

# 离子液体和 ZDDP 的摩擦学性能及协同效应研究

杨淑燕<sup>1,2</sup>, 张东<sup>1</sup>, 郭峰<sup>1</sup>

(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 730000)

**摘要:** **目的** 研究离子液体和 ZDDP 添加剂的摩擦学性能以及协同作用机制, 以降低 ZDDP 在工业润滑油中的用量或开发新添加剂。**方法** 选用聚  $\alpha$  烯烃 (PAO-4 和 PAO-8) 为基础油, 二烷基二硫代磷酸锌 (ZDDP) 和季磷盐油酸离子液体 (Ionic Liquid, IL) 为添加剂, 在四球试验机上考察了添加剂对基础油摩擦磨损性能的影响及协同作用机制。采用扫描电子显微镜 SEM 和 EDS 对磨斑表面进行形貌和化学组分分析, 利用表面粗糙度轮廓仪对磨斑进行了三维扫描并测量了其粗糙度, 利用球盘式光干涉测量装置研究了添加剂对成膜特性的影响。**结果** 40 °C 时, ZDDP 和 IL 复配物的摩擦系数介于 ZDDP 和 IL 之间。100 °C 时, 基础油 PAO4 失效, 添加 ZDDP 和 IL 复配物后, 其摩擦系数降低至 0.085, 低于单独添加 IL 和 ZDDP 时的摩擦系数。基础油 PAO8 的摩擦系数约为 0.11, 单独添加 IL 与添加 ZDDP 和 IL 复配物后的摩擦系数非常接近 (约为 0.09)。SEM 图像显示, 在 40 °C 和 100 °C 时向基础油中添加 ZDDP 和 IL 复配物, 工况下对应的磨斑直径最小, 且表面粗糙度值均小于基础油和基础油中添加 ZDDP。卷吸速度为 300 mm/s 和 450 mm/s 时, 单独添加 IL 或添加 ZDDP 和 IL 复配物, 可提高润滑油的中心膜厚, 有效缓解乏油状况。**结论** 与基础油相比, 尤其是在高温环境下, ZDDP 和离子液体复配时具有很好的减摩抗磨协同效应; 混合润滑条件下, 向基础油 PAO 中单独添加 IL 或 ZDDP 和 IL 复配物时, 可有效减缓接触区内的乏油状况。

**关键词:** 润滑油; 离子液体添加剂; ZDDP; 摩擦学性能; 协同效应; 成膜特性

**中图分类号:** TH117.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)06-0122-09

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.06.018

## Tribological Properties and Synergistic Effect of Ionic Liquids and ZDDP

YANG Shu-yan<sup>1,2</sup>, ZHANG Dong<sup>1</sup>, GUO Feng<sup>1</sup>

(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 730000, China)

**ABSTRACT:** The work aims to reduce amount of ZDDP in industrial lubricants or to develop new additives by going into tribological properties and synergistic mechanism of IL and ZDDP additive. Polyalphaolefins (PAO-4 and PAO-8) were chosen as base oil, zinc dialkyl dithiophosphates (ZDDP) and quaternary phosphonium salt oleic acid ionic liquids (IL) were selected as additives. Effects of additives on friction and wear properties of base oil, and synergy mechanism were studied on four-ball testing machine. Morphology and chemical constituents of wear scars were analyzed with SEM and EDS. 3D morphology and

收稿日期: 2018-01-02; 修订日期: 2018-02-11

Received: 2018-01-02; Revised: 2018-02-11

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); 固体润滑国家重点实验室开放课题 (LSL-1712)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China Project (51775287), China Postdoctoral Fund Project (2014M560821) and State Key Laboratory of Solid Lubrication Fund (LSL-1712)

作者简介: 杨淑燕 (1978—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为摩擦学。

Biography: YANG Shu-yan (1978—), Female, Ph. D., Associate professor, Research focus: tribology.

roughness of scar surfaces were acquired with a surface roughness profilometer. Effects of additives on film forming characteristics were studied with a ball-disk optical interferometer. At the test temperature of 40 °C, friction coefficient of ZDDP and IL compound fell in between that of ZDDP and IL. At 100 °C, the base oil PAO4 failed, friction coefficient decreased to 0.085 after addition of ZDDP and IL compound, which was lower than that of base oil containing IL and ZDDP only. Friction coefficient of base PAO8 was about 0.11. Friction coefficient of the base oil containing IL only was close to that of solution containing ZDDP and IL compound (nearly 0.09). SEM images showed that wear scar diameter was the smallest when the ZDDP and IL compound was added to the base oil at 40 °C and 100 °C, and surface roughness value was below that of base oil and ZDDP. At the entrainment speed of 300 mm/s and 450 mm/s, central film thickness of lubricating oil could be increased, and effectively oil starvation could be alleviated effectively when IL or ZDDP and IL compound was added. Compared with base oil, it is found that excellent synergistic effect of anti-friction and anti-wear can be achieved when ZDDP and IL are compounded, especially at the high temperature. Under mixed lubrication conditions, starvation conditions in the contact zone can be retarded effectively when IL alone or the ZDDP and IL compound is added to the base oil PAO.

**KEY WORDS:** lubricant; ionic liquid additives; ZDDP; tribological properties; synergistic effect; film forming characteristic

烷基二硫代磷酸锌 (ZDDP) 是一种兼有抗氧、抗磨、减摩、极压等优异性能的添加剂, 且成本低廉, 自 20 世纪 40 年代以来, 在内燃机油、齿轮油、液压油等工业用油中得到了广泛应用<sup>[1]</sup>。环保法规和节能要求日益严格<sup>[2]</sup>, 2010 年 ILSAC-GF5 油品规格规定发动机油中的硫含量不超过 0.6%, 磷含量不大于 0.08%, 这意味着必须降低 ZDDP 在工业润滑油中的使用量或开发新的添加剂取而代之<sup>[3-4]</sup>。

润滑油添加剂的复配可产生协同效应或对抗效应, 充分利用添加剂复配间的协同效应是获得经济实用的润滑油复合配方和最佳润滑效果的有效途径<sup>[5]</sup>。国内外学者对此开展了一些相关研究, 主要利用摩擦磨损试验机研究了 ZDDP 分别与含氮有机物修饰的纳米氢氧化镧 (La(OH)<sub>3</sub>)<sup>[6]</sup>、妥尔油酸铜<sup>[7]</sup>、含纳微米硼酸盐<sup>[8]</sup>、硫化异丁烯<sup>[9-10]</sup>、含氮硼酸衍生物<sup>[11]</sup>复配物的摩擦学性能和协同效应。也有学者对 ZDDP 与苯并噻唑衍生物的协同抗磨性能<sup>[12]</sup>和芳胺与 ZDDP 的抗氧化协同作用<sup>[13]</sup>进行了研究。

离子液体 (Ionic Liquid, 以下简称 IL) 从 2001 年首次应用于摩擦学研究以来, 展现出的优异减摩抗磨性能引起了国内外学者的关注<sup>[14-15]</sup>。相比于 ZDDP, 离子液体依旧存在造价高等问题, 使其推广使用受到了一定的限制。2015 年 Qu 等人<sup>[16]</sup>首次发现

ZDDP 和 3 种 IL 复配物具有良好的抗摩减摩协同效果, 并利用 XPS 和 TEM 分析手段探讨了 ZDDP 与 IL 的协同作用机理。此外, 帝国理工的 Cann<sup>[17]</sup>和清华大学谢国新等人<sup>[18]</sup>初步探讨了离子液体在弹流和混合润滑状态下的成膜特性。为此, 本文选用低黏度聚  $\alpha$  烯烃 (PAO) 为基础油, ZDDP 和油溶性的季磷盐油酸离子液体为添加剂, 利用立式万能摩擦磨损试验机 and 表面分析仪器, 研究了 ZDDP、IL 和两者复配物对摩擦磨损性能的影响, 利用球盘式光干涉测量装置初步研究了其成膜特性。该研究工作进一步揭示了 IL 和 ZDDP 添加剂的成膜机理及协同作用机制, 将为设计性能更好的润滑添加剂提供必要的依据。

## 1 实验

### 1.1 主要试剂

基础油选用两种黏度不同的聚  $\alpha$  烯烃——PAO4、PAO8 (济南赛邦石油化工有限公司)。添加剂选用了两类: 第一类为 ZDDP-T202 (锦州百特化工有限公司); 第二类为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 (以下简称 IL)。其分子式结构如图 1 所示。

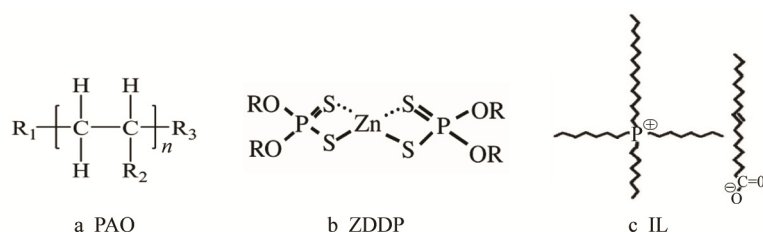


图 1 PAO、ZDDP 和季磷盐离子液体的分子结构

Fig.1 Molecular structure of PAO, ZDDP and quaternary phosphonium ionic liquid

## 1.2 物理参数

用 LVDV-III 运动黏度仪测试了基础油和含有不

同添加剂的润滑剂在 40 ℃ 和 100 ℃ 时的运动黏度、密度和粘度指数, 如表 1 所示。通过对比可以发现, 添加剂引起了润滑油黏度的轻微变化。

表 1 实验所用润滑剂的物理参数  
Tab.1 Physical parameters of lubricants used in experiments

Lubricants	Dynamic viscosity/(mPa·s)			Density/(g·cm <sup>-3</sup> )
	40 ℃	100 ℃	VI	
PAO4	16.1	4.1	182	0.81
PAO4+1%ZDDP	16.8	4.2	188	0.81
PAO4+1%IL	16.7	4.2	189	0.81
PAO4+0.5%ZDDP+0.5%IL	16.7	4.2	187	0.81
PAO8	44.2	8.0	167	0.84
PAO8+1%ZDDP	44.9	8.1	166	0.84
PAO8+1%IL	45.1	8.0	159	0.84
PAO8+0.5%ZDDP+0.5%IL	44.9	8.0	164	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 及同时添加 ZDDP 和离子液体后润滑剂的摩擦磨损性能, 其接触副为四球接触, 试球直径为 12.7 mm, 材质为精密轴承钢 GCr15, 硬度为 64HRC。摩擦磨损实验前, 通过预实验确定基本载荷、转速、温度等参数: 载荷 196 N (平均赫兹接触压力为 2.78 GPa), 转速 600 r/min, 测试温度 40、100 ℃, 供油量 10 mL (可完全覆盖球面, 油膜厚度超过 3 mm), 添加剂的总量保持为 1% (质量分数)。

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。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 对表面化学成分进行分析, 最后利用泰勒霍普森公司的 Form Talysurf PGI 800 型粗糙度轮廓仪对磨斑的三维表面形貌进行扫描, 同时测量其粗糙度。

## 1.4 成膜特性研究

添加剂对成膜特性的影响在球-盘点接触光弹流试验机上进行分析, 试验用高精度钢球, 直径为 25.4 mm, 粗糙度  $R_a$  为 25 nm 左右。玻璃盘材料为 K9 玻璃, 为便于更好地成像, 工作面镀一层铬膜, 直径为 150 mm, 粗糙度  $R_a$  为 8 nm。光源选用红绿双色激光, 波长分别为 653 nm 和 532 nm, CCD 选用 Sony-ICX204AK, 双色光干涉测量油膜厚度的原理和具体方法参见文献[19]。试验前, 将钢球和玻璃盘用无水乙醇和去离子水进行冲洗并用高压气体吹干待用。

## 2 结果与讨论

### 2.1 添加剂对摩擦力的影响

图 2 的摩擦力实验结果显示, 相比于基础油 PAO4 和 PAO8, 单独添加 ZDDP 的摩擦系数远高于基础油, 而单独添加 IL 可明显降低润滑油的摩擦系数, 这与前期的研究结果一致<sup>[14-15,20]</sup>, 相关润滑作用机理不再赘述。ZDDP 和 IL 复配物在 40 ℃ 时的摩擦系数介于 ZDDP 和 IL 之间且比基础油高, 而在 100 ℃ 下接近甚至低于单独添加 IL 时的摩擦系数, 这说明二者复配时产生了良好的减摩协同效应, 且添加剂的复配性能及作用机理受温度的影响。由图 2a 可知, 在 PAO4 中添加 IL 时, 在测试初期摩擦系数出现了较大的跳动 (蓝色曲线), 但在约 2300 s 后趋于稳定, 而在 100 ℃ 时摩擦系数非常稳定 (图 2b)。IL 与 ZDDP 的复配物 (绿色曲线) 在整个测试过程中表现出稳定的摩擦行为, 这可能是因为 IL 具有较强的极性, 在摩擦过程中与基础油、金属表面的相互作用更活跃, 经历了一段时间后逐渐趋于稳定。需要指出的是, 在图 2b 所示的摩擦力测试时发现基础油 PAO4 已失效, 为此设计了润滑油失效实验测试。

### 2.2 失效实验测试

选定与基础油和单一添加剂相同的试验工况, 实验温度为 40 ℃, 为保证润滑油发生失效, 转速提高至 800 r/min, 通过持续加载方式评价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, 相关实验结果如图 3 所示。可知基础油的失效载荷约为 440 N, 加入 ZDDP 和 IL 后均令失效载荷明显增大, 而同时添加 ZDDP

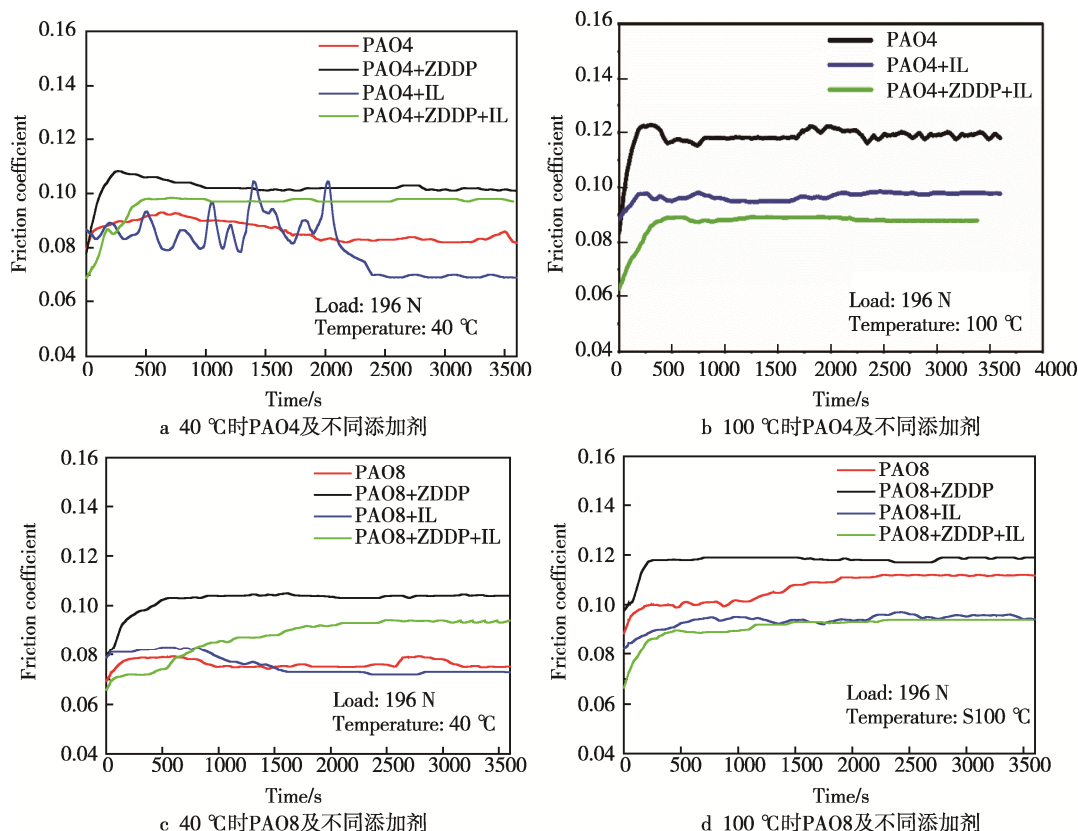


图 2 基础油及添加 ZDDP 和 IL 后摩擦系数随时间的变化曲线

Fig.2 Curves of friction coefficient of base oil, and that containing ZDDP and IL as a function of time: (a) PAO4 with additives at 40 °C, (b) PAO4 with additives at 100 °C, (c) PAO8 with additives at 40 °C, (d) PAO8 with additives at 100 °C

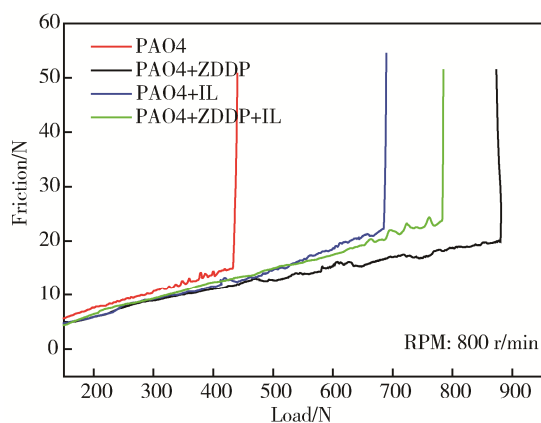


图 3 PAO4 和添加 ZDDP、IL 混合物润滑状态下摩擦力随载荷变化曲线

Fig.3 Curves of friction as a function of load when being lubricated by PAO4 as well as ZDDP and IL compound

和 IL 时, 润滑油发生失效的载荷约为 770 N, 介于两者之间 (ZDDP 约为 870 N, IL 约为 680 N)。实验结果表明了 ZDDP 和 IL 均能提高基础油的抗极压性能, 但 ZDDP 的效果更好。推测出现这种结果的原因可能与润滑油中的 S 元素含量有关, 因为 S 元素能在摩擦表面形成抗烧结作用的硫化物, 从而提高润滑剂的抗极压性能。显然 ZDDP 中的 S 元素含量要大于 IL, 而 ZDDP 和 IL 复配物中 S 含量介于两者之间。

## 2.3 添加剂对磨损性能的影响

在四球试验机上完成摩擦力测试后, 用显微镜观测了钢球磨斑直径, 并把三个下试球的平均值作为磨斑直径, 每组实验 3 次, 平均值如图 4 所示。从图 4 中发现, 在基础油 PAO 中单独添加 ZDDP 和加入 ZDDP 和 IL 复配物的两种工况下, 磨斑直径非常接近, 且相比基础油均明显减小; 而单独添加 IL 时, 100 °C 下的磨斑直径最小, 但在 40 °C 时的磨斑直径

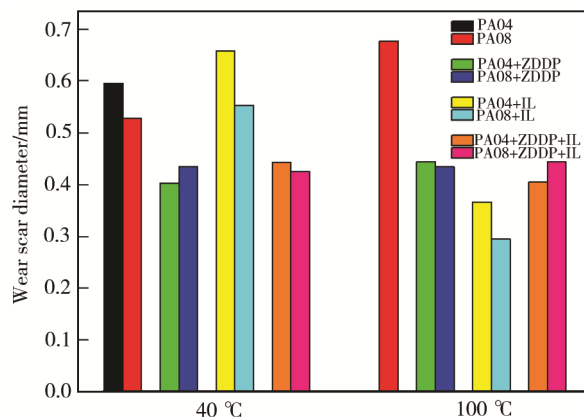


图 4 不同润滑工况下的表面磨斑直径

Fig.4 Diameters of wear scars on surface under different lubrication conditions



与基础油的相差无几。实验结果表明,ZDDP 及 ZDDP 和 IL 复配物均有很好的抗磨性能,IL 的抗磨性能受温度影响,这可能是因为在高温下更容易在摩擦表面形成耐磨的磷酸铁化学反应膜。

## 2.4 磨斑的表面形貌表征

利用扫描电子显微镜(SEM)获取摩擦实验后试样的磨斑表面形貌,放大倍率分别为100和350,如图5所示。对比SEM图像发现:与基础油相比,单独添加IL工况下的磨斑直径变小,而添加ZDDP和IL复配物工况下的直径最小;纯基础油的“犁痕”较深,单独添加IL时“犁痕”明显变浅,而二者复配物润滑条件下,“犁痕”基本不可见,摩擦表面比较光滑。实验结果表明,添加ZDDP、IL或者二者的复配物都能在一定程度上降低表面磨损,且二者复配使用时的效果优于单独添加,这说明ZDDP和IL产生了很好的协同抗磨效果。

添加剂中的活性元素(如P和S)与新生金属表面发生的摩擦化学反应是一种远离平衡态的反应,从

而在摩擦表面形成一层非常复杂的化学反应膜,它受很多因素的影响,例如分子结构、添加剂含量、摩擦过程中多种添加剂间的相互作用等。为进一步探究ZDDP和IL形成的反应膜的减摩抗磨机理,利用EDS对磨损后的磨斑表面元素化学状态进行分析,受篇幅所限,只给出了100℃时的EDS能谱和元素含量,如图6所示。对比基础油和单独添加一种添加剂的结果可知:在摩擦表面上检测到的元素基本与润滑剂的元素组成一致;ZDDP和IL复配物工况下的P元素含量介于单独添加二者之间,而S和Zn元素均高于单独添加时的含量,可推测此时受摩擦过程中ZDDP和IL添加剂之间相互作用的影响,在金属表面形成的化学反应膜与单独添加时形成的反应膜成分不同。

图5显示,当添加IL时,磨斑表面明显变光滑。为进一步论证,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三维形貌扫描,同时测量其粗糙度。根据磨斑尽可能最大程度地在扫描区域内原则,最终确定扫描区域X、Y方向上的尺寸约为1.1 mm×1.1 mm,磨斑的三维形貌及粗糙度如图7所示。

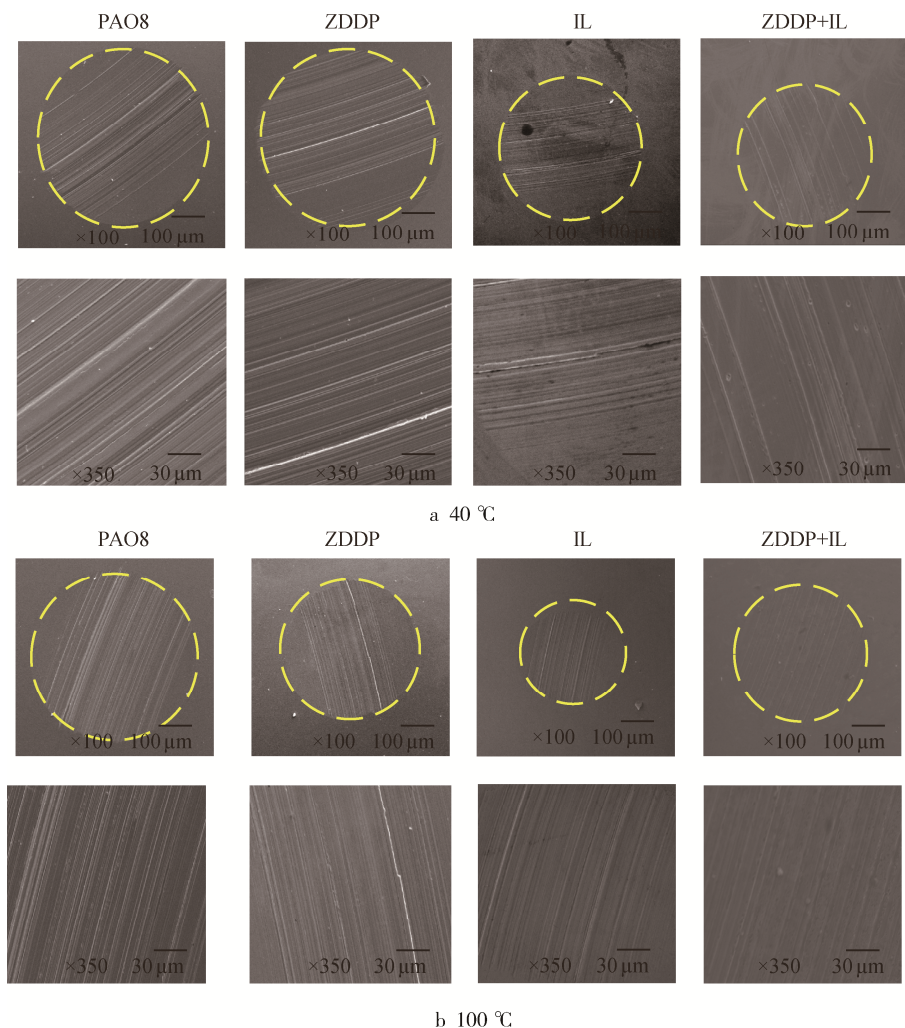


图5 40℃和100℃时不同润滑条件下表面磨斑的SEM图像

Fig.5 SEM images of wear scars on surface under different lubrication conditions at 40℃ and 100℃

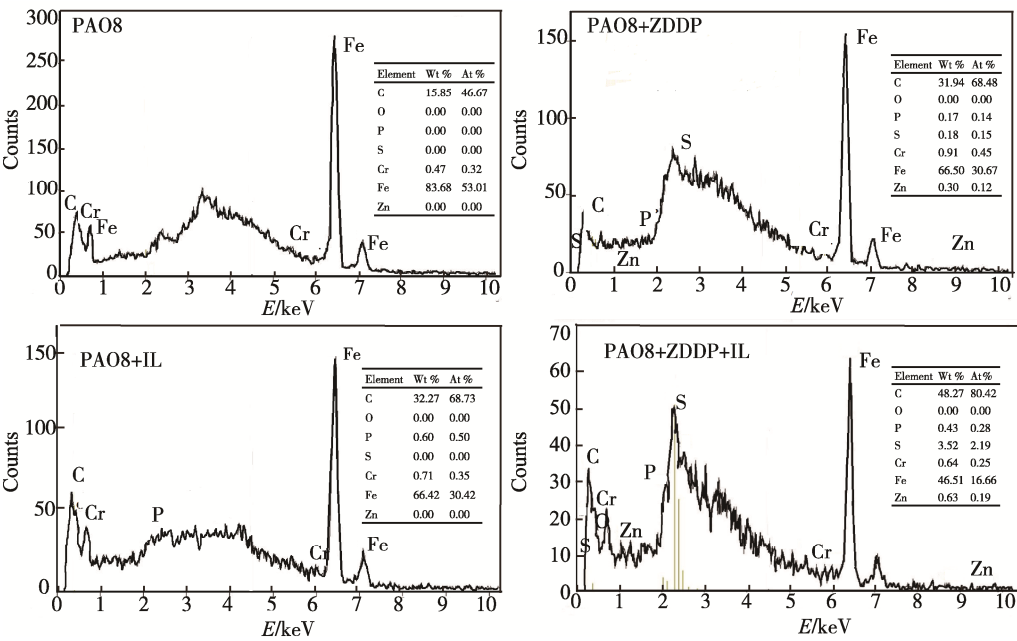


图 6 100 °C 时不同润滑工况下磨斑表面的 EDS 分析结果  
Fig.6 EDS results of wear scar surfaces under different lubrication conditions at 100 °C

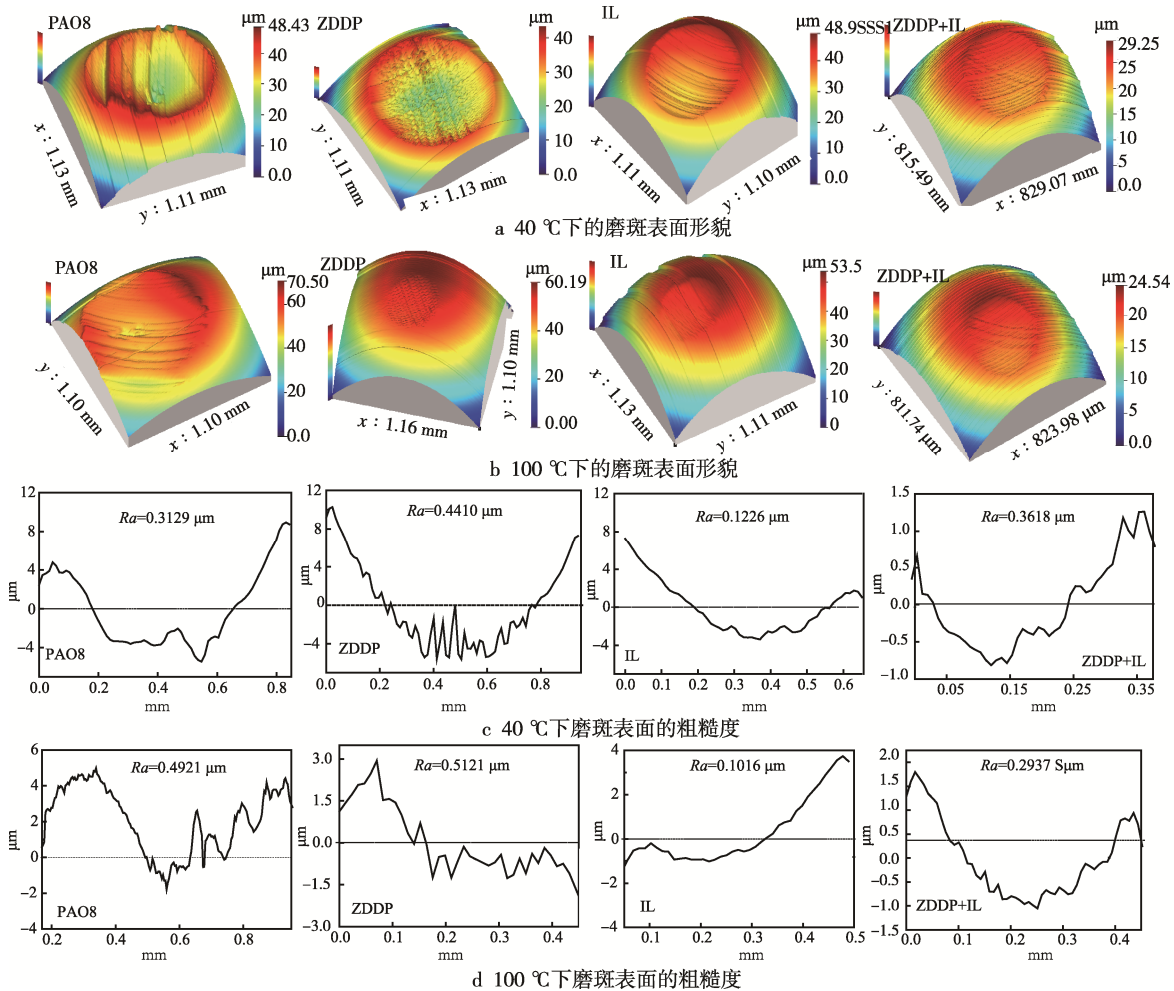


图 7 40 °C 和 100 °C 下不同润滑工况下磨斑表面的表面形貌及粗糙度

Fig.7 Morphology and roughness of wear scar surfaces under different lubrication conditions at 40 °C and 100 °C: (a) 3D morphology at 40 °C, (b) 3D morphology at 100 °C, (c) 2D cross section at 40 °C, (d) 2D cross section at 100 °C

添加 ZDDP 的磨斑表面的粗糙度大于纯基础油的粗糙度,而添加 IL 的粗糙度显著减小,添加 ZDDP 和 IL 复配物的粗糙度介于两者之间。100 °C 时被基础油润滑的磨斑表面粗糙度为 0.49  $\mu\text{m}$ , ZDDP 为 0.51  $\mu\text{m}$ , IL 为 0.10  $\mu\text{m}$ , 二者复配物为 0.29  $\mu\text{m}$ 。三维形貌图和二维截面轮廓图也反映了 ZDDP 添加剂可导致磨斑表面变粗糙,而添加 IL 则光滑的多。同时纯基础油工况下的表面粗糙度受温度的影响较大,单独添加 IL 和 ZDDP 时则变化不大,而添加二者复配物时受温度的影响显著,如 40 °C 时添加复配物的粗糙度高于基础油工况,而在 100 °C 时则远远低于基础油工况,这与图 1 中摩擦力的结果一致。

## 2.5 添加剂对成膜特性的影响

上述结果证实了 ZDDP 和 IL 在边界润滑状态下可一定程度上改善基础油的摩擦学性能,二者的复配物也能产生较好的协同增效作用。

利用光干涉点接触油膜厚度测量系统研究混合润滑状态下添加剂对成膜特性的影响。试验过程中为保证出现乏油状态且乏油程度不同,最终确定保持载

荷为 75 N,供油量为 5  $\mu\text{L}$ ,卷吸速度分别为 300 mm/s 和 450 mm/s (速度越高,乏油情况越严重),温度控制在 23 °C 左右。油膜测量前,先令玻璃盘以 1 mm/s 的速度运行 30 min,以确保表面布油均匀,油膜的膜厚曲线和光干涉图如图 8 所示。

由图 8a 可知,与基础油工况相比,加入添加剂时均可增加油膜厚度。在 300 mm/s 的卷吸速度下,基础油工况的中心膜厚为 35 nm,加入 IL 的中心膜厚约为 100 nm,加入 ZDDP 的中心膜厚为 60 nm,加入二者复配物的中心膜厚约为 68 nm。由于 450 mm/s 卷吸速度下的乏油情况更严重,加入不同添加剂时,油膜的中心膜厚均在 50 nm 左右波动,但均高于基础油工况的膜厚 (约为 33 nm)。表 1 的数据表明,加入添加剂后,润滑剂的动力黏度与基础油非常接近,而此时出现较大的膜厚差异显然与经典弹流润滑理论相悖,因此利用 CCD 对入口区油池进行观察。

在同一实验工况下,4 种润滑油的入口区油池出现乏油时,利用 CCD 拍摄光干涉图,图中两条红色虚线之间标注的区域为乏油区域,乏油程度可由其宽度  $W$  和颜色来判定, $W$  值越大、颜色越深表示乏油

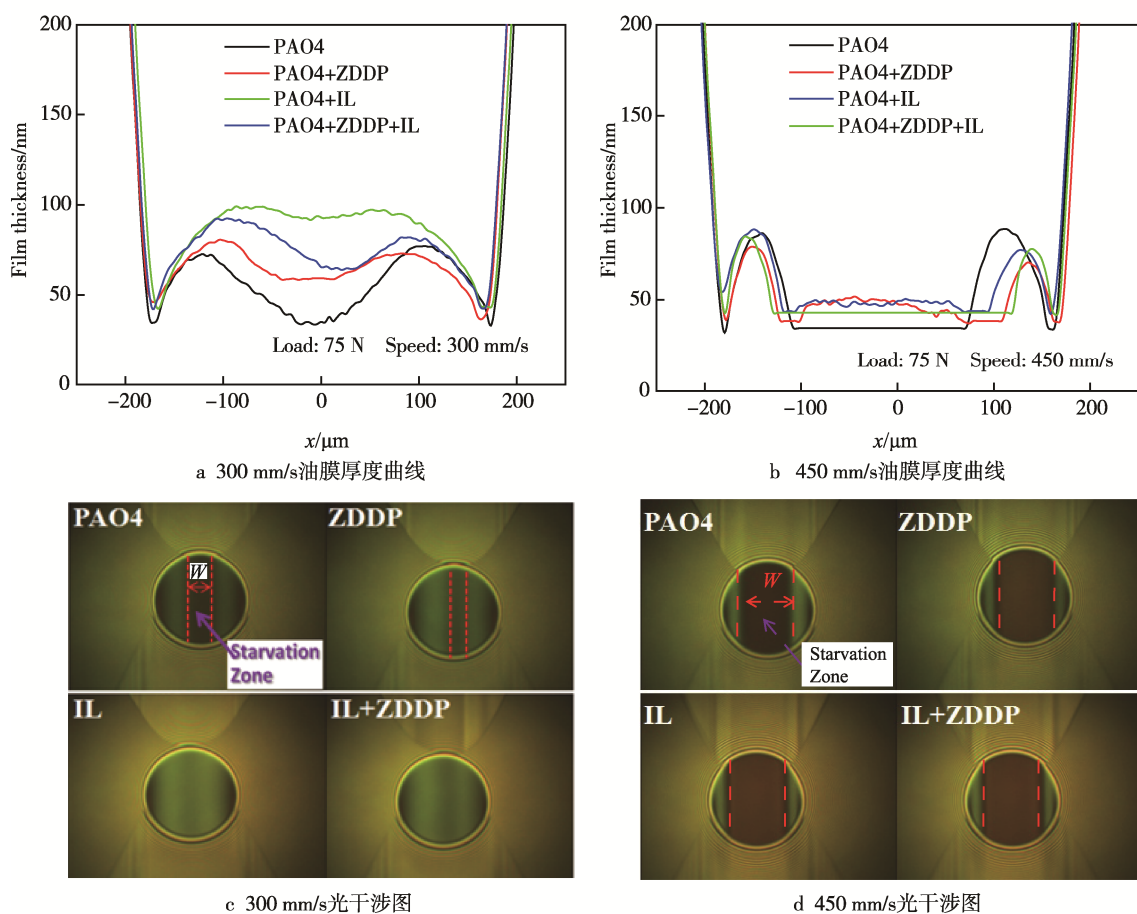


图 8 中心油膜厚度曲线和出现乏油状态时的光干涉图

Fig.8 Central film thickness curves and optical interference images under starvation conditions: (a) Film thickness curves at 300 mm/s, (b) Film thickness curves at 450 mm/s, (c) Optical interference image at 300 mm/s, (d) Optical interference image at 450 mm/s



程度越厉害。结果表明,同一工况下,基础油的乏油情况最严重,单独添加 IL 和二者复配物均可明显改善乏油状态,单独添加 ZDDP 也能在一定程度上改善乏油状态,这与膜厚结果一致。这可能是因为 IL 添加剂的极性作用,更容易在摩擦副金属表面形成层状结构的低剪切强度物理吸附膜,此时可能改变可接触区内油膜的形状,使润滑油更容易进入接触区,有效减缓乏油问题,从而抬升接触区内的油膜厚度。对比图 8c 和图 8d 发现:当卷吸速度由 300 mm/s 增加至 450 mm/s 时,乏油现象明显加重,此时添加剂改善乏油状态的效果明显减弱。加入添加剂的膜厚略高于基础油的膜厚,且各种添加剂之间的差异不大。这可能是因为此工况下的剪切速率增大,使摩擦表面上形成的低剪切强度的吸附膜很容易被剪切。

### 3 结论

1) 与基础油 PAO 相比, ZDDP 和 IL 复配物有良好的热稳定性和抗极压能力,特别是在高温条件下,它表现出了很好的减摩和抗磨协同性能。

2) 混合润滑条件下,向基础油 PAO 中单独添加 IL 和 ZDDP 与 IL 复配物时,可以有效减缓接触区内的乏油状况,从而改善润滑油的成膜特性。

#### 参考文献:

- [1] 张嗣伟. 我国摩擦学工业应用的节约潜力巨大——谈我国摩擦学工业应用现状的调查[J]. 中国表面工程, 2008, 21(2): 50-52.  
ZHANG Si-wei. Enormous Economy Potential of Tribology Application in Industry in China-on the Survey of Present Status of Tribology Application in Industry[J]. China Surface Engineering, 2008, 21(2): 50-52.
- [2] STYER J, GUINER G. Fuel Economy beyond ILSAC GF-5: Correlation of Modern Engine Oil Tests to Real World Performance[J]. SAE International Journal of Fuels and Lubricants, 2012, 5(3): 1025-1033.
- [3] SCOTT F. ZDDP: Going, Going... or not?[J]. Tribology & Lubrication Technology, 2005, 61(5): 24-30.
- [4] LI J S, WANG Y G, REN T H. A Survey on the Substitute for ZDDP[J]. Lubrication Engineering, 2006, 31(8): 168-172.
- [5] 乔玉林, 马世宁, 徐滨士, 等. 一些极压抗磨减摩添加剂协同效应的研究[J]. 石油学报(石油加工), 1997, 13(3): 33-39.  
QIAO Yu-lin, MA Shi-ning, XU Bin-shi, et al. Study on Synergistic Effect Mechanism of Some Extreme Pressure and Antiwear Additives in Lubrication Oil[J]. Acta Petrolei Sinica(Petroleum Processing Section), 1997, 13(3): 33-39.
- [6] 张泽抚, 刘维民, 薛群基. 纳米氢氧化镧与 ZDDP 相互作用的研究[J]. 电子显微学报, 2000, 19(4): 603-604.  
ZHANG Ze-fu, LIU Wei-min, XUE Qun-ji. Study on the Interaction between Nano-lanthanum and ZDDP[J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2000, 19(4): 603-604.
- [7] 李宏, 涂政文, 付尚发, 等. 妥尔油酸铜与 ZDDP 复配物的摩擦学性能研究[J]. 武汉化工学院学报, 2001, 23(3): 29-31.  
LI Hong, TU Zheng-wen, FU Shang-fa, et al. A Tribologic Study of Compound of Cupric Tailolate and Zinc Dialkyl Dithiophosphate[J]. J Wuhan Inst Chem Tech, 2001, 23(3): 29-31.
- [8] 乔玉林, 徐滨士, 马世宁, 等. 含纳微米硼酸盐及二烷基二硫代磷酸锌液体石蜡润滑下钢-钢体系的摩擦磨损性能研究[J]. 摩擦学学报, 2003, 23(1): 23-27.  
QIAO Yu-lin, XU Bin-shi, MA Shi-ning, et al. Friction and Wear Behavior of Steel-Steel Pair under the Boundary Lubrication of Liquid Paraffin Containing Complex Additive of Nano/Micro Borate and Zinc Dialkyl dithiophosphate[J]. Tribology, 2003, 23(1): 23-27.
- [9] 王恒, 赵智军. 硫化异丁烯与 ZDDP 复配对菜籽油摩擦学性能的影响[J]. 润滑与密封, 2007, 32(2): 156-158.  
WANG Heng, ZHAO Zhi-jun. Effect of Compatibility between ZDDP and Sulphuretted Isobutene on Tribological Properties of Rape Seed Oil[J]. Lubrication Engineering, 2007, 32(2): 156-158.
- [10] 辛永亮, 胡建强, 杨士钊, 等. 几种添加剂在锂基润滑脂中的极压协同性能及表面摩擦行为研究[J]. 表面技术, 2017, 46(7): 97-103.  
XIN Yong-liang, HU Jian-qiang, YANG Shi-zhao, et al. Extreme Pressure Synergistic Properties and Tribological Behaviors of Several Additives in Lithium Greases[J]. Surface Technology, 2017, 46(7): 97-103.
- [11] 白雪峰, 晏金灿, 吴华, 等. 含氮硼酸衍生物的摩擦学性能及与二烷基二硫代磷酸锌(ZDDP)配伍性能研究[J]. 摩擦学学报, 2013, 33(3): 215-221.  
BAI Xue-feng, YAN Jin-can, WU Hua, et al. Tribological Behavior of N-containing Boric Acid Derivatives and Their Synergetic Effects with ZDDP[J]. Tribology, 2013, 33(3): 215-221.
- [12] 万勇, 晁闻柳. ZDDP 与苯并噻唑衍生物的协同抗磨性能[J]. 润滑与密封, 2008, 33(1): 47-52.  
WAN Yong, CHAO Wen-liu. Synergistic Antiwear Properties of ZDDP and a Benzothiazole Derivative[J]. Lubrication Engineering, 2008, 33(1): 47-52.



- [13] 胡建强, 杨士钊, 郭力, 等. 芳胺与 ZDDP 的抗氧化协同作用[J]. 合成润滑材料, 2009, 36(4): 11-14.  
HU Jian-qiang, YANG Shi-zhao, GUO Li, et al. Anti-oxidation Synergistic Effect of Arylamine with ZDDP[J]. Synthetic Lubricants, 2009, 36(4): 11-14.
- [14] YE C, LIU W, CHEN Y, et al. Room-temperature Ionic Liquids: A Novel Versatile Lubricant[J]. Chemical Communications, 2001, 21(21): 2244-2245.
- [15] ZHOU F, LIANG Y, LIU W. Ionic Liquid Lubricants: Designed Chemistry for Engineering Applications[J]. Chemical Society Reviews, 2009, 38(9): 2590-2599.
- [16] QU J, BARNHILL W C, LUO H, et al. Synergistic Effect between Phosphonium-Alkylphosph -ate Ionic Liquids and Zinc Dialkyldithiophosphat (ZDDP) as Lubricant Additives[J]. Advanced Materials, 2015, 27(32): 4767-4774.
- [17] 解国新, 雒建斌, 郭丹, 等. 普通离子液体润滑剂的润滑成膜性能研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(11): 82-86.
- XIE Guo-xin, LUO Jian-bin, GUO Dan, et al. Film Forming Characteristics of Common Ionic Liquid Lubricants[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(11): 82-86.
- [18] ARORA H, CANN P M. Lubricant Film Formation Properties of Alkyl Imidazolium Tetrafluoroborate and Hexafluorophosphate Ionic Liquids[J]. Tribology International, 2010, 43(10): 1908-1916.
- [19] 刘海超, 郭峰, 赵国垒. 润滑膜厚测量的双色光干涉强度调制方法[J]. 摩擦学学报, 2015, 35(3): 282-287.  
LIU Hai-chao, GUO Feng, ZHAO Guo-lei. A Dichromatic Interference Intensity Modulation Approach to Lubricating Film Thickness Measurement[J]. Tribology, 2015, 35(3): 282-287.
- [20] TAYLOR L J, HUGH S. Friction-enhancing Properties of ZDDP Antiwear Additive: Part I—Friction and Morphology of ZDDP Reaction Films[J]. Tribology Transactions, 2003, 46(3): 303-309.