

# 二维纳米石墨烯作为传动油添加剂的 齿轮承载性能研究

李东山<sup>1,2</sup>, 孔宁<sup>1</sup>, 张清东<sup>1</sup>, 曹学乾<sup>2</sup>, 鲁志斌<sup>2</sup>, 万晓娜<sup>3</sup>, 林博<sup>3</sup>

(1.北京科技大学 机械工程学院, 北京 100083; 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; 3.广西柳工机械股份有限公司, 广西 柳州 545000)

**摘要:** **目的** 二维纳米石墨烯作为添加剂提高传动油的耐磨性能和承载性能, 满足重载高速工况下传动油在传递运动形式和能量过程中承载和耐磨性能需求。**方法** 二维纳米石墨烯作为传动油添加剂, 以丁二酰亚胺为分散剂制备了石墨烯传动油, 采用 FZG 齿轮试验机标准方法 (NB/SH/T 0306—2013) 评价了传动油和石墨烯传动油的耐磨性能和承载性能, 通过 SEM、Raman、EDS 和 XPS 检测手段分析试验齿轮耐磨及承载机理。**结果** 二维纳米石墨烯作为添加剂将传动油的承载能力从 8 级提升至 10 级。试验齿轮在传动油中表现为黏着磨损和磨粒磨损, 齿轮磨损表面有严重的犁沟现象; 试验齿轮在石墨烯传动油中磨损表面表现为抛光式的磨损, 磨损表面变得光滑。通过 Raman、元素面分布和 XPS 测试结果分析, 重载高速运转条件下试验齿轮磨损表面在石墨烯传动油中形成了不连续的多元杂化润滑膜, 该润滑膜是由低剪切强度相 (石墨烯、硫化物)、硬度和屈服强度比较高的磨损微粒 (铁氧化物) 和弹性模量较低的无定形聚磷酸盐等组成。润滑膜防止了齿轮材料在高载运转过程直接接触, 减小接触面间的剪切强度, 提高了耐磨性能和承载能力。**结论** 二维纳米石墨烯作为一种传动油添加剂, 可以有效提高齿轮传动系统的承载能力, 弥补齿轮材料力学性能不足的问题, 延长传动齿轮的使用寿命。

**关键词:** 二维纳米石墨烯; FZG 测试; 刮伤; 承载; 杂化润滑膜

**中图分类号:** TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2023)03-0151-10

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.03.012

## Load Carrying Performance of Gear Using Two-dimensional Nano Graphene as Transmission Oil Additive

LI Dong-shan<sup>1,2</sup>, KONG Ning<sup>1</sup>, ZHANG Qing-dong<sup>1</sup>, CAO Xue-qian<sup>2</sup>,  
LU Zhi-bin<sup>2</sup>, WAN Xiao-na<sup>3</sup>, LIN Bo<sup>3</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;  
2. State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemicals Physics, Chinese Academy of Sciences,  
Lanzhou 730000, China; 3. Guangxi Liugong Machinery Co., Ltd., Guangxi Liuzhou 545000, China)

**ABSTRACT:** Transmission oil is the lubricating medium of gear drive systems, which not only plays a crucial role in

收稿日期: 2021-11-19; 修订日期: 2022-05-25

**Received:** 2021-11-19; **Revised:** 2022-05-25

**基金项目:** 甘肃省科技基金 (21JR7RA089)

**Fund:** The Natural Science Foundation of Gansu Province, China (21JR7RA089)

**作者简介:** 李东山 (1986—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为润滑材料。

**Biography:** LI Dong-shan (1986-), Male, Doctor, Student Research focus: lubricating material.

**引文格式:** 李东山, 孔宁, 张清东, 等. 二维纳米石墨烯作为传动油添加剂的齿轮承载性能研究[J]. 表面技术, 2023, 52(3): 151-160.

LI Dong-shan, KONG Ning, ZHANG Qing-dong, et al. Load Carrying Performance of Gear Using Two-dimensional Nano Graphene as Transmission Oil Additive[J]. Surface Technology, 2023, 52(3): 151-160.

energy transfer but also is required to meet other performance requirements, such as bearing, wear resistance, and corrosion resistance. Today, with the development of modern industrial technology, gear drive systems are operating in more severe conditions including heavy loads, high speed, high temperature and harsh environments. The traditional transmission oil has not been able to match the new requirements of wear resistance and carrying capacity. Adding nano-additive is a feasible strategy to improve the performance of lubricants. Accordingly, in this work, two-dimensional graphene nanosheet was selected to enhance the performance of traditional transmission oil in the gear drive system.

Graphene nanosheet of 0.02wt.% was added to transmission oil to produce a graphene transmission oil, with 1.0wt.% succinimide as the dispersant. The gear test machine (FZG, Model: 9000) was used to evaluate the wear resistance and load-bearing capacity of transmission oil and graphene transmission oil. In the test, 20MnCr5 alloy steel gears with sixteen teeth and twenty-four teeth were used as the test gear and the drive gear, respectively. The oil level in gear box exceeded two-thirds of the gear centerline in each test. The contact stress of gears was changed by hanging weights, corresponding to the stress increase from one to twelve levels. After 15 min of test for each stress level, the gear surfaces were observed by vision to evaluate the failure level. SEM was used to characterize the gear wear morphology. EDS and Raman spectroscopy were employed to identify the chemical composition of tribofilms formed on the gear surface. X-ray photoelectron spectroscopy was obtained to further investigate the element chemical states in tribofilms.

Results showed that two-dimensional graphene nanosheet as additive can increase the load-carrying capacity of transmission oil from level eight to level ten. Under the lubrication of transmission oil, the wear surface of test gear presented serious furrow phenomenon, and its wear mechanism was serious adhesion and abrasive wear. Under the lubrication of graphene transmission oil, the wear surface of the test gear became smooth, and its wear mechanism was polishing wear. A discontinuous hybrid tribofilm was formed on the gear contact surface in the heavy load and high-speed operation condition under graphene transmission oil. The tribofilm is composed of low shear strength phase (graphene, sulfide), wear particles with high hardness and yield strength (iron oxide, etc.) and amorphous polyphosphate with low elastic modulus. Among them, hard oxide debris is beneficial to prevent the development of macroscopic cracks due to relatively high friction interface hardness. Sulfide and nano-graphene contribute to friction reduction, wear improvement, and bearing capacity. Thus, as a transmission oil additive, graphene can effectively improve the tribological properties and bearing capacity of gear drive system, offset the insufficient mechanical properties of gear materials, and extend the service life of transmission gear. FZG evaluation method can help to estimate the normal working life, guide maintenance, and give early warning in time in the gear transmission system effectively.

**KEY WORDS:** two-dimensional nano graphene additive; FZG test; scratch; load carrying; hybrid lubrication film

传动系统承担了工程机械作业过程中能量和运动形式的传递,其通过传动油的静压或是动压来实现复杂动作的传递、转换和控制,具有功率大、响应快、运动平稳、操作方便等优点。传动油作为运动形式和能量传递的工作介质不但担负着传递能量、转换能量和控制能量的功能,而且还需具备承载、润滑和防腐的性能要求。随着工程机械向重载、高速、低噪音、轻量化等苛刻的工况环境发展,传统传动油已经不能满足传动系统的承载和耐磨性能需求<sup>[1-2]</sup>。近年来将纳米微粒作为添加剂加入润滑油是提高摩擦学性能的一个主要研究方向,其中纳米石墨烯微粒由于独特的层状结构在摩擦学领域受到了广泛的关注。

纳米石墨烯具有优异的物理和化学性能,如机械强度高、超导性好、透光性好、热稳定性高等。纳米石墨烯高强度和层间易剪切等特性赋予了它独特的摩擦和磨损行为,将石墨烯作为润滑油添加剂已经开展了大量的研究工作<sup>[3-8]</sup>。Paul 等<sup>[9]</sup>报道,十二胺修饰的氧化石墨烯在商用发动机油中具有良好的分散性,

采用球-盘摩擦学性能测试时摩擦因数降低 40%。Eswaraiah 等<sup>[10]</sup>将超薄的石墨烯纳米片分散在燃油发动机油中,采用四球法考察纳米润滑油的摩擦学性能,结果显示,含有 0.02 mg/mL 的纳米润滑油的摩擦学性能、抗磨损性能和挤压性能分别提高了 80%、33%和 40%。但是通常在实验室中采用点/面或点/点等接触方式评价传动油的摩擦学性能并不能很好模拟传动系统中齿轮部件复杂的运动形式。

FZG 齿轮试验机评定润滑油的承载和抗磨性能是目前实验室中最有代表性的一种评价方式<sup>[11-12]</sup>。王金国等<sup>[13]</sup>通过四球试验机、Falex、Timkon 和 FZG 4 种试验机比较了润滑脂的承载性能,发现 FZG 研究方法的结果和实际工况环境吻合性最好。因此本文利用 FZG 齿轮试验机模拟齿轮传动过程中既有滚动又有滑动的机械运动状态,采用润滑油承载能力的评定 FZG 目测法(NB/SH/T 0306—2013)标准评价方法,研究了传动油和添加了二维纳米石墨烯传动油的承载和耐磨性能,并揭示了石墨烯传动油承载与耐磨机理。

# 1 试验

## 1.1 石墨烯传动油的制备

本文选用中国科学院兰州化学物理研究所制备的二维石墨烯为传动油添加剂。目前主要有 2 种方式提高纳米石墨烯材料在润滑油中的分散稳定性, 一种是利用修饰剂的方法, 该方法主要通过修饰剂的化学键作用改变石墨烯表面电荷状态及活性以加强石墨烯分散稳定性<sup>[6,14]</sup>; 另外一种是采用分散剂的方法, 分散剂通过其位阻作用可防止石墨烯片层再次堆叠, 进而均匀地分散在润滑油中<sup>[15]</sup>。由于本文中采用的基础油为全配方传动油, 因此采用润滑油中常用的分散剂丁二酰亚胺分散处理二维纳米石墨烯, Gupta 等<sup>[16]</sup>和孔尚等<sup>[17]</sup>也采用了丁二酰亚胺分散剂的方法, 并得到了分散性良好的石墨烯润滑油。制备纳米石墨烯传动油的具体步骤如下: 按质量分数称取 0.02% 的二维石墨烯和 1% 的丁二酰亚胺共同加入到传动油中; 然后用磁力搅拌器搅拌 10 min; 最后进行超声振荡分散 30 min, 得到稳定的石墨烯传动油分散液。

## 1.2 FZG 传动油承载能力测试

利用 FZG 齿轮试验机 (型号: 9000), 采用 NB/SH/T 0306—2013 标准方法评价传动油和石墨烯传动油的承载能力。FZG 齿轮试验机采用一对模数相同的齿轮, 具体几何参数如表 1 所示, 其中齿数为 16 的齿轮为试验齿轮, 齿数为 24 的齿轮为驱动齿轮。试验齿轮与前端刚性轴联接, 在刚性轴上安装有加载耦合器, 通过载荷力臂上悬挂砝码的方式给试验系统施加不同级别的扭矩。由于弹性轴的作用使试验齿轮齿面始终保持着加载的负荷, 在传动箱和试验齿轮以及传动轴之间形成一个封闭力流, 这种 FZG 齿轮试验机又称为封闭力流式齿轮试验机。试验齿轮上加载级数、加载力和齿面接触应力关系如表 2 所示。本文采用的测试齿轮为国产 QCL-003 型齿轮, 齿轮材料为 20MnCr5 合金钢, 表面硬度 HRC60~62。在安装前将表面质量完好的齿轮在丙酮、乙醇中分别超声清洗 20 min, 去除齿轮表面防锈油、黏附杂质等, 然后

将齿轮安装在齿轮试验机齿轮箱内, 在齿轮箱中加入测试润滑油。本文采用浸入式润滑, 润滑油加入量约为 1.25 L, 加入后油面超过齿轮中心线 2/3 处。齿轮箱内设计有电热器, 用以控制初始油温, 同时还有冷却器, 用以控制试验中的油温。2 个齿轮安装在 FZG 齿轮试验机如图 1 所示。齿轮安装完成后, 按照 NB/SH/T 0306—2013 标准评价方法中规定的步骤, 评定传动油和石墨烯传动油的承载能力。

表 1 FZG 齿轮试验机测试齿轮几何参数  
Tab.1 Gear geometric parameters

Parameter	Value
Number of teeth (Z)	$Z_1=16, Z_2=24$
Addendum modification ( $\chi$ )	$\chi_1=0.853\ 2, \chi_2=-0.5$
Centre distance/mm	91.5
Pressure angle/(°)	20
Module/mm	4.5
Face width/mm	20
Contact ratio ( $\varepsilon$ )	1.33
Angle of engagement	22°26'20"

表 2 FZG 加载级别对应的扭矩、法向力和接触点赫兹接触应力

Tab.2 Torque, normal force and Hertz contact stress at contact point corresponding to FZG loading level

Load level	Torque/(N·m)	Normal force/N	Contact point Hertz contact stress/(N·mm <sup>-2</sup> )
1	3.3	99.0	146
2	13.7	407.0	295
3	35.3	1 044	474
4	60.8	1 799	621
5	94.1	2 786	773
6	135.3	4 007	927
7	183.4	5 435	1 080
8	239.3	7 080	1 232
9	302.0	8 949	1 386
10	372.6	11 029	1 538
11	450.1	13 342	1 691
12	534.5	15 826	1 841

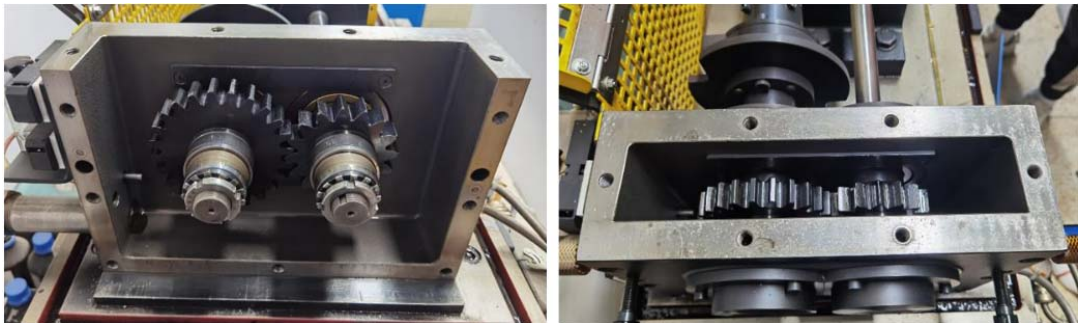


图 1 FZG 齿轮试验机齿轮安装图  
Fig.1 The installation diagram of FZG gear testing machine



### 1.3 二维纳米石墨烯表征

本文采用 TESCAN MIRA3 型扫描电子显微镜 (SEM) 和 Tecnai G2 TF20 型透射电子显微镜 (TEM) 观察二维纳米石墨烯微观形貌。采用拉曼光谱仪 (Raman) 表征原始二维纳米石墨烯结构特征。在承载性能测试后, 采用 SEM 观察试验齿轮表面磨损形貌, 采用能谱仪 (EDS) 对试验齿轮磨损表面材料微区成分元素种类与含量进行分析, 利用 Raman 和 X 射线光电子能谱仪 (XPS) 分析了齿轮磨损表面典型元素结构。

## 2 结果与讨论

### 2.1 二维纳米石墨烯传动油分散性

将 0.01% 的石墨烯和 1% 的丁二酰亚胺共同加入到传动油中经过搅拌超声处理后, 得到了质量分数为 0.01% 的二维纳米石墨烯传动油, 将样品静置一周后对样品的分散稳定性进行考察。图 2 给出了二维纳米石墨烯在传动油中静置分散情况, 可以看出二维纳米石墨烯可以稳定地分散在传动油中, 静置后未发现有明显的沉淀和团聚现象, 这表明丁二酰亚胺有效分散了二维纳米石墨烯。丁二酰亚胺的连接基是环状羧酸酐与伯胺反应的产物, 极性基最常见的是氨基, 该结构在润滑油中极易与纳米石墨烯形成胶团, 从而提高石墨烯在润滑油中的分散稳定性。

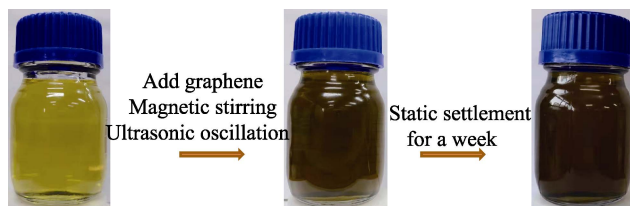


图 2 石墨烯传动油静置一周分散情况  
Fig.2 Dispersion of graphene transmission oil after standing for one week

### 2.2 二维纳米石墨烯形貌结构

图 3a 为二维纳米石墨烯的 SEM 形貌, 从图中看出石墨烯材料非常蓬松且折叠在一起形成片层状的结构。图 3b 为石墨烯的 TEM 形貌, 石墨烯材料呈现少层的透明状态并且出现了明显的卷曲褶皱现象, 从进一步放大图片的边缘部位观察到该石墨烯片层较少, 仅在边缘部位有晶格条纹出现 (如图 3c 所示)。图 3d 为石墨烯选区电子衍射 (SAED) 花样, 石墨烯材料没有观察到明显的衍射环, 进一步证明该二维纳米石墨烯是无序和无定形结构<sup>[18]</sup>。

图 4 为二维纳米石墨烯的 Raman 光谱图, 二维纳米石墨烯 D 峰、G 峰和 2D 峰 3 个峰位分别在 1 355、1 588、2 891  $\text{cm}^{-1}$  位置, 其中 D 峰代表无序的碳和边缘缺陷, G 峰代表有序的  $\text{sp}^2$  杂化碳原子<sup>[6,19]</sup>。D 峰与 G 峰处的相对强度比  $I_D/I_G$  值为 0.91, 表明所制备的石墨烯的层数较少, 结构缺陷和无序度较大。二维纳米石

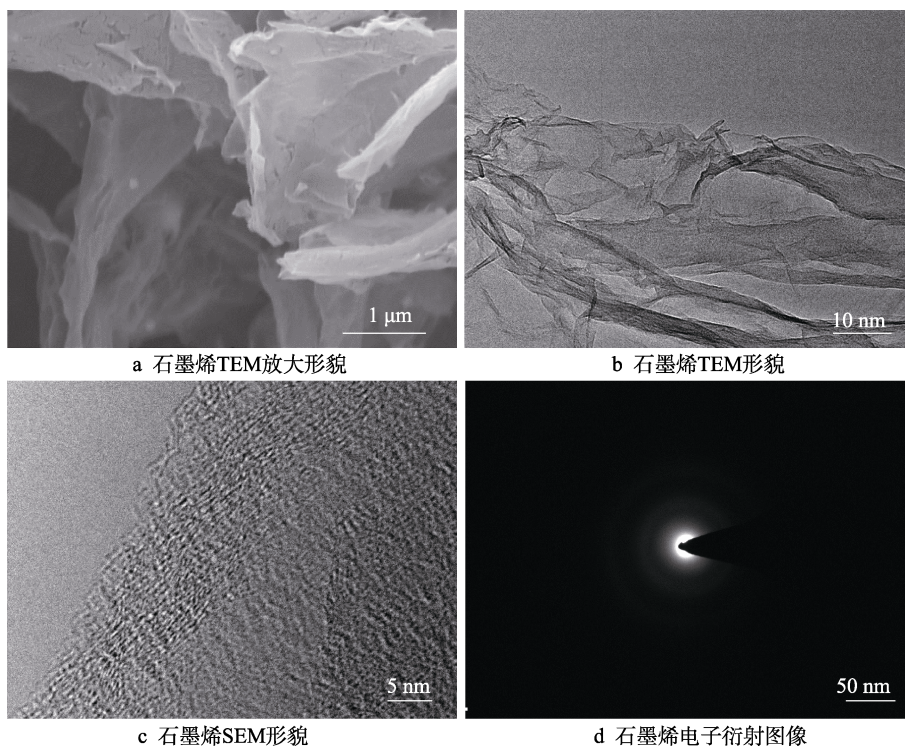


图 3 二维纳米石墨烯微观形貌

Fig.3 The microscopic morphology of two-dimensional nanographene:  
a) SEM morphology of grapheme; b) TEM morphology of grapheme; c) TEM amplified morphology of grapheme; d) graphene electron diffraction image

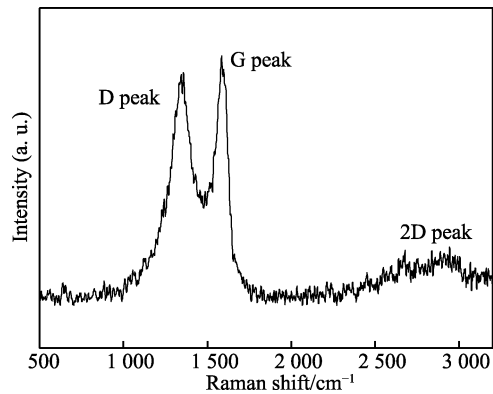


图 4 二维纳米石墨烯 Raman 光谱图  
Fig.4 Raman spectra of two-dimensional nanographene

墨烯 2D 峰蓝移,主要受到了 2D 和 D+G 波段的影响<sup>[14]</sup>。

2.3 二维纳米石墨烯传动油 FZG 承载能力测试

图 5 为试验齿轮在传动油中 8 级承载性能测试后的磨损形貌,可以看到试验齿轮 16 个齿面表面均出现了大量较深的刮伤和划痕,齿面的失效宽度总和约 74.0 mm,齿面失效百分比为 23.13% (刮伤划痕宽度占整个齿面宽度的百分比)。图 6 为试验齿轮在石墨烯传动油中 10 级测试后的磨损形貌,可以看到 16 个齿面花纹消失呈现抛光式的磨损。齿面的失效宽度总和约为 34.3 mm,失效百分比为 10.7%。根据 NB/SH/T 0306—2013 标准评价判断,传动油的失效级别为 8 级,石墨烯传动油的失效级别为 10 级。

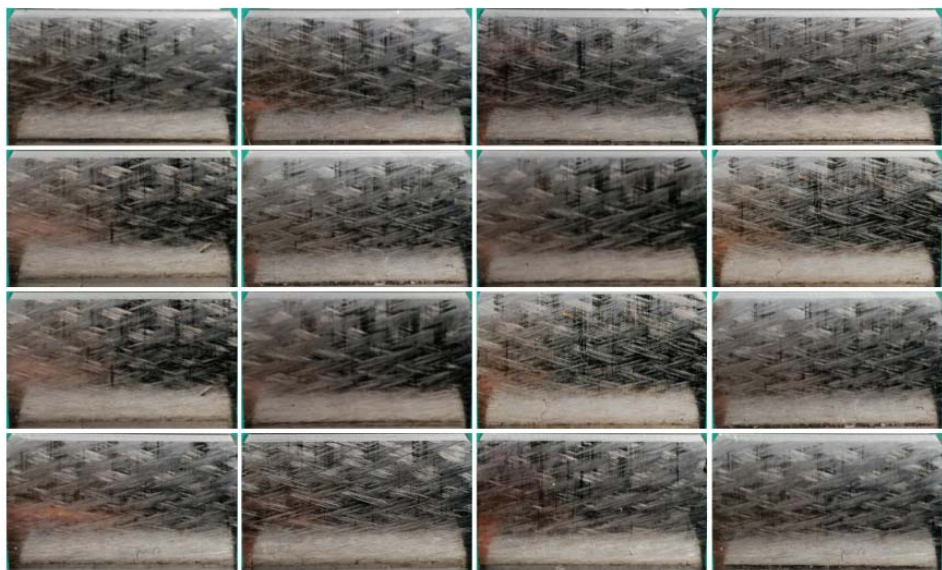


图 5 传动油润滑下试验齿轮 8 级测试后形貌  
Fig.5 Test gear morphology after grade 8 test lubricated with transmission oil

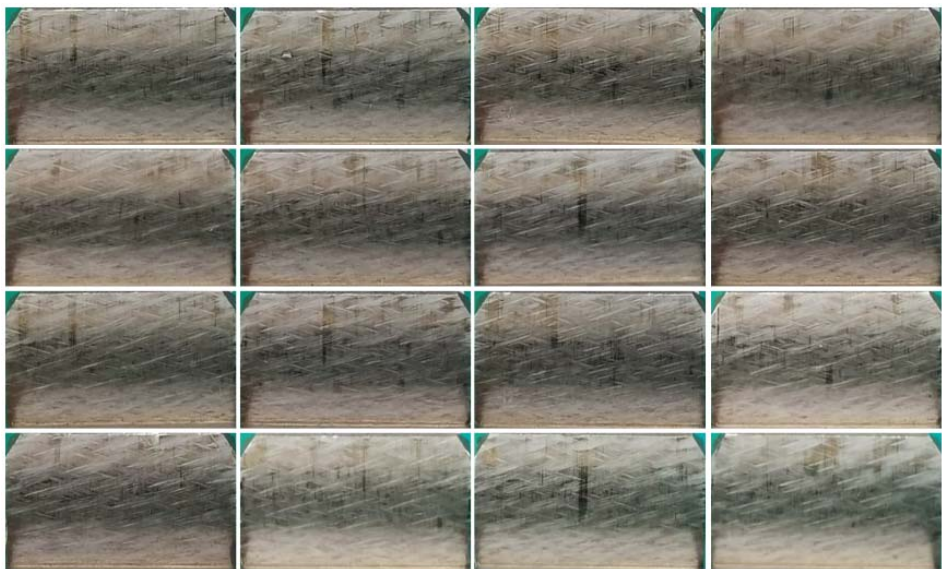


图 6 石墨烯传动油润滑下试验齿轮 10 级测试后形貌  
Fig.6 Test gear morphology after grade 10 test lubricated with graphene transmission oil



## 2.4 二维纳米石墨烯传动油承载机制分析

图 7 为试验齿轮在传动油中 8 级测试后的表面典型磨损形貌, 试验齿轮表面沿着滑动方向出现了大量的塑性变形、材料转移和犁沟, 其中磨损严重的犁沟已经超过了研磨纹的深度, 试验齿轮主要表现为黏着磨损和磨粒磨损特征。在低载高速运转过程中, 传动润滑油会在齿轮表面形成一层物理吸附膜, 此时齿轮属于弹流润滑状态, 齿轮表面材料没有直接接触不会发生磨损。随着施加载荷级别逐步增加, 在重载高速的工况运行时, 齿轮接触面间的间隙逐渐减小, 极少的润滑油能进入接触面间, 尤其是齿轮表面在机械加工后表面微观不平整区域在相对运动中产生黏着、切削、推碾等作用<sup>[12,20]</sup>。齿轮在高载高速运行时处于混合润滑和边界润滑状态, 齿轮接触面间的温度在啮合瞬间会发生较大的变化, 这个变化过程主要是齿轮表面材料直接接触引起的, 持续时间非常短, 这一温度

称为瞬时温升或闪温<sup>[21]</sup>。一方面闪温会导致齿面材料黏着撕裂, 另一方面高温导致部分金属材料发生氧化形成硬度较高的氧化物颗粒, 氧化物颗粒进入到齿轮运动接触面间会导致严重的磨粒磨损和犁沟现象。当齿轮的本体温度和闪温叠加导致齿轮接触面间的温度进一步升高, 此时齿轮严重的热弹变形直接影响其工作性能, 产生振动、噪声, 降低齿轮使用寿命。

图 8 为试验齿轮在石墨烯传动油中 10 级测试后的表面典型磨损形貌, 试验齿轮在石墨烯传动油中主要表现为抛光式磨损, 此时齿轮磨损区域的微观凸起部位逐渐被去除, 凹陷区域逐渐被磨粒和石墨烯填平, 因此表面非常光滑<sup>[22]</sup>。通过 ESM 分析试验齿轮的抛光式磨损过程基本可以分为 3 个阶段, 在初始磨损阶段齿轮表面在重载高速下发生了塑性变形, 齿面部分材料从微观凸起的区域逐渐向微观凹陷的区域转移, 部分撕裂下来的齿轮表面材料黏结在凹陷处, 如图 8a 所示; 随着测试的进行齿轮表面磨损到了第二

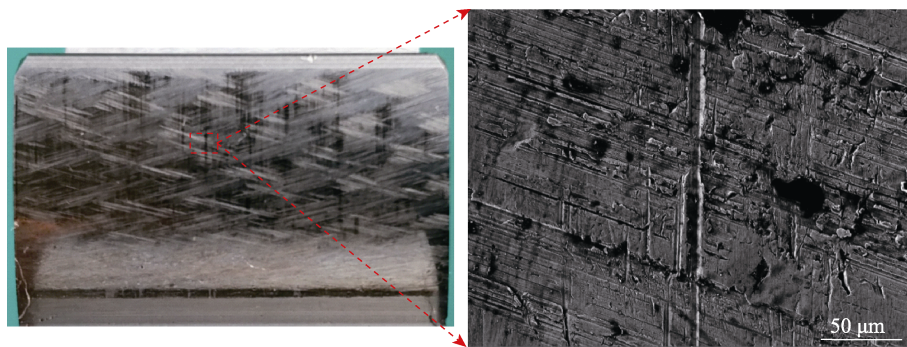


图 7 传动油润滑下试验齿轮 8 级测试后磨损形貌

Fig.7 Test gear worn morphology after grade 8 test lubricated with transmission oil

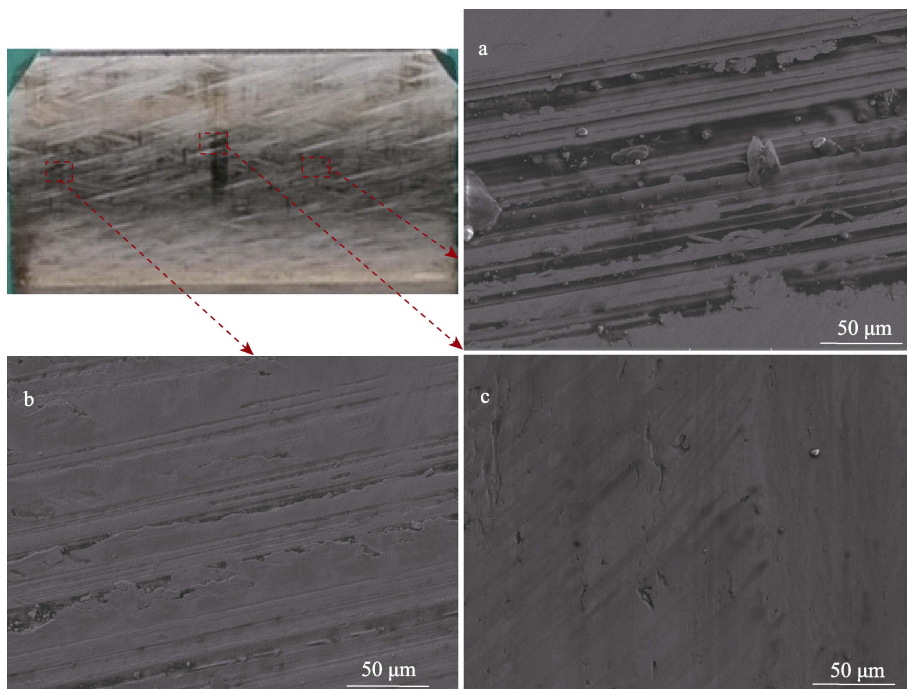


图 8 石墨烯传动油润滑下试验齿轮 10 级测试后磨损形貌

Fig.8 Test gear worn morphology after grade 10 test lubricated with graphene transmission oil

阶段, 此时齿轮表面微观凸起的区域逐渐被磨平, 微观凹陷的区域逐渐被填平, 齿轮表面变得光滑, 如图 8b 所示; 随着测试时间的延长, 齿轮表面微观形貌变得非常光滑, 此时齿轮磨损表面表现为原始花纹消失, 磨损形式为抛光式的磨损, 如图 8c 所示。传动油中的石墨烯、添加剂和齿轮材料在齿轮表面形成了性能优异的摩擦润滑膜, 该摩擦润滑膜提高了齿轮的承载能力。

综合上面的试验结果, 当传动油中添加石墨烯后, 齿轮运转过程中石墨烯纳米片可以很容易地进入到齿轮的接触面之间, 由于二维石墨烯具有超薄的几何特性和超大的柔性, 齿轮表面能够通过改变自身构型捕获一部分的磨损微粒, 石墨烯通过自身的钉扎效果使自身和磨损微粒更加牢固地钉扎在在齿轮表面, 防止磨损微粒在摩擦接触面间进一步滚动造成磨粒磨损。利用石墨烯传动油在高速重载齿轮齿面上生成具有良好减摩性和抗磨损性的润滑膜, 可以改善高速重载齿轮承载和耐磨性能。

图 9a 为试验齿轮在石墨烯传动油中磨损表面 Raman 光谱图, 在不同的磨损位置得到了 2 种 Raman 光谱。Raman 谱图 1 和 2 均出现了石墨烯材料典型的

D 峰和 G 峰, 说明传动油中的石墨烯在齿轮接触表面形成了润滑膜, 发挥了承载和抗磨的作用, 但是 Raman 谱图 1 和 2 中没有检测到 2D 峰, 说明润滑膜中的石墨烯结构变得更加无序化。谱图 2 中在  $664\text{ cm}^{-1}$  处出现了  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  的峰, 说明在高载条件下齿轮表面材料发生了氧化反应生成了  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 。图 9b 为试验齿轮在传动油中磨损表面 Raman 光谱图, 在不同的检测位置也得到了 2 种 Raman 光谱。谱图 3 中没有出现衍射峰, 说明该磨损区域没有发生严重的氧化反应或是氧化产物很少。谱图 4 中出现了  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  的峰, 说明高载条件下传动油中齿轮表面材料也发生了氧化反应。

采用 EDS 能谱对试验齿轮磨损表面的元素含量和元素分布进行了分析。图 10 为传动油齿轮磨损表面元素含量, 齿轮磨损表面检测到了 P、S、Zn 和 O 等元素, 表明传动油中的添加剂在齿轮的磨损面间发生了化学反应, 其中 9.26% 的 O 元素表明磨损表面氧化较为严重。图 11 中为石墨烯传动油齿轮磨损表面元素含量, 其中 C 元素高达 24.3%, 证明二维纳米石墨烯作为添加剂大量地富集在齿轮磨损表面, 同时也检测到了 P、S 和 Zn 等元素。通过图 12 石墨烯传动

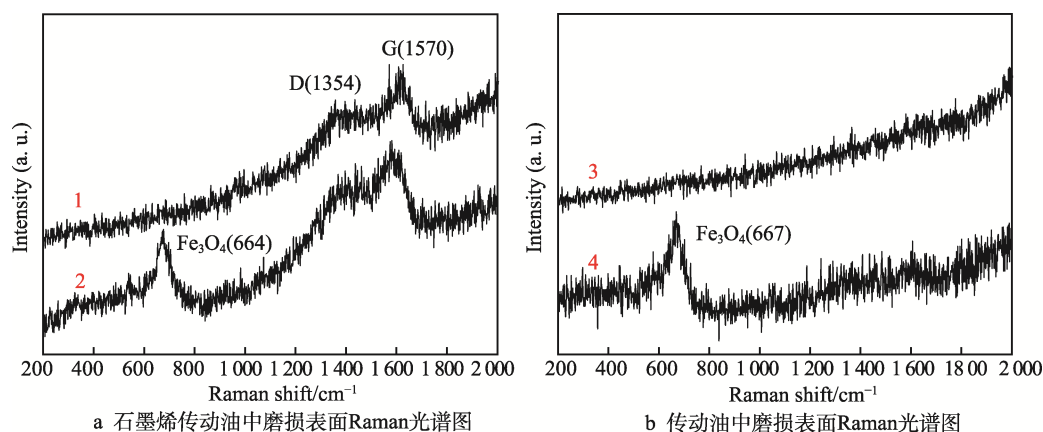


图 9 齿轮磨损表面 Raman 光谱图

Fig.9 Raman spectra of worn surface of test gear: a) graphene transmission oil; b) transmission oil

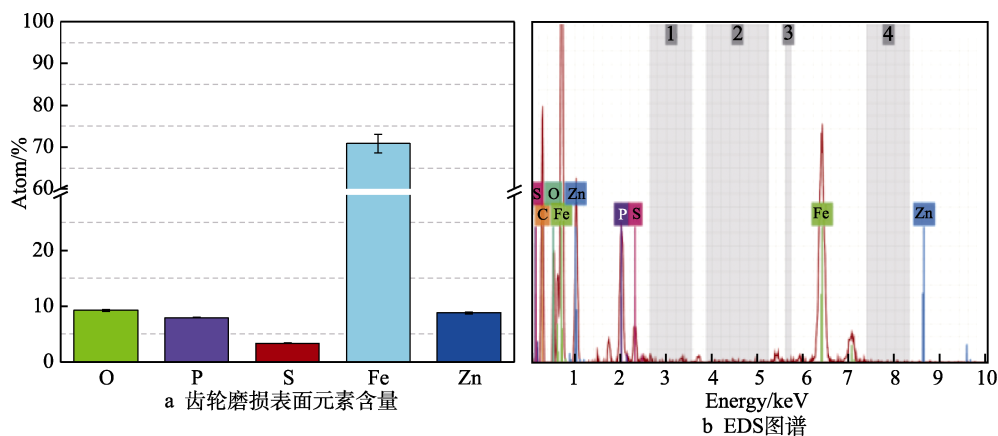


图 10 传动油润滑下齿轮磨损表面元素含量

Fig.10 Element content of gear worn surface lubricated with transmission oil: a) element content of gear wear surface; b) EDS图



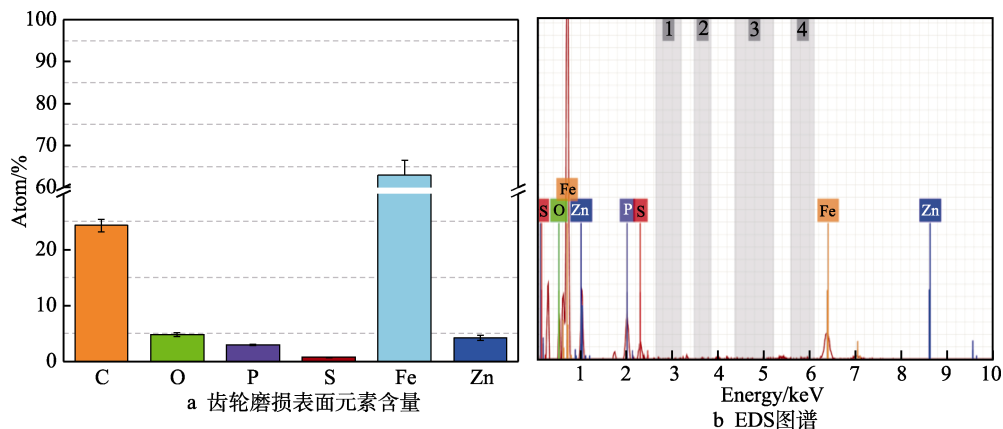


图 11 石墨烯传动油润滑下齿轮磨损表面元素含量

Fig.11 Element content of gear worn surface lubricated with graphene transmission oil:  
a) element content of gear wear surface; b) EDS

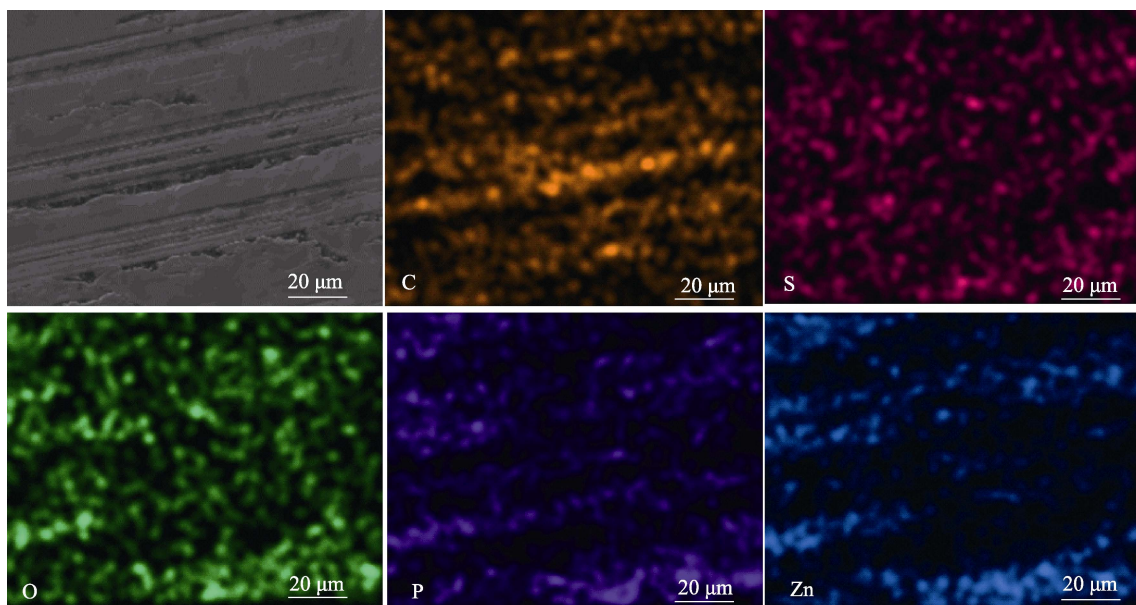


图 12 石墨烯传动油润滑下齿轮磨损表面元素分布

Fig.12 Elemental distribution mapping of gear worn surface lubricated with graphene transmission oil

油齿轮磨损表面元素面分布可以看出, C 元素在齿轮表面具有研磨纹的区域聚集, 证明粗糙的表面有利于捕获纳米石墨烯材料, 对摩擦接触区域进行填充和修复, 有效改善了齿轮表面的润滑性能。P、S、Zn 等元素在磨痕的光滑区域出现了聚集现象, 这可能是由于齿轮在运转过程中光滑区域材料直接接触导致瞬间闪温较高, 高温有利于传动油中的添加剂发生摩擦化学反应生成润滑膜。同时齿轮表面也有 4.8% 的 O 元素存在, 证明摩擦过程中发生了氧化反应。为了进一步探究石墨烯传动油中试验齿轮磨损表面润滑膜的构成, 采用 XPS 检测了磨痕处的摩擦化学产物, 图 13 给出了齿轮磨痕处典型元素 P 2p 和 S 2p 的 XPS 谱, P 2p 位于 133.3 eV 的峰归属于含磷化合物 (磷酸铁或磷酸亚铁), S 2p 位于 168.0 eV 的峰归属于硫的氧化物<sup>[23-25]</sup>。

从上面的测试和分析结果可知, 石墨烯作为添加

剂将传动油承载能力从 8 级提高到 10 级, 石墨烯传动油润滑下试验齿轮磨损表面为抛光式的磨损, 而试验齿轮在传动油条件下磨损表面表现出严重的黏着磨损和磨粒磨损。从 Raman、元素面分布和 XPS 结果可以看出, 试验齿轮表面形成了分布不均匀的多元杂化润滑膜, 润滑膜一方面可以防止齿轮材料在高载运转过程中直接接触, 另一方面可以减小接触面间的剪切强度, 从而显著提高耐磨性能和承载能力。从化学组成方面来看, 润滑膜是由低剪切强度相 (石墨烯、硫化物)、硬度和屈服强度比较高的磨损微粒 (铁氧化物等) 和弹性模量较低的无定形聚磷酸盐等组成。其中无定形聚磷酸盐作为黏合剂将摩擦化学反应物和二维纳米石墨烯黏合在一起, 同时可以用化学方法将金属氧化物分解为  $\text{FePO}_4$ , 以实现所需的易剪切的特性<sup>[26-27]</sup>。硬质的氧化物碎屑量将使摩擦界面保持相对较高的硬度, 当齿轮接触面间的接触应力较高时,



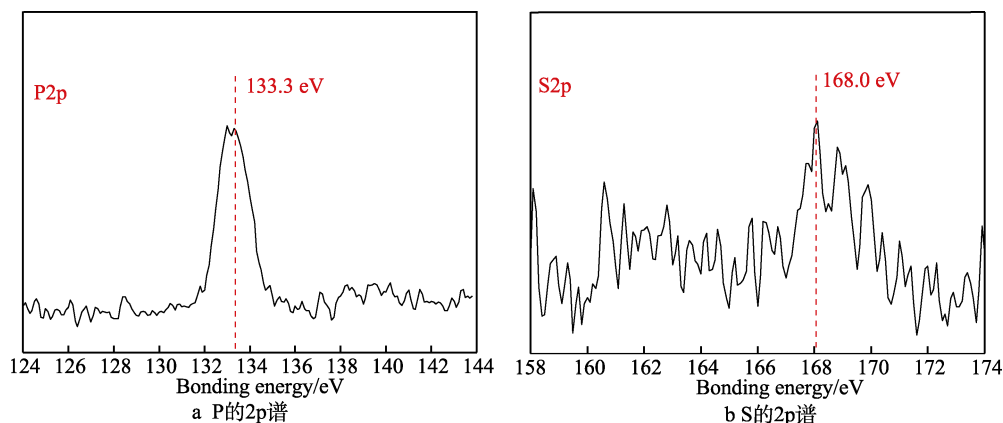


图 13 石墨烯传动油滑下齿轮磨损表面元素的 XPS 谱  
Fig.13 X-ray photoelectron spectra of the elements on the worn surfaces lubricated by graphene transmission oil

有利于转移和阻止宏观裂纹的发展<sup>[16,28-29]</sup>。因此在齿轮高载高速运转过程中,传动油中的石墨烯与一些含 S、P 添加剂在温度和压力作用下聚合在一起形成了多元杂化润滑膜,该润滑膜具有与金属硫化物相似的低剪切强度,减少了齿轮表面磨损,提高了传动油的承载能力(如图 14 所示)。但是还需要进一步的证据来证明含 S、P 添加剂与石墨烯的相互作用机理。石墨烯作为传动油添加剂可以有效提高齿轮传动副摩擦学性能和承载能力,弥补传动齿轮材料力学性能和机械特性的不足,提高传动齿轮的使用寿命。依照 NB/SH/T 0306—2013 标准方法可以有效地预估齿轮传动系统正常工作的寿命,及时组织维修或提出预警。

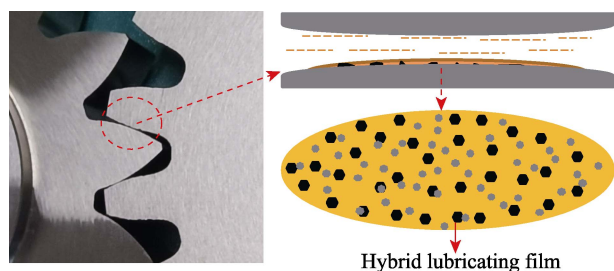


图 14 石墨烯传动油抗磨承载机理  
Fig.14 Diagram of wear resistance and load carrying mechanism of graphene transmission oil

### 3 结论

1) 采用润滑油承载能力的评定 FZG 目测法(NB/SH/T 0306—2013)标准评价方法研究传动油承载能力,发现:将二维纳米石墨烯作为添加剂,传动油的承载能力从 8 级提高到 10 级。

2) 传动油在承载 8 级测试后,试验齿轮表现为严重的黏着磨损和磨粒磨损,齿轮表面有严重的犁沟现象;石墨烯传动油在承载 10 级测试后,试验齿轮表现为抛光式的磨损,齿轮表面变得光滑并形成了混合润滑膜。

3) 在齿轮重载高速运转过程中,二维纳米石墨烯与传动油中一些含 S、P 的添加剂在温度和压力作用下聚合在一起,形成了多元杂化润滑膜,该润滑膜具有与金属硫化物相似的低剪切强度,减少了齿轮表面的磨损,提高了传动油的承载能力。

### 参考文献:

- [1] GELINSKI S, WINTER M, WICHMANN H, et al. Development and Testing of a Novel Glycerol/Chitosan Based Biocide-Free Hydraulic Fluid[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 112: 3589-3596.
- [2] 闫龙龙, 厉晓英. 改性石墨烯对液压油摩擦学性能的影响[J]. 石油炼制与化工, 2020, 51(12): 76-81.  
YAN Long-long, LI Xiao-ying. Effect of Modified Graphene on Tribological Properties of Hydraulic Oil[J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2020, 51(12): 76-81.
- [3] LI Xing, LU Hai-lin, LI Jian-hui, et al. Preparation and Lubricating Properties of Poly(Vinylidene-Fluoride) Particles Wrapped by Reduced Graphene Oxide[J]. Tribology International, 2018, 127: 351-360.
- [4] SENATORE A, D'AGOSTINO V, PETRONE V, et al. Graphene Oxide Nanosheets as Effective Friction Modifier for Oil Lubricant: Materials, Methods, and Tribological Results[J]. ISRN Tribology, 2013, 2013: 1-9.
- [5] MENG Yuan, SU Feng-hua, CHEN Yang-zhi. 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.
- [6] LI Xiao-peng, GAN Chao-liang, HAN Ze-yong, et al. High Dispersivity and Excellent Tribological Performance of Titanate Coupling Agent Modified Graphene Oxide in Hydraulic Oil[J]. Carbon, 2020, 165: 238-250.
- [7] GAN Chao-liang, LIANG Ting, LI Wen, et al. Hydroxyl-Terminated Ionic Liquids Functionalized Graphene Oxide

- with Good Dispersion and Lubrication Function[J]. Tribology International, 2020, 148: 106350.
- [8] 栗雯琦, 陈文革, 崔晓娟, 等. 氧化石墨烯膜的制备、改性及应用研究进展[J]. 表面技术, 2021, 50(2): 199-210.
- LI Wen-qi, CHEN Wen-ge, CUI Xiao-juan, et al. Research Progress on Preparation, Modification and Application of Graphene Oxide Membrane[J]. Surface Technology, 2021, 50(2): 199-210.
- [9] YANG Jin, XIA Yun-fei, SONG Hao-jie, et al. Synthesis of the Liquid-Like Graphene with Excellent Tribological Properties[J]. Tribology International, 2017, 105: 118-124.
- [10] ESWARAI AH V, SANKARANARAYANAN V, RAM-APRABHU S. Graphene-Based Engine Oil Nanofluids for Tribological Applications[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2011, 3(11): 4221-4227.
- [11] 李小刚, 王爱香, 李旭. 齿轮油承载性能模拟试验研究[J]. 润滑油, 2019, 34(6): 58-60.
- LI Xiao-gang, WANG Ai-xiang, LI Xu. Study on Simulation Test Method for Bearing Capacity of Gear Oil[J]. Lubricating Oil, 2019, 34(6): 58-60.
- [12] KRŽAN B. Load-Carrying Capacity of WC/C-Coated Gears Lubricated with a Low-Viscosity Oil[J]. Lubrication Science, 2016, 28(3): 127-139.
- [13] 王国金, 李松洮, 张立夫, 等. 摩擦磨损试验机对润滑剂承载能力测试结果的比较[J]. 润滑与密封, 1999, 24(5): 46-48.
- WANG Guo-jin, LI Song-tao, ZHANG Li-fu, et al. Comparison among Load Carrying Capacity of Lubricants Measured by Various Friction and Wear Test Machines[J]. Lubrication Engineering, 1999, 24(5): 46-48.
- [14] GUSAIN R, MUNGESE H P, KUMAR N, et al. Covalently Attached Graphene-ionic Liquid Hybrid Nanomaterials: Synthesis, Characterization and Tribological Application[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2016, 4(3): 926-937.
- [15] CHEN Yan, RENNER P, LIANG Hong. Dispersion of Nanoparticles in Lubricating Oil: A Critical Review[J]. Lubricants, 2019, 7(1): 7.
- [16] GUPTA M K, BIJWE J. A Complex Interdependence of Dispersant in Nano-Suspensions with Varying Amount of Graphite Particles on Its Stability and Tribological Performance[J]. Tribology International, 2020, 142: 105968.
- [17] 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 Shang, HU Wen-jing, LI Jiu-sheng. Tribological Properties of Graphene in PAO Base Oil[J]. China Surface Engineering, 2019, 32(3): 162-169.
- [18] YANG Bing-jun, CHEN Jiang-tao, LEI Shu-lai, et al. Spontaneous Growth of 3D Framework Carbon from Sodium Citrate for High Energy- and Power-Density and Long-Life Sodium-Ion Hybrid Capacitors[J]. Advanced Energy Materials, 2018, 8(10): 1702409.
- [19] 郭惠霞, 安景花, 梁军. 低共熔溶剂中电化学剥离制备 GO 及脉冲电沉积 Ni-GO 复合镀层性能研究[J]. 表面技术, 2020, 49(3): 224-233.
- GUO Hui-xia, AN Jing-hua, LIANG Jun. Preparation of Graphene Oxide by Electrochemical Exfoliation and Properties of Pulsed Electrodeposited Ni-Graphene Oxide Composite Coating in Deep Eutectic Solvent[J]. Surface Technology, 2020, 49(3): 224-233.
- [20] 朴钟宇, 徐滨士, 王海斗, 等. 滚动接触条件下铁基涂层的疲劳磨损寿命试验研究[J]. 材料工程, 2010, 38(6): 50-53, 58.
- PIAO Zhong-yu, XU Bin-shi, WANG Hai-dou, et al. Experimental Investigation of Fatigue Wear Life of Fe-Based Coating under Rolling Contact[J]. Journal of Materials Engineering, 2010, 38(6): 50-53, 58.
- [21] SHI Xiu-jiang, LU Xi-qun, HE Tao, et al. Predictions of Friction and Flash Temperature in Marine Gears Based on a 3D Line Contact Mixed Lubrication Model Considering Measured Surface Roughness[J]. Journal of Central South University, 2021, 28(5): 1570-1583.
- [22] GULZAR M, MASJUKI H H, KALAM M A, et al. Tribological Performance of Nanoparticles as Lubricating Oil Additives[J]. Journal of Nanoparticle Research, 2016, 18(8): 223.
- [23] NEVILLE A, MORINA A, HAQUE T, et al. Compatibility between Tribological Surfaces and Lubricant Additives—How Friction and Wear Reduction can be Controlled by Surface/Lube Synergies[J]. Tribology International, 2007, 40(10-12): 1680-1695.
- [24] SALINAS RUIZ V R, KUWAHARA T, GALIPAUD J, et al. Interplay of Mechanics and Chemistry Governs Wear of Diamond-Like Carbon Coatings Interacting with ZDDP-Additivated Lubricants[J]. Nature Communications, 2021, 12(1): 1-15.
- [25] QU Jun, MEYER H M, CAI Zhen-bing, et al. Characterization of ZDDP and Ionic Liquid Tribofilms on Non-Metallic Coatings Providing Insights of Tribofilm Formation Mechanisms[J]. Wear, 2015, 332-333: 1273-1285.
- [26] VENGUDUSAMY B, GREEN J H, LAMB G D, et al. Durability of ZDDP Tribofilms Formed in DLC/DLC Contacts[J]. Tribology Letters, 2013, 51(3): 469-478.
- [27] ABDULLAH TASDEMIR H, WAKAYAMA M, TOKO-ROYAMA T, et al. The Effect of Oil Temperature and Additive Concentration on the Wear of Non-Hydrogenated DLC Coating[J]. Tribology International, 2014, 77: 65-71.
- [28] WAN Shan-hong, PU Ji-bin, LI Dong-shan, et al. Tribological Performance of CrN and CrN/GLC Coated Components for Automotive Engine Applications[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 695: 433-442.
- [29] WAN Shan-hong, TIEU A K, XIA Ya-na, et al. Tribocchemistry of Adaptive Integrated Interfaces at Boundary Lubricated Contacts[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 1-17.