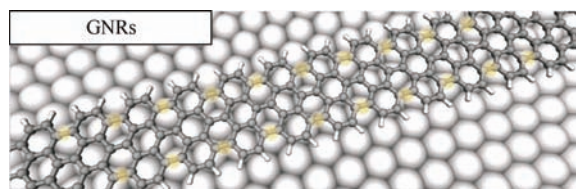


图 2 石墨烯纳米带 (GNRs) 的结构示意图<sup>[24]</sup>

## 1.3 二维结构 —— 石墨烯纳米片(GNPs)

石墨烯纳米片是石墨烯纳米微粒最常见的结构。其微观结构如图 3 所示, 厚度为纳米尺度的二维石墨纳米材料, 可兼具单层石墨烯和高石墨碳的优点<sup>[25]</sup>, 在机械、电气和润滑等方面表现优异, 受到了人们的广泛关注。将其引入并分散到聚合物、金属和陶瓷等基体材料或润滑油中, 通过降低表面

张力、克服表面惰性等措施提高其分散性, 可充分发挥其优异的摩擦学性能<sup>[26]</sup>。石墨烯纳米片作为高性能纳米润滑材料, 已成为备受关注和瞩目的研究前沿和热点。

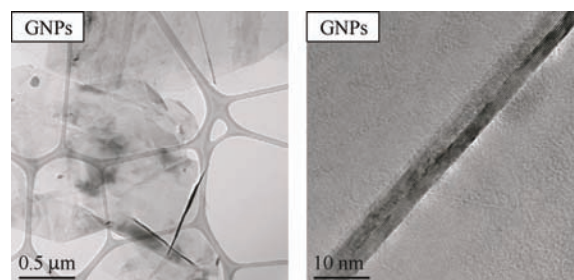


图 3 石墨烯纳米片 (GNPs) 的 TEM 图<sup>[25]</sup>

## 1.4 三维结构——褶皱纸团状石墨烯

褶皱纸团状石墨烯由石墨烯纳米片褶皱而成。相比于平整的纸张, 褶皱的纸团彼此不易于相互接触团聚, 有利于其在润滑油中的分散稳定性。图 4 分别为石墨、石墨烯纳米片、炭黑以及纸团状石墨烯的微观形貌以及在润滑油的分散稳定性对比, 研究发现<sup>[27]</sup>, 纸团状石墨烯的分散稳定性远胜于石墨、石墨烯纳米片和炭黑等碳类材料纳米添加剂, 且具有更优异的润滑性能。

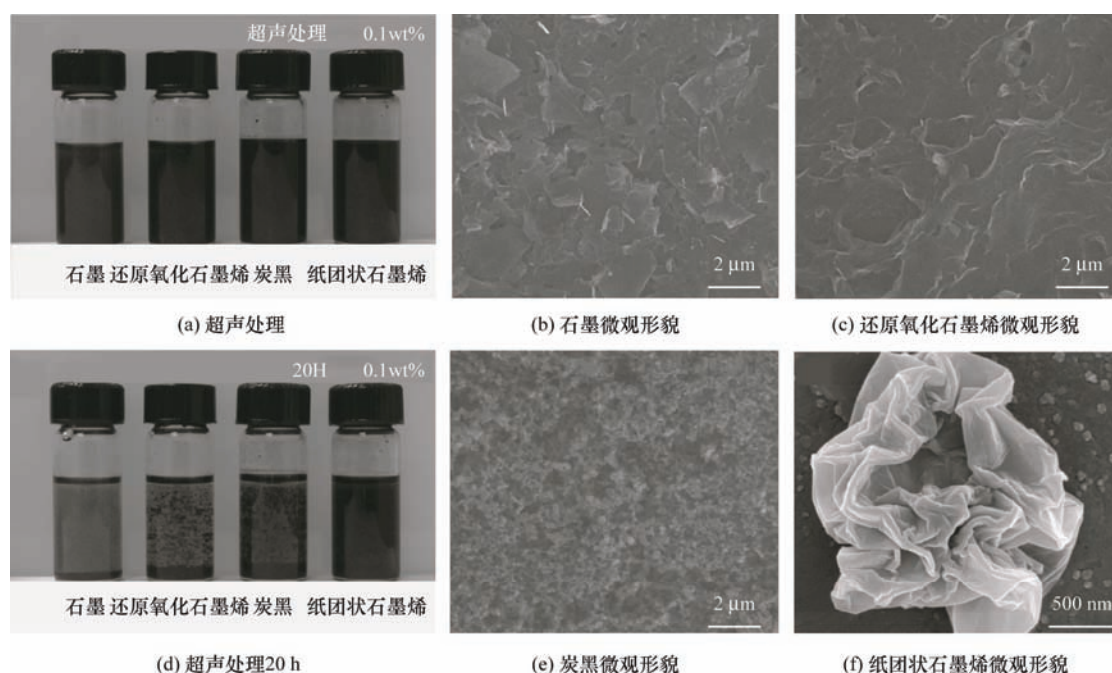


图 4 不同碳材料纳米添加剂分散稳定及微观形貌<sup>[27]</sup>

# 2 石墨烯及衍生物添加剂摩擦学性能

作为碳的同素异形体, 石墨烯因其独特的润滑

特性而成为固体润滑涂层或润滑添加剂的首选材料。石墨烯纳米微粒作为润滑添加剂具有优异的减摩抗磨性能, 其在摩擦学领域的应用受到人们的高度重视。



FAN 等<sup>[28]</sup>对比分析了零维石墨烯量子点与片状碳、MoS<sub>2</sub>、球状 MoS<sub>2</sub>及石墨烯复合微粒的摩擦学性能;发现纳米级的石墨烯量子点可以使摩擦因数和磨损率分别降低 60%和 91%。

研究表明一维石墨烯纳米带在界面处发生分离和位移,这使其作为润滑添加剂时的性能受到限制<sup>[29]</sup>;而二维石墨烯纳米片表现出较低的摩擦因数,显示出优异的润滑性能。ESWARAIAH 等<sup>[30]</sup>利用太阳能辐射技术,对已改进 Hummer 方法制备的氧化石墨进行剥落,得到超薄的二维石墨烯纳米片,并使用四球摩擦磨损试验机考察了石墨烯纳米片添加剂对发动机油摩擦学性能的影响;发现石墨烯纳米片添加剂能显著提高发动机油的摩擦学性能。ZHAO 等<sup>[31]</sup>通过改进 Hummer 法使得氧化石墨烯的合成技术实现了规模化、低成本化和环保化,消除了氮氧杂质,简化了合成过程;并利用温和热还原法(在 700 °C)得到还原氧化石墨烯(记作 MRGO),测试了其摩擦学性能;图 5 为基础油以及含有 MRGO 和 GO 添加剂的润滑油的摩擦因数随时间和浓度的变化曲线,发现当 MRGO 质量分数为 0.5%时,可使摩擦因数降低 30%。基于绿色、低成本和合成工艺简单等优点,MRGO 作为润滑添加剂有很好的应用前景。

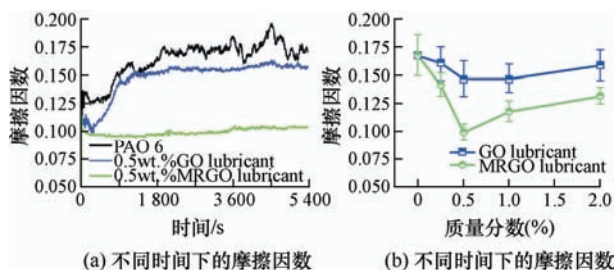


图 5 含 MRGO 和 GO 纳米添加剂的润滑油的摩擦因数<sup>[31]</sup>

JANKHAN 等<sup>[32]</sup>使用改良 Hummer 方法制备了二维还原氧化石墨烯纳米片,并将其以不同浓度分散到基础油中,考察了其对基础油摩擦学性能的影响;发现不同浓度的二维还原氧化石墨烯纳米片均能在一定程度上改善基础油的减摩抗磨性能。MA 等<sup>[33]</sup>利用液相等离子体法制备了二维石墨烯纳米片,并将其按质量分数 0.05%加入 RP-4652D 润滑油中,采用往复活塞环-缸套摩擦磨损试验研究了温度对石墨烯添加剂摩擦学性能的影响规律;研究结果如图 6 所示,当试验温度为 150 °C、180 °C、210 °C 时,加入石墨烯纳米片的润滑油摩擦因数分

别降低 11%、6%、9%,缸套磨损量分别降低 14%、8%、6%。二维石墨烯纳米片在高温工况下表现出良好的抗磨减摩性能。

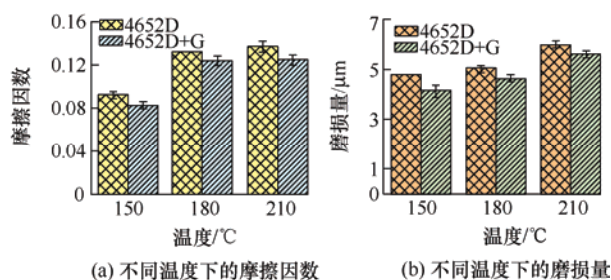
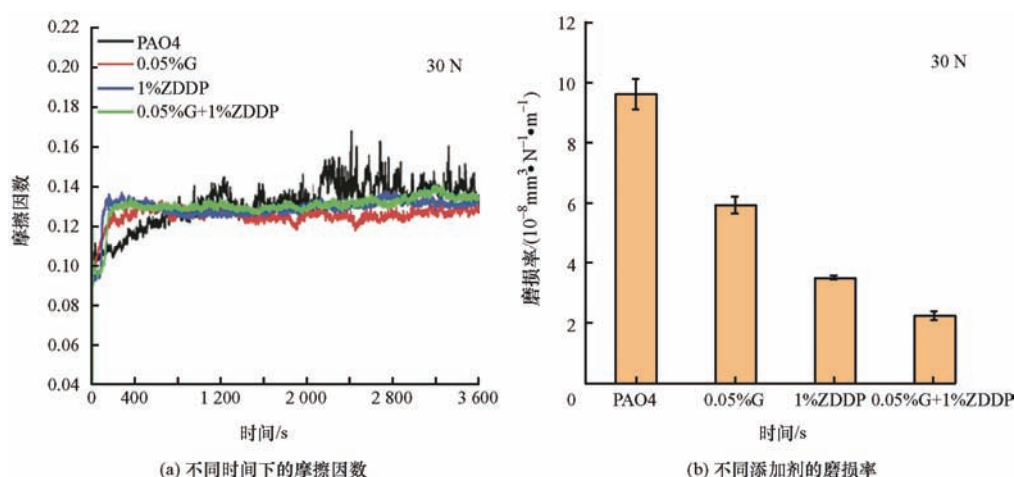


图 6 石墨烯纳米片添加剂在不同温度下的润滑性能<sup>[33]</sup>

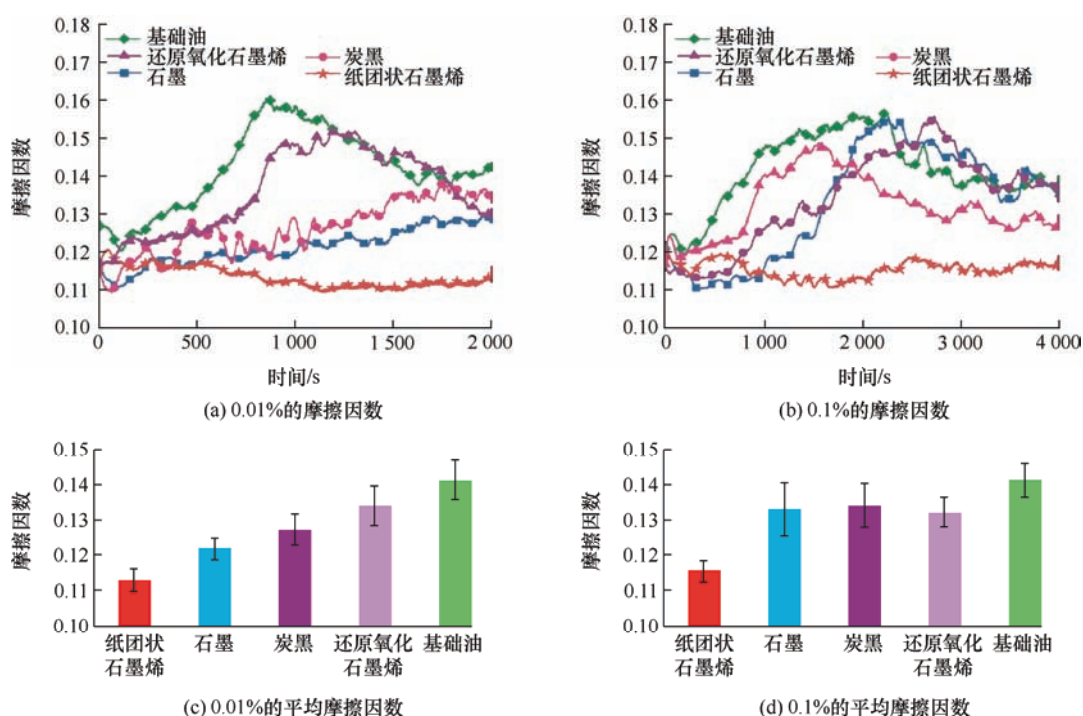
HAKAN 等<sup>[34]</sup>利用改进 Hummer 方法制备了二维氧化石墨烯纳米片,并研究了其对 5W-40 发动机润滑油摩擦学性能的影响,发现该添加剂在很低浓度下即可使得摩擦因数和钢球表面磨痕直径有所减小。大量研究表明,在传统润滑剂中引入不同的纳米微粒,可以显著改善摩擦学性能<sup>[35-40]</sup>。而基于环保要求,可生物降解润滑油有望替代传统污染型矿物润滑油<sup>[41]</sup>,代表了该领域未来的发展趋势之一。JOSÉ M. LIÑEIRA DEL RÍO 等<sup>[42]</sup>将横向尺寸分别为 7 μm(GNP7)和 40 μm(GNP40)的石墨烯纳米片引入生物降解聚合物酯润滑剂(BIOE)中,并考察了其摩擦学性能;发现二者均可大幅降低摩擦因数,且 GNP7 纳米片具有更优异的润滑性能。ZHAO 等<sup>[43]</sup>将石墨烯(0.05%)、二烷基二硫代磷酸锌(ZDDP; 1%)及二者混合物作为添加剂加入到聚 α-烯烃基础油(PAO4)中,考察了其对 PAO4 摩擦学性能的影响;图 7 为 G 和 ZDDP 对 PAO4 摩擦学性能的影响,对其分析发现 G/ZDDP 复合体系表现出优异的抗磨性能。

FU 等<sup>[44]</sup>分别将不同质量分数的石墨烯添加剂以及石墨烯与 ZDDP 混合添加剂加入基础油中,并利用四球摩擦磨损试验机研究了其摩擦学性能。当石墨烯和 ZDDP 的质量含量分别为 0.03%和 0.5%时,基础油的抗磨性能得到极大提高,与单石墨烯添加剂相比,磨斑直径降低 36.9%,二者可起到较好的协同作用。ZHANG 等<sup>[45]</sup>利用四球摩擦磨损试验机研究了石墨烯在基础油(PAO10)中的抗磨减摩性能。石墨烯添加剂的加入可使纯基础油的摩擦因数和磨斑直径分别降低 13%和 17%。

图7 石墨烯和 ZDDP 在 PAO4 中的摩擦学性能<sup>[43]</sup>

相比于零维石墨烯纳米微粒以及一维纳米带和二维纳米片, 三维的褶皱纸团状石墨烯具有更好的自分散稳定性。XUAN 等<sup>[27]</sup>发现, 三维的褶皱纸团状石墨烯作为高性能添加剂可以显著改善聚  $\alpha$ -烯烃基础油的润滑性能。同时, 纸团状石墨烯的摩擦学性能显著优于其他碳材

料纳米添加剂, 如石墨、炭黑、还原氧化石墨烯等。图 8 为不同碳添加剂在润滑油中的摩擦因数, 发现当纸团状石墨烯在聚  $\alpha$ -烯烃基础油中的质量分数为 0.01%~0.1%时, 较二维石墨烯纳米片、石墨等其他碳纳米材料, 表现出更低的摩擦因数。

图8 不同碳材料纳米添加剂在 PAO4 基础油中的摩擦因数<sup>[27]</sup>

总之, 在零维量子点、一维纳米带和二维纳米片等不同微观结构的石墨烯中, 三维的褶皱纸团状石墨烯制备工艺相对简单, 仅通过喷雾干燥即可制备。同时褶皱纸团状石墨烯不但具有良好的自分散稳定性, 而且具有良好的摩擦学性能, 其有望作为

石墨烯润滑添加剂未来重要的研究发展方向。

### 3 石墨烯的表面修饰及其摩擦学性能

石墨烯纳米微粒具有优良的减摩抗磨性能, 但

由于石墨烯的表面惰性、范德华力和  $\pi$ - $\pi$  键作用使其容易发生团聚,同时非极性颗粒在润滑剂中的相容性较差<sup>[46]</sup>以及还原氧化石墨烯的表面和边缘还残留一些含氧官能团,也可造成其在润滑油中团聚和沉降,其在润滑油中的分散性及分散稳定性限制了其应用,亟待研究解决。研究发现,除了调控其微观结构,还可利用多种有机化合物作为表面修饰剂对石墨烯纳米微粒进行表面改性,通过与石墨烯表面的高活性含氧基团反应来引入有机官能团或使有机分子覆盖在石墨烯的表面降低片层之间的范德华力等措施以改善其在润滑油中的分散稳定性,提高其作为润滑添加剂的摩擦学性能。

### 3.1 有机酸修饰

ZHAO 等<sup>[47]</sup>利用油酸对石墨烯进行改性,制备了油酸修饰石墨烯(MG),并将其分散在聚  $\alpha$  烯烃(PAO6)基础油中。当 MG 含量为 0.2% 时,与未改性的石墨烯相比,摩擦因数降低了 23%,磨痕直径降低了 13%,显著提高了基础油的润滑性能。LIN 等<sup>[48]</sup>使用质量比为 3:5 的硬脂酸和油酸对石墨烯进行修饰;修饰后的石墨烯能够稳定分散在基础油 350SN 中。四球摩擦磨损试验结果表明,加入 0.075% 的石墨烯添加剂即能显著提高基础油的减摩抗磨性能,这是由于硬脂酸-油酸修饰的石墨烯在基础油中的分散稳定性良好,可充分发挥石墨烯的润滑性能。

LA 等<sup>[49]</sup>利用油酸和表面活性剂对石墨烯纳米片(GNP)进行改性,并将其分散在 HD-50 基础油中。当 GNP 添加剂浓度约为 0.05% 时,磨痕直径减少 35%,在发动机润滑油中加入改性 GNP 添加剂可显著提高摩擦和抗磨性能。ZHANG 等<sup>[50]</sup>利用油酸对石墨烯进行表面改性,并将其分散到聚  $\alpha$  烯烃 9(PAO9)基础油中,研究其摩擦学性能。图 9 为油酸修饰的石墨烯在不同质量分数下的摩擦因数和磨损直径,当添加质量分数为 0.02% 时,摩擦因数减小 17%;添加质量分数为 0.06% 时,磨斑直径减小 14%。油酸修饰的石墨烯可显著提高聚  $\alpha$  烯烃基础油的抗磨减摩性能。

YI 等<sup>[51]</sup>利用油酸和硬脂酸对二维石墨烯纳米片进行改性,并使用四球摩擦磨损试验机考察了石墨烯纳米片作为润滑油添加剂的摩擦学性能,发现改性后的石墨烯纳米片表现出良好的抗磨减摩性能。ZHANG 等<sup>[52]</sup>同样利用具有长链烷烃的硬脂酸和油酸对三维纸团状石墨烯进行表面修饰,得到亲

油性褶皱石墨烯球(MCGB),并研究不同添加量的 MCGB 在 500SN 基础油中的摩擦性能。发现在基础油中添加 0.01% 的 MCGB 可以明显改善其抗磨减摩效果,摩擦因数和磨斑直径分别减小 2.08% 和 16.18%。

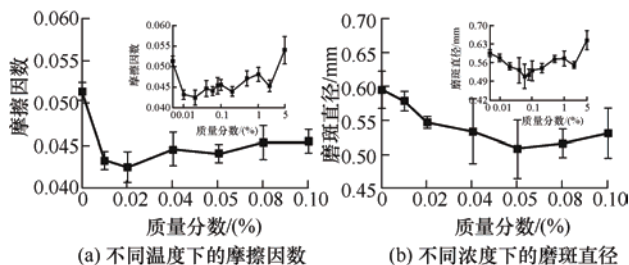


图 9 PAO9 添加不同浓度油酸修饰石墨烯的润滑性能<sup>[50]</sup>

虽然有机酸作为表面修饰剂可以一定程度提高石墨烯纳米微粒在润滑油中的分散稳定性,表现出良好的抗磨减摩性能,但是作为表面修饰剂有机酸的引用也会使得润滑油的酸值提高、腐蚀磨损倾向加剧。

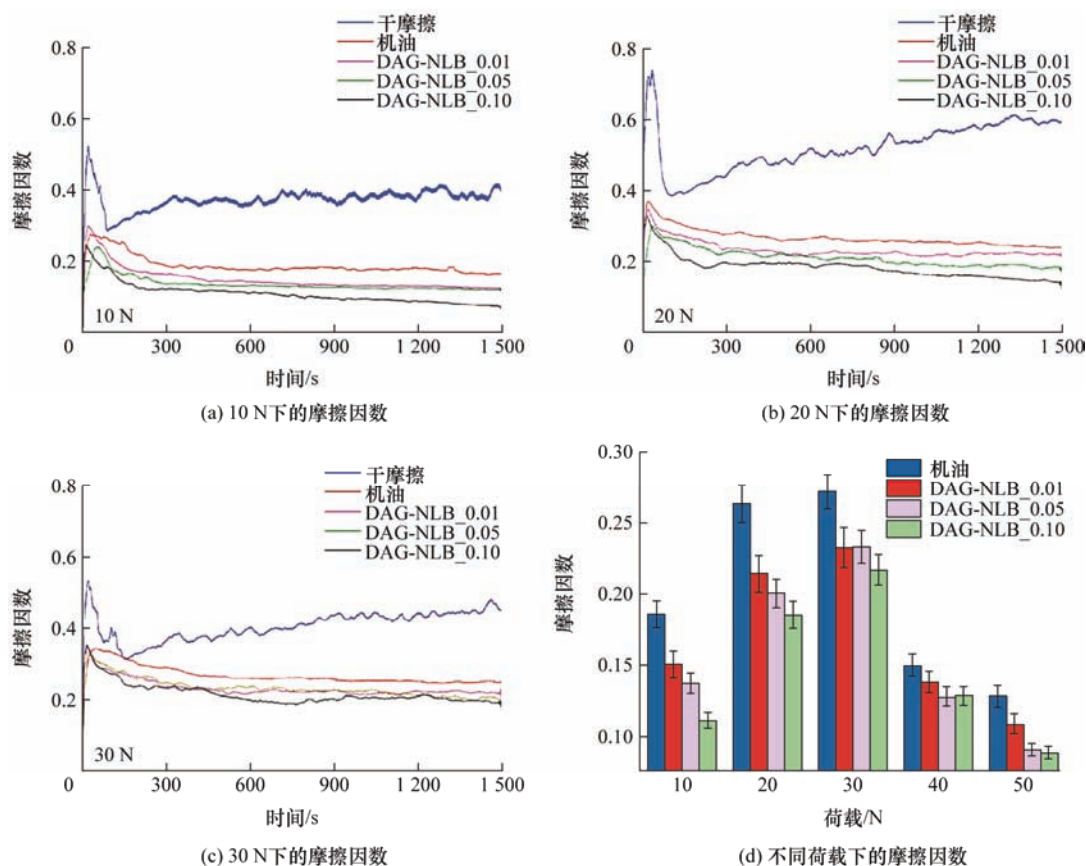
### 3.2 有机胺修饰

NURUL 等<sup>[53]</sup>利用酰胺化法使得十八烷基胺、十四烷基胺和癸胺的烷基直链与氧化石墨烯形成共价连接,得到酰胺功能化氧化石墨烯,并深入研究了其作为润滑油添加剂在基础油中的摩擦学性能;研究发现与氧化石墨烯相比,酰胺功能化氧化石墨烯表现出更优异的抗磨减摩性能。XIA 等<sup>[54]</sup>和 PENG 等<sup>[55]</sup>均利用十八胺(ODA)对 GO 纳米片边缘的羧基和基面上的环氧基团进行酰胺化反应和亲核取代反应得到了 GO-ODA。研究发现 GO-ODA 具有高接枝密度的十八烷基链,在润滑油中具有良好的分散稳定性,静止 30 天无任何沉降产生,且表现出良好的摩擦学性能。

GAYATRI 等<sup>[56]</sup>研究了十二胺功能化石墨烯(DAG)分散纳米润滑剂在商用发动机油中的摩擦学性能,图 10 为不同载荷下,含 DAG 添加剂的润滑油的摩擦因数与时间的关系曲线,发现 DAG 可显著降低摩擦因数,具有更优异的润滑性能。

有机胺的引入可以削弱石墨烯分散稳定性不良带来的影响,其机理是通过有机胺的胺基功能团和氧化石墨烯上的羧基功能团进行偶联,因此有机胺的表面修饰依赖氧化石墨烯原料表面的羧基官能团的数目、分布。

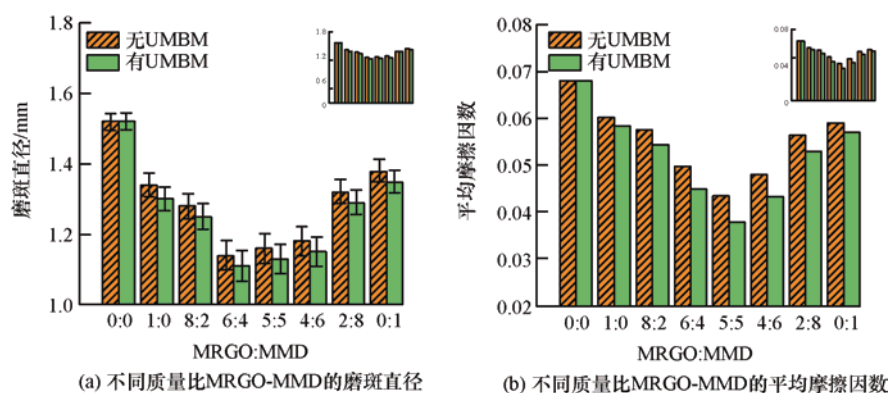


图 10 含 DAG 添加剂的商用发动机油润滑下的摩擦因数<sup>[56]</sup>

### 3.3 其他有机物修饰

除了利用有机酸、有机胺作为表面修饰剂一维, 研究者还开发了其他类型的表面修饰剂以提高石墨烯纳米微粒在润滑油中的分散稳定性。CHOUDHARY 等<sup>[57]</sup>利用亚硫酰氯和烷基胺为原料, 采用两步法制备出烷基化石墨烯, 并采用四球摩擦磨损试验机考察了十八烷基化石墨烯(ODA-G)在非极性十六烷中的摩擦学性能, 发现十六烷中加入很低浓度(0.06%)的 ODA-G 时即可有效降低摩擦磨

损。WANG 等<sup>[58]</sup>采用油酸、硬脂酸、十六烷三甲基溴化铵等有机分子对石墨烯和二硫化钼进行表面烷基化改性, 得到改性还原氧化石墨烯(MRGO)和改性二硫化钼(MMD)粉体; 图 11 为含不同质量比 MRGO-MMD 添加剂的基础油润滑下的磨损斑直径及平均摩擦因数, 发现 MRGO 和 MMD 作为润滑油添加剂显示出良好的减摩抗磨性能, 且二者在基础油中的分散稳定性良好, 并具有协同摩擦学效应。

图 11 含不同质量比 MRGO-MMD 添加剂的基础油润滑下的摩擦学性能<sup>[58]</sup>

ZHANG 等<sup>[59]</sup>以十二醇、乙醇胺、自制氧化石墨烯(GO)为前驱体制备了烷基磷酸盐改性氧化石墨烯(GON-DDP), 发现 GON-DDP 经超声分

散于基础油(VHVI8)后显示良好的减摩抗磨性能。ZHANG 等<sup>[60]</sup>利用多巴胺在弱碱性环境中的自聚合制备了聚多巴胺修饰氧化石墨烯纳米微粒

(PGO), 发现 PGO 作为润滑油添加剂表现出良好的摩擦学性能。

ZHAO 等<sup>[61]</sup>利用辛硫醇对 GO 进行修饰得到辛硫醇-GO, 并将 GO、辛硫醇-GO 作为添加剂与润滑脂复配, 研究其在润滑脂中的摩擦性能。发现辛硫醇-GO 可以改善润滑脂的润滑性能, 使润滑脂的摩擦因数降低 11.7%, 磨损直径降低 31.5%。

ZHU 等<sup>[62]</sup>通过缩小颗粒尺寸、表面接枝十八醇(OA)和部分化学还原, 制备出一种新型长链烷基功能化的还原氧化石墨烯(RGO-g-OA), 其制备流程如图 12a 所示。图 12b~12e 为基础油及含不同质量分数 RGO-g-OA 的润滑油的典型摩擦因数曲线和平均摩擦因数, 结果表明 RGO-g-OA 不但具有高分散能力, 且具有良好的减摩性能。

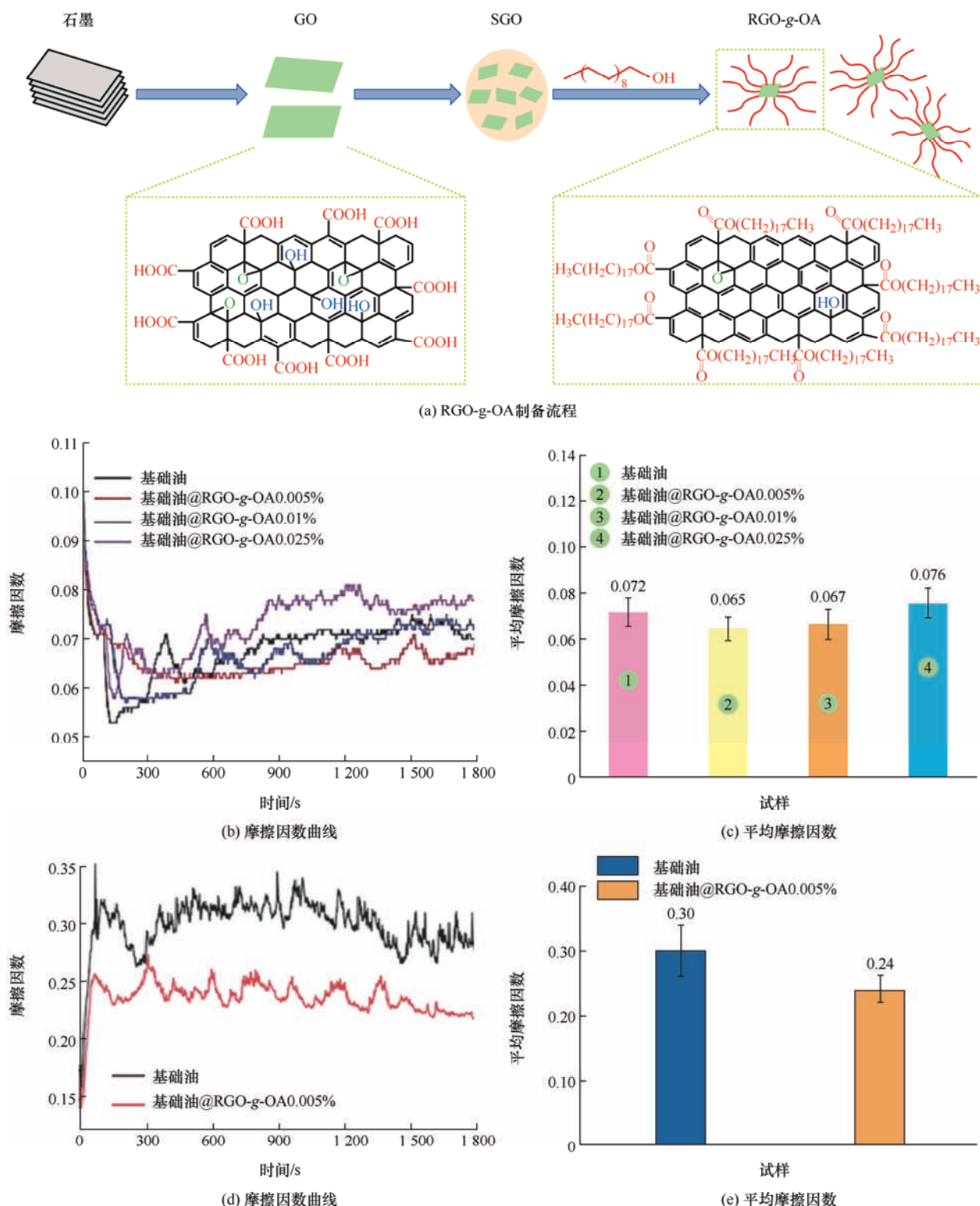


图 12 RGO-g-OA 纳米微粒的制备流程及其在基础油中的摩擦因数<sup>[62]</sup>



通过表面修饰可在一定程度上改善石墨烯纳米微粒的分散稳定性, 但表面修饰方法依赖其表面和边缘的官能团及其分子结构。但由于不同的制备工艺, 实验条件的差异以及不同的石墨来源对石墨烯的表面化学结构都有一定的影响, 从而难以确定石墨烯的精确表面分子结构。正因其表面官能团分布的不确定性, 实现有效可控修饰的难度较大, 未来有待继续深入研究, 从而改善石墨烯纳米微粒与润滑油之间的适配性, 以推动其在润滑油领域的应用。

## 4 石墨烯基复合微粒及其摩擦学性能

为了进一步提高石墨烯的润滑性能, 研究者将其他摩擦活性纳米微粒复合至石墨烯表面, 得到石墨烯基复合纳米微粒。复合纳米微粒可进入摩擦副接触区域并形成润滑膜, 从而减轻摩擦磨损。同时摩擦活性纳米微粒具有较高的剪切强度, 有利于提高润滑膜的承载能力<sup>[63-66]</sup>。将石墨烯与金属及其氧化物纳米微粒、过渡金属族硫化物纳米微粒等进行复合, 可扩大其在润滑领域的应用范围, 充分发挥复合纳米微粒的优异性能<sup>[67]</sup>。

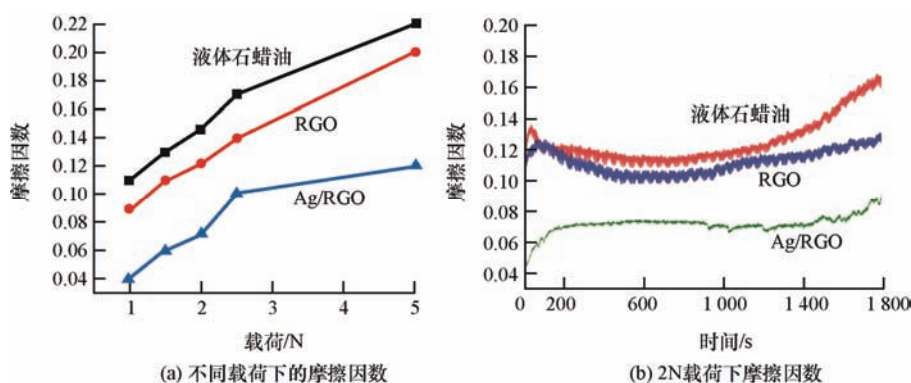


图 13 液状石蜡以及添加 RGO 和 Ag/RGO 的液状石蜡在不同载荷和时间下的摩擦因数<sup>[71]</sup>

LI 等<sup>[72]</sup>利用激光照射氧化石墨烯和银纳米微粒的混合物, 也得到银/石墨烯复合纳米微粒 (Ag/RGO), 发现与银纳米颗粒、GO、Ag/GO 和几种商业添加剂相比, Ag/RGO 表现出更优异的减摩和抗磨性能。HU 等<sup>[73]</sup>利用四球摩擦磨损试验机考察了石墨烯/铜(G/Cu)复合纳米微粒在润滑油中的摩擦学性能, 发现质量分数为 0.05% 的复配添加剂减摩抗磨性能最优, 与纯基础油相比, 摩擦因数降低 31.34%, 磨斑直径降低 22.31%。

MENG 等<sup>[74]</sup>在超临界二氧化碳流体条件下将金纳米微粒修饰到氧化石墨烯(GO)片上, 制备出 Au/GO 复合纳米微粒, 并将其分散在 PAO6 基础油中, 研究了其摩擦学性能; 发现 Au/GO 复合纳米微

### 4.1 石墨烯/金属及其氧化物复合纳米微粒

ZHANG 等<sup>[68]</sup>制备了还原氧化石墨烯/铜纳米颗粒复合微粒(RGO/Cu-NP), 并利用 UMT 摩擦磨损试验机考察了其摩擦学性能, 发现当添加剂浓度(质量分数)为 1.5% 时, 含 RGO/Cu-NP 复合纳米微粒的润滑油具有较好的减摩抗磨性能。LI 等<sup>[69]</sup>以氧化石墨烯和无水硫酸铜为原料, 制备了石墨烯/铜复合纳米微粒(GNS-Cu), 并在含有一定量山梨糖醇酐油酸酯乳化剂(Span-80)的基础油中考察了其分散稳定性和摩擦学性能, 发现 GNS-Cu 复合纳米微粒(质量分数: 0.02%) 在基础油中具有较好的分散稳定性, 在 0.005%~0.03% 浓度范围内可使基础油的最大承载能力提高近 50%。

此外, 研究发现银在低温下表现出良好的润滑效应<sup>[70]</sup>。QIN 等<sup>[71]</sup>利用化学还原法将银纳米颗粒沉积在石墨烯纳米片上, 成功制备出银包覆石墨烯 (Ag/RGO) 复合纳米微粒。图 13 为液状石蜡油以及添加 RGO 和 Ag/RGO 的液状石蜡油润滑下的摩擦因数和在 2 N 载荷下摩擦因数曲线, 发现 Ag/RGO 复合纳米微粒具有更低的摩擦因数, 其作为液状石蜡油添加剂表现出良好的润滑性能。

粒具有良好的减摩抗磨性能, 有望用作节能润滑油添加剂。WANG 等<sup>[75]</sup>采用水热法合成了  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{RGO}$  复合纳米微粒, 利用四球摩擦磨损试验机进行了摩擦学性能研究, 结果表明 0.20% (质量分数) 的  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{RGO}$  复合纳米微粒具有良好的抗磨减摩性能。SONG 等<sup>[76]</sup>通过水解法合成了  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  纳米棒/氧化石墨烯复合纳米微粒, 利用 UMT 摩擦磨损试验机考察了其作为润滑油添加剂对液状石蜡摩擦学性能的影响, 发现其具有良好的润滑性能。LI 等<sup>[77]</sup>考察了  $\text{RGO}@Fe_3O_4$  复合纳米微粒对生物柴油烟灰污染润滑油摩擦学行为的影响, 发现其可在磨损表面形成保护层, 从而有效改善含 PAO6 生物柴油的抗磨性能。

## 4.2 石墨烯/过渡金属族硫化物复合纳米微粒

除金属及其氧化物纳米微粒, 过渡金属族硫化物也经常作为一类重要的摩擦活性纳米添加剂, 受到摩擦性领域的广泛关注。其中以二硫化钼( $\text{MoS}_2$ )、二硫化钨( $\text{WS}_2$ )纳米微粒最有代表性<sup>[78-81]</sup>。

$\text{MoS}_2$  纳米微粒具有二维层状结构, 其分子存在较弱的层间范德华力和较强的层内共价键, 具有较强的润滑能力<sup>[82-84]</sup>, 在固体润滑剂、润滑油添加剂、自润滑高分子材料<sup>[85]</sup>等领域得到了广泛的应用。通

过引入  $\text{MoS}_2$  纳米微粒并调控其在石墨烯纳米微粒的分布, 可显著提高石墨烯纳米添加剂的摩擦学性能。

HOU 等<sup>[86]</sup>利用一锅水热法制备了还原氧化石墨烯/二硫化钼( $\text{RGO}/\text{MoS}_2$ )复合纳米微粒, 制备工艺流程见图 14a。系统研究了纯  $\text{RGO}$ 、 $\text{MoS}_2$ 、两者混合物以及  $\text{RGO}/\text{MoS}_2$  复合纳米微粒在液状石蜡中的抗磨减摩性能, 结果如图 14b 和 c 所示。研究发现  $\text{RGO}/\text{MoS}_2$  复合纳米微粒的抗磨减摩性能显著优于纯  $\text{RGO}$ 、 $\text{MoS}_2$  及两者混合物。

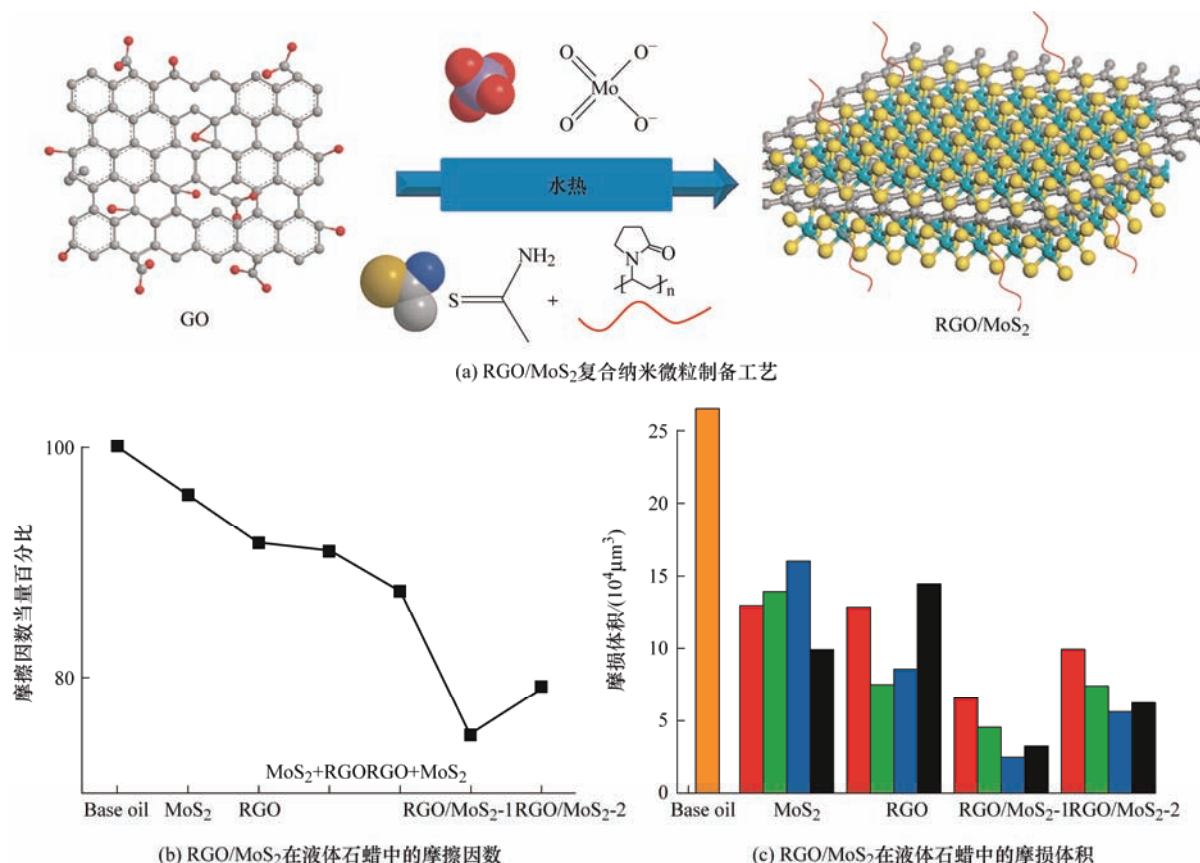


图 14  $\text{RGO}/\text{MoS}_2$  复合纳米微粒在液状石蜡中的摩擦学性能<sup>[86]</sup>

SONG 等<sup>[87]</sup>将 L-半胱氨酸钠和氧化石墨烯纳米片进行水热还原, 制备出  $\text{MoS}_2/\text{GO}$  复合纳米微粒。研究表明,  $\text{MoS}_2/\text{GO}$  复合纳米微粒具有良好的分散稳定性和极薄的层状结构, 能有效改善基础油的减摩抗磨性能。NURUL 等<sup>[88]</sup>以酰胺化氧化石墨烯( $\text{AGO}-\text{C}_n$ )为原料, 采用水热法制备出不同质量比的  $\text{AGO}-\text{C}_n/\text{MoS}_2$  复合纳米微粒, 研究了其在 III 类石油基油中的摩擦学性能, 发现质量比为 1:1 的  $\text{AGO}-\text{C}_{14}/\text{MoS}_2$  复合纳米微粒的摩擦因数和磨痕直径分别降低了 53% 和 63%。WU 等<sup>[89]</sup>制备出中空类富勒烯结构的  $\text{MoS}_2/\text{RGO}$  复合纳米微粒 ( $\text{HIF}-\text{MoS}_2/\text{RGO}$ ), 并将其加入离子润滑脂中, 研究了其摩擦学行为; 发现与其他添加剂相比,

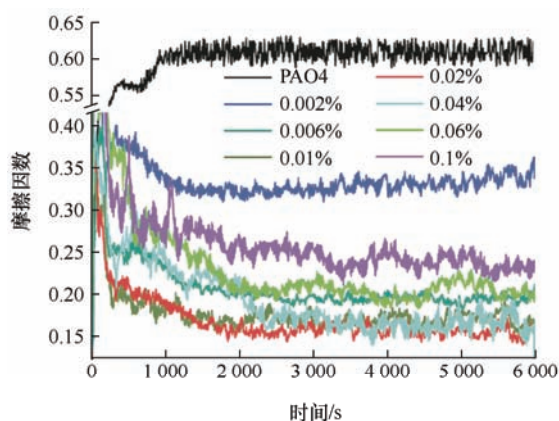
$\text{HIF}-\text{MoS}_2/\text{RGO}$  复合纳米微粒在 3.0 GPa 的较高载荷下具有优良的减摩抗磨性能。ZHANG 等<sup>[90]</sup>通过水热法成功制备出  $\text{RGO}/\text{MoS}_2$  复合纳米微粒, 并利用 UMT-2 多功能摩擦试验机考察其作为润滑油添加剂在液状石蜡中的摩擦磨损性能。研究发现, 与纯  $\text{MoS}_2$  相比,  $\text{RGO}/\text{MoS}_2$  (1.00%) 复合纳米微粒作为润滑油添加剂的摩擦因数降低了 18%, 相对磨损量减少 55%。

$\text{WS}_2$  作为一种同类型的类石墨层状金属二卤族化合物, 具有成本低、润滑性能优异<sup>[91-92]</sup>、抗氧化性强等特点, 也受到广泛的关注。ZHENG 等<sup>[93]</sup>制备出二硫化钨/石墨烯复合微粒( $\text{WS}_2/\text{G}$ ), 图 15 为含不同质量分数  $\text{WS}_2/\text{G}$  添加剂的基础油润滑下的摩擦

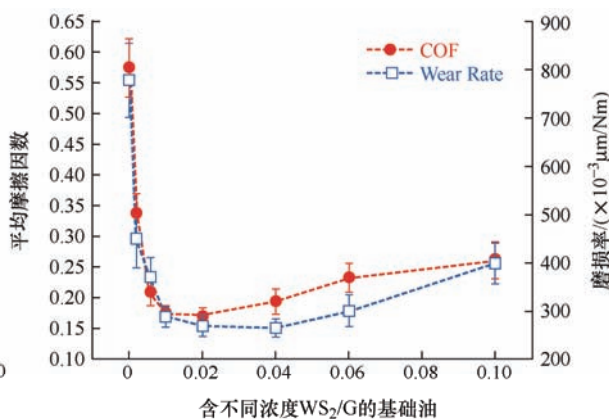


因数随时间的变化以及平均摩擦因数和磨损率的变化,发现其作为润滑油添加剂可在磨损表面形成保

护膜,改善滑动界面的接触状态,从而大幅降低摩擦因数和磨损率。



(a) 含不同浓度 $WS_2/G$ 的基础油的摩擦因数



(b) 含不同浓度 $WS_2/G$ 的基础油的平均摩擦因数和磨损率

图 15 含不同浓度  $WS_2/G$  添加剂的基础油润滑下的摩擦因数<sup>[93]</sup>

ZHU<sup>[94]</sup>将  $WS_2$  和石墨烯进行复配,研究不同浓度、不同配比的  $WS_2/G$  复配添加剂对润滑脂摩擦学性能的影响。研究表明: $WS_2/G$  复配添加剂可以显著提升复合锂基润滑脂的抗磨减摩性能,当  $WS_2$  和  $G$  配比为 1:1 且复配添加剂添加浓度为 0.2% 时,润滑脂的摩擦学性能最佳,和基础脂相比,磨斑直径降低 36.5%,摩擦因数降低 33.8%

#### 4.3 石墨烯/其他复合纳米微粒

除了金属及其氧化物和过渡族金属硫化物外,石墨烯与其他的纳米微粒的复合材料在润滑领域中承担了重要的角色,能有效提高基础润滑介质的减摩、抗磨性能。

具有片层结构的偏硼酸钙表面强度较高,作为润滑添加剂可以有效地提升基础油的减摩抗磨性能,在摩擦学领域得到了广泛关注<sup>[95]</sup>。GUO 等<sup>[96]</sup>制备出纳米偏硼酸钙/还原石墨烯复合粉体  $[Ca(BO_2)_2/RGO]$ ,发现其作为润滑添加剂表现出良好的减摩抗磨性能,这是由于片层还原石墨烯在滑动过程中发生破裂,释放出的纳米偏硼酸钙沉积在摩擦副运动表面形成高弹态物质所致。LIU 等<sup>[97]</sup>制备了石墨烯/氮化硼复合纳米片,并采用四球摩擦磨损试验机考察了其作为润滑油添加剂的抗磨性能,发现石墨烯与氮化硼纳米片产生协同摩擦学效应,可有效提高基础油的抗磨性能。针对发动机内部传动部件之间的摩擦损失问题,WU 等<sup>[98]</sup>成功制备出氢氧化镧/还原氧化石墨烯复合纳米微粒  $[La(OH)_3/RGO]$ ,图 16 为氧化石墨烯、纳米  $La(OH)_3$  和  $La(OH)_3/RGO$  复合纳米微粒的摩擦学性能对比,

发现其在温度 80 °C、接触压力 1.62 GPa、添加量 0.1% 条件下可大幅提高柴油机油的抗磨性能。

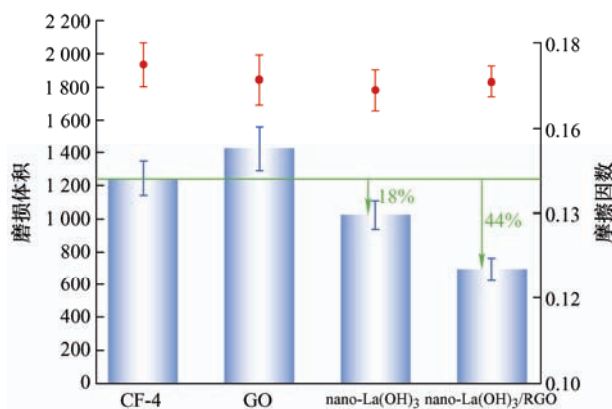


图 16 氧化石墨烯、纳米  $La(OH)_3$  和  $La(OH)_3/RGO$  复合纳米微粒的摩擦学性能对比<sup>[98]</sup>

$[HPy]BF_4$  离子液体和石墨烯(IL/G)复合纳米微粒润滑油添加剂是新兴研究热点之一,前景光明<sup>[99-104]</sup>。YOU 等<sup>[105]</sup>考察了  $[HPy]BF_4$  离子液体(ILs)、少层石墨烯(G)以及 IL/G 复合纳米微粒在不同浓度、负载和转速下的摩擦学性能。IL/G 复合纳米添加剂更容易附着在钢球磨损表面,提高油膜的承载能力,因此表现出更出色的摩擦学性能。

石墨烯作为一种潜在的纳米润滑基础材料,通过与金属及其氧化物、过渡族金属硫化物和其他纳米微粒复合,可以有效提高石墨烯的润滑能力,充分发挥其在润滑油领域的独特优势,改善机械系统摩擦学性能,对节能减排和环保具有重要作用。纸团状石墨烯具有较好的自分散稳定性,但其摩擦学性能难以满足实际工况的使用需求。作者课题组<sup>[106]</sup>



利用喷雾干燥法制备了可分散石墨烯基复合纳米微粒,产物直径均一,在润滑油中具有良好的分散性稳定性和减摩抗磨性能,是一种性能优异的润滑油抗磨减摩剂。可以预期,纸团状石墨烯基复合纳米微粒应用前景良好,可望助力实现石墨烯基纳米润滑添加剂的规模化应用。

## 5 石墨烯及其复合纳米微粒润滑机制

石墨烯类润滑材料在微观接触尺度具有超润滑性能,在宏观接触尺度展现出独特的自定序特性,其润滑作用主要归因于界面接触不均匀。深入研究石墨烯及其复合纳米微粒的润滑机制,对于指导石墨烯材料的结构优化设计、宏观性能调控以及实现其摩擦学应用具有重要的意义。研究发现,石墨烯的润滑机制主要包括:润滑膜形成机制、滚动轴承机制、自补偿机制和剥离机制以及多种复合润滑机制等<sup>[107]</sup>。

### 5.1 润滑膜形成机制

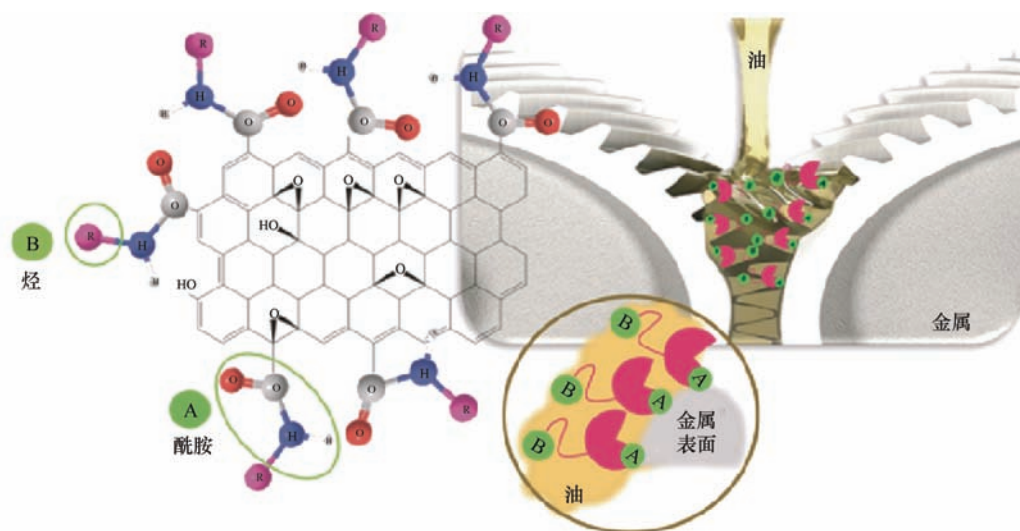
二维片层结构的石墨烯纳米片容易吸附在摩擦副接触表面,在外界条件下石墨烯首先在摩擦界面形成物理吸附润滑膜,从而可以避免摩擦副的直接接触,提高抗磨减摩性。随着接触压力的增大和摩擦时间的延长,物理吸附膜会逐渐发生破坏,此时石墨烯纳米微粒可参与摩擦化学反应,形成化学反应膜,从而表现出良好的减摩抗磨作用<sup>[43, 108]</sup>。

YIN 等<sup>[109]</sup>研究了石墨烯润滑油纳米添加剂在

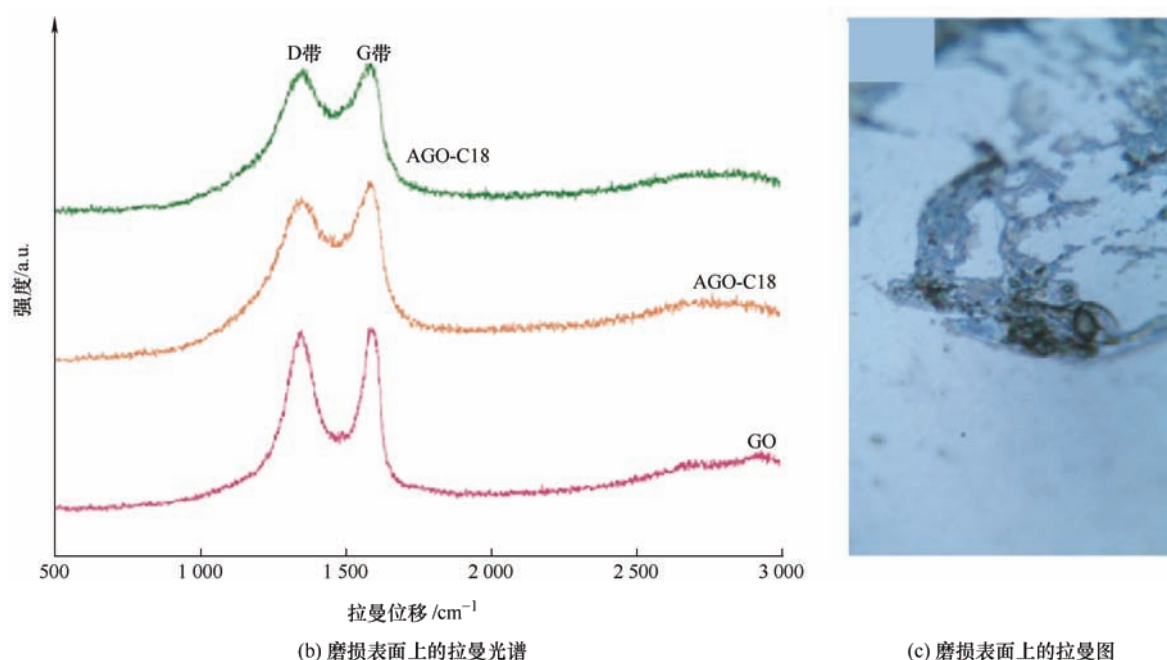
应力诱导下滑动界面的重建以及润滑膜的生长机理。发现在整个运动的过程中,石墨烯纳米片失去了其层状结构并降解为无定形碳,同时在磨损过程中形成了具有双层结构的摩擦保护膜,提高了润滑油的摩擦学性能。NURUL 等<sup>[53]</sup>研究了酰胺化氧化石墨烯纳米片(AGO- $C_n$ )的润滑机制。图 17 为金属摩擦副滑动表面润滑膜形成示意图以及拉曼光谱,显示了金属表面经过摩擦之后,形成了 AGO- $C_n$  润滑膜。

经过酰胺基和长链烃修饰后,AGO- $C_n$  与金属表面的吸附性能增强,使其更容易在摩擦表面形成均匀、连续的润滑膜。润滑膜的形成不仅可以保护金属板表面,而且还能减少微凸体之间的摩擦,有助于防止材料裂纹扩展。如图 17b 所示,AGO- $C_n$  添加剂排列在金属表面,烷基胺接枝产生的带负电荷的酰胺基团将附着到带正电荷的金属表面,以防止金属之间彼此接触。图 17c 所示磨损表面的拉曼图像显示了磨损表面上的黑点(AGO- $C_{18}$ ),可以吸收部分剪切应力,从而降低摩擦因数,提高抗磨性能。

随后 NURUL 等<sup>[79]</sup>又将  $MoS_2$  纳米微粒引入酰胺化氧化石墨烯纳米片表面合成了 AGO- $C_n/MoS_2$  复合纳米微粒,并进行摩擦学性能对比分析,结果表明 AGO- $C_n/MoS_2$  复合纳米微粒具有更优异的抗磨减摩性能。由于复合纳米微粒的两种功能组分的协同作用,从而进一步提升了摩擦学性能。

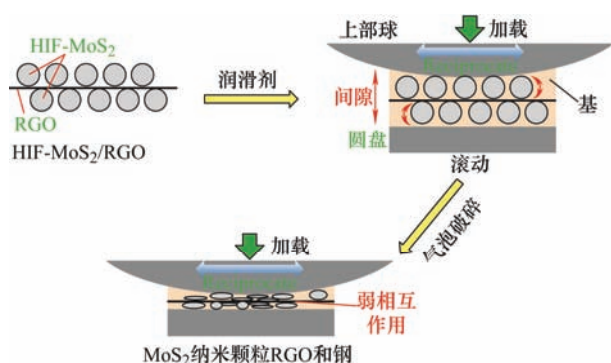


(a) 润滑膜形成示意图

图 17 表面修饰石墨烯纳米添加剂的润滑膜形成机制示意图<sup>[53]</sup>

## 5.2 滚动轴承机制

纳米级的石墨烯层间的剪切力较低, 通过层间滑动容易进入液体润滑剂的接触区域, 从而起到类似于纳米球的滚动效应。WANG 等<sup>[110]</sup>探究了 Ag/RGO 复合纳米微粒的润滑机制, 结果表明由 Ag 和 RGO 构成的复合润滑膜可避免钢滑动表面的直接接触, 将滑动摩擦变为滚动摩擦, 从而可有效减少磨损。WU 等<sup>[89]</sup>详细研究了 HIF-MoS<sub>2</sub>/RGO 的润滑机制, 如图 18 所示。一方面, HIF-MoS<sub>2</sub>/RGO 添加剂进入摩擦副接触表面后, 在钢-钢滑动表面起润滑作用; 另一方面, RGO 表面的纳米笼可以增加固体表面之间的间隙, 并充当 RGO 和钢之间的滚动球, 将滑动摩擦转变为微观滚动摩擦, 使接触区域内的 MoS<sub>2</sub> 更稳定, 从而降低摩擦因数和磨损率。

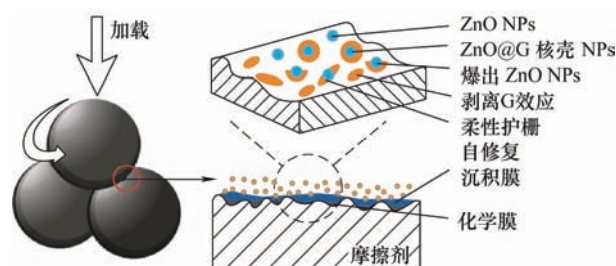
图 18 MoS<sub>2</sub>/RGO 复合纳米微粒的滚动轴承润滑机理<sup>[89]</sup>

## 5.3 自补偿机制

石墨烯纳米微粒可以填充到磨损表面的凹坑等

缺陷中, 从而修复损伤坏表面。在滑动过程中, 得益于摩擦产生的瞬时高温, 石墨烯纳米微粒在磨损表面的沉积增强, 从而修复磨损表面、减轻磨损。

REN 等<sup>[111]</sup>研究了 ZnO@G 纳米添加剂的自补偿机制。润滑机理如图 19 所示, 在摩擦副界面, 石墨烯可改变其外观以适应磨损表面的轮廓, 也可以在外力作用下发生破碎, 以修复局部犁沟, 提高润滑性能。同时 ZnO 纳米颗粒组分在摩擦过程中多次沉积在摩擦副表面上, 形成更稳定的润滑膜。ZnO 的物理沉积、石墨烯的自修复以及润滑油的摩擦化学反应共同构成了一个协同润滑系统, 可以有效地改善润滑基础材料的摩擦学性能。

图 19 ZnO@G 复合纳米微粒润滑添加剂的自补偿润滑机理示意图<sup>[111]</sup>

## 5.4 剥离机制

由于石墨烯纳米微粒独特的层状结构和层间较低的范德华力, 易表现出天然的超润滑性, 在微纳米水平和较低的压力下可实现超低摩擦。

ZHAO 等<sup>[39]</sup>将石墨烯添加剂均匀分散在润滑油中, 使其在摩擦界面产生物理吸附。图 20 为石墨烯

添加剂结构演化及润滑机理示意图演示,在压力和剪切力作用下,剥离程度较高的石墨烯添加剂会发生重叠和重排,堆叠形成平行于滑动方向的片状润滑膜,因此表现出优良的润滑性能。

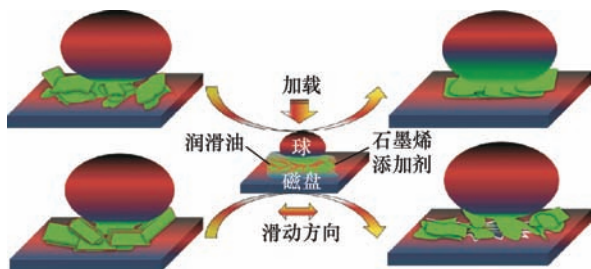


图 20 石墨烯添加剂结构演化及其剥离润滑机理示意图<sup>[39]</sup>

以上石墨烯及其复合纳米微粒的四种润滑机制已得到了多数研究者的认可,然而在复杂的服役环境中,通常是两种或两种以上机理同时存在,共同或协同作用,从而达到良好的润滑的效果;而当摩擦副的表面较为光滑时,石墨烯微粒起到球轴承的作用;当石墨烯的粒径小于摩擦副表面的粗糙度时,其可以填充到摩擦副表面的凹处,使摩擦副表面平整,生成润滑膜,避免两摩擦副的直接接触,以达到抗磨减磨的作用。但以上所有的润滑机制的研究均基于对摩擦学性能测试结束后对磨损表面分析而获得,而真实的摩擦过程是瞬态的、多变的,石墨烯及其复合纳米微粒在摩擦过程中实时的服役状态有待进一步的研究,是未来润滑油添加剂的重要研发方向。

## 6 结论与展望

随着批量化生产以及大尺寸薄膜制备等难题的逐步突破,石墨烯的产业化应用步伐正在加快,我国石墨烯产业逐渐步入快速成长期。石墨烯及其复合纳米微粒作为润滑添加剂已得到较广泛的关注和较深入的研究。迄今相关研究主要侧重于石墨烯的最佳润滑条件、表面修饰对润滑性能的影响、石墨烯复合纳米微粒的摩擦学使役行为、润滑机制等,为了研究更加深入,仍需进行以下工作。

(1) 石墨烯的分散稳定性较差。虽然通过表面修饰可在一定程度上改善其分散稳定性,但因石墨烯表面化学结构及分布的不确定性,实现有效可控修饰的难度较大,未来有待继续研发,从而解决石墨烯与基础油之间的分散稳定性和适配性难题。而

纸团状石墨烯具有良好的自分散稳定性,是解决其分散稳定性难题的另一个重要发展方向。因此为了进一步提升石墨烯的使用性能,有必要加强纸团状石墨烯复合纳米微粒的摩擦学研究,并推动石墨烯基纳米润滑添加剂的规模化应用。

(2) 石墨烯及其复合纳米微粒抗磨减摩添加剂在摩擦过程中的实时服役状态,目前尚不明确。基于前期润滑机制研究结果,利用计算科学相关理论,构建分子动力学等模型,对新型高性能石墨烯润滑油添加剂的分子结构进行理论设计,进一步从分子水平上研究石墨烯及其复合纳米微粒在摩擦副表面的实时微观运动行为。同时,利用纳米尺度液膜原位成像和追踪表征等先进测试技术,深入研究石墨烯及其复合纳米微粒在摩擦副表面的实时微观运动行为、成膜和摩擦化学反应过程,进一步阐明实时摩擦学机制和润滑失效机制,以指导石墨烯及其复合纳米微粒抗磨减摩添加剂的规模化应用。

(3) 石墨烯的绿色环保制备也是未来的主要发展趋势之一。继续研究绿色、经济、大规模生产高质量石墨烯的合成方法,充分发挥环境友好型材料的属性,协同推进节能减排,助力实现“双碳”目标。

## 参 考 文 献

- [1] HOLMBERG K, ERDEMIR A. Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions[J]. Friction, 2017, 5(3): 263-284.
- [2] LUO Jianbin, ZHOU Xiang. Superlubricative engineering—Future industry nearly getting rid of wear and frictional energy consumption[J]. Friction, 2020, 8(4): 643-665.
- [3] HOLMBERG K, KIVIKYTÖ-REPONEN P, HÄRKISAARI P, et al. Global energy consumption due to friction and wear in the mining industry[J]. Tribology International, 2017, 115: 116-139.
- [4] MENG Yuan, SU Fenghua, CHEN Yangzhi. Effective lubricant additive of nano-Ag/MWCNTs nanocomposite produced by supercritical CO<sub>2</sub> synthesis[J]. Tribology International, 2018, 118: 180-188.
- [5] SALAH N, ALSHAHRIE A, ABDEL-WAHAB M, et al. Carbon nanotubes of oil fly ash integrated with ultrathin CuO nanosheets as effective lubricant additives[J]. Diamond and Related Materials, 2017, 78: 97-104.
- [6] WU Hui, ZHAO Jingwei, CHENG Xiawei, et al. Friction



- and wear characteristics of  $\text{TiO}_2$  nano-additive water-based lubricant on ferritic stainless steel[J]. Tribology International, 2018, 117: 24-38.
- [7] CAO Zhengfeng, XIA Yanqiu, CHEN Chuan. Fabrication of novel ionic liquids-doped polyaniline as lubricant additive for anti-corrosion and tribological properties[J]. Tribology International, 2018, 120: 446-454.
- [8] GAO Kai, CHANG Qiuying, WANG Bin, et al. The tribological performances of modified magnesium silicate hydroxide as lubricant additive[J]. Tribology International, 2018, 121: 64-70.
- [9] QIU Shihui, LIU Gang, LI Wei, et al. Noncovalent exfoliation of graphene and its multifunctional composite coating with enhanced anticorrosion and tribological performance[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 747: 60-70.
- [10] HU Yueyang, LI Weifeng, MA Suhua, et al. The composition and performance of alite-ye'elimite clinker produced at 1300 °C[J]. Cement and Concrete Research, 2018, 107: 41-48.
- [11] LEE C, WEI X, KYSAR J, et al. Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene[J]. Science, 2008, 321(5887): 385-388.
- [12] NOVOSELOV K, GEIM A, MOROZOV S, et al. Electric field effect in atomically thin carbon films[J]. Science, 2004, 306(5696): 666-669.
- [13] LIU Qian, LIU Zunfeng, ZHANG Xiaoyan, et al. Organic photovoltaic cells based on an acceptor of soluble graphene[J]. Applied Physics Letters, 2008, 92: 223303.
- [14] GILJE S, SONG Han, WANG Minsheng, et al. A chemical route to graphene for device applications[J]. Nano Letters, 2007, 7(11): 3394-3398.
- [15] BLAKE P, BRIMICOMBE P, NAIR R, et al. Graphene-based liquid crystal device[J]. Nano Letters, 2008, 8(6): 1704-1708.
- [16] STOLLER M, PARK S, ZHU Y, et al. Graphene-based ultracapacitors[J]. Nano Letters, 2008, 8(10): 3498-3502.
- [17] HAN Sheng, WU Dongqing, LI Shuang, et al. Porous graphene materials for advanced electrochemical energy storage and conversion devices[J]. Advanced Materials, 2014, 26(6): 849-864.
- [18] RESTUCCIA P, FERRARIO M, RIGHI M. Monitoring water and oxygen splitting at graphene edges and folds: Insights into the lubricity of graphitic materials[J]. Carbon, 2020, 156: 93-103.
- [19] LIU Chu, SHI Jiajia, BRAUN R. The equivalent Young's modulus prediction for vacancy defected graphene under shear stress[J]. Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, 2019, 110: 115-122.
- [20] XIE Hua, LIU Yifan, LI Na, et al. High-temperature-pulse synthesis of ultrathin-graphene-coated metal nanoparticles[J]. Nano Energy, 2021, 80: 105536.
- [21] OLABI A, ABDELKAREEM M, WILBERFORCE T, et al. Application of graphene in energy storage device – A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021, 135: 110026.
- [22] JIN Bao, ZHAO Jun, HE Yongyong, et al. High-quality ultra-flat reduced graphene oxide nanosheets with super-robust lubrication performances[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 438: 135620.
- [23] ALGADI H, MAHATA C, SAHOO B, et al. Facile method for the preparation of high-performance photodetectors with a GQDs/perovskite bilayer heterostructure[J]. Organic Electronics, 2020, 76: 105444.1-105444.7.
- [24] CAI Jinming, RUFFIEUX P, JAAFAR R, et al. Atomically precise bottom-up fabrication of graphene nanoribbons[J]. Nature, 2010, 466(7305): 470-473.
- [25] SHAO Yuyan, ZHANG Sheng, WANG Chongming, et al. Highly durable graphene nanoplatelets supported Pt nanocatalysts for oxygen reduction[J]. Journal of Power Sources, 2010, 195(15): 4600-4605.
- [26] CHEN Lianyi, KONISHI H, FEHRENBACHER A, et al. Novel nanoprocessing route for bulk graphene nanoplatelets reinforced metal matrix nanocomposites[J]. Scripta Materialia, 2012, 67(1): 29-32.
- [27] DOU Xuan, KOLTONOW A, HE Xingliang, et al. Self-dispersed crumpled graphene balls in oil for friction and wear reduction[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2016, 113(6): 1528-1533.
- [28] FAN Xiaoqiang, LI Wen, FU Hanmin, et al. Probing the function of solid nanoparticle structure under boundary lubrication[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering. 2017, 5(5): 4223-4233.
- [29] WANG Zhao. Lubricity of graphene on rough Au surfaces[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2018, 51(43): 435301.
- [30] ESWARAIAH V, SANKARANARAYANAN V, RAMAPRABHU S. Graphene-based engine oil nanofluids for tribological applications[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2011, 3(11): 4221-4227.
- [31] ZHAO Jun, LI Yingru, WANG Yongfu, et al. Mild thermal

- reduction of graphene oxide as a lubrication additive for friction and wear reduction[J]. RSC Advances, 2017, 7(3): 1177-1766.
- [32] PATEL J, KIANI A. Effects of reduced graphene oxide (RGO) at different concentrations on tribological properties of liquid base lubricants[J]. Lubricants, 2019, 7(2): 11.
- [33] 马青怡, 沈岩, 袁晓帅, 等. 液相等离子制备石墨烯润滑添加剂的摩擦磨损特性[J]. 车用发动机, 2021(4): 42-47.  
MA Qingyi, SHEN Yan, YUAN Xiaoshuai, et al. Friction and wear properties of graphene lubricating additive prepared with liquid plasma[J]. Vehicle Engine, 2021(4): 42-47.
- [34] KALELI H, DEMIRTAŞ S, UYSAL V, et al. Tribological performance investigation of a commercial engine oil incorporating reduced graphene oxide as additive[J]. Nanomaterials, 2021, 11(2): 386.
- [35] ZHAO Jun, HUANG Yiyao, HE Yongyong, et al. Nanolubricant additives: A review[J]. Friction, 2021, 9(5): 891-917.
- [36] GULZAR M, MASJUKI H, KALAM M, et al. Tribological performance of nanoparticles as lubricating oil additives[J]. Journal of Nanoparticle Research, 2016, 18(8): 223.
- [37] KONG Linghui, SUN Jianlin, BAO Yueyue. Preparation, characterization and tribological mechanism of nanofluids[J]. RSC Advances, 2017, 7(21): 11269-12599.
- [38] LEE C, HWANG Y, CHOI Y, et al. A study on the tribological characteristics of graphite nano lubricants[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2009, 10(1): 85-90.
- [39] ZHAO Jun, MAO Junyuan, LI Yingru, et al. Friction-induced nano-structural evolution of graphene as a lubrication additive[J]. Applied Surface Science, 2018, 434: 21-27.
- [40] NASSER K I, LIÑEIRA Del Río J M, LÓPEZ E, et al. Hybrid combinations of graphene nanoplatelets and phosphonium ionic liquids as lubricant additives for a polyalphaolefin[J]. Journal of Molecular Liquids, 2021, 336: 116266.
- [41] TAMADA I, LOPES P, MONTAGNOLLI R, et al. Biodegradation and toxicological evaluation of lubricant oils[J]. Brazilian Archives of Biology and Technology, 2012, 55(6): 951-956.
- [42] LIÑEIRA Del Río J, GUIMAREY M J, PRADO J, et al. Improving the tribological performance of a biodegradable lubricant adding graphene nanoplatelets as additives[J]. Journal of Molecular Liquids, 2022, 345: 117797.
- [43] ZHAO Yang, GENG Zhongrong, LI Dongshan, et al. An investigation on the tribological properties of graphene and ZDDP as additives in PAO4 oil[J]. Diamond and Related Materials, 2021, 120: 108635.
- [44] 付景国, 朱嘉琪, 朱新河, 等. 石墨烯与 ZDDP 作为复配润滑油添加剂的摩擦学性能[J]. 大连海事大学学报, 2020, 46(2): 114-119.  
FU Jingguo, ZHU Jiaqi, ZHU Xinhe, et al. Tribological properties of graphene and ZDDP as compound lubricant additives[J]. Journal Dalian Maritime University, 2020, 46(2): 114-119.
- [45] 张世堂, 王昆, 胡泽祥. 石墨烯添加剂对润滑油基础油摩擦学性能的影响[J]. 石油炼制与化工, 2018, 49(9): 91-95.  
ZHANG Shitang, WANG Kun, HU Zexiang. Effect of graphene additive on tribological properties of lube base oil[J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2018, 49(9): 91-95.
- [46] 李妍, 龙军, 赵毅, 等. 柴油抗磨剂分子的极性基团对其抗磨性能的影响[J]. 石油炼制与化工, 2019, 50(3): 80-86.  
LI Yan, LONG Jun, ZHAO Yi, et al. Effect of polar groups of diesel anti-wear agent on anti-wear performance[J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2019, 50(3): 80-86.
- [47] LIANG Zhao, WANG Siyuan, ZHU Kaiji, et al. Enhancing the tribological properties and corrosion resistance of graphene-based lubricating grease via ultrasonic-assisted ball milling[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2022, 633: 127889.
- [48] LIN Jinshan, WANG Liwei, CHEN Guohua. Modification of graphene platelets and their tribological properties as a lubricant additive[J]. Tribology Letters, 2011, 41(1): 209-215.
- [49] LA D, TRUONG T, PHAM T, et al. Scalable fabrication of modified graphene nanoplatelets as an effective additive for engine lubricant oil: Nanomaterials[Z]. 2020: 10.
- [50] ZHANG Wei, ZHOU Ming, ZHU Hongwei, et al. Tribological properties of oleic acid-modified graphene as lubricant oil additives[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2011, 44(20): 205303.

- [51] 董懿, 张艳岗, 刘勇, 等. 化学法石墨烯分散液的制备及其摩擦学性能的研究[J]. 机械科学与技术, 2020, 39(8): 1295-1298.
- DONG Yi, ZHANG Yangang, LIU Yong, et al. Preparation and tribological properties of chemical graphene distillation[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2020, 39(8): 1295-1298.
- [52] 张姗姗, 赵建国, 张进, 等. 褶皱石墨烯球对润滑油摩擦性能的影响[J]. 化工学报, 2018, 69(10): 4479-4485.
- ZHANG Shanshan, ZHAO Jianguo, ZHANG Jin, et al. Effect of crumpled graphene balls on friction performance of base oil[J]. CIESC Journal, 2018, 69(10): 4479-4485.
- [53] ISMAIL N A, MOHD ZULKIFLI N W, CHOWDHURY Z Z, et al. Grafting of straight alkyl chain improved the hydrophobicity and tribological performance of graphene oxide in oil as lubricant[J]. Journal of Molecular Liquids, 2020, 319: 114276.
- [54] 夏池, 李传, 陶炜, 等. 油溶性氧化石墨烯的制备及在润滑油中的摩擦学性能[J]. 润滑与密封, 2018, 43(8): 137-142.
- XIA Chi, LI Chuan, TAO Wei, et al. Preparation and tribological properties of oil-soluble graphene oxide as lubricant additive[J]. Lubrication Engineering, 2018, 43(8): 137-142.
- [55] 彭玉兴, 王臣, 朱真才, 等. 矿井提升钢丝绳改性氧化石墨烯润滑油减摩特性研究[J]. 摩擦学学报, 2021, 41(2): 149-159.
- PENG Yuxing, WANG Chen, ZHU Zhencai, et al. Anti-Friction properties of modified graphene oxide lubricants for wire rope in a mine hoist[J]. Tribology, 2021, 41(2): 149-159.
- [56] PAUL G, SHIT S, HIRANI H, et al. Tribological behavior of dodecylamine functionalized graphene nanosheets dispersed engine oil nanolubricants[J]. Tribology International, 2019, 131: 605-619.
- [57] CHOUDHARY S, MUNGSE H, KHATRI O. Dispersion of alkylated graphene in organic solvents and its potential for lubrication applications[J]. Journal of Materials Chemistry, 2012, 22(39): 21032-21039.
- [58] WANG Siyuan, CHEN Ding, CHEN Yaotong, et al. Dispersion stability and tribological properties of additives introduced by ultrasonic and microwave assisted ball milling in oil[J]. RSC Advances, 2020, 10(42): 25177-25185.
- [59] ZHANG Lei, HE Yi, ZHU Lin, et al. Alkyl phosphate modified graphene oxide as friction and wear reduction additives in oil[J]. Journal of Materials Science, 2019, 54(6): 4626-4636.
- [60] ZHANG Lixiu, YIN Zhenyu, WEI Xiaoyi, et al. Study on friction properties of polydopamine modified graphene oxide as lubricant additive[J]. Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures, 2022: 1-13.
- [61] 赵磊, 杨红梅, 刘畅, 等. 辛硫醇改性氧化石墨烯在润滑脂中的摩擦学性能[J]. 润滑与密封, 2020, 45(2): 7-11, 16.
- ZHAO Lei, YANG Hongmei, LIU Chang, et al. Tribological properties of octanethiol modified graphene oxide in lubricant grease[J]. Lubrication Engineering, 2020, 45(2): 7-11, 16.
- [62] ZHU Chao, YAN Yehai, WANG Fan, et al. Facile fabrication of long-chain alkyl functionalized ultrafine reduced graphene oxide nanocomposites for enhanced tribological performance[J]. RSC Advances, 2019, 9(13): 7324-7333.
- [63] MENG Yuan, SU Fenghua, CHEN Yangzhi. A. Novel nanomaterial of graphene oxide dotted with Ni nanoparticles produced by supercritical CO<sub>2</sub>-assisted deposition for reducing friction and wear[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2015, 7(21): 11604-11612.
- [64] JIA Zhengfeng, CHEN Tiedan, WANG Jie, et al. Synthesis, characterization and tribological properties of Cu/reduced graphene oxide composites[J]. Tribology International, 2015, 88: 17-24.
- [65] HOU Xiao, YANG Cuizhen, HE Jie, et al. Preparation and tribological properties of lanthanum trifluoride nanoparticles-decorated graphene oxide nanosheets[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2015, 54(17): 4773-4780.
- [66] PANG Wenchao, NI Zifeng, WU Jialiang, et al. Investigation of tribological properties of graphene oxide reinforced ultrahigh molecular weight polyethylene under artificial seawater lubricating condition[J]. Applied Surface Science, 2018, 434: 273-282.
- [67] ETTEFAGHI E, AHMADI H, RASHIDI A, et al. Experimental evaluation of engine oil properties containing copper oxide nanoparticles as a nanoadditive[J]. International Journal of Industrial Chemistry, 2013, 4(1): 28.
- [68] ZHANG Yi, TANG Hua, JI Xiaorui, et al. Synthesis of reduced graphene oxide/Cu nanoparticle composites and their tribological properties[J]. RSC Advances, 2013,



- 3(48): 26086-26093.
- [69] LI Xueshan, ZHAO Yibo, WU Wei, et al. Synthesis and characterizations of graphene-copper nanocomposites and their antifriction application[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2013, 20 (4): 2043-2049.
- [70] YAO Jie, SHI Xiaoliang, ZHAI Wenzheng, et al. Effect of TiB<sub>2</sub> on tribological properties of TiAl self-lubricating composites containing Ag at elevated temperature[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2015, 24(1): 307-318.
- [71] 施琴, 朱和军. 银/石墨烯复合润滑添加剂对于润滑油摩擦性能的影响[J]. *粉末冶金技术*, 2020, 38(4): 257-261.
- SHI Qin, ZHU Hejun. Effects of Ag/RGO composites as lubricant additives on the tribological properties of lubricating oil[J]. *Powder Metallurgy Technology*, 2020, 38(4): 257-261.
- [72] WANG Li, GONG Peiwei, LI Wei, et al. Mono-dispersed Ag/Graphene nanocomposite as lubricant additive to reduce friction and wear[J]. *Tribology International*, 2020, 146: 106228.
- [73] 胡海峰, 王连海, 李晓, 等. 石墨烯/纳米铜复合润滑油添加剂摩擦学性能研究[J]. *润滑与密封*, 2018, 43(9): 98-103.
- HU Haifeng, WANG Lianhai, LI Xiao, et al. Tribological properties of graphene/copper nanoparticles as lubricant additives[J]. *Lubrication Engineering*, 2018, 43(9): 98-103.
- [74] MENG Yuan, SU Fenghua, CHEN Yangzhi. Au/Graphene oxide nanocomposite synthesized in supercritical CO<sub>2</sub> fluid as energy efficient lubricant additive[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 45(9): 39549-39559.
- [75] WANG Chenglong, SUN Jianlin, GE Chenglin, et al. Synthesis, characterization and lubrication performance of reduced graphene oxide-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid for strips cold rolling[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022, 637: 128204.
- [76] SONG Haojie, JIA Xiaohua, LI Na, et al. Synthesis of  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanorod/graphene oxide composites and their tribological properties[J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2012, 22(3): 895-902.
- [77] LI Chuan, ZHANG Qiangqiang, WU Bo, et al. Effect of rGO@Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> on the tribological behavior of biodiesel soot-contaminated polyalphaolefin[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2021, 235(3): 668-676.
- [78] JIANG Zhengquan, ZHANG Yujuan, YANG Guangbin, et al. Synthesis of oil-soluble WS<sub>2</sub> nanosheets under mild condition and study of their effect on tribological properties of poly-alpha olefin under evaluated temperatures[J]. *Tribology International*, 2019, 138: 68-78.
- [79] JIANG Zhengquan, ZHANG Yujuan, YANG Guangbin, et al. Tribological properties of oleylamine-modified ultrathin WS<sub>2</sub> nanosheets as the additive in polyalpha olefin over a wide temperature range[J]. *Tribology Letters*, 2016, 61(3): 24.
- [80] JIANG Zhengquan, YANG Guangbin, ZHANG Yujuan, et al. Facile method preparation of oil-soluble tungsten disulfide nanosheets and their tribological properties over a wide temperature range[J]. *Tribology International*, 2019, 135: 287-295.
- [81] JIANG Zhengquan, ZHANG Yujuan, YANG Guangbin, et al. Tribological properties of tungsten disulfide nanoparticles surface-capped by oleylamine and maleic anhydride dodecyl ester as additive in diisooctylsebacate[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2017, 56(6): 1365-1375.
- [82] ZHENG Xiaojing, XU Yufu, GENG Jian, et al. Tribological behavior of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/MoS<sub>2</sub> nanocomposites additives in aqueous and oil phase media[J]. *Tribology International*, 2016, 102: 79-87.
- [83] WANG Meng, LI Guangda, XU Huayun, et al. Enhanced lithium storage performances of hierarchical hollow MoS<sub>2</sub> nanoparticles assembled from nanosheets[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2013, 5(3): 1003-1008.
- [84] LUO Ting, CHEN Xinchun, LI Peisheng, et al. Laser irradiation-induced laminated graphene/MoS<sub>2</sub> composites with synergistically improved tribological properties[J]. *Nanotechnology*, 2018, 29(26): 265704.
- [85] HU Kunhong, LIU M, WANG Qiongjie, et al. Tribological properties of molybdenum disulfide nanosheets by monolayer restacking process as additive in liquid paraffin[J]. *Tribology International*, 2009, 42(1): 33-39.
- [86] HOU Kaiming, WANG Jinqing, YANG Zhigang, et al. One-pot synthesis of reduced graphene oxide/molybdenum disulfide heterostructures with intrinsic incommensurateness for enhanced lubricating properties[J]. *Carbon*, 2017, 115: 83-94.
- [87] SONG Haojie, WANG Biao, ZHOU Qiang, et al.

- Preparation and tribological properties of MoS<sub>2</sub>/graphene oxide composites[J]. *Applied Surface Science*, 2017, 419: 24-34.
- [88] ISMAIL N, CHOWDHURY Z, JOHAN M, et al. MoS<sub>2</sub> - functionalized graphene composites—Potential replacement for lubricant friction modifier and anti - wear additives[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2021, 23(9): 2100030.
- [89] WU Jian, MU Liwen, ZHU Jiahua, et al. Synthesis of hollow fullerene-like molybdenum disulfide/reduced graphene oxide nanocomposites with excellent lubricating properties[J]. *Carbon*, 2018, 134: 423-430.
- [90] 张飞霞, 李长生, 张毅, 等. 还原氧化石墨烯/MoS<sub>2</sub>与碳纳米管/MoS<sub>2</sub> 作为润滑油添加剂的摩擦学性能研究[J]. *人工晶体学报*, 2015, 44(3): 801-807.
- ZHANG Feixia, LI Changsheng, ZHANG Yi, et al. Tribological property of RGO/MoS<sub>2</sub> and CNTs/MoS<sub>2</sub> as lubricated oil additives[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2015, 44(3): 801-807.
- [91] ALDANA P U, VACHER B, LE M T, et al. Action mechanism of WS<sub>2</sub> nanoparticles with ZDDP additive in boundary lubrication regime[J]. *Tribology Letters*, 2014, 56(2): 249-258.
- [92] RATOI M, NISTE V, WALKER J, et al. Mechanism of action of WS<sub>2</sub> lubricant nanoadditives in high-pressure contacts[J]. *Tribology Letters*, 2013, 52(1): 81-91.
- [93] ZHENG Dan, WU Yanping, LI Zhengyang, et al. Tribological properties of WS<sub>2</sub>/graphene nanocomposites as lubricating oil additives[J]. *RSC Advances*, 2017, 7(23): 146-1468.
- [94] 朱开吉. 石墨烯/二硫化钨复合锂基润滑脂的制备及其性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2020.
- ZHU Kaiji. Preparation and performance study of graphene/WS<sub>2</sub> composite lithium grease [D]. Changsha: Hunan University, 2020.
- [95] 杨亚文, 王娜, 任俊芳, 等. 核壳纳米复合润滑材料研究进展[J]. *材料导报*, 2019, 33(19): 3242-3250.
- YANG Yawen, WANG Na, REN Junfang, et al. Research progress of composite lubricating material with core-shell structure[J]. *Materials Reports*, 2019, 33(19): 3242-3250.
- [96] 郭竟尧, 侯显斌, 魏钰坤, 等. 纳米偏硼酸钙/还原石墨烯润滑添加剂的制备及摩擦学性能[J]. *材料导报*, 2021, 35(20): 20011-20015.
- GUO Jingyao, HOU Xianbin, WEI Yukun, et al. Preparation and tribological properties of nano-calcium metaborate/reduced graphene lubricant additive[J]. *Materials Reports*, 2021, 35(20): 20011-20015.
- [97] LIU Yuchen, MATETI S, LI Chao, et al. Synthesis of composite nanosheets of graphene and boron nitride and their lubrication application in oil[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2018, 20(2): 1700488.
- [98] WU Bo, SONG Haojie, LI Chuan, et al. Enhanced tribological properties of diesel engine oil with nano-lanthanum hydroxide/reduced graphene oxide composites[J]. *Tribology International*, 2020, 141: 105951.
- [99] LIU Xuqing, ZHOU Feng, LIANG Yongmin, et al. Tribological performance of phosphonium based ionic liquids for an aluminum-on-steel system and opinions on lubrication mechanism[J]. *Wear*, 2006, 261(10): 1174-1179.
- [100] ZHOU Feng, LIANG Yongmin, LIU Weimin. Ionic liquid lubricants: Designed chemistry for engineering applications[J]. *Chemical Society Reviews*, 2009, 38(9): 2590-2599.
- [101] XIAO Huaping, GUO Dan, LIU Shuhai, et al. Film thickness of ionic liquids under high contact pressures as a function of alkyl chain length[J]. *Tribology Letters*, 2011, 41(2): 471-477.
- [102] MORDUKHOVICH G, QU J, HOWE J, et al. A low-viscosity ionic liquid demonstrating superior lubricating performance from mixed to boundary lubrication[J]. *Wear*, 2013, 301(1): 740-746.
- [103] YU Bo, BANSAL D, QU Jun, et al. Oil-miscible and non-corrosive phosphonium-based ionic liquids as candidate lubricant additives[J]. *Wear*, 2012, 289: 58-64.
- [104] PALACIO M, BHUSHAN B. Review of ionic liquids for green molecular lubrication in nanotechnology[J]. *Tribology Letters*, 2010, 40(2): 247-268.
- [105] YOU Shengli, ZHOU Ming, WANG Mingyue, et al. Frictional performance of an ionic liquid/graphene composite additive in lubricating oil[J]. *Nano*, 2021, 16(10): 2150111.
- [106] 张晟卯, 蒋正权, 张玉娟, 等. 一种可分散石墨烯纳米复合微粒及其制备方法和应用: 中国, ZL201810121355.4[P]. 2021-01-22.
- ZHANG Shengmao, JIANG Zhengquan, ZHANG Yujuan, et al. Preparation method and application of dispersible graphene nanocomposites: China, ZL201810121355.4[P]. 2021-01-22.
- [107] LIU Yanfei, GE Xiangyu, LI Jinjin. Graphene lubrication[J]. *Applied Materials Today*, 2020, 20:

100662.

- [108] YANG Kang, MA Hongru, CAO Shuaitao, et al. Analysis of friction interfaces with sinusoidal microchannels and the hybrid lubrication mechanisms of a tribo-film[J]. Applied Surface Science, 2020, 525: 146502.
- [109] XUAN Yin, FAN Wu, CHEN Xinchun, et al. Graphene-induced reconstruction of the sliding interface assisting the improved lubricity of various tribo-couples[J]. Materials & Design, 2020, 191: 108661.
- [110] WANG Li, GONG Peiwei, LI Wei, et al. Mono-dispersed Ag/Graphene nanocomposite as lubricant additive to reduce friction and wear[J]. Tribology International, 2020, 146: 106228.
- [111] REN Baijing, GAO Liang, BOTAOXIE, et al. Tribological properties and anti-wear mechanism of ZnO@graphene core-shell nanoparticles as lubricant additives[J]. Tribology international, 2020, 144: 106114.

作者简介: 蒋正权, 男, 1990 年出生, 博士, 讲师, 硕士研究生导师。主要研究方向为润滑油纳米添加剂。

E-mail: jiangzhq@ncwu.edu.cn

余来贵, 男, 1963 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为摩擦学及材料化学。

E-mail: lgyu1963@yahoo.ca

闫明明, 男, 1990 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为表面工程和材料摩擦磨损。

E-mail: yanningming@ncwu.edu.cn

全玉萍, 女, 1979 年出生, 博士, 教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为纳米功能材料。

E-mail: yptong\_zz@163.com

郝用兴(通信作者), 男, 1966 年出生, 博士, 教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为机械工程新材料。

E-mail: haoyongxing@ncwu.edu.cn

张晟卯, 男, 1975 年出生, 教授, 博士, 博士研究生导师。主要研究方向为纳米材料的控制合成与规模化制备、纳米材料摩擦学。

E-mail: zsm@vip.henu.edu.cn

张平余, 男, 1962 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为材料科学及摩擦学。

E-mail: pingyu@henu.edu.cn