

离子液体和 ZDDP 添加剂的减摩抗磨性及成膜机理探讨

张东¹, 杨淑燕^{1,2}, 郭峰¹

(1. 青岛理工大学 机械工程学院, 山东 青岛 266520;

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 730001)

摘要: **目的** 顺应当前尽可能选用低黏度润滑油而满足节能减排的要求, 进一步探讨离子液体作添加剂时的摩擦润滑机理。**方法** 选用低黏度的聚 α 烯烃(PAO-4 和 PAO-8)为基础油, 以二烷基二硫代磷酸锌(ZDDP)和季磷盐油酸离子液体(IL)为添加剂, 在四球试验机上分别测量了 40、100 °C 下的摩擦系数, 并对比磨斑直径, 对磨损表面进行 SEM 和 EDS 分析。利用轮廓仪对磨斑表面进行三维扫描, 并分析其表面粗糙度。**结果** 与基础油对比, 离子液体有效降低了摩擦系数, 而传统添加剂 ZDDP 则导致摩擦系数上升。在部分工况, 尤其是高温环境下, 离子液体和 ZDDP 均可有效降低磨损。EDS 和表面粗糙度结果可推断: ZDDP 和 IL 在摩擦表面产生了两种截然不同的摩擦反应膜。**结论** 离子液体可以明显改善基础油的摩擦学性能。ZDDP 和 IL 产生的不同摩擦膜引起了摩擦性能的不同, 二者的成膜机理值得进一步探讨。

关键词: 离子液体添加剂; ZDDP; 摩擦系数; 成膜机理; 磨损

中图分类号: TH117.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)02-0089-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.02.015

Effects on Friction and Wear Performance of Ionic Liquids and ZDDP Lubricant Additives and Film-forming Mechanisms

ZHANG Dong¹, YANG Shu-yan^{1,2}, GUO Feng¹

(1. School of Mechanical Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China; 2. State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730001, China)

ABSTRACT: The work aims to meet energy conservation requirements by selecting low viscosity lubricants as far as possible, and further explore friction and lubrication mechanism of ionic liquid as an additive. Low viscosity polyalphaolefin (PAO-4 and PAO-8) was chosen as base oil, and zinc dialkyl dithiophosphate (ZDDP) and quaternary phosphonium salts of oleic acid ionic liquid (IL) were chosen as additives. Friction coefficient was measured at 40 °C and 100 °C, respectively on friction and wear four-ball tester. Diameter of wear scars was observed with a microscope and also compared, the surfaces of wear scars were analyzed with SEM and EDS. Surface 3D scanning and roughness analysis were completed with the aid of a contact roughness profiler. Compared with the base oil, ionic liquid can effectively reduce friction coefficient, while traditional additive ZDDP increases friction coefficient. In some working conditions especially in high temperature environment, both ionic liquid and ZDDP

收稿日期: 2017-08-12; 修订日期: 2017-11-10

Received: 2017-08-12; Revised: 2017-11-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51775287), 中国博士后基金项目(2014M560821)

Fund: Supported by the National Natural Science Fund Project(51775287), China Postdoctoral Fund Project(2014M560821)

作者简介: 张东(1991—), 男, 硕士, 主要研究方向为摩擦学。

Biography: ZHANG Dong(1991—), Male, Master, Research focus: tribology.

通讯作者: 杨淑燕(1987—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为摩擦学。

Corresponding author: YANG Shu-yan(1987—), Female, Doctor, Vice professor, Research focus: tribology.

can effectively reduce wear. According to EDS and surface roughness analysis results, it can be concluded that ZDDP and IL produce two distinct kinds of friction reaction film on friction surface, thus causing differences in friction performance. Film forming mechanisms of the films are further discussed.

KEY WORDS: ionic liquid additives; ZDDP; friction coefficient; film-forming mechanism; wear

边界润滑状态下, 载荷基本由微凸体、润滑剂与表面相互作用而生成的边界润滑膜来承受, 故摩擦系数很大。通常利用基础油添加剂来减少摩擦和磨损, 以达到节能的目的。其中, 摩擦改进剂和极压抗磨添加剂在减少边界润滑和混合润滑下的摩擦和磨损上起着关键性的作用^[1]。

二烷基二硫代磷酸锌 (ZDDP) 是目前最成功的润滑油添加剂。自 20 世纪 40 年代 ZDDP 研制成功以来, 其一直作为一种高效添加剂使用至今。特别是在发动机油中, ZDDP 更是不可或缺的添加组分^[2]。在过去的七十多年里, 研究人员进行了大量的实验, 研究了 ZDDP 的性质与其摩擦性能的关联性, 从多方面阐述了 ZDDP 的抗氧、抗磨和抗腐蚀机理^[3-5]。近年来, 随着环保要求的提高, 发动机油中允许存在的磷和硫越来越少, 且 ZDDP 是润滑油中 SAPS 含量的主要来源, 从而导致 ZDDP 的应用受到了一定程度的限制^[6]。同时, ZDDP 的分解产物会造成润滑剂中的催化剂中毒、轴承的电化学腐蚀和过滤系统的堵塞等问题。所以, 减少 ZDDP 的使用量已成为一种必然趋势^[7]。

近十几年来, 研究者展开了大量工作, 以期开发出 ZDDP 的替代物。虽然已经取得了一些成果, 但仍未找到可以完全取代 ZDDP 的产品^[8]。离子液体 (Ionic Liquids) 具有不挥发性、不燃性、很高的热稳定性、低的熔点等理想润滑材料所需要的性能。2001 年, 刘维民等^[9]首次将离子液体应用于摩擦学领域, 发现离子液体具有非常低的摩擦系数和磨损量。随后国内外研究者对此展开了一系列的研究工作, 例如 Phillips 等人^[10]最早研究了离子液体作为水润滑添加剂的摩擦学性能, 蔡美荣^[11]等研究了把季磷盐离子液体添加到 PAO-10 润滑油后的摩擦学性能。Qu 等人^[12]研究了离子液体作为矿物油和发动机油添加剂时的摩擦学性能, 发现离子液体添加剂均表现出优异的减摩抗磨性能。周峰^[13-14]等人总结了相关离子液体摩擦特性的研究工作, 提出了离子液体的高极性使其在摩擦副表面形成坚固有效的吸附层, 同时进行摩擦化学反应的减摩抗磨机理。

综上所述, 学者们对离子液体添加剂引起摩擦性能的改变展开了系统而深入的研究, 但对于其成膜机理的研究并不深入, 因此本文选用低黏度聚 α 烯烃 (PAO) 为基础油, 二烷基二硫代磷酸锌 (ZDDP) 和季磷盐油酸离子液体为添加剂, 在立式万能摩擦磨损试验机四球模块上进行摩擦性能研究, 并通过表面分析方法

进一步探讨离子液体和 ZDDP 添加剂的成膜机理。

1 实验部分

1.1 主要试剂

基础油选用两种黏度不同的聚 α 烯烃: PAO4、PAO8 (济南赛邦石油化工有限公司)。选用的添加剂为 ZDDP-T202 (锦州百特化工有限公司) 和中国科学院兰州化学物理研究所合成的季磷盐油酸离子液体 (IL)。PAO、ZDDP 和季磷盐离子液体的分子结构如图 1 所示。

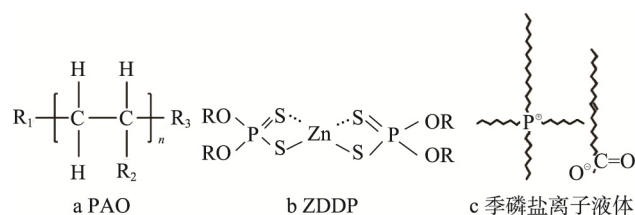


图 1 PAO、ZDDP 和季磷盐离子液体的分子结构

Fig.1 Molecular structure of PAO, ZDDP and quaternary phosphonium ionic liquid: a) PAO, b) ZDDP, c) quaternary phosphonium ionic liquid

1.2 物理化学性能及表征

用 LVDV-III 运动粘度仪测定实验所用润滑剂的密度及其在两种不同温度下的运动黏度, 结果如表 1 所示。通过对比发现, 添加剂引起了润滑油黏度的轻微变化。

表 1 实验所用润滑油的物理性能参数

Tab.1 Physical performance parameters of lubricants for experiment use

Lubricants	Dynamic viscosity/(mPa·s)		VI	Density/(g·cm ⁻³)
	40 °C	100 °C		
PAO4	16.1	4.1	182	0.81
PAO4+1%ZDDP	16.8	4.2	188	0.81
PAO4+1%IL	16.8	4.2	189	0.81
PAO8	44.2	8.0	167	0.84
PAO8+1%ZDDP	44.9	8.1	166	0.84
PAO8+1%IL	45.2	7.9	159	0.84

1.3 摩擦磨损实验

利用 MMW-1 型立式万能摩擦磨损试验机四球模块评价了 PAO 和添加 ZDDP、离子液体后的润滑剂

的摩擦磨损性能,其接触副为四球接触。为保证实验的准确性,实验前通过预实验确定基本载荷 196 N (平均赫兹接触压力为 2.78 GPa),转速 600 r/min,温度 40、100 °C,供油量 10 mL (可完全覆盖球面,并超过 3 mm)。预实验表明离子液体添加剂的含量对摩擦性能影响较小,故选用添加剂质量分数为 1%的润滑剂。试球为 $\phi 12.7$ mm 的精密轴承钢 GCr15 钢球,公差在 0.0002 mm 之内,硬度为 HRC64,符合行标准则。

实验前先用石油醚超声清洗试球 6 h 以上,再使用无水乙醇将石油醚清洗干净并用氮气吹干,然后将试球固定于试验机的规定位置,用滴管添加适量润滑油。实验结束后,将试球再次用石油醚和乙醇冲洗,利用显微镜测量磨斑直径。利用 Hitachi S-3500N 型扫描电子显微镜 (SEM) 获取磨斑形貌,并利用 EDS 进行表面化学成分分析,最后利用英国泰勒霍普森公司生产的 Form Talysurf PGI 800 型粗糙度轮廓仪进行三维表面形貌扫描和粗糙度测量。

2 实验结果与讨论

2.1 添加剂对摩擦力的影响

图 2 为各润滑油在不同温度下摩擦系数随时间变化的曲线。由图 2a 可知,基础油 PAO4 在 40 °C 时达到稳定后的摩擦系数约为 0.09,且摩擦系数随时间的变化有轻微波动;加入 ZDDP 后,其摩擦系数明显

增大,且较为稳定,约为 0.10;加入 IL 后,其摩擦系数随时间的变化波动较大,在 40 min 后趋于稳定,约为 0.068,明显低于基础油的摩擦系数。图 2b 显示在 100 °C 时,基础油 PAO4 的摩擦系数骤然增大而导致润滑油失效,而加入 ZDDP 和 IL 后可避免润滑油失效,且加入 IL 后的润滑油摩擦系数约为 0.08,明显小于加入 ZDDP 后的润滑油摩擦系数 0.12。值得注意的是,加入 IL 后的润滑油摩擦系数一直保持稳定,这与在 40 °C 时不同。这可能是因为摩擦反应膜的形成过程与温度有关,反应膜在低温情况下很不稳定,从而导致摩擦系数出现了较大波动。

图 2c、2d 显示,在基础油 PAO8 中添加 ZDDP 和 IL 后的结果与 PAO4 相似,即添加 ZDDP 后,摩擦系数提高,而加入 IL 后,摩擦系数降低。不同的是,基础油 PAO8 在高温下表现更稳定,并未发生失效,且摩擦系数整体比较平稳。

2.2 失效实验测试

预实验中出现了 PAO4 在高温工况下失效的情况,图 2b 也表明在 100 °C 条件下,PAO4 极易失效,故选定实验温度为 40 °C。同时,为保证润滑油能够失效,提高转速至 800 r/min,在持续加载的条件下,研究了添加剂对润滑油失效的影响。实验中以测得摩擦力骤然增大 20 N 以上作为判定失效的标准,结果如图 3 所示。

从图中可以看出,基础油 PAO4 的失效载荷约为

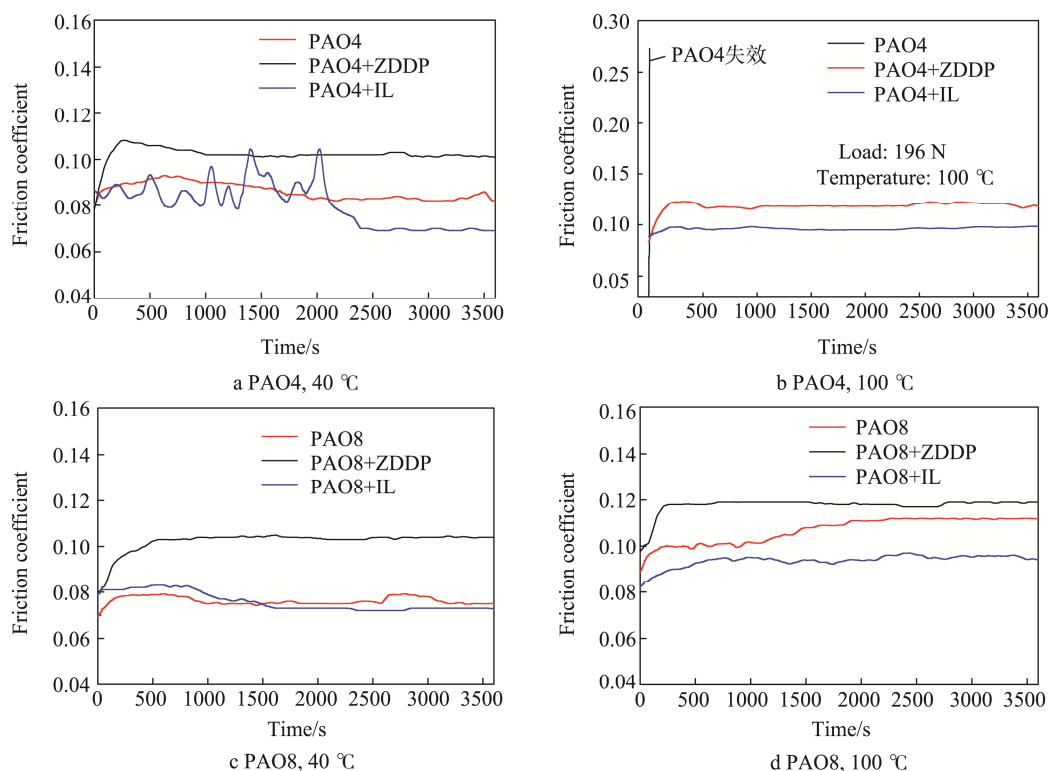


图 2 基础油及添加 ZDDP 和 IL 后摩擦系数随时间的变化曲线

Fig.2 Variation curves of friction coefficient of pure, ZDDP-doped and IL-doped base oils as a function of time

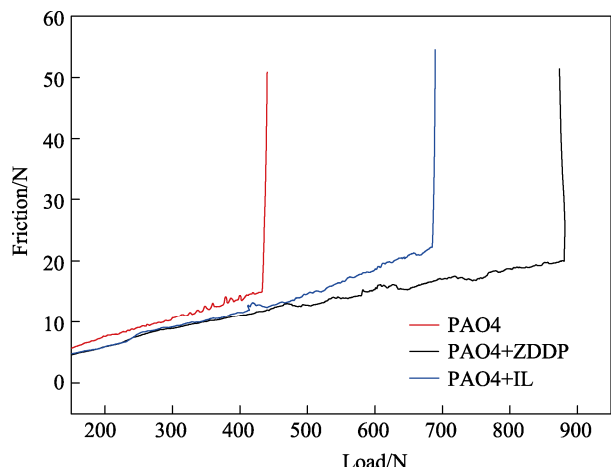


图3 PAO4和添加ZDDP、IL后摩擦力随载荷变化曲线
Fig.3 Variation curves of frictional force of pure, ZDDP-doped and IL-doped PAO4 as a function of load

440 N,但是加入ZDDP和IL后,引起润滑剂失效的载荷明显增大,PAO4+ZDDP的失效载荷约870 N,而PAO4+IL的失效载荷约680 N,说明ZDDP和IL均可有效提高基础油的抗极压性能。本试验工况下,ZDDP的抗极压能力优于IL,推测是因为ZDDP中含有S元素,能在摩擦表面生成硫化物^[6]。

2.3 添加剂对磨损性能的研究

用显微镜观测钢球磨斑直径,并把三个下试球的平均值作为磨斑直径,每组实验进行五次后取平均值,平均值如图4所示。特别说明的是,基础油PAO4在100℃时极易发生失效,实验不具备重复性,故磨斑和SEM等分析讨论中均没有列出PAO4在100℃时的结果。

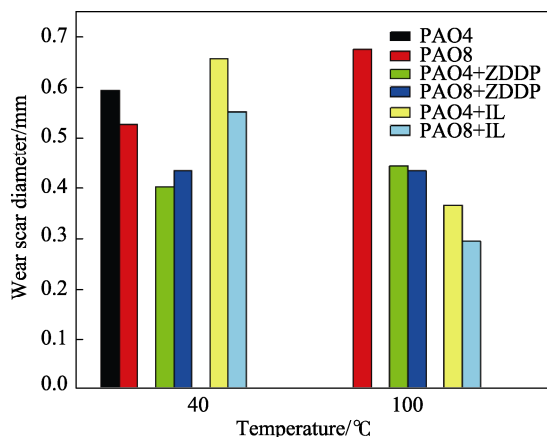


图4 不同润滑状态下的试样表面磨斑直径
Fig.4 Diameter of wear scars on specimen surface under different lubrication conditions

图4为各润滑状态下试样的表面磨斑直径。由图可见,在40℃时,基础油PAO4和PAO8的磨斑直径相差不大。加入ZDDP后,两种润滑油在40、100℃下的磨斑直径均明显减小,且两者在不同温度下相差不大,可见ZDDP添加剂的抗磨性能较好,且受温度

影响很小。而IL添加剂只在100℃时能有效减小磨损,在40℃下的减摩效果不理想。这可能是因为低温条件下,离子液体的成膜能力较差,不能有效隔离两个摩擦表面造成的。磨斑直径的结果与图2所示的摩擦系数结果是一致的。

2.4 磨斑的表面形貌分析

由于PAO4和PAO8的实验结果相似,因此仅给40、100℃下,PAO8、PAO8+ZDDP、PAO8+IL润滑状态下试样的磨斑表面形貌,如图5所示。

由图可见,40℃时,在100放大倍率下,基础油PAO8的磨斑直径最大,加入添加剂后,磨斑直径变小。在350放大倍率下,基础油PAO8润滑条件下的磨损情况较严重,在磨斑表面可以看到明显的“犁痕”;添加ZDDP后,磨斑表面的“犁痕”减轻;添加IL后,虽然磨斑直径没有明显减小,但“犁痕”基本不可见,表面明显变光滑。100℃时的实验结果与40℃时的结果相似,但在100℃时加入IL,磨斑直径会明显减小,而且摩擦表面明显变光滑,“犁痕”基本不可见。这可能与ZDDP和IL在摩擦表面产生的反应膜不同有很大关系,这与ZDDP增加摩擦力而IL降低摩擦力的结论也是相互呼应的。此外,添加离子液体后未发现摩擦表面出现腐蚀,可能与离子液体的阳离子中含有一定防腐性的磷元素有关^[11]。

2.5 磨斑的三维形貌和表面粗糙度

利用Form Talysurf PGI 800型粗糙度轮廓仪对摩擦磨损试验后的磨斑表面进行了三维形貌扫描,同时测量了其表面粗糙度。根据图4的磨斑直径,寻找和确保磨斑尽可能最大程度地包含在扫描区域内,设置扫描1.1×1.1 mm的方形区域,扫描点数量设置为300,扫描速度为1 mm/s,粗糙度分析设置的取样长度为略宽于磨斑直径的长度,分辨率0.08 mm,磨斑的三维形貌及表面粗糙度如图6所示。

与SEM分析不同,图6可以从磨斑深度方向上进一步研究添加剂对基础油磨损性能的影响。40℃时,基础油润滑下的磨斑表面“犁痕”非常明显,沟痕深度不一,且整个表面的表面粗糙度 R_a 为0.3129。加入ZDDP后,“犁痕”变得不明显,磨痕明显变浅,磨斑表面上有一层“疙瘩状”的摩擦膜,且整个表面看起来比较粗糙,其表面粗糙度 R_a 为0.441。而加入IL后,磨痕明显变浅,磨斑表面因生成了一层均匀而致密的反应膜而变得相对平滑,其表面粗糙度 R_a 为0.1226。100℃时的实验结果与40℃时类似,并且可以清楚地看到,加入ZDDP后,磨斑直径明显减小,这与SEM结果相对应。需要说明的是,各种润滑剂润滑条件下的试样表面均明显存在一些“划痕”,经过与光滑的钢球表面对比,这些划痕可能是在机械加工过程中产生的。

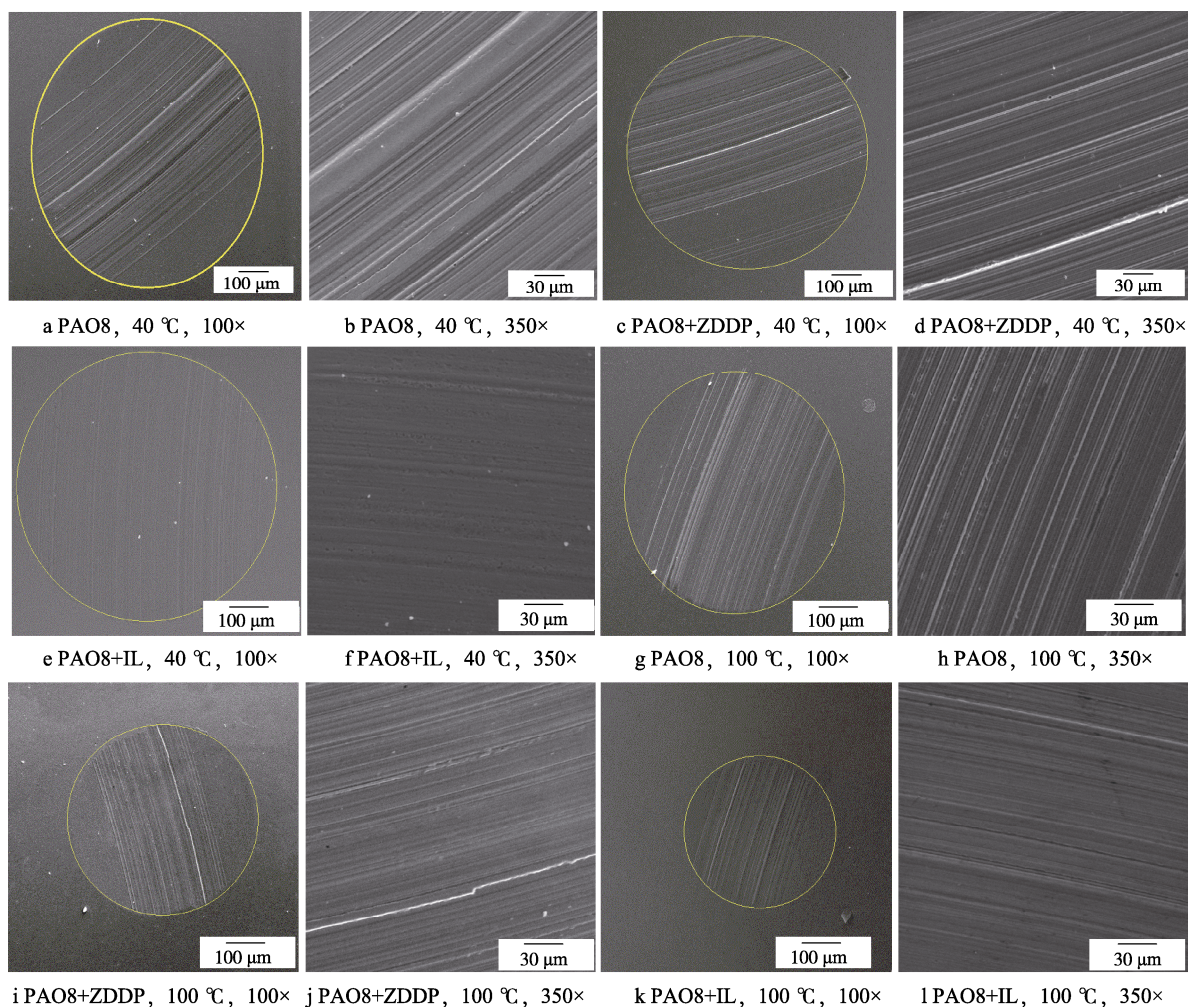


图 5 PAO8 及添加 ZDDP、IL 的润滑状态下试样磨斑表面的 SEM 照片

Fig.5 SEM images of wear scar surface on pure, ZDDP-doped and IL-doped PAO8 under lubrication conditions

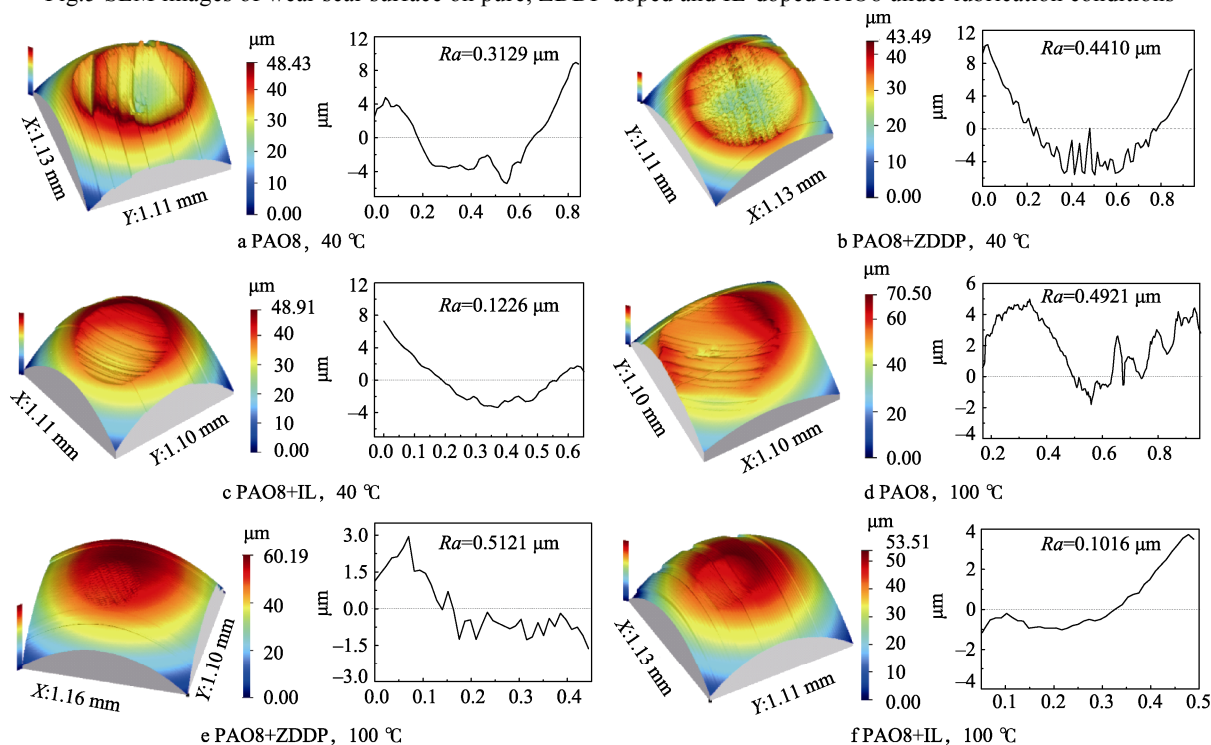


图 6 PAO8 及添加 ZDDP、IL 后的润滑状态下试样磨斑的表面形貌及粗糙度

Fig.6 Surface morphology and roughness of wear scars on pure, ZDDP-doped and IL-doped PAO8 under lubrication conditions

2.6 磨斑表面的 EDS 分析

添加剂中的活性元素,如 P、S 等,与新生金属表面发生的摩擦化学反应比较复杂,利用 EDS 对磨损后磨斑表面的元素进行了分析,以期深入理解 ZDDP 和离子液体形成反应膜的减摩抗磨机理。

由于 PAO4 和 PAO8 的 EDS 结果相似,而 PAO8 在 40 °C 时的结果不明显,故只给出 PAO8 在 100 °C 时的结果,如图 7 所示。由图可见,基础油的摩擦表面上只检测到了 C、Fe 以及少量的 Cr 元素,这与基础油及摩擦副的物质组成相一致。PAO8+ZDDP 的摩擦表面上除了检测到 C、Fe 基础元素外,还发现了少量的 S、P、Zn 等元素,这与 ZDDP 的组成成分相一致。而在 PAO8+IL 的摩擦表面上,除基础元素外,只能检测到了 P 元素,并没有 S 元素,这也与 IL 的组分相一致。

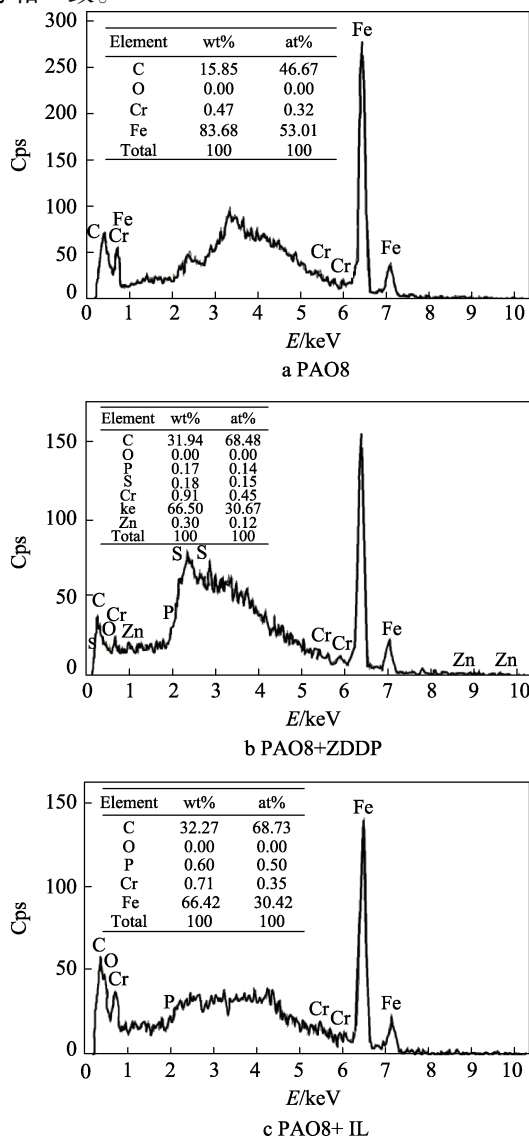


图 7 PAO8 及添加 ZDDP、IL 润滑时 100 °C 时试样 EDS 分析结果

Fig.7 EDS analysis results of pure, ZDDP-doped and IL-doped PAO8 at 100 °C under lubrication conditions

2.7 添加剂的减摩抗磨机理讨论

学者们对于 ZDDP 的抗磨机理主要从分解机理^[6]和表面膜形成两方面来研究。目前,最广泛被接受的理论是 ZDDP 和其分解产物在金属表面或者氧化表面进行物理化学吸附,然后 ZDDP 被氧化、被降解,最终形成一种“孤岛”形状的摩擦反应膜。例如,Spikes^[15]利用 AFM 分析发现 ZDDP 形成的摩擦反应膜最初是似岛状结构,然后逐步延伸至形成完整的膜。Fuller 等^[16-17]利用 XANES 技术在含油表面进行检测,发现摩擦反应膜是下层为短链的聚磷酸盐、正磷酸盐,上层是一种长链的聚磷酸盐玻璃材质。但至今为止,对于摩擦化学反应的很多细节并不了解,例如首先生成链还是短链等。

对于离子液体的成膜特性以及减摩抗磨机理,学者们也展开了研究。例如 Qu^[18-19]、Minami^[20]等人用 TEM、EDS 研究发现,季磷盐离子液体作添加剂润滑后,可观察到摩擦膜下生成细化晶粒结构的塑性变形区,而这些摩擦膜主要是由一些不定形的纳米晶体颗粒组成,一般包含两层:下层膜一般致密整齐,通过 EDS 分析推断是化学生成膜;上层膜是一层疏松多孔层,一般是由基底金属和其氧化物的混合物组成。Vibhu Sharma^[21]等人用纳米压痕技术(Nano-indentation)证明了离子液体形成的摩擦膜硬度较低,并与 ZDDP 摩擦膜进行比较,发现后者的硬度更高。

本实验证实了 ZDDP 和 IL 易于在新鲜金属表面发生复杂的摩擦化学反应,而生成一层摩擦反应膜。而且发现在高温条件下,IL 反应膜更容易生成且稳定。此外,在极限工况下,ZDDP 和 IL 均能有效延长润滑油的失效时间。对比于基础油,在边界润滑条件下,这层摩擦反应膜可避免两摩擦表面的直接接触,从而可达到良好的减摩效果。同时,EDS 分析和磨斑的三维形貌也证实了二者生成的摩擦反应膜是不同的。其中,ZDDP 反应膜比较粗糙,而 IL 反应膜则相对平滑,这很好地解释了图 2 所示的摩擦系数结果,即 ZDDP 添加剂提高了摩擦系数,而 IL 却降低摩擦系数。

3 结论

1) 低黏度的 PAO 基础油在某些极限工况下容易失效,而 ZDDP 和 IL 添加剂的加入,均可明显改善基础油的抗极压性能。

2) ZDDP 和离子液体(IL)添加剂可在两摩擦金属表面生成一层反应膜,可有效减轻两表面的磨损情况。对比于基础油的摩擦系数,ZDDP 引起了摩擦系数的增加,而 IL 可有效降低摩擦系数。

3) ZDDP 摩擦反应膜类似“疙瘩状”,且比较粗糙,而离子液体(IL)反应膜则是比较致密而相对平

滑的。经过初步探究,发现二者的减摩抗磨机理不同。

致谢:

感谢中国科学院兰州化学物理研究所蔡美荣博士提供的离子液体试剂,感谢英国帝国理工学院张杰博士在实验过程中给予的指导。

参考文献:

- [1] 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
WEN S Z, HUANG P. Principle of Tribology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.
- [2] 姚文钊, 薛卫国, 刘雨花, 等. 低硫酸盐灰分, 低磷和低硫发动机油添加剂发展现状及趋势[J]. 润滑油, 2009, 24(1): 48-53.
YAO W Z, XUE W G, LIU Y H, et al. Development Status and Trend of Low SAPS Engine Oil Additives[J]. Lubricating Oil, 2009, 24(1): 48-53.
- [3] 魏建军, 薛群基. 二烷基二硫代磷酸锌的热分解机理及其抗氧化性能的研究[J]. 石油炼制, 1991(11): 27-31.
WEI J J, XUE Q J. Study on Thermal Decomposition and Antioxidative Performance of Zinc Dialkyl dithiophosphate[J]. Oil Refining, 1991(11): 27-31.
- [4] 文小红, 王学业, 刘万强, 等. 二烷基二硫代磷酸锌润滑添加剂的抗磨机理[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(8): 1305-1310.
WEN X H, WANG X Y, LIU W Q, et al. Anti-wear Property of Zinc Dialkyl dithiophosphate[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(8): 1305-1310.
- [5] 张龙华, 李铭, 刘维民, 等. 二烷基二硫代磷酸丙烯酸酯作为润滑油添加剂的实验研究[J]. 石油学报(石油加工), 2008, 24(2): 191-197.
ZHANG L H, LI M, LIU W M, et al. Experimental Study on Acrylate of Dialkyl Dithiophosphoric Acid as Lubricant Additives[J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2008, 24(2): 191-197.
- [6] SPIKE H. The History and Mechanisms of ZDDP[J]. Tribology Letters, 2004, 17(3): 469-489.
- [7] 李久盛, 王永刚, 任天辉. 二烷基二硫代磷酸锌(ZDDP)替代物的研究现状[J]. 润滑与密封, 2006, 31(8): 168-172.
LI J S, WANG Y G, REN T H. A Survey on the Substitute for ZDDP[J]. Lubrication Engineering, 2006, 31(8): 168-172.
- [8] 欧阳平, 陈国需, 李华峰. ZDDP 所面临的挑战及其改进剂的研究现状[J]. 润滑与密封, 2008, 33(12): 98-100.
OUYANG P, CHEN G X, LI H F. The Challenge Confronted with ZDDP and Research Status of Its Modifier[J]. Lubrication Engineering, 2008, 33(12): 98-100.
- [9] YE C F, LIU W M, CHEN Y X, et al. Room-temperature Ionic Liquids: A Novel Versatile Lubricant[J]. Chem Commun, 2001, 21: 2244.
- [10] PHILLIPS B S, ZABINSKI J S. Ionic Liquid Lubrication Effects on Ceramics in a Water Environment[J]. Tribology Letters, 2004, 17: 533-541.
- [11] 蔡美荣. 抗氧化防腐蚀离子液体的合成及其摩擦学性能研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2012.
CAI M R. The Synthesis and Tribological Performance of Antioxidation and Anticorrosion Ionic Liquids[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2012.
- [12] 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.
- [13] FAN M J, LIANG Y M, ZHOU F, et al. Dramatically Improved Friction Reduction and Wear Resistance by in Situ Formed Ionic Liquids[J]. RSC Advances, 2012, 2(17): 6824-6830.
- [14] OLIVIER H. Recent Developments in the Use of Non-aqueous Ionic Liquids for Two-phase Catalysis[J]. Journal of Molecular Catalysis A: Chemical, 1999, 146(1): 285-289.
- [15] ZHANG J. Influence of Succinimide Dispersants on Film Formation, Friction and Antiwear Properties of Zinc Dialkyl Dithiophosphate[D]. London: Imperial College London, 2012.
- [16] FULLER M L S, KASRAIM, BANCROFT G M, et al. Solution Decomposition of Zinc Dialkyl Dithiophosphate and Its Effect on Antiwear and Thermal Film Formation Studied by X-ray Absorption Spectroscopy[J]. Tribology International, 1998, 31: 627-644.
- [17] YIN Z F, KASRAI M, FULLER M, et al. Application of Soft X-ray Absorption Spectroscopy in Chemical Characterization of Antiwear Films Generated by ZDDP Part I: The Effect of Physical Parameters[J]. Wear, 1997, 202: 172-191.
- [18] 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.
- [19] QU J, BARNHILL W C, LUO H, et al. Synergistic Effects between Phosphonium-alkylphosphate Ionic Liquids and Zinc Dialkyl dithiophosphate (ZDDP) as Lubricant Additives[J]. Advanced Materials, 2015, 27(32): 4767-4774.
- [20] MINAMI I, INADA T, SASAKI R, et al. Tribo-chemistry of Phosphonium-derived Ionic Liquids[J]. Tribology Letters, 2010, 40(2): 225-235.
- [21] SHARMA V, DOERR N, ASWATHSP B. Chemical-mechanical Properties of Tribofilms and Their Relationship to Ionic Liquid Chemistry[J]. RSC Advances, 2016, 6(27): 22341-22356.