

磷基无卤素油溶性离子液体润滑添加剂的摩擦学特性

范丰奇¹, 张朝阳², 周康¹, 黄卿¹, 汤仲平¹, 于强亮^{1,2}, 蔡美荣²

(1. 中国石油兰州润滑油研究开发中心, 兰州 730060; 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:以磷酸二异辛酯(EDHPA)作为阴离子,双季磷盐为阳离子合成一种新型的无卤素离子液体并作为PAO 10的润滑添加剂与市售T306做比较。通过SRV-V摩擦磨损试验机考察其摩擦学性能,通过扫描电子显微镜对磨损形貌进行表征,通过非接触式三维轮廓仪对磨损体积进行测量,通过ECR对摩擦过程中摩擦膜变化进行分析,通过XPS元素分析对磨斑表面化学元素和变化进行分析。结果表明合成的新型无卤素离子液体作为PAO 10的添加剂时具有优异的摩擦学性能,同时极大程度的提高了PAO 10的极压承载能力。新型离子液体在摩擦过程中发生摩擦化学反应,其中较长的烷基链与极性元素P在摩擦时生成致密且厚的边界润滑膜,提高了PAO 10体系的减摩抗磨性能和极压承载性能。

关键词:油溶性离子液体; 季磷盐; 极压抗磨; 边界润滑

中图分类号: TH117.1

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2020)06-0136-08

Tribological Properties of Lubricating Additives of Phosphorus-based Halogen-free Oil-soluble Ionic Liquid

FAN Fengqi¹, ZHANG Chaoyang², ZHOU Kang¹, HUANG Qing¹, TANG Zhongping¹, YU Qiangliang^{1,2}, CAI Meirong²

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

Abstract: A new type of halogen-free ionic liquid was synthesized by using diisooctyl phosphate (EDHPA) as anion and diquaternary phosphate as cation. It was compared with commercial T306 as lubricating additive of PAO 10. The tribological properties were investigated by SRV-V friction and wear testing machine, the wear morphology was characterized by scanning electron microscope, the wear volume was measured by non-contact three-dimensional profilometer, the changes of friction film during the friction process were analyzed by ECR, and the chemical elements and changes of wear spot surface were analyzed by XPS. Results show that the new synthesized halogen-free ionic liquid has excellent tribological properties as an additive of PAO 10, and greatly improves the extreme pressure carrying capacity of PAO 10. The friction chemical reaction occurs in the friction process of the new ionic liquid, in which the long alkyl chain and polar element P form a dense and thick boundary lubrication film during friction, which improves the friction reducing, anti-wear and extreme pressure bearing properties of PAO 10 system.

Keywords: oil-soluble ionic liquid; quaternary phosphate; extreme pressure anti-wear; boundary lubrication

收稿日期: 2020-10-22; 修回日期: 2020-11-29

通信作者: 于强亮(1986—),男(汉),博士,副研究员;研究方向:润滑油添加剂、功能缓蚀剂、功能防腐涂层;E-mail: yql@licp.cas.cn

基金项目: 国家自然科学基金(52075524, 51705504, 21972153); 中国科学院青年创新促进会(2018454); 中国博士后基金面上项目(2019M653798)和甘肃省自然科学基金(20JR10RA048)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (52075524, 51705504, 21972153), Youth Innovation Promotion Association CAS (2018454), China Postdoctoral Science Foundation Funded Project (2019M653798) and Natural Science Foundation of Gansu Province of China(20JR10RA048)

引用格式: 范丰奇, 张朝阳, 周康, 等. 磷基无卤素油溶性离子液体润滑添加剂的摩擦学特性[J]. 中国表面工程, 2020, 33(6): 136-143.

FAN F Q, ZHANG C Y, ZHOU K, et al. Tribological properties of lubricating additives of phosphorus-based halogen-free oil-soluble ionic liquid [J]. China Surface Engineering, 2020, 33(6): 136-143.

0 引言

润滑剂是减少设备摩擦与磨损的主要方式之一,也是目前工业使用最有效的手段^[1-2]。随着科技的发展,机械设备零部件的精密程度越来越高,对摩擦润滑环境的要求愈加苛刻,常规润滑添加剂难以满足机械设备在恶劣环境下的润滑要求,迫切需要开发新型的高性能润滑添加剂,以保证设备的安全运行^[3-5]。

离子液体作为一类性能优异的润滑剂,具有低熔点,优异的热稳定性和不燃等特性和显著的减摩抗磨特性^[6-7]。近年来,随着环境保护力度的增加,对环境友好的润滑剂和添加剂的需求将逐渐增加。无卤素离子液体相比传统离子液体,如咪唑离子液体,具有更高的水解稳定性和环境友好性,使用无卤素离子液体取代传统咪唑离子液体作为基础油的润滑添加剂,可以有效的缓解环境污染问题^[8]。曲孟男等^[9]合成了一种含酯基的离子液体并作为葵花籽油的润滑添加剂考察其摩擦学性能,发现当离子液体的添加量(质量分数)达到1.5%时,摩擦因数减少42.9%,磨损体积降低33.3%;YU等^[10]合成了两种N-P型油溶性离子液体并作为PAO 10的润滑添加剂考察了摩擦学性能,试验发现所合成的离子液体的摩擦学性能优异,在加入(质量分数)1%离子液体时的性能优于ZDDP和磷酸三酯;WILLIAM等^[11]研究了具有相同有机磷酸根阴离子而不同链长的季磷盐阳离子作为GTL 4基础油的摩擦学性能,试验结果表明,设计的离子液体与油可以很好的互溶,当添加量(质量分数)为1.04%时表现出良好的润滑性能;QU等^[12]研究了三已基十四烷基磷双(2-乙基己基)磷酸酯作为PAO添加剂的减摩抗磨性能,试验发现,加入5%离子液体可消除润滑油中的摩擦失效,摩擦因数降低

60%,磨损体积降低3个数量级;HUANG等^[13]合成了两种具有相似阴离子的P-S型油溶性离子液体,评估了防腐性能,并测试了作为PAO 10添加剂的摩擦学性能,试验结果表明,这些离子液体作为添加剂可以显著降低滑动触点的摩擦磨损并增强空白PAO 10的EP性能。这些研究表明,离子液体作为基础油的润滑添加剂具有良好的相容性并能极大程度地改善基础油的润滑性能。

季磷盐中含有极性元素P,可在摩擦界面发生摩擦化学反应,生成摩擦化学反应膜^[14],是离子液体中常用且高效的阳离子。文中以磷酸二异辛酯作为阴离子,在双季磷盐为阳离子合成一种新型的无卤素离子液体并作为PAO 10的润滑添加剂,考察了它的摩擦学性能和极压承载性能并分析了摩擦过程中的成膜机理。

1 试验

1.1 材料

合成离子液体所需的三辛基磷(85%)和1,2-二溴乙烷(98%)购自J&K。磷酸二异辛酯钠是根据先前报道的方法制备的^[18],所使用的PAO 10为中国石油兰州润滑油研究开发中心提供,T306购自广州锐圣研化工科技有限公司。

1.2 合成

称取1.0 mol 三辛基磷和0.5 mol 1,2-二溴乙烷并加入乙腈,在85℃下回流24 h。冷却至室温后加1.0 mol 磷酸二异辛酯钠,反应12 h。减压蒸除溶剂,粗产物用石油醚溶解并过滤出溴化钠,滤液加入100 mL蒸馏水洗去溴化钠。有机相用无水硫酸镁干燥,过滤出硫酸镁,蒸除溶剂,得到黄色透明粘稠液体,标记为D-P₁₈₈₈P₈,分子结构如图1所示。核磁共振分析与质谱数据如表1所示。

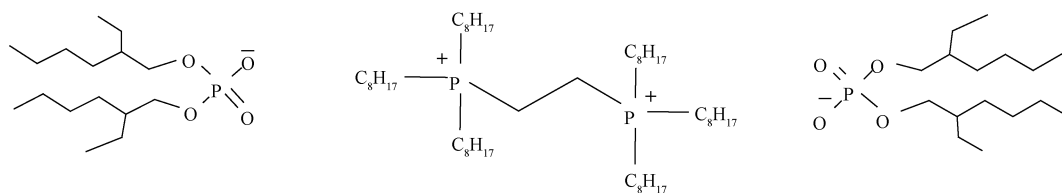


图1 D-P₁₈₈₈P₈的分子结构

Fig. 1 Molecular structure of D-P₁₈₈₈P₈ 表1 D-P₁₈₈₈P₈的核磁共振与质谱分析数据

表 1 D-P₁₈₈₈P₈ 的核磁共振与质谱分析数据
Table 1 NMR and MS data analysis of D-P₁₈₈₈P₈

Items	Data results	
¹ H NMR (400 MHz, CDCl ₃)	δ: 3.70–3.65 (m, 8H), 3.15 (s, 4H), 2.48 (s, 12H), 1.52–1.17 (m, 108H), and 0.86–0.82 (m, 42H)	
¹³ C NMR (100 MHz, CDCl ₃)	δ: 68.13, 58.12, 40.45, 40.37, 40.13, 40.05, 31.88, 31.84, 30.93, 30.11, 29.15, 23.33, 23.22, 22.71, 22.06, 14.19, 14.13, 11.16, 10.99, and 10.92	
³¹ P NMR (162 MHz, CDCl ₃)	δ: 35.68 (s)	
m/z (ESI, positive ion)	Calcd:384.3879	Found:384.3874
m/z (ESI, negative ion)	Calcd:321.2200	Found:321.2208

1.3 热稳定性分析

采用 NETZSCH STA 449 F3 TGA-DSC 热同步分析仪测试了样品的热稳定性。所需样品为 PAO 10 以及相同质量比分别为 1%T306, 1%D-P₁₈₈₈P₈ 的 PAO 组合物。试验条件:氮气氛围下,升温速率为 10 ℃/min,从室温升温至 600 ℃。

1.4 摩擦磨损试验和摩擦表面分析

采用 Optimol 油脂公司制造的 SRV-5 摩擦磨损试验机对上述样品的摩擦学性能进行测量,采用球-盘点接触方式,上试球为 AISI 52100 钢球,直径为 10 mm,下试盘为 AISI 52100 钢盘,直径为 24 mm,厚度为 7.9 mm。采用 FEG-250 扫描电子显微镜(SEM)观察 SRV 摩擦磨损试验过后的磨痕,采用 BRUKER-NPFLEX 非接触式三维轮廓仪测量下式样的磨损体积,采用 XPS 分析测定了磨斑表面的化学元素状态。电接触电阻(ECR)通过 SRV-5 摩擦磨损试验机采集得到。在室温下对 1%T306 和 1%D-P₁₈₈₈P₈ 进行变载荷试验,载荷从 50~1650 N,以 50 N 的间隔逐步进行,每个载荷的测试时间为 2 min。

2 结果与讨论

2.1 热稳定性

使用热同步分析仪测试了 PAO 10、1%T306 和 1%D-P₁₈₈₈P₈ 的热稳定性如图 2 所示,相应的热分解温度如表 2 所示。在 PAO 10 中加入 1%T306 后,PAO 10 的热稳定性有所下降,热分解温度为 312.05 ℃ 低于 PAO 10 自身的 329.04 ℃,在升温过程中,1%T306 在 PAO 10 之前发生了热分解,表现出较差的热稳定性。而加入 1%D-P₁₈₈₈P₈ 后,热重曲线与基础油 PAO 10 接近,热分解温度为 327.29 ℃ 与 PAO 10 的热分解温度接

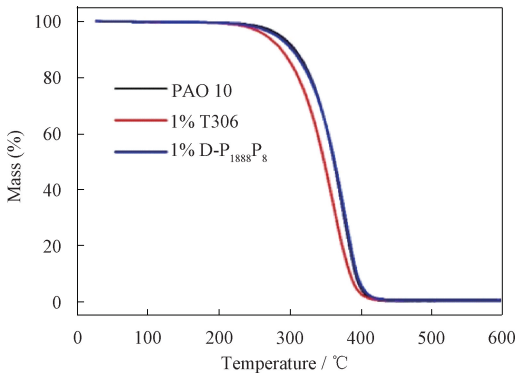


图 2 PAO 10、1%T306 和 1%D-P₁₈₈₈P₈ 的热重曲线
Fig. 2 TG curves of PAO 10, 1%T306 and 1%D-P₁₈₈₈P₈

表 2 PAO 10、1%T306 和 1%D-P₁₈₈₈P₈ 的热稳定性
Table 2 Thermal stabilities of PAO 10, 1%T306 and 1%D-P₁₈₈₈P₈

Lubricant	Thermal decomposition temperature/℃	Decomposition temperature to 50% mass loss/℃
PAO 10	329.04	362.04
1%T306	312.05	348.05
1%D-P ₁₈₈₈ P ₈	327.29	362.29

近,说明加入 1%D-P₁₈₈₈P₈ 基本未改变基础油的热分解温度。

2.2 摩擦学性能及表面形貌分析

图 3(a) 为 PAO 10、包含 1%T306 和 1%D-P₁₈₈₈P₈ 的 PAO 10 在室温状态下的摩擦因数随时间变化的曲线(载荷:300 N,行程:1 mm,温度:RT,频率:25 Hz)。图 3(b) 对应于图 3(a) 试验过后,测量的下试盘的磨斑磨损体积。在图 3(a) 中我们发现,PAO 10 的摩擦因数最大,平均摩擦因数为 0.178,有明显且较长的磨合期,在加入润滑添加剂后,摩擦因数均明显下降,平均摩擦因数大小为:PAO 10 (0.178) > 1%T306

(0.118) > 1%D- $P_{1888}P_8$ (0.094)。其中加入 1% D- $P_{1888}P_8$ 后, PAO 10 体系具有优异的摩擦学性能, 磨合时间极大程度的缩短, 说明 D- $P_{1888}P_8$ 具有优异的减摩性能。图 3(b) 表明, PAO 10 在室温下的磨损体积较大, 达到了 $1.20 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$, 在加入润滑添加剂后的抗磨性能优于空白的 PAO

10 基础油, 且当加入 1% D- $P_{1888}P_8$ 磨损体积最小, 可能是由于 D- $P_{1888}P_8$ 中的极性元素 P 与摩擦副表面的 Fe 发生摩擦化学反应, 生成摩擦化学反应膜, 表现出最优的抗磨性能^[15]。结合图 3(a) 说明加入 1% D- $P_{1888}P_8$ 可以有效的改善室温下 PAO 10 的摩擦学性能。

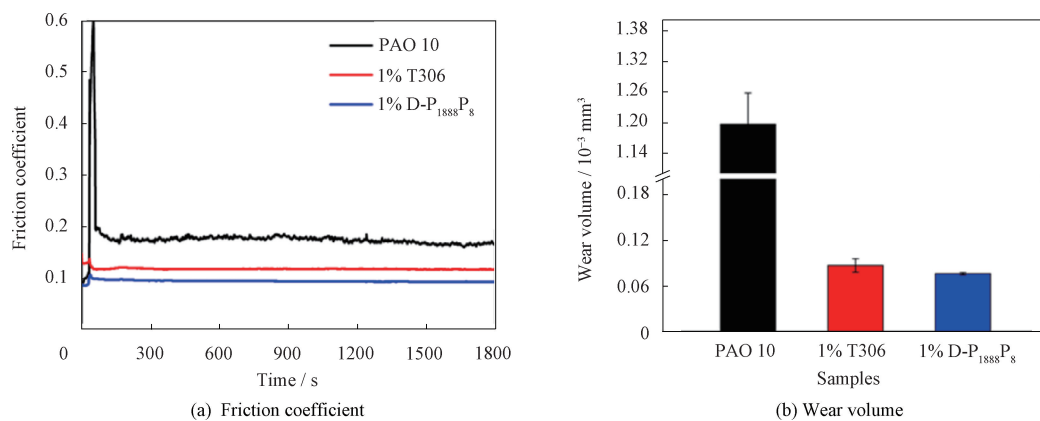


图3 室温下的摩擦因数及磨损量曲线

Fig. 3 Friction coefficient and wear volume curves at RT

图 4(a), 4(b), 4(c) 分别为室温下 PAO 10、1%T306 和 1%D- $P_{1888}P_8$ 润滑后下试样的磨损表面形貌。从图 4 中我们发现, PAO 10 润滑下的磨损痕迹最大, 有宽且深的磨斑, 观察到较为严重的黏着磨损。在加入 1%T306 后, 磨斑变小, 黏着磨损减少但依然存在, 观察到典型的平行犁沟

沟。在加入 1%D- $P_{1888}P_8$ 润滑后, 磨斑变浅变窄, 在 1000 倍下无明显黏着磨损, 平行犁沟明显减少。以上结果表明, D- $P_{1888}P_8$ 作为 PAO 10 的润滑添加剂在室温下具有优异的抗磨性能。

图 5(a) 为 100 °C 时 PAO 10、1%T306 和 1% D- $P_{1888}P_8$ 的摩擦磨损试验中, 摩擦因数随时间变

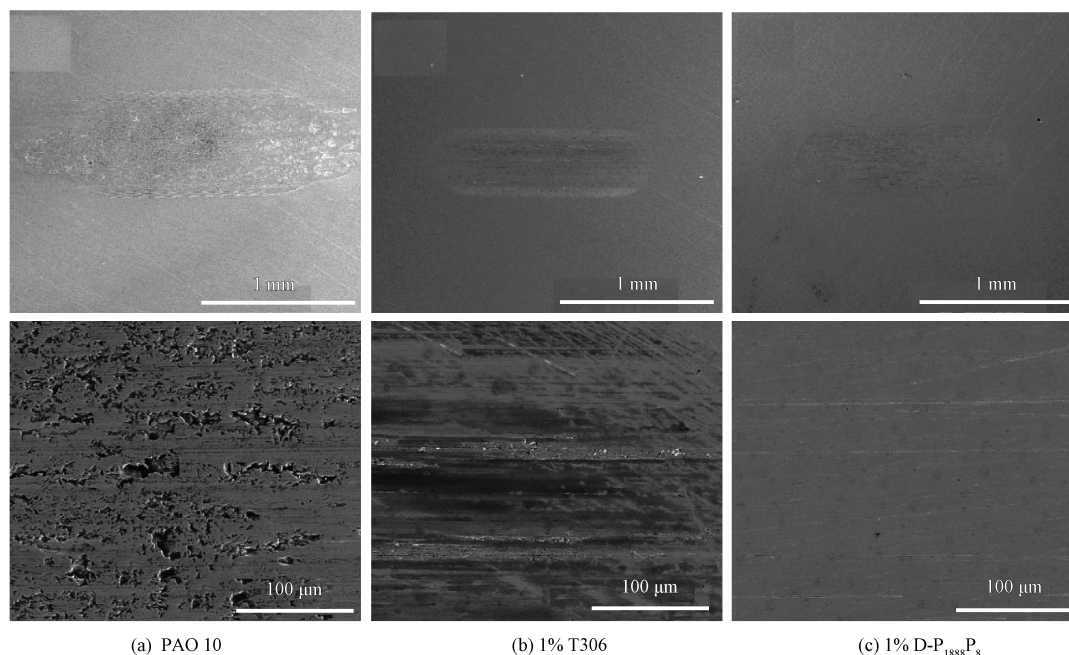


图4 不同润滑剂下室温润滑后下试样磨斑表面的 SEM 照片

Fig. 4 SEM images of the surface of the lower samples after reference lubricant at RT

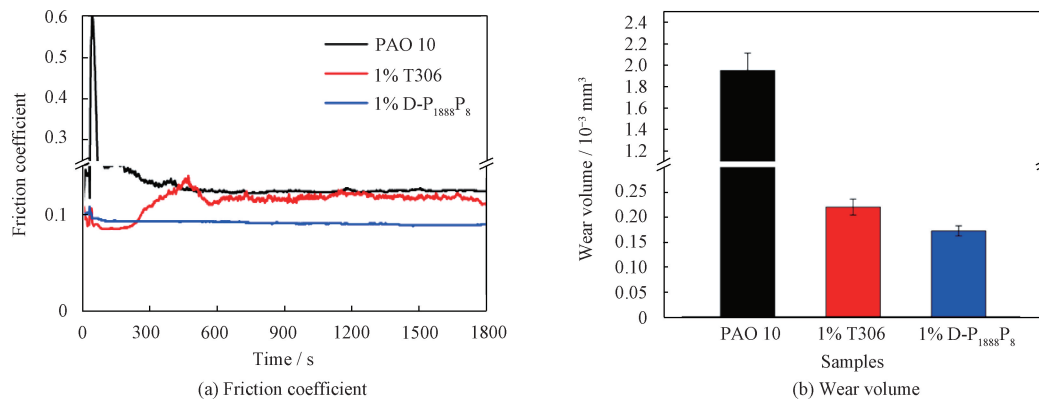


图5 100 °C下摩擦因数和磨损量曲线

Fig. 5 Friction coefficient and wear volume curve at 100 °C

化曲线,图5(b)为摩擦试验过后下试盘的磨损体积(载荷:300 N,行程:1 mm,温度100 °C,频率:25 Hz)。观察图5(a)发现PAO 10和1% T306摩擦因数较大,其中PAO 10有明显的磨合期,结合图5(b)说明,PAO 10磨损体积也比室温下增长了1.63倍,磨损情况严重。在加入1% T306后与室温相比,磨损体积增长了 $0.1591 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ 约3.67倍,表明在高温下T306的减摩抗磨性能比室温时下降很多。而加入1% D-P₁₈₈₈P₈后,摩擦因数与室温相比变化不大甚至有所下降(0.091),在高温下表现出优异而稳定的减摩性能,结合磨损量,与室温相比,磨损体积增大 $0.0965 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ 约2.27倍,在高温下抗磨性

能下降较小,表现出优异的摩擦学性能。

图6(a),6(b),6(c)分别为100 °C时PAO 10、1%T306和1%D-P₁₈₈₈P₈的摩擦磨损试验后,下试样表面的磨斑表面形貌。从图6(a)中我们发现,基础油PAO 10中发生较为严重的黏着磨损,磨斑比室温下宽且深,典型平行犁沟较多,结合磨损体积,表明PAO 10在高温下的磨损情况严重。加入1%T306后,黏着磨损减少,但仍然有大量的典型平行犁沟,与室温情况相比,抗磨损性能下降很多。在加入1%D-P₁₈₈₈P₈后,与PAO 10和1%T306相比,磨斑较窄而浅,无明显黏着磨损,且犁沟较少,与室温下SEM图像相比,抗磨损性能下降但犁沟增加不多说明抗磨性

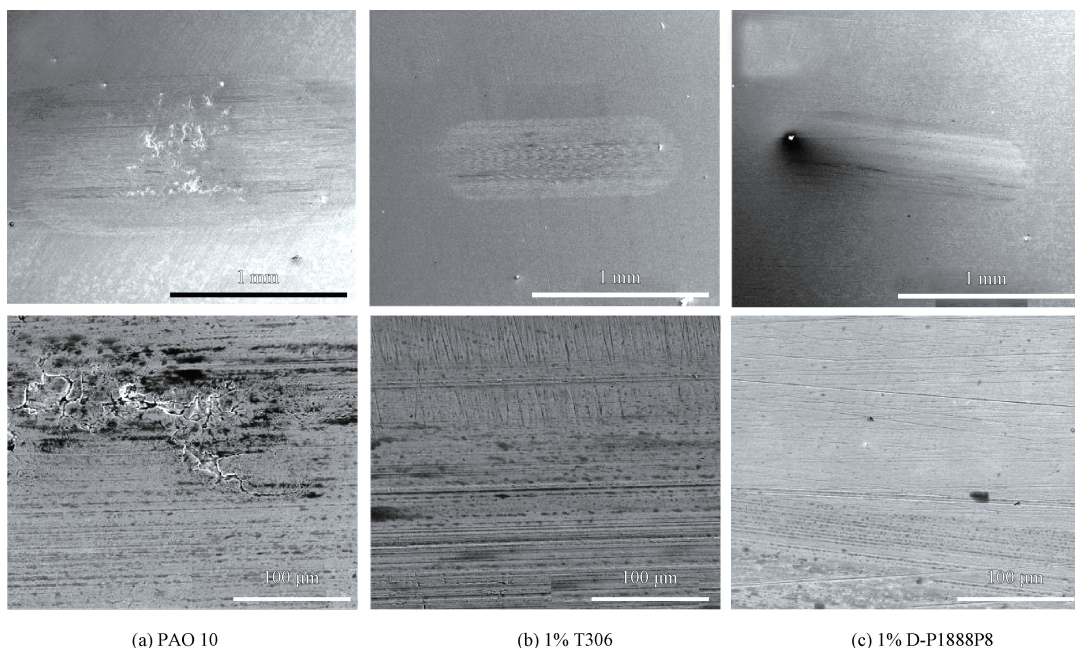


图6 不同润滑剂100 °C下润滑后试样磨斑表面的SEM照片

Fig. 6 SEM images of the surface of the lower sample after different lubricant at 100 °C

能下降较小,仍然具有优异的抗磨性能。

在室温下对 1%T306 和 1%D- $P_{1888}P_8$ 进行变载荷试验,结果如图 7 所示(载荷:从 50~1650 N,载荷梯度:50 N/2 min,行程:1 mm,温度:RT,频率:25 Hz)。在图 7 中,1%T306 的 COF 随载荷的增加有一定的波动,当载荷超过 800 N 时,出现润滑失效。当加入 1%D- $P_{1888}P_8$ 时,其摩擦因数随着载荷的增加波动较小,且随着载荷的增加摩擦因数有减小的趋势,其承载性能可以达到 1600 N,达到了 1%T306 承载能力的 2 倍。这些结果表明,加入 1%D- $P_{1888}P_8$ 使 PAO 体系具有优异的承载能力,结合 SRV 数据,说明 D- $P_{1888}P_8$

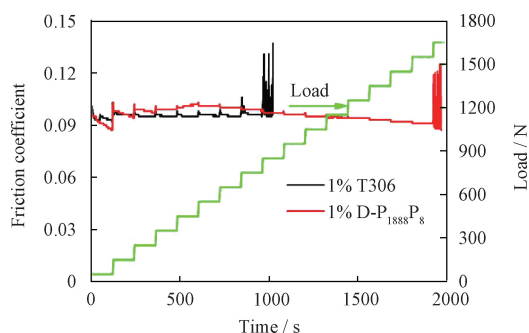
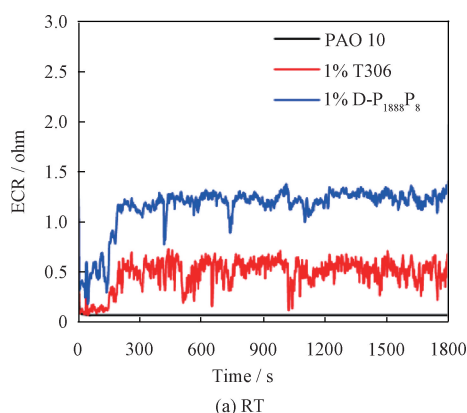
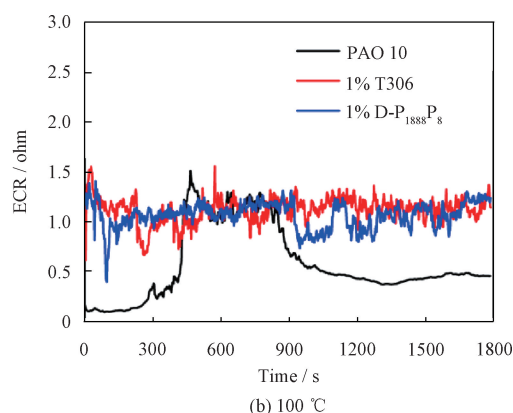


图 7 1%T306 和 1%D- $P_{1888}P_8$ 随时间和载荷变化的摩擦因数曲线

Fig. 7 Friction coefficient curves of 1%T306 and 1%D- $P_{1888}P_8$ with time and load



(a) RT



(b) 100 °C

图 8 PAO 10、1%T306 和 1%D- $P_{1888}P_8$ 的 ECR 值

Fig. 8 ECR of PAO 10、1%T306 and 1%D- $P_{1888}P_8$

通过摩擦磨损试验证明 D- $P_{1888}P_8$ 具有优异的减摩抗磨性能,通过 SEM 表明 D- $P_{1888}P_8$ 可以减少 PAO 10 基础油在摩擦过程中的黏着磨损情况,提高金属的使用寿命,通过 ECR 测试表明摩擦过程中 D- $P_{1888}P_8$ 与摩擦副表面发生摩擦化学

在 PAO 10 中具有优异的润滑和极压性能。考虑到它的优异摩擦学性能,可以用作为润滑添加剂。

2.3 润滑机理

测试了 PAO 10、1%T306 和 1%D- $P_{1888}P_8$ 在室温和 100 °C 下的电接触电阻值 (ECR) 如图 8 所示,当不同物质吸附在摩擦副表面上时,其界面处的电接触电阻是可变的,ECR 测量结果可以直观显示界面电阻的变化和推断界面摩擦膜的形成^[16]。图 8(a) 为在室温下的接触电阻随时间变化曲线。从图 8(a) 中可以看出 PAO 10 的电接触电阻值较小,说明摩擦过程中摩擦副之间为直接接触。1%T306 比 PAO 10 的 ECR 值大,说明在摩擦过程中发生了摩擦化学反应,生成摩擦化学反应膜。此外,1%D- $P_{1888}P_8$ 的 ECR 值最大,说明 D- $P_{1888}P_8$ 比 T306 具有更强的摩擦化学反应能力,在摩擦过程中形成了更致密和更厚的润滑膜,对摩擦学性能的提升较大,而且这一变化趋势在高温摩擦过程中也得到了验证,图 8(b),说明 D- $P_{1888}P_8$ 在摩擦过程中通过摩擦化学反应在摩擦表面形成了润滑保护膜避免了摩擦副之间的直接接触,因此 ECR 值比基础油 PAO 10 的高很多,较厚的润滑膜有利于提高润滑油的减摩抗磨性能和极压承载性能^[17]。

反应生成较厚且致密的摩擦化学反应膜。这些试验结果证明 D- $P_{1888}P_8$ 作为润滑添加剂的可行性。为研究摩擦副表面发生的摩擦化学反应,解释摩擦过程的成膜机理,获得有关季磷盐离子液体的润滑作用机理,对室温和 100 °C 下的 SRV 试

验过后的磨损表面通过 XPS 对 Fe、O、P 等元素进行分析。图 9 为室温和 100 °C 下 1% D-P₁₈₈₈P₈ 润滑的磨损表面的 XPS 能谱 (SRV: 载荷: 300 N, 行程: 1 mm, 温度: RT 和 100 °C, 频率: 25 Hz)。图 9 表明, 在室温和 100 °C 下, 1% D-P₁₈₈₈P₈ 润滑的磨损表面的 XPS 能谱非常相似。在室温下, Fe2p 峰大约出现在 711.3 和 724.5 eV, 结合 O1s

的峰出现在 532.5 eV, 可能对应于 Fe₂O₃, Fe(OH)O, Fe₃O₄。P2p 的峰出现在 133.9 eV, 结合 O 的特征峰, 可能对应于 P-O-P, P-O-Fe 等^[18-21]。以上结果表明, D-P₁₈₈₈P₈ 作为润滑添加剂在摩擦过程中发生摩擦化学反应, 形成摩擦化学膜, 避免了摩擦副之间的直接接触, 因此获得了优异的摩擦学性能。

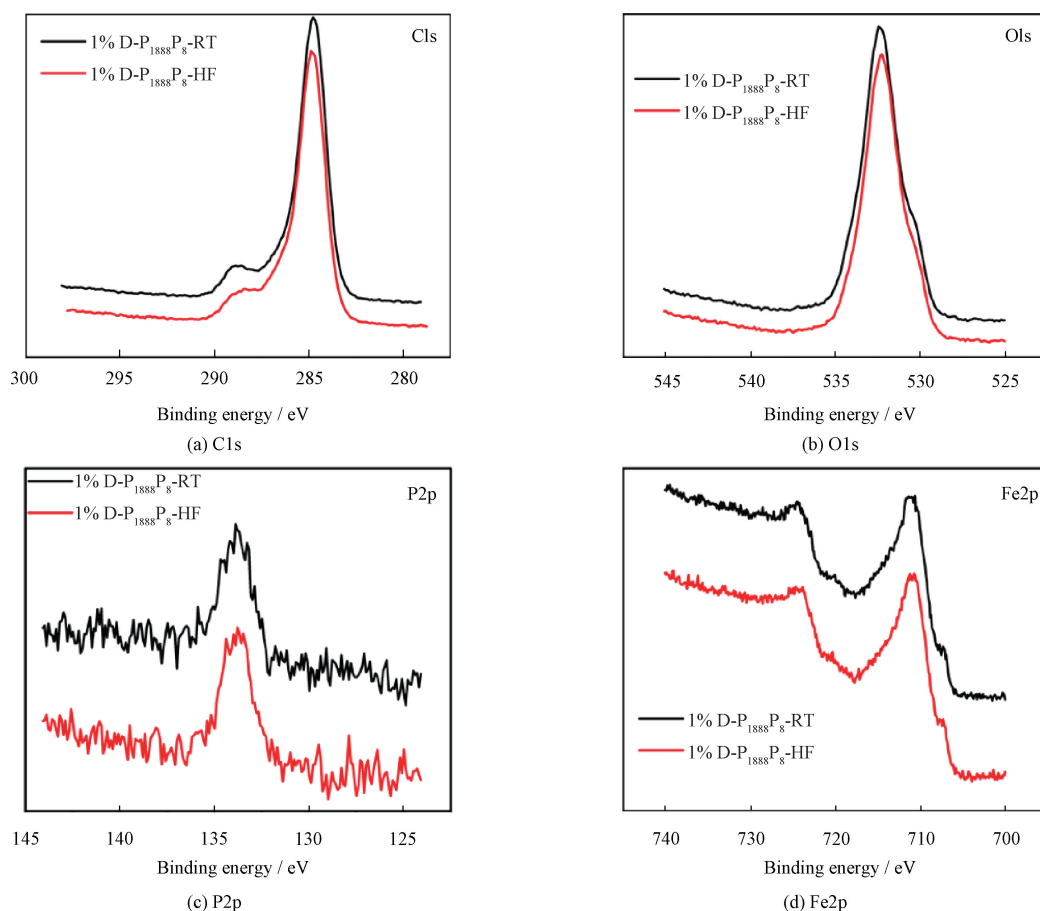


图 9 室温和高温下 1% D-P₁₈₈₈P₈ 润滑的 XPS 光谱图

Fig. 9 XPS spectra of lubricated with 1% D-P₁₈₈₈P₈ at RT and HT

3 结 论

(1) 合成了一种新型的无卤素离子液体 D-P₁₈₈₈P₈ 并作为基础油 PAO 10 的润滑添加剂, 与 PAO 10 相比, 其热稳定性基本不变。

(2) 在室温下, 加入了 1% D-P₁₈₈₈P₈ 的 PAO 10 体系的减摩抗磨性能比添加 1% T306 的摩擦学性能更为优异。在高温下, 1% D-P₁₈₈₈P₈ 的 PAO 10 体系依旧表现出优异的减摩抗磨性能。在变载试验中, 加入 1% 的 D-P₁₈₈₈P₈ 表现出良好的极压承载性能。

(3) 通过 ECR 对室温和 100 °C 下的接触电阻的测量, 发现 1% D-P₁₈₈₈P₈ 具有较长的烷基链, 在摩擦过程中发生摩擦化学反应形成了致密和厚的润滑膜, 阻碍了摩擦副之间的直接接触。通过 XPS 对磨损表面的元素分析结果发现, 活性元素 P 在摩擦化学反应中发挥了关键作用, 在摩擦过程中与摩擦副表面的 Fe 元素反应形成边界润滑膜, 提高了 PAO 10 的减摩抗磨性能和极压承载能力。

参考文献

[1] 张建文, 张朝辉, 刘志杭. 质子型离子液体水基润滑油

- 摩擦学性能研究[J]. 摩擦学学报, 2019, 39(5): 628-634.
- ZHANG J W, ZHANG C H, LIU Z H. Lubricating properties of the protic ionic liquids as the water-based lubricating additives[J]. Tribology, 2019, 39(5): 628-634(in Chinese).
- [2] WANG Y, LEE T, LIN J, et al. Corrosion properties of metals in dicyanamide-based ionic liquids[J]. Corrosion Science, 2014, 78, 81-88.
- [3] 凡明锦, 张朝阳, 文平, 等. 氨基酸离子液体润滑剂的结构与摩擦学行为的关系[J]. 中国表面工程, 2017, 30(3): 148-158.
- FAN M J, ZHANG C Y, WEN P, et al. Relationship between molecular structure and tribological performance of amino acid ionic liquid lubricant[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(3): 148-158(in Chinese).
- [4] 孟凡善, 李征, 丁昊昊, 等. 油酸修饰纳米 BN/TiN 润滑添加剂的摩擦学性能研究[J]. 材料工程, 2020, 48(5): 160-167.
- MENG F S, LI Z, DING H H, et al. Tribological properties of nano-BN/TiN lubricating additives modified with oleic acid[J]. Journal of Materials Engineering, 2020, 48(5): 160-167(in Chinese).
- [5] 侯铎, 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 S, YANG Y, KOU T X, et al. Tribological properties of triethanolamine borate as lubrication[J]. Lubrication Engineering, 2020, 45(2): 75-80(in Chinese).
- [6] 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 Y P, HUANG G W, WANG Y R, et al. Tribological performance of oil-soluble ionic liquids as additives in lubricant oil[J]. Materials Protection, 2017, 50(4): 43-47(in Chinese).
- [7] 李金龙, 周峰, 李春生, 等. 离子液体作为聚乙二醇(PEG)添加剂的摩擦学性能[J]. 摩擦学学报, 2011, 31(1): 36-39.
- LI J L, ZHOU F, LI C S, et al. Tribological properties of ionic liquid as additives in polyethylene glycol[J]. Tribology, 2011, 31(1): 36-39(in Chinese).
- [8] 于强亮, 王将兵, 范丰奇, 等. N/P 无卤素离子液体润滑剂的链长与摩擦学性能的关系[J]. 摩擦学学报, 2020, 40(5): 673-679.
- YU Q L, WANG J B, FAN F Q, et al. The relationship between the chain length and tribological properties of N/P halogen-free ionic liquid lubricants[J]. Tribology, 2020, 40(5): 673-679(in Chinese).
- [9] 屈孟男, 马雪瑞, 何金梅, 等. 功能化苯并三氮唑离子液体作为润滑油添加剂的摩擦学性能研究[J]. 摩擦学学报, 2017, 37(2): 199-205.
- QU M N, MA X R, HE J M, et al. Tribological properties of functionalized benzotriazolium ionic liquid as lubricant additive[J]. Tribology, 2017, 37(2): 199-205(in Chinese).
- [10] YU Q, ZHANG C, 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.
- [11] BAMHILL W C, QU J, LUO H, et al. Phosphonium-organo-phosphate ionic liquids as lubricant additives: effects of cation structure on physicochemical and tribological characteristics[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2014, 6(24): 22585-22593.
- [12] QU J, BANSAL D G, YU B, et al. Anti-wear performance and mechanism of an oil-miscible ionic liquid as a lubricant additive[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2012, 4(2): 997-1002.
- [13] HUANG G, YU Q, MA Z, et al. Oil-soluble ionic liquids as antiwear and extreme pressure additives in poly- α -olefin for steel/steel contacts[J]. Friction, 2017, 7(1): 18-31.
- [14] JIANG D, HU L, FENG D. Crown-type ionic liquids as lubricants for steel-on-steel system[J]. Tribology Letters, 2010, 41(2): 417-424.
- [15] WANG Y, YU Q, CAI M, et al. Halide-free PN ionic liquids surfactants as additives for enhancing tribological performance of water-based liquid[J]. Tribology International, 2018, 128: 190-196.
- [16] WANG Y, YU Q, MA Z, et al. Significant enhancement of anti-friction capability of cationic surfactant by phosphonate functionality as additive in water[J]. Tribology International, 2017, 112: 86-93.
- [17] WANG Y, YU Q, CAI M, et al. Synergy of lithium salt and non-ionic surfactant for significantly improved tribological properties of water-based fluids[J]. Tribology International, 2017, 113: 58-64.
- [18] BAI Y, YU Q, ZHANG J, et al. Soft-nanocomposite lubricants of supramolecular gel with carbon nanotubes[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2019, 7(13): 7654-7663.
- [19] YU Q, WU Y, LI D, et al. Supramolecular ionogel lubricants with imidazolium-based ionic liquids bearing the urea group as gelator[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2017, 487: 130-140.
- [20] YU Q, HUANG G, CAI M, et al. In situ zwitterionic supramolecular gel lubricants for significantly improved tribological properties[J]. Tribology International, 2016, 95: 55-65.
- [21] GUSAIN R, GUPTA P, SARAN U S, et al. Halogen-free bis(imidazolium)/bis(ammonium)-di[bis(salicylato)borate] ionic liquids as energy-efficient and environmentally friendly lubricant additives[J]. ACS Applied Materials Interfaces, 2014, 6(17): 15318-15328.