

专题——减摩抗磨添加剂与表面的相互作用

# 油溶性有机减摩抗磨添加剂的研究进展

于强亮<sup>1,2</sup>, 蔡美荣<sup>1</sup>, 周峰<sup>1</sup>, 刘维民<sup>1</sup>

(1.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;  
2.中国石油兰州润滑油研究开发中心, 兰州 730060)

**摘要:** 随着科学技术的不断进步, 摩擦学研究发展迅速, 一些新型的润滑领域相继出现, 伴随而生一些新型润滑技术和材料, 使得机械运行稳定性和寿命逐渐增加。机械运转关键润滑部件(如轴承、齿轮、涡轮等)的稳定性对设备的长效和可靠运行起到了决定性作用, 其中, 满足润滑部件长效运行的关键技术在于润滑油的品质和优良的润滑稳定性。全配方润滑油中基础油的质量是根本, 润滑添加剂对润滑油综合性能具有重要影响, 而减摩抗磨添加剂是润滑油中最重要的添加剂。综述了近 10 年润滑油常用的有机减摩抗磨添加剂的研究进展, 根据减摩抗磨添加剂的类别, 详细综述了磷系减摩抗磨添加剂、硫系减摩抗磨添加剂、硼系减摩抗磨添加剂、含氮杂环化合物及其衍生物减摩抗磨添加剂、离子液体减摩抗磨添加剂, 并对其发展状况和减摩抗磨机理进行了探究。最后对上述几类减摩抗磨添加剂存在的问题进行了简要分析, 并对其未来发展趋势进行了展望, 对减摩抗磨添加剂的发展方向 and 面临的问题提出了几点建议和意见。

**关键词:** 基础油润滑; 减摩抗磨; 添加剂; 摩擦学性能

**中图分类号:** TH117; TE626 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)09-0001-18

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.09.001

## Research Progress of Oil-soluble Organic Friction-reduction and Anti-wear Additives

YU Qiang-liang<sup>1,2</sup>, CAI Mei-rong<sup>1</sup>, ZHOU Feng<sup>1</sup>, LIU Wei-min<sup>1</sup>

(1.State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2.PetroChina Lanzhou Lubricating Oil R&D Institute, Lanzhou 730060, China)

**ABSTRACT:** With the continuous advancement of science and technology, tribological research has been rapidly developed,

收稿日期: 2020-08-25; 修订日期: 2020-09-16

Received: 2020-08-25; Revised: 2020-09-16

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0703802); 国家自然科学基金项目(51705504, 21972153, 51675512); 中国博士后基金面上项目(2019M653798); 中国科学院青年创新促进会(2018454)

**Fund:** National Key Research and Development Program of China (2018YFB0703802), National Natural Science Foundation of China (51705504, 21972153, 51675512), China Postdoctoral Science Foundation Funded Project (2019M653798) and Youth Innovation Promotion Association of CAS (2018454)

作者简介: 于强亮(1986—), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为润滑油添加剂、缓蚀剂及功能防腐涂层。

**Biography:** YU Qiang-liang (1986—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: lubricant additives, corrosion inhibitors and functional anticorrosive coatings.

通讯作者: 蔡美荣(1982—), 女, 博士, 研究员, 主要研究方向为摩擦化学、离子液体润滑剂和超分子凝胶润滑剂。邮箱: caimr@licp.cas.cn

**Corresponding author:** CAI Mei-rong (1982—), Female, Doctor, Professor, Research focus: tribochemistry, ionic liquid lubricants and supramolecular gel lubricant. E-mail: caimr@licp.cas.cn

通讯作者: 周峰(1976—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为仿生摩擦学、减阻降噪和边界润滑。邮箱: zhoul@licp.cas.cn

**Corresponding author:** ZHOU Feng (1976—), Male, Doctor, Professor, Research focus: the bioinspired tribology, drag-reduction antibiofouling and boundary lubrication. E-mail: zhoul@licp.cas.cn

引文格式: 于强亮, 蔡美荣, 周峰, 等. 油溶性有机减摩抗磨添加剂的研究进展[J]. 表面技术, 2020, 49(9): 1-18.

YU Qiang-liang, CAI Mei-rong, ZHOU Feng, et al. Research progress of oil-soluble organic friction-reduction and anti-wear additives[J]. Surface technology, 2020, 49(9): 1-18.

and some new lubrication fields have emerged one after another, accompanied by some new lubrication technologies and materials, so that the stability and service life of machinery are getting higher and higher. The stability of key lubricating parts such as bearings, gears, turbines, etc., in mechanical operation plays a decisive role in the long-term and reliable operation of equipment. The key technology to meet the long-term operation of lubricating parts lies in the quality of lubricating oil and excellent lubrication stability. The quality of base oil in fully formulated lubricating oil is fundamental. Lubricating additives have an important influence on the overall performance of lubricating oils. Anti-friction and anti-wear additives are the most important additives in lubricating oils. The research progress of organic friction-reduction and anti-wear additives commonly used in lubricants in the past 10 years was reviewed. According to the categories of friction-reduction and anti-wear additives, a detailed overview of phosphorus-based friction-reduction and anti-wear additives, sulfur-based friction-reduction and anti-wear additives, boron-based friction-reduction and anti-wear additives, nitrogen-containing heterocyclic compounds and their derivatives of friction-reduction and anti-wear additives and ionic liquid friction-reduction and anti-wear additives were described in detail, and the development status and friction-reduction and anti-wear mechanism were explored. Finally, the problems of the above-mentioned friction-reduction and anti-wear additives were briefly analyzed, and the future development trend was prospected. Moreover, some suggestions and opinions were put forward on the development trend and problems of friction-reduction and anti-wear additives.

**KEY WORDS:** base oil lubrication; friction-reduction and anti-wear; additives; tribological performances

摩擦作为一种自然现象,古已有之。远古时期,人类就已经发明了钻木取火、用动物油脂润滑车轴等助力生活。如今,摩擦已经发展成为一门与人类生产生活息息相关的学科,得到了人们的普遍关注。

众所周知,机械在运转过程中必然会产生摩擦和磨损<sup>[1-3]</sup>。通过研究和应用先进的润滑技术,可以显著地降低摩擦和磨损,节约能量损耗。据统计,由摩擦造成的能量损失约占世界消耗能量的 50%,80% 的机械事故是由磨损导致,仅我国每年因摩擦磨损造成的经济损失就有上千亿元<sup>[4]</sup>。在节能减排的背景需求下,研究和应用摩擦学的知识和技术,采用合理的润滑手段来解决摩擦磨损和润滑的问题已经得到了人们的普遍认可。对于机械设备,合理使用润滑剂不仅可以提高机械的使用寿命和机械运行的稳定性能,而且能够极大提升燃油经济性。目前,在工业领域使用最简便、最安全有效的润滑剂主要是液体润滑剂<sup>[5-8]</sup>。

液体润滑剂的润滑模式通常被定义为 4 类<sup>[9]</sup>:边界润滑、混合润滑、弹性流体动压润滑、流体润滑,如图 1 所示。

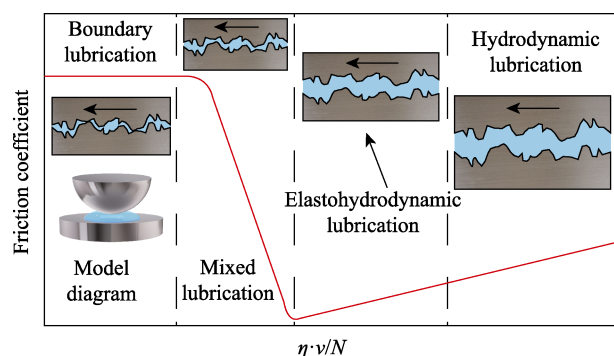


图 1 Stribeck 曲线与摩擦状态  
Fig.1 Stribeck curve and friction state

边界润滑 (BL) 状态,其特征在于典型膜厚为 1~50 nm。高负载、高温或使用低黏度油时,大多数润滑油膜被挤压到摩擦副接触区域以外,并且发生摩擦副的直接接触。整个摩擦体系的负载完全由金属粗糙表面承担<sup>[10-13]</sup>。

混合润滑 (ML) 状态,其特征在于干摩擦、边界润滑、薄膜润滑和流体动压润滑共存。与边界润滑相比,摩擦副的两个金属表面离得相对较远,并且金属与金属的接触有时会发生,而产生摩擦。此状态下摩擦体系的负载由润滑油和摩擦副的凹凸不平共同承担<sup>[14-17]</sup>。

弹性流体动压润滑 (EHL),其特征在于典型膜厚为 1~100 μm。摩擦副表面彼此之间的距离足够远,可以防止金属对金属粘结。在这一状态下,摩擦系统施加的负载完全由润滑油膜承担。此时润滑油的黏度、用量决定了摩擦系数,润滑油的黏度则取决于温度、压力/黏度系数等影响因素<sup>[18-21]</sup>。

流体动压润滑 (HDL),其特征在于典型膜厚为 1~100 μm,主要由摩擦表面的相对运动所产生的动压效应形成流体润滑膜,常用于滑动轴承的润滑。摩擦副之间足够远,状态与弹性流体动压润滑相同。

摩擦副处于边界和混合润滑状态时会产生严重的摩擦和磨损,是导致机械高磨损和高能量损失的主要原因。对于这两个状态下的润滑改善,最有效的手段是使用润滑添加剂,其能够在摩擦副表面形成有效保护膜,以防止摩擦副的直接接触而产生的摩擦磨损。为此,润滑油中通常添加油溶性有机减摩抗磨添加剂和极压添加剂来改善其润滑、抗磨和极压承载性能,从而满足机械在不同工况下的润滑需求<sup>[22-25]</sup>。本文将重点综述近 10 年来,润滑油中普遍采用的几大类油溶性有机减摩抗磨添加剂。

## 1 油溶性有机减摩抗磨添加剂

油溶性有机减摩抗磨添加剂通常带有极性头基和非极性的长烷基链。极性头基团决定分子的减摩抗磨特性, 烷基链长决定了分子本身的油溶性能。减摩抗磨添加剂需要通过在摩擦副的表面吸附或反应而起作用, 因此减摩抗磨添加剂的分子结构与其性能关系密切<sup>[26]</sup>。常见的油溶性有机减摩抗磨添加剂可分为 5 大类: 1) 含磷化合物(磷系减摩抗磨添加剂), 例如磷酸酯、亚磷酸酯、磷酸盐、烷基二硫代磷酸钼(MoDTP); 2) 含硫化合物(硫系减摩抗磨添加剂), 例如硫化异丁烯、二烷基二硫代磷酸锌(ZDDP)、二硫代氨基甲酸钼(MoDTC); 3) 含氮化合物(含氮杂环类减摩抗磨添加剂), 如胺、酰胺、酰亚胺、氮杂环等<sup>[27]</sup>; 4) 含硼化合物(硼酸酯及其衍生物), 例如有机硼酸酯、硫磷掺杂的硼酸酯衍生物; 5) 离子液体添加剂, 例如油溶性离子液体。

### 1.1 磷系减摩抗磨添加剂

磷系减摩抗磨添加剂发展时间较短, 图 2 给出了磷系减摩抗磨添加剂的简要发展历程。从 1941 年发表的含有磷和硫的润滑添加剂的一系列专利, 再到 J. M. Thorp<sup>[28]</sup>于 1973 年发表了二硫化钼与 ZDDP 作为油的润滑添加剂, 并使用四球摩擦试验机进行测试, 研究发现, 含有 ZDDP 的润滑油最大无卡咬负荷( $P_B$ )几乎是基础油的两倍, 烧结负荷( $P_D$ )提高了 3.5%, 表现出良好的抗磨性能。目前, 磷系减摩抗磨添加剂

已经得到了广泛关注, 王公应<sup>[29]</sup>合成了两种氮磷协同型添加剂, 获得了优异的减摩抗磨性能并首次发现氮磷协同作用对摩擦学性能的影响; 乔玉林<sup>[30]</sup>认为氮磷协同型添加剂吸附在摩擦表面时, 分子间形成的氢键可以增强横向引力和增加油膜强度。在氮磷型添加剂中, 氮是一种路易斯碱, 可以有效抑制磷元素的腐蚀。龙清平<sup>[31]</sup>采用量子化学, 计算了 8 类磷系润滑添加剂的构效关系, 结果表明, 添加剂分子的前线轨道能级, Mulliken 电荷分布决定了其润滑性能, O—C、O—N、C—N 键能较小, 在边界润滑中容易断裂, 易发生摩擦化学反应。杨超<sup>[32]</sup>采用亚磷酸酯、芳基磷酸酯和磷酸酯胺盐考察不同结构的含磷添加剂的润滑行为, 发现磷酸酯的高反应活性和高的热稳定性共同增强其极压、抗磨润滑性能。

磷系添加剂具有优异的减摩抗磨性能, 良好的防腐能力, 同时兼具高承载能力, 较好的润滑性能, 成为当下市场前景最好、应用最广的减摩抗磨添加剂<sup>[33-34]</sup>。其润滑机理普遍可解释为, 添加剂分子的含磷极性端吸附在金属表面, 形成一层排列有序的保护膜, 长链部分与另一添加剂分子的长链部分相互作用, 从而形成井然有序的多分子层保护膜, 在摩擦过程中最外层分子被剪切并与润滑油一起起到减少摩擦的作用(图 3)。其中, 极性元素 P 在摩擦过程中释放出来, 吸附在摩擦副表面形成物理保护膜或与金属基底发生摩擦化学反应形成化学反应膜, 阻隔了摩擦副之间的直接接触, 提高了润滑油的减摩抗磨性能<sup>[35-36]</sup>。

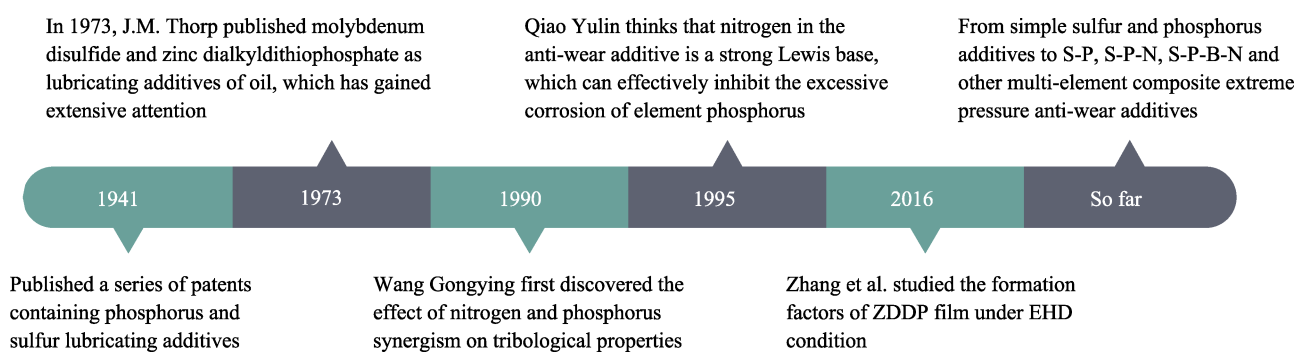


图 2 有机磷减摩抗磨添加剂的简要发展历程

Fig.2 Brief development history of organophosphorus friction-reduction and anti-wear additives

#### 1.1.1 磷酸酯

磷酸酯作为润滑添加剂的使用已有 80 多年的历史, 由于磷酸酯结构稳定性强, 其在工业润滑油中广泛使用<sup>[37-40]</sup>。常见的磷酸酯包括芳香磷酸酯(如磷酸三甲酚酯)、烷基磷酸酯(如磷酸三丁酯)、硫代磷酸酯和含金属磷酸酯盐(如二烷基二硫代磷酸锌)以及包含磷酸酯类的离子液体等。随着润滑油的温度、压力和剪切应力的提高, 越来越多的磷酸酯类减摩抗磨润滑添加剂被相继开发出来(图 4)。

熊孝经等<sup>[41]</sup>分别考察了 3 种磷系减摩抗磨添加剂(亚磷酸二正丁酯(图 4 中(1))、磷酸三甲酚酯(图 4 中(2))和硫代磷酸三苯酯(图 4 中(3))) 在 N46 矿物油中的摩擦学性能。通过实验发现, 在添加上述添加剂后, 轧制过程的摩擦系数明显减小, 磨损明显降低(图 5)。其中 T304 具有优异的减摩抗磨性能和极压性能, 其在 N46 中的最佳添加量为 0.5%~1.5%(质量分数)。T306 和 T309 在 N64 中的减摩抗磨性能、响应性和感受性较 T304 差, 分别只限于在中高、中低载荷下工作。

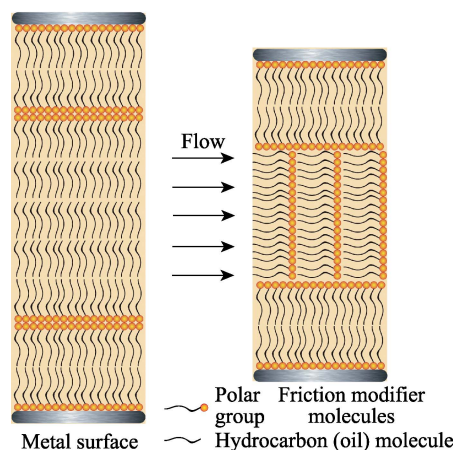


图3 添加剂在金属表面吸附的稳定状态以及剪切过程  
Fig.3 Stable state and shear process of additive adsorption on metal surface

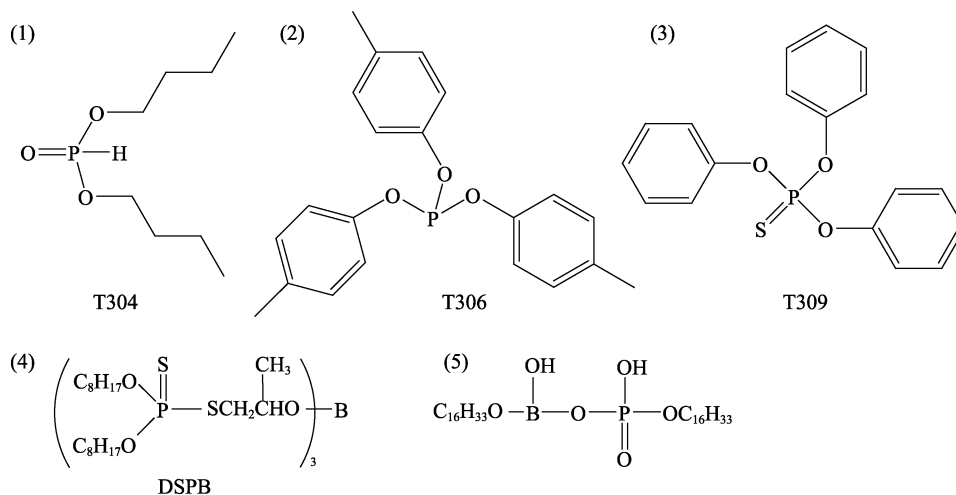


图4 一些常见的含磷型减摩抗磨添加剂的分子结构

Fig.4 Molecular structure of phosphorus-containing friction-reduction and anti-wear additives

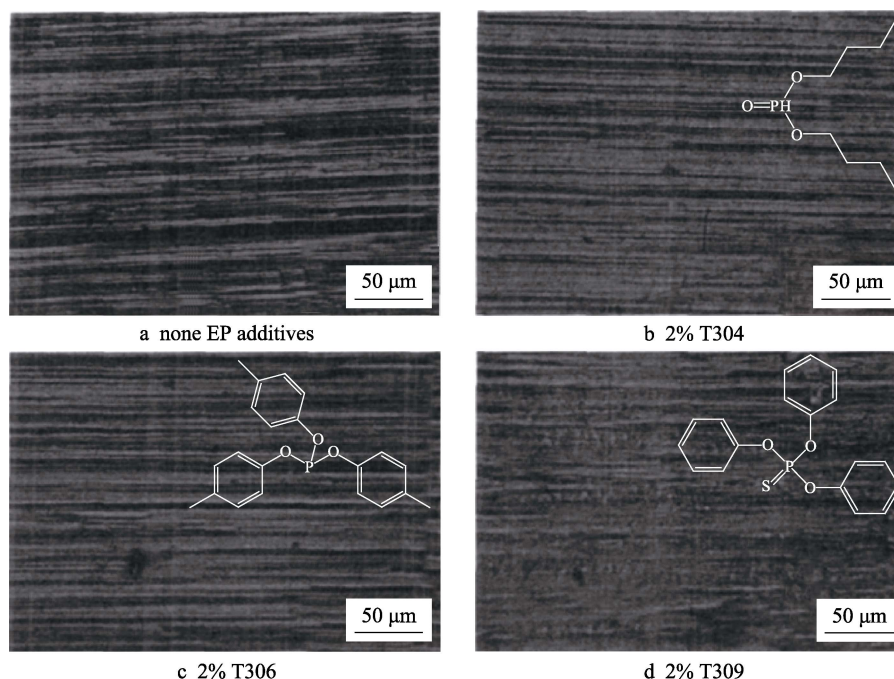


图5 不同润滑条件下铜带轧后表面形貌

Fig.5 Surface morphology of copper strip after rolling under different lubrication conditions

### 1.1.2 含磷硼酸酯

王永刚<sup>[42]</sup>制备了一种新型含磷硼酸酯(图4中(4)),并作为基础油A51的润滑添加剂。实验结果表明,所设计的含磷硼酸酯的热稳定性高于ZDDP,并且在A51中具有良好减摩抗磨性能和抗氧化性能。

龚殿婷<sup>[43]</sup>合成了含磷硼酸酯润滑添加剂(图4中(5)),并添加到航空20号润滑油中考察其摩擦学性能。四球摩擦试验机测试显示,含磷硼酸酯添加剂可明显提高航空20号润滑油的承载能力和抗磨性能。

## 1.2 硫系减摩抗磨添加剂

随着机械设备向大型化、自动化、精密化的方向发展,机械的设计愈加复杂,机械设备的运行环境愈加恶劣,工作时间与条件愈加苛刻。所需的润滑添加

剂已经从单纯的含硫、磷添加剂发展为 S-P、S-P-N、S-P-B-N 等多元素协同添加剂<sup>[44-47]</sup>。图 6 给出了硫系

减摩抗磨添加剂的简要发展历程。对于本部分涉及的含硫型减摩抗磨添加剂的分子结构如图 7 所示。

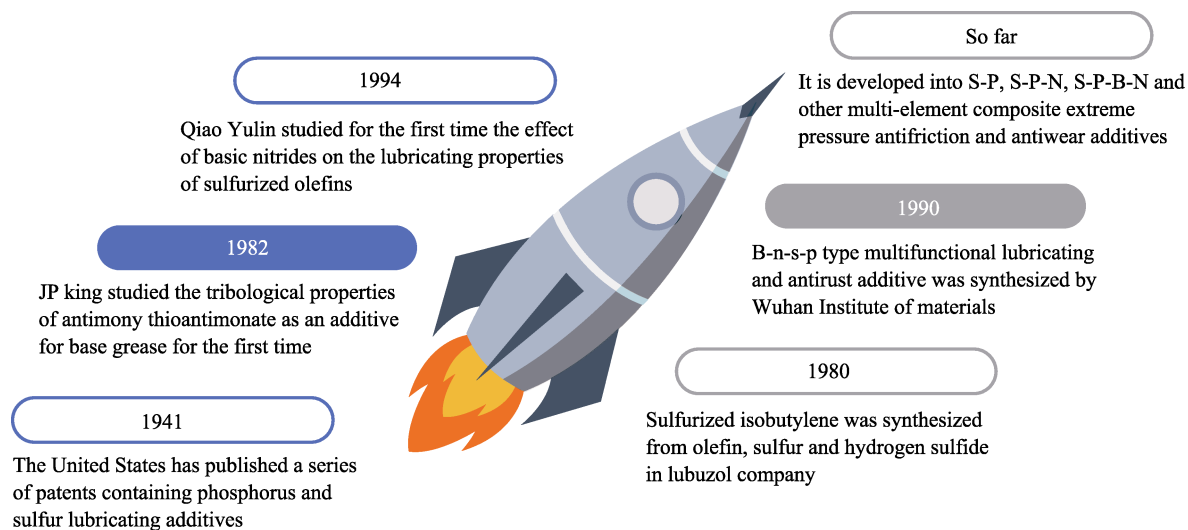


图 6 有机硫减摩抗磨添加剂的简要发展历程

Fig.6 Brief development history of organic sulfur friction-reduction and anti-wear additives

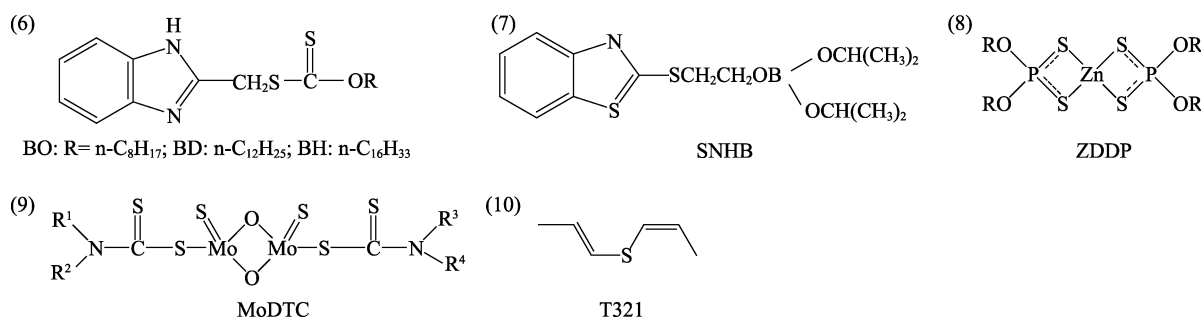


图 7 相应含硫型减摩抗磨添加剂的分子结构

Fig.7 Molecular structure of the corresponding sulfur-containing friction-reduction and anti-wear additives

### 1.2.1 含硫氮杂环化合物

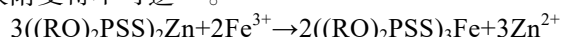
刘艳丽<sup>[48]</sup>合成了三种氮硫化合物(图 7 中(6)),在四球试验机上考察了其摩擦磨损性能。当加入质量分数 1% 时, BD、BO、BH 三种化合物均可以有效地改善基础油(液体石蜡)的极压性能和减摩抗磨性能,三种化合物均表现出优异的热稳定性,且分子中烷基链越长,热稳定性越好。

朱苗<sup>[49]</sup>合成了一种含硫杂环硼酸酯(图 7 中(7)),并作为菜籽油添加剂研究了摩擦学性能。实验结果发现,所合成的 SNHB 具有良好的油溶性,较高的热分解温度(热分解温度范围从 270.50~396.01 °C),同时水解时间超过 7 d,并且所合成的 SNHB 可以有效提高菜籽油的减摩抗磨性能和极压性能。

### 1.2.2 ZDDP

在众多的硫系减摩抗磨添加剂中,ZDDP(图 7 中(8))是被广泛应用的添加剂<sup>[50-54]</sup>。ZDDP 通过 P=S 键上的 S 原子吸附在铁上,并且由于二硫代磷酸配体的不稳定性,ZDDP 中的 Zn 离子很容易与摩擦副表面 Fe 发生置换反应,形成热稳定性较差的二硫代磷

酸铁,在摩擦过程中二硫代磷酸铁与水或氢氧化物水解形成二硫代磷酸,并迅速与  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  发生化学反应,使吸附变得不可逆<sup>[55]</sup>。



当摩擦副在含 ZDDP 的润滑剂中摩擦时,ZDDP 膜会在摩擦副表面快速生成。ZDDP 在摩擦表面上形成了相当厚的非晶态磷酸锌反应膜,并与摩擦副中的氧化铁磨损颗粒发生反应,形成更软更良性的硫化铁(图 8)。ZDDP 膜通过阻隔两个摩擦基材的直接接触来控制磨损,从而防止了后者的粘附,并减少了它们在滑动过程中的瞬态接触应力。

Liu 等<sup>[56]</sup>使用 X 射线光电电子能谱(XPS)分析了各种衍生自 ZDDP 的润滑膜,以确定摩擦膜化学成分与磨损严重性之间的关系,发现存在于所有凸轮轴、凸角上的摩擦膜都含有各种链长的聚磷酸盐玻璃。在低磨损轨迹上观察到长链多磷酸盐,而在更严重的磨损轨迹上观察到短链多磷酸盐。多磷酸盐链长的变化在沿低磨损轨迹的不同磨损深度处也有明显差异。在低磨损轨迹上长链多磷酸盐的存在表明它们具有优越的抗磨性能,而在更明显的磨损轨迹上存在短链多

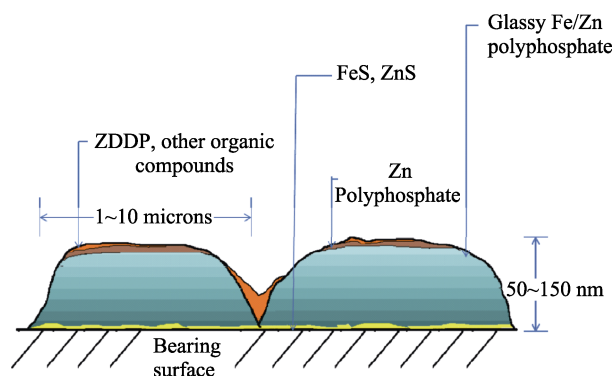


图8 ZDDP表面膜的层状结构  
Fig.8 Layered structure of the ZDDP surface film

磷酸盐则表明它们的抗磨性能较差。Dawczyk<sup>[57]</sup>使用隔离层成像(SLIM)、镀金膜的扫描白光干涉法(SWLI)和接触模式原子力显微镜(AFM)(图9)三种方法研究在薄膜滚动滑动条件下由几种二烷基二硫代磷酸锌和二芳基二硫代磷酸锌溶液形成的摩擦膜。实验结果表明,所有研究的ZDDP在摩擦过程中都会在钢表面形成摩擦膜。伯、仲和混合烷基ZDDP均显示出相似的成膜速率,生成的膜厚度可达100~200 nm。不同的是仲烷基ZDDP表现出更快的成膜速度,但是经过约1 h的摩擦后膜变得不稳定,并且其斑点从表面消失。芳基ZDDP形成摩擦膜的速度要慢得多,该膜仅达到约50 nm的厚度,并且沿摩擦方向具有带状结构,在某些区域中存在可忽略的摩擦膜。通过使用AFM测量ZDDP摩擦膜的粗糙度,证明ZDDP在摩擦表面形成了粗糙的固体摩擦膜。

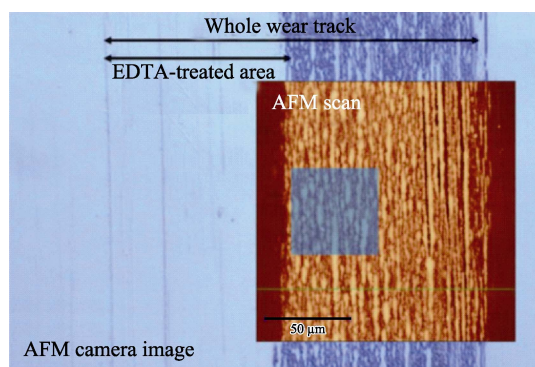


图9 用EDTA除去摩擦膜左侧的AFM图像  
Fig.9 Removal of the AFM image on the left side of the friction film with EDTA

抗磨添加剂的基本原理在于它们能在轴承表面形成保护膜,并在启动阶段和弹性流体动压和边界润滑状态下保护表面。通过对ZDDP薄膜固态结果的观察,可以得到ZDDP表面膜的层状结构。当金属浸入含有ZDDP的润滑剂时,会迅速生成薄的聚磷酸盐润滑膜,并逐渐转化为正磷酸盐。润滑膜的形成对润滑剂摩擦学性能的提升起到了促进作用<sup>[58]</sup>(图10)。

ZDDP润滑膜可以在低温下形成,并且与基材的

化学性质相对无关<sup>[59]</sup>。关于什么因素驱动ZDDP摩擦膜形成,为何仅在经历滑动的表面上发生以及膜形成是否主要受温度、压力、摩擦或其他因素控制的问题,一直存在大量争论。

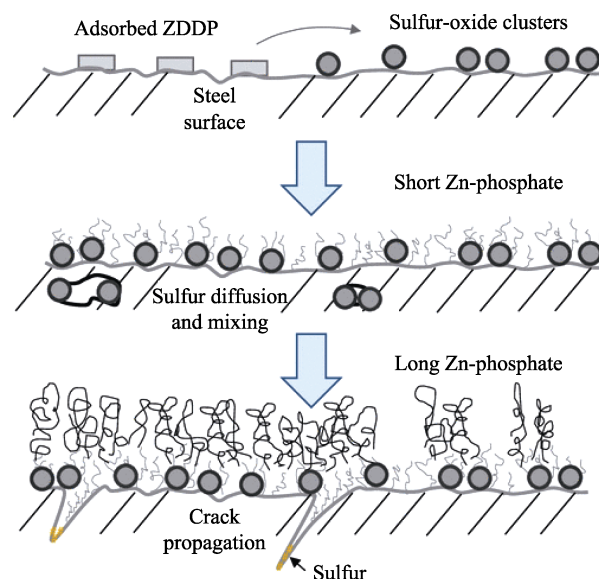


图10 ZDDP润滑机理图  
Fig.10 Lubrication mechanism diagram of ZDDP

电磁场对ZDDP的作用影响鲜有报道,李建武<sup>[60]</sup>首次研究了电磁场对含丁辛基二硫代磷酸锌盐(T202)和含双辛基二硫代磷酸锌盐(T203)的150SN基础油润滑性能的影响(图11),实验结果表明,添加剂分子中电负性较高的氧、硫孤对电子与外逸电子通过共振形成负离子,这些负离子与金属表面铁原子的d轨道形成共价配位键,而一定强度的电磁场可能会有利于这一共振过程的进行,因此促进了含ZDDP润滑油中一些物理反应(如吸附)和化学反应(如氧化膜等化学反应膜的再生)的发生。在电磁场作用下,两种含ZDDP添加剂的润滑油中钢球的磨斑直径均比无电磁场时的小,且磨斑表面的犁沟较浅,擦伤程度较轻微,电磁场提高了含ZDDP润滑油的润滑性能。

### 1.2.3 MoDTC

二烷基二硫代氨基甲酸钼(MoDTC,图7中(9))因其具有优异的润滑性能,在汽车工业领域广为人知。MoDTC通过摩擦化学反应来减少摩擦力,通过剪切、温度和表面化学等摩擦条件促进MoDTC形成MoS<sub>2</sub>,而MoS<sub>2</sub>是一种层状结晶结构的性能优良的固体润滑剂,其层间键弱,在剪切应力下易断裂,从而降低摩擦力<sup>[61]</sup>。

Kassim<sup>[62]</sup>为了更好地了解MoDTC在摩擦过程中的降解作用,研究了MoDTC添加到PAO中润滑条件下的摩擦磨损过程,制备了粉状MoDTC、MoS<sub>2</sub>、MoO<sub>3</sub>、Mo<sub>2</sub>C和Mo五种类型的Mo衍生粒子,并进行了1500次短摩擦实验,实验结果表明,MoDTC在摩擦过程中降解成MoS<sub>2</sub>,提高了体系的减摩抗磨性能。

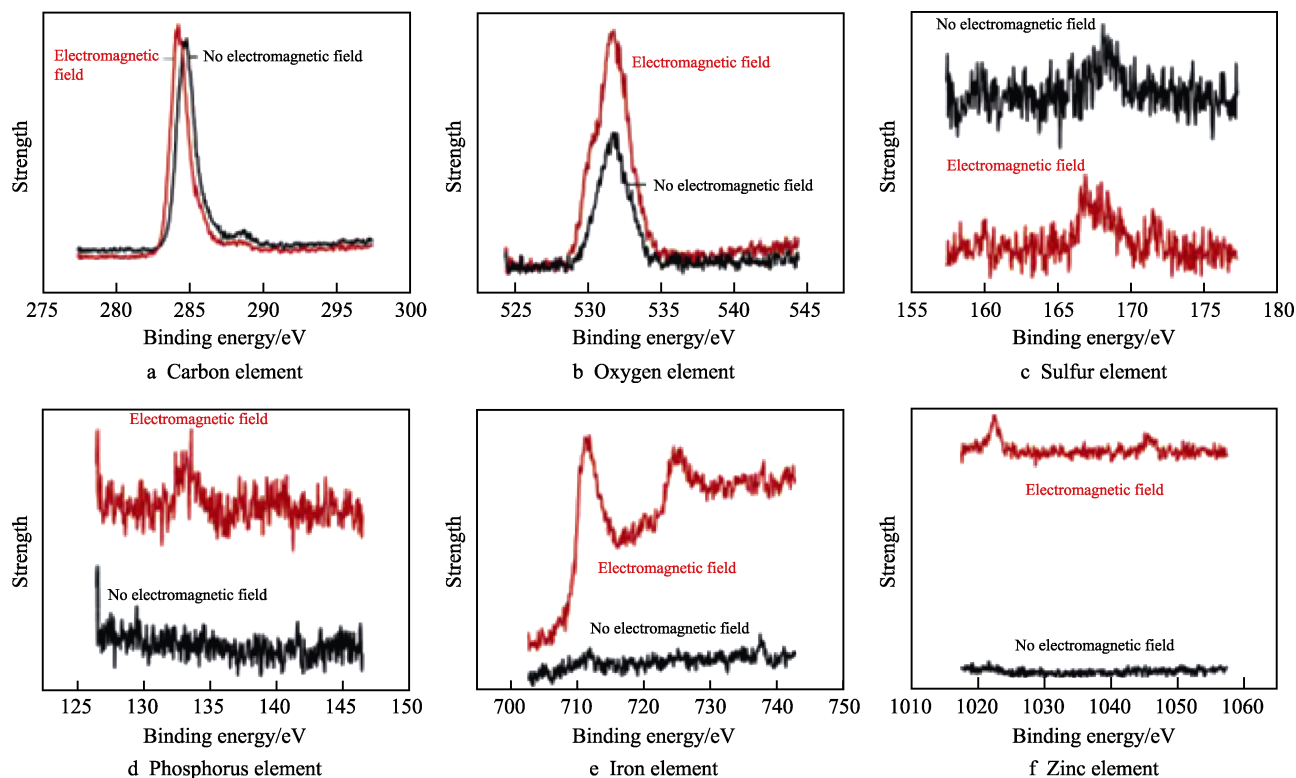


图 11 有、无电磁场条件下含 T203 添加剂润滑油中钢球磨斑表面典型元素的 XPS 谱

Fig.11 XPS spectrum of typical elements on the surface of steel ball wear spots in lubricating oil containing T203 additive under conditions with and without electromagnetic field

AI-Jeboori<sup>[63]</sup>研究了采用 MoDTC 摩擦改进剂的 DLC/非涂层 CI 系统在滑动接触和滚动接触条件下的摩擦学性能,实验发现含 MoDTC 的基础油中润滑的 DLC 球产生了一层 MoS<sub>2</sub>膜,提高了体系的减摩抗磨性能。

#### 1.2.4 有机硫金属减摩抗磨添加剂

邓碧云<sup>[64]</sup>合成了含硫的二黄原酸酯衍生物、乙基黄原酸酯衍生物、苯并噻唑衍生物、苯并三氮唑衍生物、噻唑衍生物共 5 大类 47 种有机硫金属润滑添加剂,系统考察了它们作为液体石蜡油的摩擦学性能,并与 ZDDP 进行比较。实验结果发现这些合成的有机硫金属润滑添加剂均能提高液体石蜡的热稳定性,并极大提高基础油的极压抗磨性能(承载能力接近 ZDDP,甚至部分润滑添加剂承载性能超过 ZDDP)。机理分析结果表明,含硫杂环化合物在摩擦过程中分解开环,并发生摩擦化学反应,形成摩擦化学反应膜,阻隔摩擦副之间直接接触,起到润滑和提高承载性能的能力。

#### 1.2.5 硫化异丁烯

硫化异丁烯(图 7 中(10))是工业油和齿轮油生产中极为重要的润滑添加剂。硫化异丁烯可以有效提高基础油的极压承载性能,同时在极压条件下仍然具有优异的抗磨性能。硫化异丁烯可以提高加氢催化剂的活性,也是一种高效的有机硫化剂。这些工业用途使得硫化异丁烯促进了全球催化和润滑行业的迅速

发展。

Guan<sup>[65]</sup>采用共沉淀法制备了  $\beta$ -环糊精( $\beta$ -CD)和硫化异丁烯的复合物。在聚乙二醇-600(PEG-600)溶液中,用四球摩擦试验机研究了不同浓度的复合物的摩擦学性能。实验结果表明,当复合物的质量分数为 0.8%时,摩擦系统显示出最小的摩擦系数(图 12)。在摩擦过程中,复合物分解为各种分子片段, T321 分子释放到摩擦界面上,形成硫醇铁和 FeS 膜,  $\beta$ -CD 在摩擦界面上形成醇铁和碳沉积膜,共同作用表现出优异的摩擦学性能。

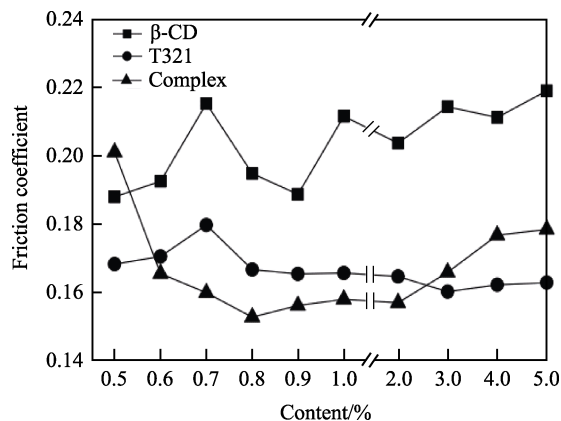


图 12 不同质量分数下的  $\beta$ -CD、T321、以及复合物的平均摩擦系数

Fig.12 Average friction coefficient of  $\beta$ -CD, T321, and composites at different mass concentrations

陈卓君<sup>[66]</sup>考察硫化异丁烯在酯类油中的减摩抗磨性能,实验结果发现 T321 在新戊基多元醇酯中的感受性和配伍性较好,含有添加剂的基础油具有良好的边界润滑能力,当 T321 质量分数达到 2%时,可大大提高基础油的  $P_B$  和  $P_D$  值。

童宗文<sup>[67]</sup>采用 Falex 试验机考察了硫化异丁烯在基础油 PAO 8 中的摩擦学性能。实验结果发现,硫化异丁烯不能改善 PAO 8 的抗磨性能但可以显著提高 PAO 8 的极压承载性能。

### 1.3 含氮杂环类减摩抗磨添加剂

氮杂环(图 13 中(11)—(15))添加剂由来已久<sup>[68-72]</sup>,含氮杂环化合物由于电负性高,半径小,分子间易形成氢键,可以使横向引力和油膜强度大幅提高<sup>[73]</sup>。含氮杂环用作添加剂较多,不仅可用作抗氧剂和抗腐蚀添加剂,还可以用作减摩抗磨添加剂,如苯并三氮唑、烷基取代咪唑、噻二唑及其衍生物等<sup>[74]</sup>。图 14 简要介绍了有机含氮杂环类减摩抗磨添加剂的发展历程。

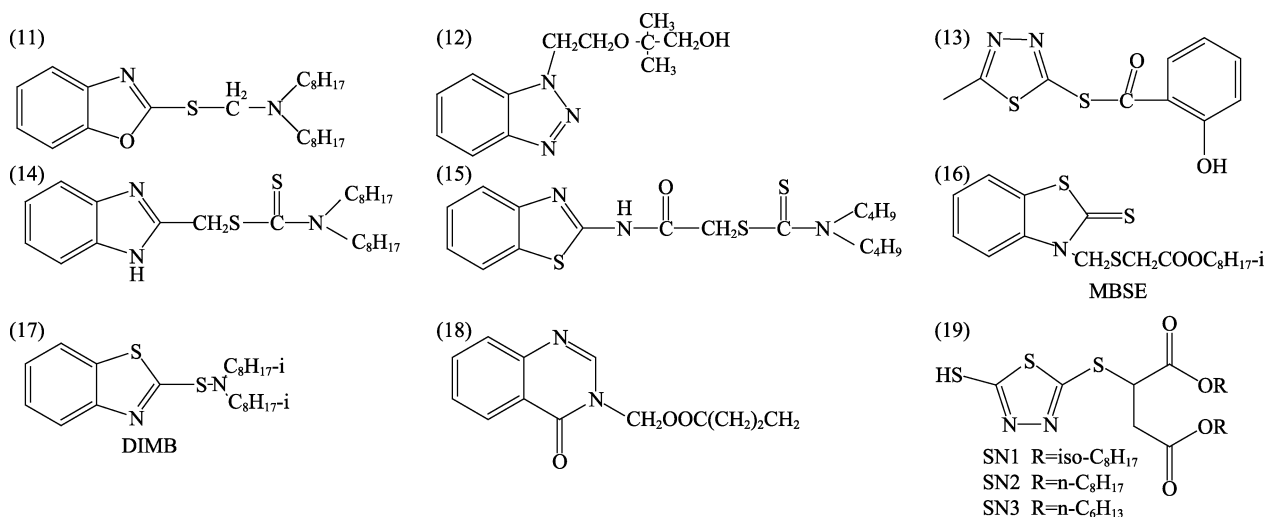


图 13 常见几种含氮添加剂以及氮杂环衍生物

Fig.13 Several nitrogen-containing additives and nitrogen heterocyclic derivatives

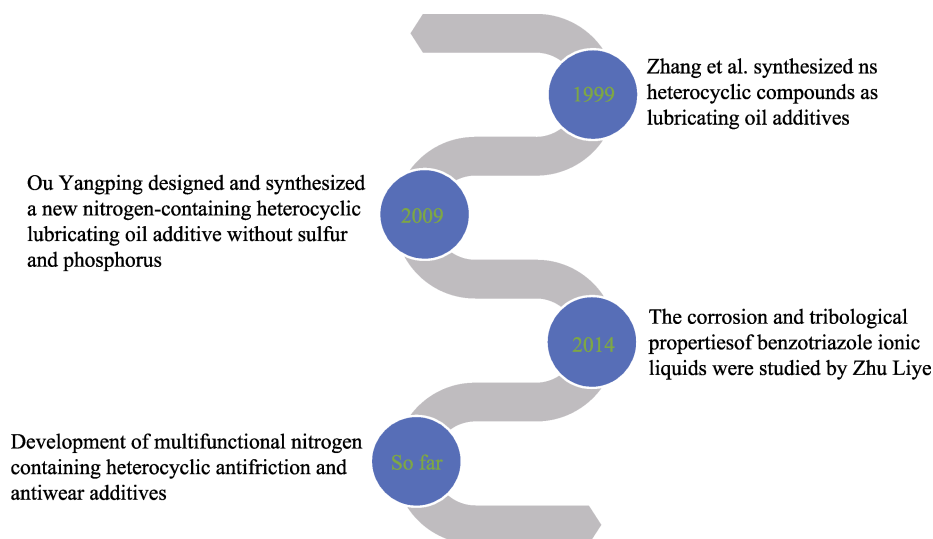


图 14 有机含氮杂环减摩抗磨添加剂的简要发展历程

Fig.14 Brief development history of organic nitrogen-containing heterocyclic friction-reduction and anti-wear additives

欧阳平等<sup>[75]</sup>制备了一种新型含氮杂环添加剂(图 13 中(18)),并系统考察了其作为润滑油添加剂的摩擦学性能。该分子结构中侧链烷基有利于增加其在基础油中的溶解度,添加剂分子中的苯环结构可以提高分子的热稳定性以及对基础油的感受性。添加剂分子中的羰基和氮原子更易与金属表面结合,先络合形成过渡态,从而生成致密的保护膜。试验结果表明,该

添加剂具有优异的热稳定性,对液体石蜡的感受性好,可以明显提高基础油的承载,降低磨斑直径和减小摩擦系数,从而提高液体石蜡的摩擦学性能。XPS 分析了润滑膜化学特征,结果证明在摩擦过程中,添加剂分子与金属基底发生摩擦化学反应,磨斑表面形成含有机氮化物和含氮金属配合物以及  $FeO$  的摩擦化学反应润滑膜。

噻二唑类杂环衍生物在润滑脂中应用广泛,表现出优异的摩擦学性能。胡建强等<sup>[76]</sup>发现,添加新型噻二唑的润滑脂表现出优异的极压、抗磨以及防腐蚀性能,并且性能优于传统添加剂 SbDTC,二者在防腐和抗磨等方面具有协同增强效应,当其与 ZDDP 和 MDDP 复配时,在极压、抗磨和防腐方面展现出优异的协同效应。

王庆瑞等<sup>[77]</sup>制备了 3 种多功能抗磨添加剂(图 13 中(19)),并系统研究了其在复合锂基脂中的减摩抗磨性能和抗氧化性。实验结果表明,噻二唑衍生物能有效提高润滑脂的抗氧化性能和摩擦学性能,利用 SEM 分析了磨痕表面形貌以及 XPS 能谱分析磨痕表面的化学成分。其润滑机理应该是在摩擦过程中,添加剂先发生了化学吸附,再和基底发生摩擦化学反

应,在磨斑表面形成了以硫化物、含氮化合物以及  $\text{Fe}_x\text{O}_y$  组成的边界润滑膜,从而表现了良好的减摩抗磨的性能。

#### 1.4 硼酸酯及其衍生物

传统的减摩抗磨添加剂由于引入氮、硼等杂原子,获得优异的摩擦学性能,因此硼酸酯减摩抗磨添加剂也是当今摩擦学研究的热点<sup>[78-81]</sup>。文献报道,含硫、磷和氯化物等添加剂随着油的黏度降低,其承载能力下降,而硼酸盐类添加剂随着油黏度的减小,承载能力反而提高<sup>[82-84]</sup>。图 15 列出了有机硼类减摩抗磨添加剂的简要发展历程。本部分内容中涉及到的一些含硼型减摩抗磨添加剂的分子结构如图 16 所示。

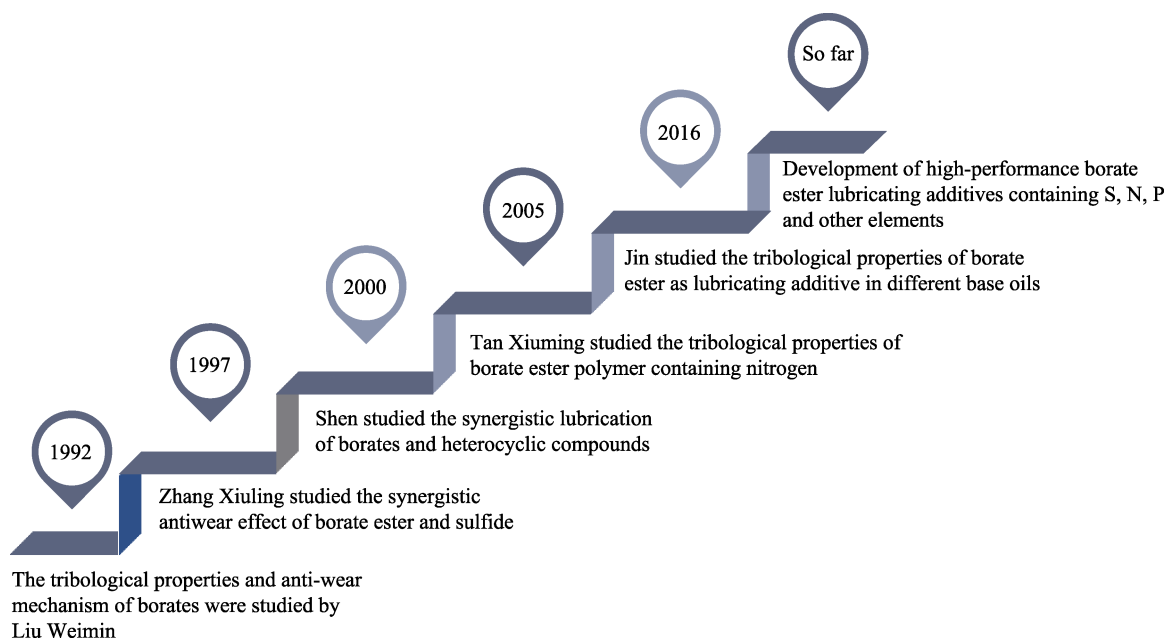


图 15 有机硼酸酯减摩抗磨添加剂的简要发展历程

Fig.15 Brief development history of organoborate friction-reduction and anti-wear additives

孟祥涛等<sup>[85]</sup>制备一种新型醇胺硼酸酯(图 16 中(20)),将其作为润滑油添加剂。使用四球摩擦试验机考察硼酸酯抗磨添加剂的摩擦学性能。结果表明,在较低添加量时,其抗磨效果更佳。

赵永涛等<sup>[86]</sup>合成了一种新型含硫含氮硼酸酯抗磨添加剂(图 16 中(21))。将该添加剂加入到 T100 基础油中。利用四球摩擦磨损试验机考察了样品的摩擦学性能,对多组样品的磨斑直径、摩擦系数、最大无卡咬负荷、磨斑表面形貌进行对比,探究 CNSB 的减摩抗磨性能和机理。随着 CNSB 添加量增加,磨斑直径和摩擦系数减小,  $P_B$  值明显增加。添加质量分数 1.5% CNSB 的油样磨斑直径下降了 28.95%; 添加质量分数 2% CNSB 油样摩擦系数下降了 34.48%,  $P_B$  增加了 539 N。在摩擦过程中, CNSB 会发生分解,活性 S 元素和少量的 N、B 元素可以形成润滑保护薄

膜,从而表现出优异的减摩抗磨性能。

王永刚等<sup>[87]</sup>制备了一种多功能新型含硼化合物作为菜籽油添加剂(图 16 中(22)),摩擦学测试和热稳定性试验发现, NBMA 具有优异的承载性能,和 ZDDP 相比, ZDDP 在菜籽油中表现了中等的极压性能,然而在重载(490 N)条件下,添加 NBMA 的油样表现出更好的抗磨性能,远优于 ZDDP。

孙令国等<sup>[88]</sup>制备了含黄氨酸官能团的硼酸酯(图 16 中(23))作为 PAO 添加剂。利用四球摩擦磨损试验机较为全面地评价了其摩擦学性能,采用湿热箱加速水解试验评价其水解稳定性,并与硼酸三丁酯进行对比。实验结果表明,所制备的硼酸酯添加剂不仅具有优异的摩擦学性能,而且明显提高了其在 PAO 中的水解稳定性,使其在工业用润滑油中具有广泛的应用。

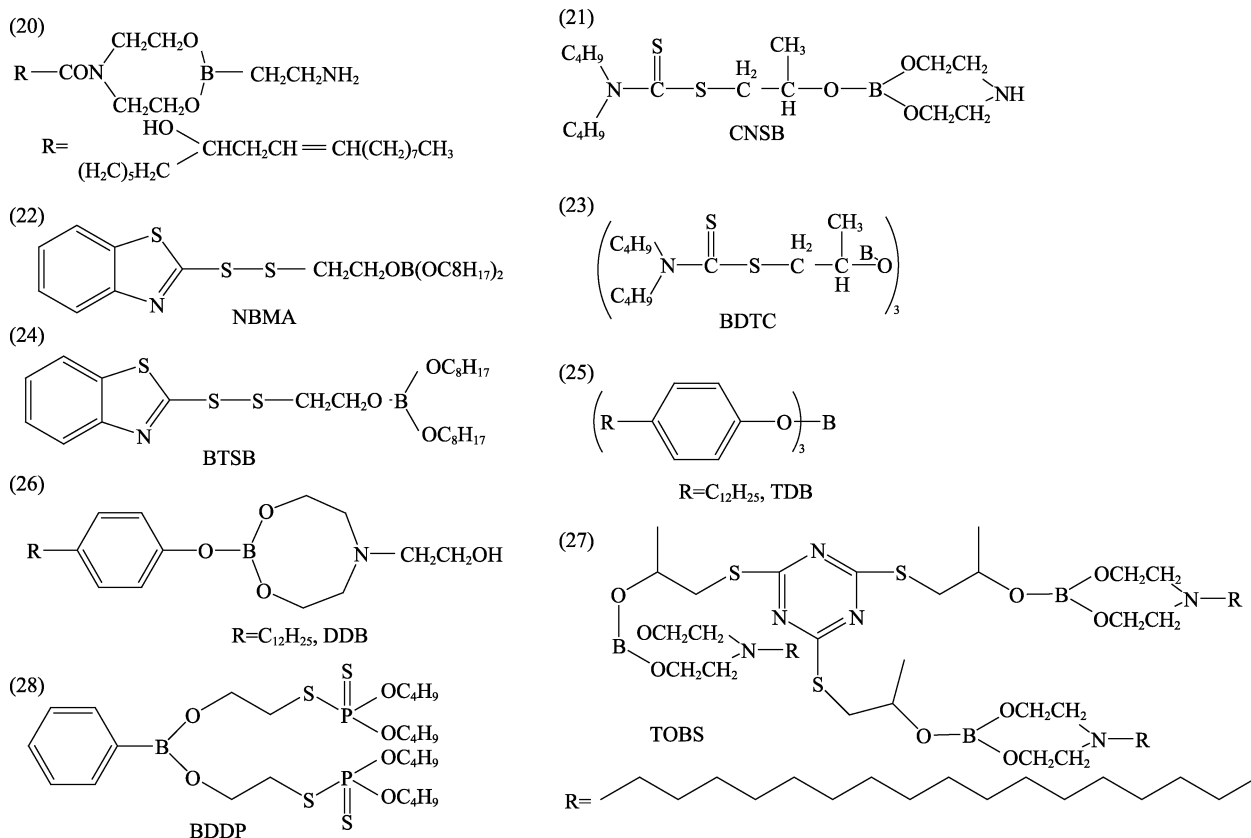


图 16 硼酸酯及其衍生物的分子结构

Fig.16 Molecular structure of borate and its derivatives

LI Jiu-sheng 等<sup>[89]</sup>合成并表征了一种新型的含苯并噻唑和二硫键的硼酸酯衍生物(图 16 中(24))。使用四球摩擦试验机评价其作为菜籽油添加剂的摩擦学性能,并通过 XPS 研究其作用机理。结果表明,BTSB 在承载、减摩、抗磨、抑制腐蚀、抗氧化方面具有全面的性能,可部分取代 ZDDP。此外,检测到分解的硼酸酯、有机硫化物和氮吸附在磨损表面上,并且 BTSB 中的 S 元素与金属发生反应并生成  $\text{FeSO}_4$ ,这两者都有助于形成边界润滑膜。

WANG Song 等<sup>[90]</sup>通过等离子氮化处理在 52100 钢上生成氮化层,比较其与未处理的钢在油润滑状态下的摩擦学性能,当使用含氮硼酸酯(B-N)作为基础油润滑添加剂时,添加质量分数 1.25%,相比于未处理的钢,氮化处理后的钢的摩擦系数和磨损痕迹直径分别降低了 34%和 45%。该作用的主要机理归因于:B-N 添加剂更易于在氮化层表面生成更高 B、N 元素含量的摩擦膜。

YAN Jin-can 等<sup>[91]</sup>合成了三(4-十二烷基苯基)硼酸酯(图 16 中(25))和 2-(2-(4-十二烷基苯氧基)-1,3,6,2-二氧杂硼烷-6-基)乙醇(图 16 中(26)),并将其用作菜籽油中的添加剂,具有很高的抗磨和极压性能。用 XANES 和 XPS 分析润滑膜的组成和结构,结果表明,添加剂在基于  $\text{B}_2\text{O}_3$  和 BN 的摩擦表面上形成保护膜,并在结果中发现了 B-N 协同效应,这表明由 BN 组成的摩擦膜比由  $\text{B}_2\text{O}_3$  组成的摩擦膜更

有用。

LI Jian-chang 等<sup>[92]</sup>合成了三噻硼酸酯(图 16 中(27)),并研究了其抗磨和极压以及水解性能。结果表明,合成 TOBS 具有良好的抗水解性能和优异的极压性能。硼酸酯添加剂的水解稳定性通过氮与硼的配位形成而得到改善。XANES 光谱分析表明,摩擦膜中有一层硼酸-氧-铁无机物,硫酸铁和硫化铁的存在确保了矿物油中 TOBS 添加剂的良好抗磨和极压性能。

为了降低机油中 ZDDP 的剂量,WANG Li-ping 等<sup>[93]</sup>合成了一种新型的含苯基硼酸酯(图 16 中(28))。热重分析结果表明,与商业添加剂 ZDDP 和 F10A 相比,BDDP 具有更好的热稳定性。使用四球摩擦试验机和 SRV 摩擦试验机研究了含有 BDDP、ZDDP 和 F10A 的 PAO 6 基础油的摩擦学性能。在变载和高温条件下,BDDP 质量分数为 0.8%的油显示出优于 ZDDP 和 F10 摩擦学性能。用 X 射线光电子能谱(XPS)检测了在钢球磨损表面上产生的摩擦膜的元素组成,结果表明该摩擦膜由  $\text{Fe}_2\text{B}$  和  $\text{B}_2\text{O}_3$  组成。因此,BDDP 可以替代 ZDDP 或减少 ZDDP 在发动机油中的剂量。

## 1.5 离子液体减摩抗磨添加剂

离子液体作为润滑剂及减摩抗磨添加剂的研究已经有近 20 年的历史,大量研究证明其优异的摩擦学性能归因于离子液体与摩擦副间发生复杂的摩擦化学反应,形成有效的边界润滑膜,从而起到了减摩

和抗磨性能,进而减少机械设备的磨损。然而,由于传统离子液体本身含有卤族元素,容易水解生成卤化氢,从而腐蚀金属表面,加之其制备成本高,分子极性较大,从而极大地制约其作为润滑油添加剂的应用<sup>[94]</sup>。为了解决这一问题,研究工作者做了大量的相

关工作发现,合成无卤素离子液体和开发油溶性的离子液体可以解决上述问题<sup>[95-98]</sup>。目前,离子液体作为润滑剂和添加剂的发展,主要经历了如图 17 所示的研究阶段。一些典型的油溶性离子液体添加剂的分子结构如图 18 所示。

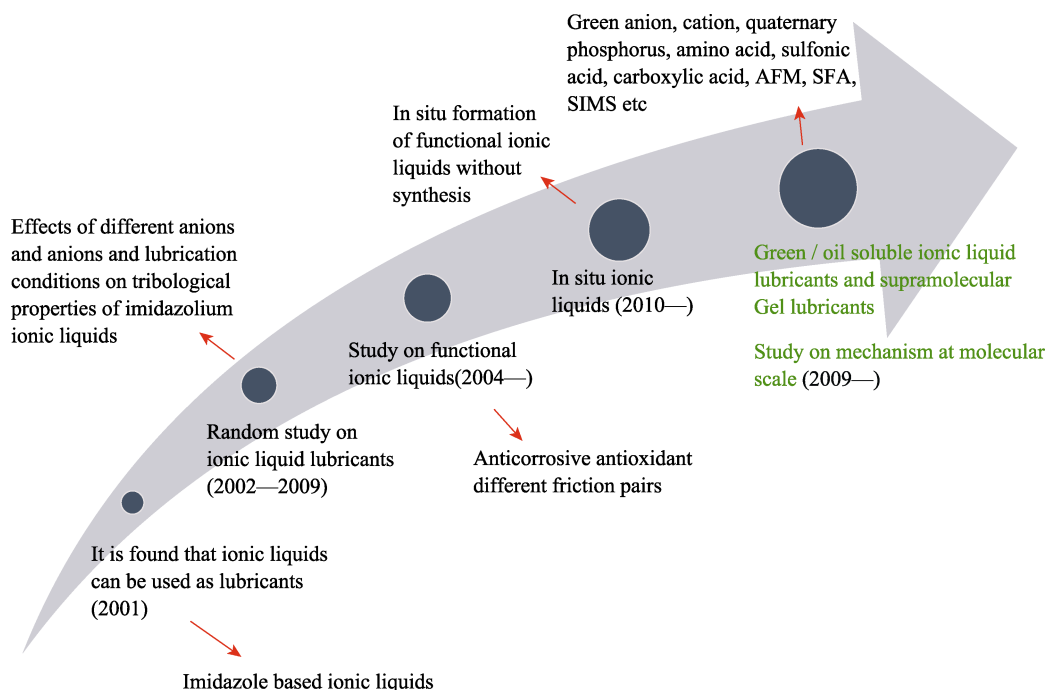


图 17 离子液体减摩抗磨添加剂的简要发展历程

Fig.17 Brief development history of ionic liquid friction reduction and anti-wear additives

Cai<sup>[99]</sup>合成了 3 种具有位阻酚结构的咪唑基离子液体 (图 18 中(29)), 并通过微动往复摩擦磨损试验机 (SRV) 考察了其摩擦学性能。实验发现, 合成的离子液体作为 PEG200 的添加剂, 具有优异的抗氧化和减摩抗磨性能。

Fan<sup>[100]</sup>以双 (三氟甲基磺酰基) 酰亚胺锂 (LiTFSI) 与合成酯原位合成了一种离子液体 [Li(合成酯)]TFSI (图 18 中(30)), 该离子液体合成简单, 油溶性好, 具有优异的减摩抗磨性能。

Yu<sup>[101]</sup>合成了 2 种油溶性离子液体 1,2-双-N,N-二甲基-N-乙酰胺基双 (2-乙基己基) 磷酸酯 (图 18 中(31)) 和 N,N-二甲基十六烷基双 (2-乙基己基) 磷酸酯 (图 18 中(32)), 并与 ZDDP 和 T306 对比, 研究其作为润滑油 (PAO10) 添加剂的减摩抗磨性能。实验发现合成的 NP-16 和 NP-16-2-16 均优于 T204 和 T306。NP-16-2-16 (图 19) 具有 2 个阳离子头基, 显示出较大的空间位阻, 空间位阻的影响直接导致阳离子吸附的不稳定性, 因此在吸附过程中很难同时满足双阳离子头基的吸附状态。然而, NP-16 没有空间位阻, 可以灵活地吸附在金属摩擦副表面, 因此, 其比 NP-16-2-16 具有更好的减摩和抗磨性能。

Yu<sup>[102]</sup>合成了两种新型的离子液体 (图 18 中(33))

和(34)), 并考察了其在 500SN 中的摩擦学性能, 研究表明, 添加质量分数为 2% 的 P<sub>888</sub>PDOSS 和 4% P<sub>888</sub>DOSS 时基础油具有最优的摩擦学性能, 摩擦过程中, 磷酸酯官能团在摩擦副表面形成含有镁或铝络合物和复杂的摩擦化学润滑膜。

Qu<sup>[103]</sup>研究了双 (2-乙基己基) 磷酸三己基十四烷基磷离子液体 (图 18 中(35)) 作为 PAO 的润滑添加剂的润滑性能。实验表明, 添加质量分数 5% IL 可使基础油的热稳定性提高到 347 °C, 同时摩擦系数下降 60%, 消除基础油的摩擦失效, 磨损率降低 3 个数量级。摩擦化学反应膜的纳米结构和成分分析表明, 离子液体与摩擦副表面发生了摩擦化学反应, 并生成了一定厚度的摩擦化学反应膜。

钟寅杰<sup>[104]</sup>合成了一种二异辛基二硫代磷酸酯季铵盐离子液体 (图 18 中(36)), 并考察了其作为菜籽油 RSO 和合成油 PAO 的减摩抗磨添加剂的摩擦学性能。实验结果发现, MDAPD 具有良好的低温流动性、热稳定性和减摩抗磨性能。当添加质量分数 1% 时, 磨斑直径下降明显, 表面磨痕更浅。

William<sup>[105]</sup>合成了双 (2-乙基己基) 磷酸季铵盐离子液体 (图 18 中(37)), 并对其减摩抗磨性能进行了考察。实验结果表明, 质子基团比非质子基团具有

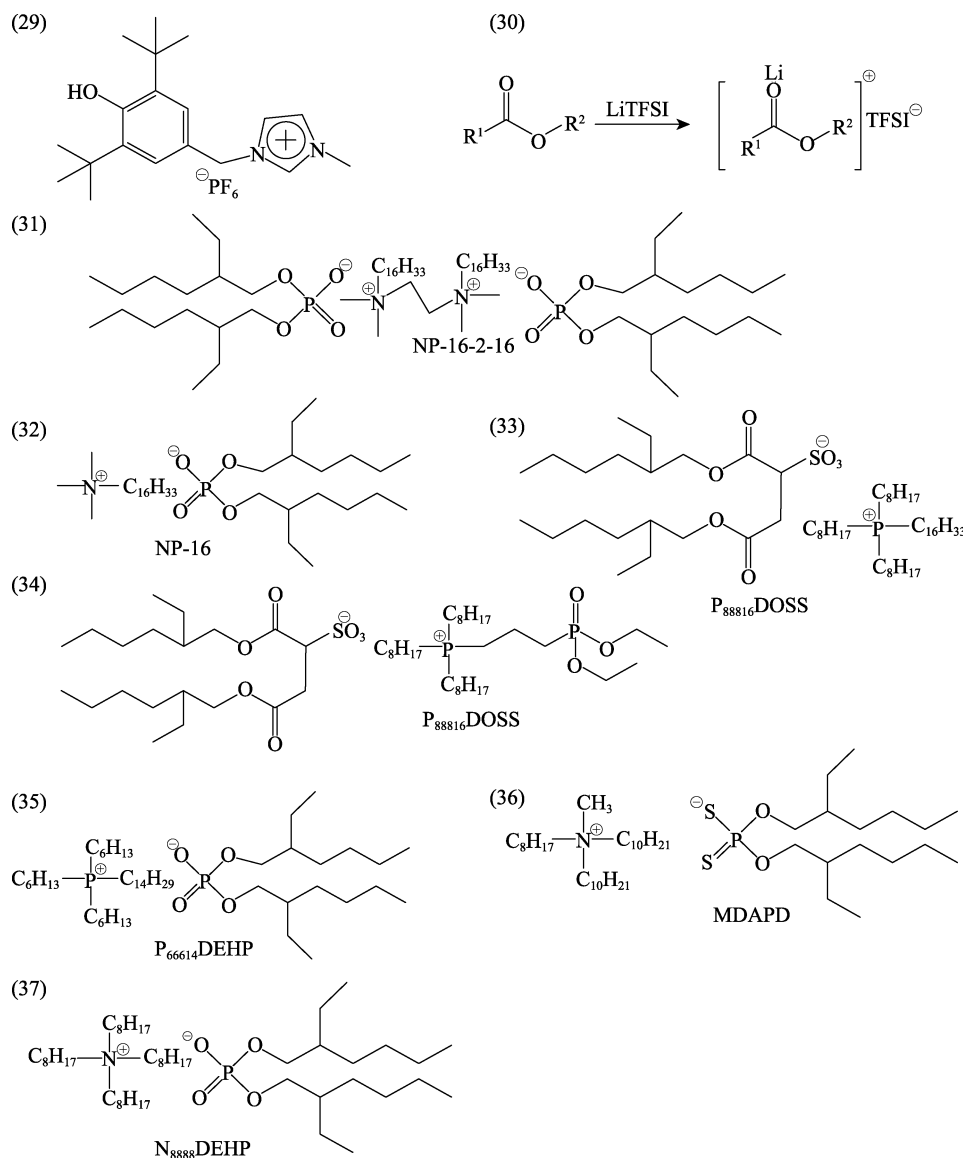


图 18 离子液体抗磨添加剂的分子结构

Fig.18 Molecular structure of the ionic liquid friction-reduction and anti-wear additives

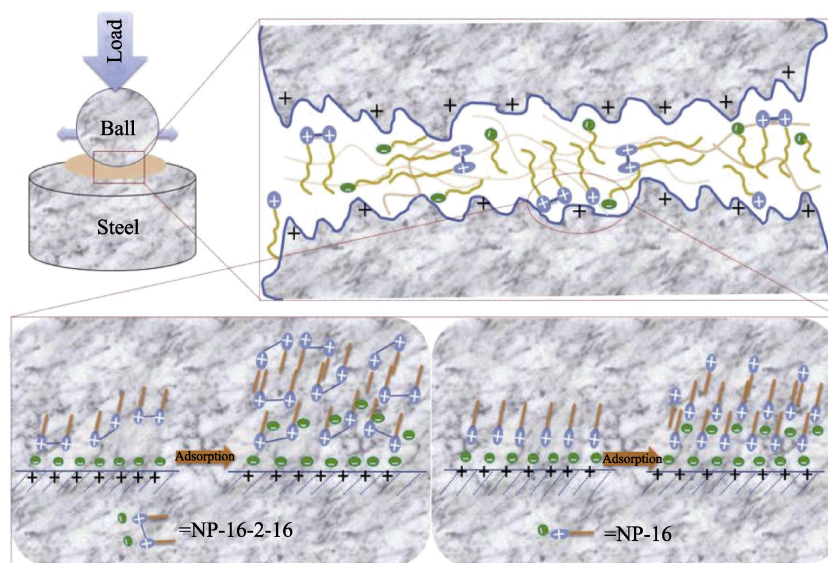


图 19 摩擦界面上 NP-16 和 NP-16-2-16 的吸附和润滑机理示意图

Fig.19 Schematic diagram of adsorption and lubrication mechanism for the NP-16 and NP-16-2-16 on the friction interface

更高的油溶性,长烷基链提供更高的油溶性和热稳定性。选定的离子液体作为基础油的润滑添加剂提高了基础油的减摩抗磨性能。

## 2 对于油基减摩抗磨添加剂的建议及展望

我国减摩抗磨添加剂的研究虽然取得了长足的发展,但是随着润滑需求的逐渐提高、人们的环保意识不断增强和新的环保法规越来越严格,传统的减摩抗磨添加剂正面临着巨大挑战,因此要在以下几方面开展持续研究,以满足工业发展和环保的要求。

### 2.1 低硫、低磷型添加剂

随着发动机润滑油的快速发展和排放指标的日益提高,发动机用油标准对油品中的硫、磷以及灰分含量提出了更加苛刻的要求。在不降低减摩抗磨性能的前提下,发展低硫、低磷型减摩抗磨添加剂,同时提升添加剂的热稳定性和氧化安定性。

### 2.2 含硼环境友好添加剂

我国硼资源储备丰富,发展含硼型减摩抗磨添加剂的原料易得,制备工艺简单,但是要快速发展含硼型减摩抗磨添加剂,首先要解决其水解稳定性。合理的分子设计,构建环状的硼酸酯类化合物,将是含硼型减摩抗磨添加剂的持续研发方向。

### 2.3 含氮杂环型减摩抗磨添加剂

含氮杂环类减摩抗磨添加剂的设计制备相对简单,原材料的可选范围广泛,近年来国内外学者普遍关注多功能型含氮杂环减摩抗磨添加剂的设计制备。例如具有防腐性能的含氮杂环减摩抗磨添加剂的发展、兼具极压特性的含氮杂化减摩抗磨添加剂、高热稳定性含氮杂环减摩抗磨添加剂、抗氧型含氮杂环减摩抗磨添加剂、全氮型的多功能减摩抗磨添加剂等都将这一研究领域的主要发展方向。

### 2.4 离子液体减摩抗磨添加剂

目前,离子液体在摩擦学领域的研究得到了越来越多的关注,我国在这方面的研究成果已处在国际领先水平,但要使离子液体添加剂能大范围推广并得到实际的工业化应用还有很多问题需要解决,下一步的工作重点有:

1) 开发油溶性离子液体作为添加剂的应用,设计简便的合成方法,降低成本,使油溶性离子液体真正得到应用。

2) 根据离子液体的特性,设计润滑性能优异、具有无腐蚀或抗腐蚀的离子液体,用作水基润滑的减摩抗磨添加剂。

3) 拓宽绿色离子液体添加剂的种类,并解决离子液体的易吸水性、易发泡性、热氧化稳定性低、粘温性能差等问题。

4) 离子液体与其他商用添加剂的兼容性、台架试验评价等方面还比较欠缺,今后要加强这方面的研究。虽然,目前已开展的对离子液体摩擦学行为的研究还不能满足一些工况的需求,但离子液体作为一类理想的、绿色的、极具发展前途的新型润滑材料,具有值得人们深入研究的价值和广阔的应用前景。

## 3 结束语

首先,国内外针对减摩抗磨添加剂的研究主要集中在民用或者工业使用的油脂润滑,苛刻环境下(高温、高压、重载、空间辐照等)使用的减摩抗磨添加剂的研究需加强。

其次,目前对于减摩抗磨添加剂的研究主要集中在性能测试,对于其机理的研究仅限于传统的测试表征手段,例如摩擦系数、磨损体积、表面分析测定润滑膜的组成等,但是对于其如何在润滑体系中与金属基底发生相互作用,或者说减摩抗磨与金属作用成膜过程的认知还非常有限,通过先进的原位分析手段或者理论模拟及量子化学计算,将更有助于科研人员认知这一过程,有助于设计合成新型的减摩抗磨添加剂。

第三,科研院所与用户企业或者用户单位的交流必须充分。多数的减摩抗磨添加剂的研究仅仅停留在实验室的评价,但是对于实际应用,要考虑减摩抗磨添加剂的耐受性、在基础油中的长期分散稳定性、与其他添加剂的匹配性和相容性等影响因素,简单的测试其减摩抗磨性能与其真正走向应用,需要企业与科研人员互相配合,共同完成,最好以应用为导向,进行减摩抗磨添加剂的研发。

第四,从国家的长远发展状况而言,高端的润滑材料,包括润滑油脂、添加剂等,受制于西方发达国家的技术封锁,很多材料要想创新有所突破,必须要加大力气培养一批专门的人员,能够从分子设计、合成制备、微观作用机制等方面进行系统的研究。以兰州化物所创新群体,结合国内的相关企事业单位,大力开展这方面的研究任重道远。

第五,目前纳米添加剂的发展迅速,未来要系统地研究有机减摩抗磨添加剂和无机减摩抗磨添加剂的各自作用机制和协同作用机制,这对于丰富减摩抗磨添加剂的类型,完善摩擦学和润滑相关理论具有积极的推动作用。

## 参考文献:

- [1] 毛卫秀,龙光涛. 轴向柱塞泵关键摩擦副匹配性研究[J]. 铸造技术, 2013(3): 301-303.

- MAO Wei-xiu, LONG Guang-tao. Study on matching of key friction pair of axial piston pump[J]. Foundry technology, 2013(3): 301-303.
- [2] 马纪明, 黄怡鸿, 郭健, 等. 液压柱塞泵运动副磨损特性研究综述[J]. 液压与气动, 2017(8): 84-94.  
MA Ji-ming, HUANG Yi-hong, GUO Jian, et al. Research review on wear characteristics of moving pair of hydraulic plunger pump[J]. Chinese hydraulics & pneumatics, 2017(8): 84-94.
- [3] DONG X Y, QIAO Y L, ZANG Y, et al. Effect of ultrasonic vibration on the behavior of antifriction and wear resistance of  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  ceramic friction pairs under oil lubrication[J]. Physics procedia, 2013, 50: 449-452.
- [4] JIA B, MIKALSEN R, SMALLBONE A, et al. A study and comparison of frictional losses in free-piston engine and crankshaft engines[J]. Applied thermal engineering, 2018, 140: 217-224.
- [5] LI X, WANG Z, DONG G. Preparation of nanoscale liquid metal droplet wrapped with chitosan and its tribological properties as water-based lubricant additive[J]. Tribology international, 2020, 148: 106349.
- [6] LIU Cheng-cheng, GUO Yan-bao, WANG De-guo. PEI-RGO nanosheets as a nanoadditive for enhancing the tribological properties of water-based lubricants[J]. Tribology international, 2019, 140: 105851.
- [7] WANG Y, DU Y, DENG J. Friction reduction of water based lubricant with highly dispersed functional  $\text{MoS}_2$  nanosheets[J]. Colloids and surfaces A: physicochemical and engineering aspects, 2019, 562: 321-328.
- [8] 王海忠, 叶承峰, 刘维民. 1-甲基-3-丁基咪唑六氟磷酸盐离子液的摩擦学性能[J]. 摩擦学学报, 2003, 23(1): 38-41.  
WANG Hai-zhong, YE Cheng-feng, LIU Wei-min. Tribological behavior of the ionic liquid of 1-Methyl-3-Butyl-Imidazolium hexafluorophosphate as a lubricant[J]. Tribology, 2003, 23(1): 38-41.
- [9] MENG Y, XU J, JIN Z, et al. A review of recent advances in tribology[J]. Friction, 2020, 8(2): 221-300.
- [10] 杨莹, 路长厚. 水包油乳化液润滑的动静压轴承静特性研究[J]. 润滑与密封, 2008, 33(7): 25-27.  
YANG Ying, LU Chang-hou. Research on the static performance of hybrid bearing lubricated with the emulsion of oil in water[J]. Lubrication engineering, 2008, 33(7): 25-27.
- [11] ZHANG C, HUANG B, XU J, et al. Effect of Mo on tribological behaviors of atmospheric plasma sprayed  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -13% $\text{TiO}_2$ /Mo coatings under boundary lubrication condition[J]. Ceramics international, 2020, 46(10): 15066-15075.
- [12] YUE H, DENG J, ZHANG Y, et al. Characterization of the textured surfaces under boundary lubrication[J]. Tribology international, 2020, 151: 106359.
- [13] ROY S, JAZAA Y, SUNDARARAJAN S. Investigating the micropitting and wear performance of copper oxide and tungsten carbide nanofluids under boundary lubrication[J]. Wear, 2019, 428-429: 55-63.
- [14] 李玲, 裴喜永, 史小辉, 等. 混合润滑状态下结合面的法向接触刚度研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(3): 16-23.  
LI Ling, PEI Xi-yong, SHI Xiao-hui, et al. Normal contact stiffness of machine joint surfaces under mixed lubrication state[J]. Journal of vibration and shock, 2020, 39(3): 16-23.
- [15] XIE Z, XUE Q, WU J, et al. Mixed-lubrication analysis of planetary roller screw[J]. Tribology international, 2019, 140: 105883.
- [16] AZAM A, GHANBARZADEH A, NEVILLE A, et al. Modelling tribochemistry in the mixed lubrication regime [J]. Tribology international, 2019, 132: 265-274.
- [17] ZAPLETAL T, SPERKA P, KRUPKA I, et al. The effect of surface roughness on friction and film thickness in transition from EHL to mixed lubrication[J]. Tribology international, 2018, 128: 356-364.
- [18] 杨沛然, 刘晓玲, 崔金磊, 等. 弹性流体动力润滑的热效应[J]. 润滑与密封, 2010, 35(5): 1-9.  
YANG Pei-ran, LIU Xiao-ling, CUI Jin-lei, et al. Thermal effects on elastohydro-dynamic lubrication[J]. Lubrication engineering, 2010, 35(5): 1-9.
- [19] EVERITT C, ALFREDSSON B. The influence of gear surface roughness on rolling contact fatigue under thermal elastohydrodynamic lubrication with slip[J]. Tribology international, 2020, 151: 106394.
- [20] CHECO H M, DUREISSEIX D, FILLOT N. A homogenized micro-elastohydrodynamic lubrication model: accounting for non-negligible microscopic quantities[J]. Tribology international, 2019, 135: 344-354.
- [21] SIMON V V. Improved mixed elastohydrodynamic lubrication of hypoid gears by the optimization of manufacture parameters[J]. Wear, 2019, 438-439: 102722.
- [22] 王丽, 罗婷, 陈新春, 等. 球形微纳颗粒的制备及其作为润滑油添加剂的抗磨减摩性能研究进展[J]. 中国粉体技术, 2020, 26(1): 53-60.  
WANG Li, LUO Ting, CHEN Xin-chun, et al. Research progress on preparation and tribology properties of spherical micro-nano-particle lubricant additives[J]. China powder science and technology, 2020, 26(1): 53-60.
- [23] ZHANG Yu-lin, CHEN Fei, ZHANG You, et al. Influence of graphene oxide on the antiwear and antifriction performance of MAO coating fabricated on Mg-Li alloy[J]. Surface and coatings technology, 2019, 364: 144-156.
- [24] LAN P X, LACCINO L L, BAO X Y, et al. The effect of lubricant additives on the tribological performance of oil and gas drilling applications up to 200 °C[J]. Tribology international, 2020, 141: 105896.
- [25] HU Z S, YIE Y, WANG L G, et al. Synthesis and tribological properties of ferrous octoxyborate as antiwear and

- friction-reducing additive of lubricating oil[J]. Tribology letters, 2000, 8: 45-50.
- [26] SEYMOUR B T, WRIGHT R A E, PARROTT A C, et al. Poly (alkyl methacrylate) brush-grafted silica nanoparticles as oil lubricant additives: effects of alkyl pendant groups on oil dispersibility, stability, and lubrication property[J]. ACS applied materials & interfaces, 2017, 9(29): 25038-25048.
- [27] 孙令国. 极压抗磨剂的种类及作用机理[J]. 合成润滑材料, 2016, 43(3): 29-34.  
SUN Ling-guo. The kinds and mechanism of extreme pressure anti-wear additives[J]. Synthetic lubricants, 2016, 43(3): 29-34.
- [28] THORP J M. The mechanism of lubrication by molybdenum disulphide dispersed in oil and the effect of a zinc dialkylidithiophosphate additive[J]. Wear, 1973, 23(1): 63-70.
- [29] 王公应, 严正泽, 刘馥英. 磷氮型极压抗磨添加剂性能的研究[J]. 华东化工学院学报, 1990, 16(6): 689-694.  
WANG Gong-ying, YAN Zheng-ze, LIU Fu-ying. Studies on extreme pressure-antiwear additives of phosphorous-nitrogen (P-N) type[J]. Journal of East China Institute of Chemical Technology, 1990, 16(6): 689-694.
- [30] 乔玉林, 方学敬, 党鸿辛. 一些磷-氮型极压抗磨添加剂性能的研究[J]. 摩擦学学报, 1995, 15(3): 248-256.  
QIAO Yu-lin, FANG Xue-jing, DANG Hong-xin. Study on the properties of several type P-N antiwear and extreme-pressure additives[J]. Tribology, 1995, 15(3): 248-256.
- [31] 龙清平, 王学业, 刘万强, 等. 磷系添加剂结构与润滑性能的量子化学研究[J]. 计算机与应用化学, 2005, 22(5): 3-8.  
LONG Qing-ping, WANG Xue-ye, LIU Wan-qiang, et al. Theoretical study on structure and lubricant property of containing phosphorus additives[J]. Computers and applied chemistry, 2005, 22(5): 3-8.
- [32] 杨超, 邵腾飞, 魏朝良, 等. 不同结构含磷极压剂润滑行为研究[J]. 摩擦学学报, 2016, 36(4): 458-464.  
YANG Chao, SHAO Teng-fei, WEI Chao-liang, et al. Lubricating mechanism of different structure phosphates as extreme-pressure additive[J]. Tribology, 2016, 36(4): 458-464.
- [33] 吴燕霞, 李维民, 王晓波. 磷系极压抗磨剂在酯类油中的摩擦学性能[J]. 石油学报(石油加工), 2015, 31(5): 1122-1128.  
WU Yan-xia, LI Wei-min, WANG Xiao-bo. Tribological behaviors of p-extreme pressure and anti-wear additives in ester base oil[J]. Acta petrolei sinica (petroleum processing section), 2015, 31(5): 1122-1128.
- [34] OTERO I, LOPEZ E R, REICHELT M, et al. Ionic liquids based on phosphonium cations as neat lubricants or lubricant additives for a steel/steel contact[J]. ACS applied materials & interfaces, 2014, 6(15): 13115-13128.
- [35] SHARMA V, DOERR N, ERDEMIR A, et al. Interaction of phosphonium ionic liquids with borate esters at tribological interfaces[J]. RSC advances, 2016, 6(58): 53148-53161.
- [36] HUANG G, FAN S, BA Z, et al. Insight into the lubricating mechanism for alkylimidazolium phosphate ionic liquids with different alkyl chain length[J]. Tribology international, 2019, 140: 105886.
- [37] JOHNSON D W, HILS J E. Phosphate esters, thiophosphate esters and metal thiophosphates as lubricant additives[J]. Lubricants, 2013, 1(4): 132-148.
- [38] XIAO H, DAI W, KAN Y. Amine-intercalated  $\alpha$ -zirconium phosphates as lubricant additives[J]. Applied surface science, 2015, 329: 384-389.
- [39] LIN B, ZHU H, KIET TIEU A, et al. Adsorbed film structure and tribological performance of aqueous copolymer lubricants with phosphate ester additive on Ti coated surface[J]. Wear, 2015, 332-333: 1262-1272.
- [40] GONG K, WU X, ZHAO G. Tribological properties of polymeric aryl phosphates grafted onto multi-walled carbon nanotubes as high-performances lubricant additive[J]. Tribology international, 2017, 116: 172-179.
- [41] 熊孝经, 孙建林, 黄瑛, 等. 磷系极压剂在铜板带冷轧乳化液中的应用效果研究[J]. 润滑与密封, 2010, 35(5): 102-106.  
XIONG Xiao-jin, SUN Jian-lin, HUANG Ying, et al. Study on application effect of phosphorus-based extreme pressure agent in copper strip cold rolling emulsion[J]. Lubrication engineering, 2010, 35(5): 102-106.
- [42] 王永刚, 白晓华, 张立, 等. 含硫磷酸酯衍生物的制备及其在合成油中的摩擦性能[J]. 精细石油化工, 2010, 27(4): 42-45.  
WANG Yong-gang, BAI Xiao-hua, ZHANG Li, et al. Preparation of sulfur-containing phosphoborate derivatives and their friction properties in synthetic oil[J]. Speciality petrochemicals, 2010, 27(4): 42-45.
- [43] 龚殿婷, 李凤华, 张宏军, 等. 一种含磷硼酸酯润滑油添加剂的制备及性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(1): 210-218.  
GONG Dian-ting, LI Feng-hua, ZHANG Hong-jun, et al. Study on preparation and performance of a phosphorus-containing borate lubricating oil additive[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(1): 210-218.
- [44] 陈铭. 硼酸酯与含硫、磷、氯添加剂的减摩抗磨复合作用[J]. 机械设计与研究, 2001(2): 69-72.  
CHEN Ming. Composite antifriction and antiwear actions between boric acid ester and additives with sulfur, phosphorus and chlorine [J]. Machine design and research, 2001(2): 69-72.
- [45] 张博, 徐滨士, 许一, 等. 润滑剂中微纳米润滑材料的研究现状[J]. 摩擦学学报, 2011, 31(2): 194-204.  
ZHANG Bo, XU Bin-shi, XU Yi, et al. Research status of

- micro-and nano-materials in lubricating additives[J]. Tribology, 2011, 31(2): 194-204.
- [46] 孙令国, 黄春晖, 刘涛, 等. 一种硫-磷-氮添加剂在聚醚润滑油中的应用研究[J]. 润滑油, 2015, 30(4): 24-29.
- SUN Ling-guo, HUANG Chun-hui, LIU Tao, et al. Application study of a S-P-N additive in polyalkylene glycol lubricating oil[J]. Lubricating oil, 2015, 30(4): 24-29.
- [47] 马江波, 胡俊宏, 丁津原, 等. 硫系和磷系添加剂对菜籽油摩擦学性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2004(3): 272-275.
- MA Jiang-bo, HU Jun-hong, DING Jin-yuan, et al. Effect of S-and P-type additives on tribological behavior of rapeseed oil[J]. Tribology, 2004(3): 272-275.
- [48] 刘艳丽, 赵鸿斌, 黄先威, 等. 一种苯并咪唑黄原酸酯的合成及其摩擦学性能[J]. 化学研究与应用, 2012, 24(2): 270-273.
- LIU Yan-li, ZHAO Hong-bin, HUANG Xian-wei, et al. Synthesis and tribological properties of the novel nitrogen and sulfur compounds[J]. Chemical research and application, 2012, 24(2): 270-273.
- [49] 朱苗, 王鉴, 唐海燕, 等. 一种含氮硫杂环硼酸酯的制备及摩擦学性能[J]. 化工进展, 2016, 35(7): 2179-2185.
- ZHU Miao, WANG Jian, TANG Hai-yan. Synthesis and tribological properties of a sulfur nitrogen-containing heterocyclic borate ester[J]. Chemical industry and engineering progress, 2016, 35(7): 2179-2185.
- [50] MARTIN J M, ONODERA T, MINFRAY C, et al. The origin of anti-wear chemistry of ZDDP[J]. Faraday discussions, 2012, 156(1): 311-323.
- [51] 钟锦声, 孙文斌. ZDDP 复配对润滑油抗磨性能影响研究进展[J]. 北京汽车, 2014(3): 15-28.
- ZHONG Jin-sheng, SUN Wen-bin. Research progress on the effect of ZDDP compound on the antiwear performance of lubricating oil[J]. Beijing Auto, 2014(3): 15-28.
- [52] 杨淑燕, 张东, 郭峰. 离子液体和 ZDDP 的摩擦学性能及协同效应研究[J]. 表面技术, 2018, 47(6): 122-129.
- YANG Shu-yan, ZHANG Dong, GUO Feng. Tribological properties and synergistic effect of ionic liquids and ZDDP[J]. Surface technology, 2018, 47(6): 122-129.
- [53] SUAREZ A N, GRAHN M, PASARIBU R, et al. The influence of base oil polarity on the tribological performance of ZDDP additives[J]. Tribology international, 2010, 43(12): 2268-2278.
- [54] GOSVAMI N N, LAHOUII I, MA J, et al. Nanoscale in situ study of ZDDP tribofilm growth at aluminum-based interfaces using atomic force microscopy[J]. Tribology international, 2020, 143: 106075.
- [55] DAWCZYK J, MORGAN N, RUSSO J, et al. Film thickness and friction of ZDDP tribofilms[J]. Tribology letters, 2019, 67(2): 34.
- [56] LIU E, KOUAME S D. An XPS study on the composition of zinc dialkyl dithiophosphate tribofilms and their effect on camshaft lobe wear[J]. Tribology transactions, 2013, 57(1): 18-27.
- [57] DAWCZYK J, RUSSO J, SPIKES H. Ethoxylated amine friction modifiers and ZDDP[J]. Tribology letters, 2019, 67(4): 1-15.
- [58] GOSVAMI N N, LAHOUII I, MA J, et al. Nanoscale in situ study of ZDDP tribofilm growth at aluminum-based interfaces using atomic force microscopy[J]. Tribology international, 2020, 143: 106075.
- [59] OKUBO H, TADOKORO C, SASAKI S. Tribological properties of a tetrahedral amorphous carbon (ta-C) film under boundary lubrication in the presence of organic friction modifiers and zinc dialkyldithiophosphate (ZDDP)[J]. Wear, 2015, 332-333: 1293-1302.
- [60] 李建武, 江泽琦, 方建华, 等. 电磁场对含不同二烷基二硫代磷酸锌 150SN 基础油润滑性能的影响[J]. 机械工程材料, 2017, 41(5): 49.
- LI Jian-wu, JIANG Ze-qi, FANG Jian-hua, et al. Infineon electromagnetic field on lubrication properties 150SN base oil with different zinc dialkyldithiophosphate[J]. Materials for mechanical engineering, 2017, 41(5): 49.
- [61] ESPEJO C, WANG Chun, THIÉBAUT B, et al. The role of MoDTC tribochemistry in engine tribology performance: A Raman microscopy investigation[J]. Tribology international, 2020, 150: 106336.
- [62] KASSIM T, TOKOROYAMA M, MURASHIMA N, et al. The wear classification of MoDTC-derived particles on silicon and hydrogenated diamond-like carbon at room temperature[J]. Tribology international, 2020, 147: 106176.
- [63] YASIR A J, SHAHRIAR K, ARDIAN M, et al. Investigation of pure sliding and sliding/rolling contacts in a DLC/cast iron system when lubricated in oils containing MoDTC-type friction modifier[J]. Tribology international, 2018, 122: 23-37.
- [64] 邓碧云. 新型含氮、硫润滑油添加剂的合成、表征与性能研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2009.
- DENG Bi-yun. Study on synthesis, characterization and performance of new nitrogen and sulfur lubricating oil additives[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2009.
- [65] GUAN J, XU X, HU J, et al. Preparation and action mechanism of inclusion complex of  $\beta$ -cyclodextrin and sulfurized isobutylene as additives in solution of polyethylene glycol-600[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2015, 30(4): 859-867.
- [66] 陈卓君, 冯龙龙, 徐嘉宁, 等. 硫化异丁烯在酯类合成油中的摩擦学特性[J]. 润滑与密封, 2013, 38(6): 49-52.
- CHEN Zhuo-jun, FENG Long-long, XU Jia-ning, et al. Tribological characteristics of vulcanization isobutylene additives in ester oil[J]. Lubrication engineering, 2013, 38(6): 49-52.
- [67] 童宗文, 杨洪滨. 硫化异丁烯在聚  $\alpha$ -烯烃中的摩擦学性能[J]. 合成润滑材料, 2012, 39(4): 4-6.

- TONG Zong-wen, YANG Hong-bin. Tribological properties of sulfurized isobutylene in poly ( $\alpha$ -olefin)[J]. *Synthetic lubricants*, 2012, 39(4): 4-6.
- [68] 陈严华, 欧阳平, 张贤明, 等. 五元含氮杂环润滑添加剂的摩擦学研究进展[J]. *润滑与密封*, 2015, 40(9): 137-141.
- CHEN Yan-hua, OUYANG Ping, ZHANG Xian-ming, et al. Research and development in tribology of five-membered Nitrogen-Containing heterocyclic lubricating additives[J]. *Lubrication engineering*, 2015, 40(9): 137-141.
- [69] 欧阳平, 陈严华, 张贤明, 等. 六元含氮杂环润滑添加剂的摩擦学研究进展[J]. *应用化工*, 2014, 43(12): 2256-2259.
- OUYANG Ping, CHEN Yan-hua, ZHANG Xian-ming, et al. Research and development in tribology of hexahydroxy N-containing heterocyclic lubricating additives[J]. *Applied chemical industry*, 2014, 43(12): 2256-2259.
- [70] XIONG L, HE Z, HAN S, et al. Tribological properties study of N-containing heterocyclic imidazoline derivatives as lubricant additives in water-glycol[J]. *Tribology international*, 2016, 104: 98-108.
- [71] 欧阳平, 张贤明, 郭豫川, 等. 一种新型含氮杂环润滑添加剂的摩擦学特性研究[J]. *机械科学与技术*, 2013, 32(5): 675-678.
- OUYANG Ping, ZHANG Xian-ming, GUO Yu-chuan, et al. Study on the tribological performances of a novel nitrogen-containing heterocyclic lubricating additive[J]. *Mechanical science and technology for aerospace engineering*, 2013, 32(5): 675-678.
- [72] 林科宇, 史永刚, 贺越康, 等. 抗氧及摩擦改进剂的发展研究[J]. *当代化工*, 2018, 47(2): 372-378.
- LIN Ke-yu, SHI Yong-gang, HE Yue-kang, et al. Research progress of anti-oxidants and friction improvers of lubricant[J]. *Contemporary chemical industry*, 2018, 47(2): 372-378.
- [73] 饶文琦, 任天辉, 李久盛, 等. 六元含氮杂环化合物的分子结构对其抗磨性能的影响[J]. *摩擦学学报*, 2001, 21(2): 118-121.
- RAO Wen-qi, REN Tian-hui, LI Jiu-sheng, et al. The effect of molecular structure of six-element N-containing heterocyclic compounds on their wear properties[J]. *Tribology*, 2001, 21(2): 118-121.
- [74] 李进, 陈国需, 杜鹏飞, 等. 氮杂环化合物添加剂的应用[J]. *合成润滑材料*, 2014, 41(3): 23-25.
- LI Jin, CHEN Guo-xu, DU Peng-fei, et al. Application of nitrogen heterocyclic compounds additives[J]. *Synthetic lubricants*, 2014, 41(3): 23-25.
- [75] 欧阳平, 张贤明, 陈国需. 含氮杂环润滑添加剂的合成及性能研究[J]. *化学研究与应用*, 2013, 25(2): 174-178.
- OUYANG Ping, ZHANG Xian-ming, CHEN Guo-xu. Preparation and properties of nitrogen-containing heterocyclic lubricating additive[J]. *Chemical research and application*, 2013, 25(2): 174-178.
- [76] 胡建强, 郭力, 杨士钊, 等. 噻二唑复合添加剂在润滑脂中的应用[J]. *合成润滑材料*, 2010, 37(2): 5-8.
- HU Jian-qiang, GUO Li, YANG Shi-zhao, et al. Application of thiadiazole complex additive in greases[J]. *Synthetic lubricants*, 2010, 37(2): 5-8.
- [77] 王庆瑞, 王俊明, 李维民, 等. 噻二唑衍生物作为润滑脂多功能添加剂的性能研究[J]. *润滑与密封*, 2012, 37(5): 13-22.
- WANG Qing-rui, WANG Jun-ming, LI Wei-min, et al. A study of derivatives of 2,5-dimercapto-1,3,4-thiadiazoles as multifunctional additives in grease[J]. *Lubrication engineering*, 2012, 37(5): 13-22.
- [78] 侯铄, 杨勇, 寇天鑫, 等. 润滑添加剂三乙醇胺硼酸酯的摩擦学特性研究[J]. *润滑与密封*, 2020, 45(2): 75-80.
- HOU Shuo, YANG Yong, KOU Tianxin, et al. Tribological properties of triethanolamine borate as lubricating additive[J]. *Lubrication engineering*, 2020, 45(2): 75-80.
- [79] 孙令国, 杨蕾, 王永刚, 等. 含硫磷酸官能团硼酸酯的制备及摩擦学性能[J]. *精细化工*, 2012, 29(8): 803-807.
- SUN Ling-guo, YANG Lei, WANG Yong-gang, et al. Preparation of a borate ester containing thiophosphoric acid group and its tribological properties[J]. *Fine chemicals*, 2012, 29(8): 803-807.
- [80] QIN Z, HONG S, HONG B, et al. Triisopropyl borate as an electrolyte additive for improving the high voltage stability of  $\text{LiNi}_{0.6}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.2}\text{O}_2$  cathode[J]. *Journal of electroanalytical chemistry*, 2019, 854: 113506.
- [81] SAFFARI H R M, SOLTANI R, ALAEI M, et al. Tribological properties of water-based drilling fluids with borate nanoparticles as lubricant additives[J]. *Journal of petroleum science and engineering*, 2018, 171: 253-259.
- [82] LI J, FAN B, REN T, et al. Tribological study and mechanism of B-N and B-S-N triazine borate esters as lubricant additives in mineral oil[J]. *Tribology international*, 2015, 88: 1-7.
- [83] 孙令国, 王永刚, 张立, 等. 含磷酸酯胺盐官能团硼酸酯衍生物的摩擦学性能研究[J]. *润滑与密封*, 2010, 35(1): 52-55.
- SUN Ling-guo, WANG Yong-gang, ZHANG Li, et al. Tribological properties of a novel borate derivative containing amine phosphate[J]. *Lubrication engineering*, 2010, 35(1): 52-55.
- [84] 徐振, 杨福旺, 程思, 等. 含硫、氮的硼酸酯添加剂的制备及摩擦学性能[J]. *现代化工*, 2014, 34(11): 73-75.
- XU Zhen, YANG Fu-wang, CHENG Si, et al. Preparation and tribology properties of borate ester lubricating additive containing S and N[J]. *Modern chemical industry*, 2014, 34(11): 73-75.
- [85] 孟祥涛, 黄玮, 丛玉凤, 等. 醇胺型硼酸酯抗磨添加剂的制备[J]. *当代化工*, 2015, 44(9): 2113-2115.
- MENG Xiang-tao, HUANG Wei, CONG Yu-feng, et al.

- Preparation of alcohol amine borate antiwear additive[J]. Contemporary chemical industry, 2015, 44(9): 2113-2115.
- [86] 赵永涛, 孙建林, 汤安, 等. 二烷基二硫代氨基硼酸酯的摩擦学性能[J]. 功能材料, 2019, 49(9): 09202-09206.
- ZHAO Yong-tao, SUN Jian-lin, TANG An, et al. Tribology performance of dialkyldithiocarbamic borate ester[J]. Functional materials, 2019, 49(9): 09202-09206.
- [87] 王永刚, 杨双花, 白晓华, 等. 含苯并噻唑环的硼酸酯衍生物的制备及其摩擦学特性研究[J]. 洛阳理工学院学报(自然科学版), 2010, 20(2): 1-4.
- WANG Yong-gang, YANG Shuang-hua, BAI Xiao-hua, et al. Synthesis and tribological properties of borate ester derivative containing benzothiazole functional group[J]. Journal of luoyang institute of science and technology (natural science edition), 2010, 20(2): 1-4.
- [88] 孙令国, 王永刚, 李久盛, 等. 含荒氨酸官能团硼酸酯添加剂的制备及摩擦学性能研究[J]. 润滑与密封, 2011, 36(1): 61-64.
- SUN Ling-guo, WANG Yong-gang, LI Jiu-sheng, et al. Tribological study of a novel borate ester containing N, N-dialkyldithiocarbamate group[J]. Lubrication engineering, 2011, 36(1): 61-64.
- [89] LI Jiu-sheng, XU Xiao-hong, WANG Yong-gang, et al. Tribological studies on a novel borate ester containing benzothiazol-2-yl and disulfide groups as multifunctional additive[J]. Tribology international, 2010, 43: 1048-1053.
- [90] WANG Song, YUE Wen, FU Zhi-qiang, et al. Study on the tribological properties of plasma nitrided bearing steel under lubrication with borate ester additive[J]. Tribology international, 2013, 66: 259-264.
- [91] YAN Jin-can, ZENG Xiang-qiong, HEIDE E, et al. The tribological performance and tribochemical analysis of novel borate esters as lubricant additives in rapeseed oil[J]. Tribology international, 2014, 71: 149-157.
- [92] LI Jian-chang, FAN Bing-ji, REN Tian-hui, et al. Tribological study and mechanism of B-N and B-S-N triazine borate esters as lubricant additives in mineral oil[J]. Tribology international, 2015, 88: 1-7.
- [93] WANG Li-ping, WU Hong-xing, ZHANG Dong-ya, et al. Synthesis of a novel borate ester containing a phenylboronic group and its tribological properties as an additive in PAO 6 base oil[J]. Tribology international, 2018, 121: 21-29.
- [94] ZHENG D, ZHAO Q, JU C, et al. The interaction of two anticorrosive ionic liquid additives on the friction properties of water lubricants[J]. Tribology international, 2020, 141: 105948.
- [95] 黄玉萍, 黄国威, 王玉荣, 等. 油溶性离子液体作为润滑油添加剂的摩擦学性能研究[J]. 材料保护, 2017, 50(4): 43-47.
- HUANG Yu-ping, HUANG Guo-wei, WANG Yu-rong, et al. Tribological performance of oil-soluble ionic liquids as additives in lubricant oil[J]. Materials protection, 2017, 50(4): 43-47.
- [96] SEYMOUR B T, FU W, WRIGHT R A E, et al. Improved lubricating performance by combining oil-soluble hairy silica nanoparticles and an ionic liquid as an additive for a synthetic base oil[J]. ACS applied materials & interfaces, 2018, 10(17): 15129-15139.
- [97] STUMP B C, ZHOU Y, LUO H, et al. New functionality of ionic liquids as lubricant additives: mitigating rolling contact fatigue[J]. ACS applied materials & interfaces, 2019, 11(33): 30484-30492.
- [98] DUAN H T, LI W M, KUMARA C, et al. Ionic liquids as oil additives for lubricating oxygen-diffusion case-hardened titanium[J]. Tribology international, 2019, 136: 342-348.
- [99] CAI Mei-rong, LIANG Yong-min, YAO Mei-huan, et al. Imidazolium ionic liquids as antiwear and antioxidant additive in poly(ethylene glycol) for steel/steel contacts[J]. ACS applied materials & interfaces, 2010, 2(3): 870-876.
- [100] FAN Ming-jin, SONG Zeng-hong, LIANG Yong-min, et al. In situ formed ionic liquids in synthetic esters for significantly improved lubrication[J]. ACS applied materials & interfaces, 2012, 4(12): 6683-6689.
- [101] YU Qiang-liang, ZHANG Chao-yang, DONG Rui, et al. Novel N, P-containing oil-soluble ionic liquids with excellent tribological and anti-corrosion performance[J]. Tribology international, 2019, 132: 118-129.
- [102] YU Qiang-liang, WANG Yu-rong, HUANG Guo-wei, et al. Task-specific oil-miscible ionic liquids lubricate steel/light metal alloy: a tribochemistry study[J]. Advanced materials interfaces, 2018, 5(19): 1800791.
- [103] QU J, BANSAL D G, Yu B, et al. Antiwear performance and mechanism of an oil-miscible ionic liquid as a lubricant additive[J]. ACS applied materials & interfaces, 2012, 4(2): 997-1002.
- [104] 钟寅杰, 李志鹏, 任天辉. 二异辛基二硫代磷酸酯季铵盐离子液体在基础油中的摩擦学研究[J]. 润滑与密封, 2016, 41(7): 25-32.
- ZHONG Yin-jie, LI Zhi-peng, REN Tian-hui. Tribological properties of a quaternary ammonium salt of di(isooctyl) dithiophosphate as lubricant additive in base oils[J]. Lubrication engineering, 2016, 41(7): 25-32.
- [105] BARNHILL W C, LUO H, MEYER H M, et al. Tertiary and quaternary ammonium-phosphate ionic liquids as lubricant additives[J]. Tribology letters, 2016, 63(2): 1-11.