

DOI: 10.3901/JME.2023.21.313

电场环境下聚乙二醇在钢/钢界面的摩擦性能研究^{*}

葛翔宇¹ 吴晓东¹ 石秋雨² 宋仕祎¹ 王文中¹

(1. 北京理工大学机械与车辆学院 北京 100081;

2. 国网智能电网研究院有限公司 北京 102209)

摘要: 工业常用润滑油多为绝缘油,而针对绝缘油在电场环境下的摩擦性能研究较少。因此,提出一种含醚键绝缘油在电场环境下可能的减摩模型,以填补电场环境下绝缘油(如聚乙二醇(PEG))在钢/钢界面摩擦性能研究方面的空白。研究表明,电场对 PEG 的摩擦性能影响较大。正电压会导致摩擦因数增大;负电压条件下则存在一个最优工况使 PEGs 表现出最优的减摩性能,即电压-1.0 V、PEG 黏度 53 mPa·s、滑动速度 100 mm/s 和法向载荷 2 N。分析结果表明在-1.0 V 电压条件下 PEG 的润滑状态为混合润滑,其良好减摩性能主要归因于在接触表面形成的 PEG 吸附膜。此外,摩擦化学膜中 Fe_xO_y 和 FeOOH 总量的减少也有助于减摩性能的提升。证明绝缘油的摩擦性能同样受到电场环境影响,提出绝缘油在电场环境下的减摩模型,完善电场环境下的润滑理论,并为电场环境下多功能润滑材料的设计研发提供新思路。

关键词: 电场环境;摩擦;绝缘油;润滑

中图分类号: TH117; TH142

Friction Performances of Polyethylene Glycols at Steel Interface under External Electric Fields

GE Xiangyu¹ WU Xiaodong¹ SHI Qiuyu² SONG Shiyi¹ WANG Wenzhong¹

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081;

2. State Grid Smart Grid Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209)

Abstract: Most industrial lubricating oils are insulating oils, and the friction performances of insulating oils have rarely been investigated in an electric environment. Therefore, a possible tribological model for ether-containing insulating oil is proposed to supplement the research in the field of frictional performances of insulating oils such as polyethylene glycols (PEGs) at the steel interface under external electric fields (EEFs). The results show that the EEFs greatly affected the friction performances of PEGs. The positive voltage leads to the increase in friction coefficient. Under the negative voltage conditions, there is an optimal working condition to make the PEGs show the optimal anti-friction performance, namely voltage-1.0V, PEG viscosity 53 mPa·s, sliding speed 100 mm/s, and normal load 2 N. The analysis results indicate that the lubrication state of PEG under -1.0 V is the mixed lubrication. The PEG adsorption film and the reduction in the amount of Fe_xO_y and FeOOH in the tribochemical film contributed to the improved friction performance under the negative voltage condition of -1.0 V. It has been demonstrated that the frictional performance of insulating oils is also affected by EEFs. A tribological model for insulating oils under EEFs is proposed, which enriches the lubrication theory under EEFs and provides new insights for the design and development of multifunctional lubricating materials under EEFs.

Key words: electrical environment; friction; insulating oil; lubrication

^{*} 国家自然科学基金资助项目(52205180)。20230408 收到初稿,20230720

收到修改稿

0 前言

随着科学技术的发展,越来越多的机械结构或设备向机-电耦合系统转变,如超高密度磁存储系统中的磁头/磁盘接口、微纳米机电系统中的带电移动接口、电气化铁路、电机、风力发电机、飞机推进系统、导电滑环等^[1-7]。这些系统的机械零部件(如轴承、齿轮和电机)常在电场环境下运行,而电场环境会导致润滑介质的润滑性能发生变化^[8],进而导致机械零部件过早失效。如电动汽车的很多机械零部件都存在严重的电致失效问题,其根本原因在于电场环境导致的润滑失效^[9]。因此,研究润滑介质在电场环境下的润滑性能具有重要的意义。

自 GURUSWAMY 和 BOCKRIS 首次提出“摩擦电化学”的概念以来,电场环境下的润滑摩擦机理得到了蓬勃发展^[10-15]。YOSHITSUGU 等^[16]发现液晶作为润滑剂在边界润滑条件下存在一个阈值电压,当外部电压大于阈值电压时,摩擦因数(COF)明显降低;而当外部电压低于阈值电压时,摩擦因数几乎不受影响。雒建斌团队^[17-20]系统研究了薄膜润滑条件下电场环境对膜厚的影响,发现油酸等润滑剂的膜厚随外部电场的增加而增厚,摩擦因数也在增加。近年来学者们对离子液体在电场环境下的润滑性能开展了大量研究^[21-29]。结果表明,离子液体可在滑动界面^[30]处形成典型的自组装双电层结构,结合离子液体的物理吸附和摩擦化学反应的协同作用,最终决定了其减摩和抗磨特性。但离子的腐蚀性和氧化性可能会阻碍离子液体的广泛应用^[31-32]。

值得注意的是,当前电场环境下润滑剂的摩擦行为研究主要集中在高导电性润滑剂(导电润滑油或添加电解质)^[33],而对于绝缘油或弱电解质主要研究其成膜特性,对其摩擦性能的研究较少。油基润滑剂在现代工业润滑中占据主导地位,而大多数的润滑油都是绝缘油,如聚乙二醇(PEG)、聚 α -烯烃(PAO)和聚亚烷基乙二醇(PAG)等。因此,在电场环境下对绝缘油开展摩擦性能及其机理研究是必要的。本文重点研究了电场环境下 PEG 在钢/钢界面的摩擦性能,并揭示其减摩机理。

1 试验准备

1.1 试验材料及试验方法

试验中使用的 PEG 由上海阿拉丁生化科技股

份有限公司提供,包括 PEG200(黏度 53 mPa·s; 平均相对分子质量 200)、PEG400(黏度 84 mPa·s; 平均相对分子质量 400)和 PEG600(黏度 141 mPa·s; 平均相对分子质量 600)。PEG 的纯度超过 99%,且在使用前未经进一步处理。利用流变仪(MCR101, Anton Paar, 奥地利)测定 PEG 在室温下的黏度。利用自主改装的多功能摩擦磨损试验机(UMT-3, Bruker, 德国)对 PEG 开展电场环境下的摩擦性能研究,图 1 所示为基于双电极模式的电场摩擦试验示意图。摩擦副由轴承钢球(GCr15, $\varnothing 10$ mm, 表面粗糙度 $Ra \approx 10$ nm)和轴承钢片组成(GCr15, $Ra \approx 25$ nm)。摩擦试验前利用酒精、丙酮和纯水超声清洗钢球和钢片(每种试剂清洗 10 min)。

试验时向摩擦副接触区域滴入定量的 PEG 液体(30 μ L)。钢球和钢片之间的载荷范围为 2~4 N, 对应接触区最大赫兹接触应力约为 466 MPa (4 N), 滑动速度范围为 25~200 mm/s。为研究电场对 PEG 摩擦性能的影响,采用了两种接电形式。如图 1 所示,当电源正极和钢球相连、负极和钢片相连时,施加电压记为正电压,如+1.0 V。当负极和钢球相连、正极和钢片相连时,电压记为负电压,如-1.0 V。每种试验重复 3 次,摩擦因数测量精度为 ± 0.001 。为获得更准确的测试结果,调节平台的水平度和加载装置的垂直度,以使平台顺时针和逆时针旋转时可得到相同的摩擦因数。所有测试均在室温下进行,环境相对湿度为 10%~30%。

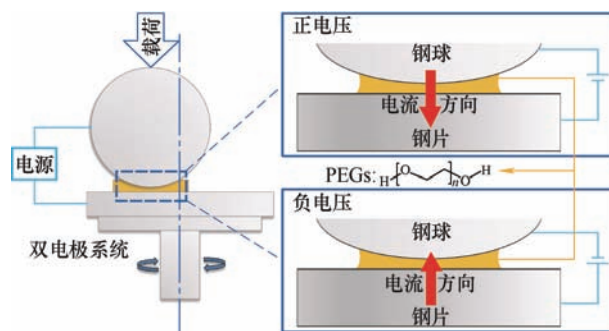


图 1 电场环境下的摩擦试验设备示意图

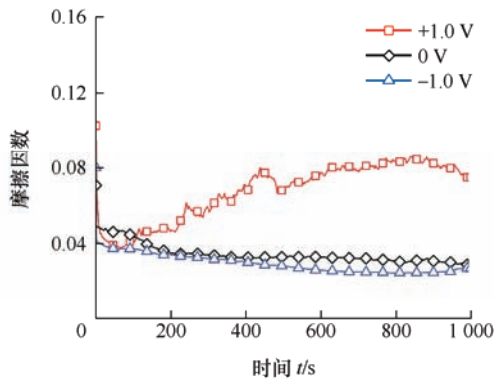
1.2 表面分析

摩擦试验结束后,利用显微镜和三维白光干涉仪(Nexview, ZYGO Lamda, 美国)测量钢球磨斑直径(WSD)和磨损表面粗糙度。利用扫描电镜(SEM, S4800, HITACHI, 日本)观察钢片磨痕的表面形貌。利用 X 射线光电子能谱仪(XPS, PHI QUANTERA-II SXM, ULVAC, 日本)和拉曼光谱仪(LabRAM HR Evolution, HORIBA, 日本)表征分析磨损表面的化学元素及化学状态。

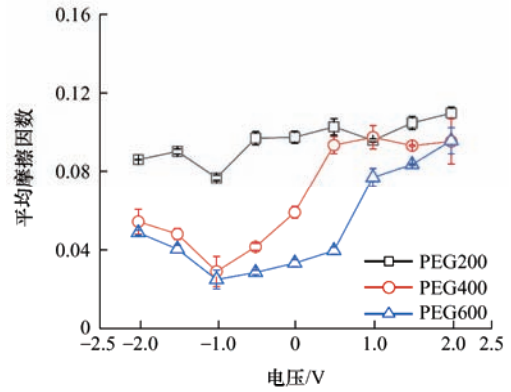
2 结果与讨论

2.1 摩擦润滑试验

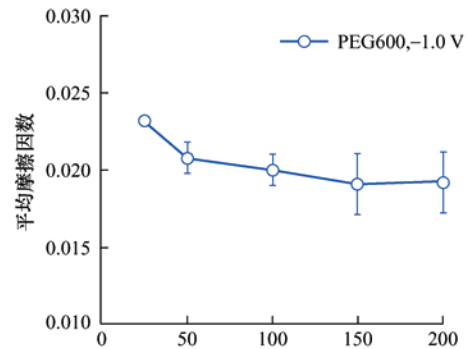
为研究 PEG 在不同外部电场环境下的摩擦性能, 利用 PEG600 作为润滑剂分别在 -1.0 、 0.0 及 $+1.0$ V 电压下开展了摩擦试验。结果如图 2a 所示, $+1.0$ V 电压下的摩擦因数持续上升, 远大于无电场条件下的摩擦因数(~ 0.034); 而 -1.0 V 电压下的摩擦因数(~ 0.031)比无电场的摩擦因数约小 8.8%。该结果表明外部电场会显著影响 PEG600 的摩擦性能, 与无电场环境下的摩擦因数相比, 负电压利于减摩而正电压利于增摩。为进一步研究电场对 PEG 摩擦性能的影响规律, 在 -2.0 V 到 $+2.0$ V 的电压范围内对 PEG200、PEG400 及 PEG600 开展了摩擦试验。结果如图 2b 所示, 在正电压条件下, 随着电压从 0.0 V 增加到 $+2.0$ V, 三种 PEG 的摩擦因数整体呈增大趋势。在负电压条件下, 随着电压从 0.0 V 变化到 -1.0 V, 三种 PEG 的摩擦因数均减小; 随后当电压从 -1.0 V 变化到 -2.0 V 时, 摩擦因数均增大。该结果表明, -1.0 V 为 PEG 获得最小摩擦因数的最优电压; 同时, 在最优电压(-1.0 V)下黏度最大的 PEG600 的摩擦因数最小。随后在 -1.0 V 条件下研究了滑动速度对 PEG600 摩擦性能的影响。结果如图 2c 所示, 当滑动速度从 25 mm/s 增加到 150 mm/s 时, 摩擦因数从 0.023 减少到 0.019 ; 当滑动速度从 150 mm/s 进一步增加到 200 mm/s 时, 摩擦因数略有上升。此外在 -1.0 V 条件下进一步研究了载荷对 PEG600 摩擦性能的影响, 结果如图 2d 所示。当载荷以步长 0.5 N 由 1 N 增加至 4 N 时, 摩擦因数由 0.014 增加至 0.035 , 摩擦因数与载荷近乎呈线性关系, 随载荷增加而增加。该结果表明, 外部电压、PEG 黏度、滑动速度以及载荷均存在最优值以提高 PEG 的减摩性能。



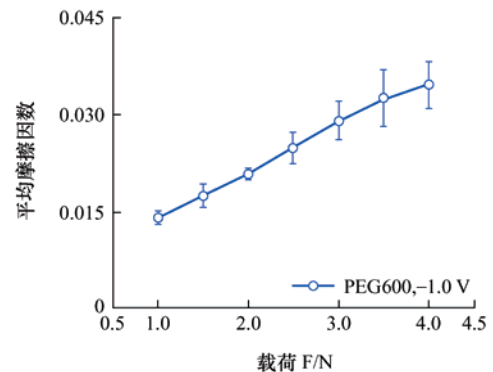
(a) 电压正负对 PEG600 摩擦性能的影响 (滑移速度 100 mm/s, 载荷 2 N)



(b) 不同电压下 PEGs 的摩擦系数 (滑移速度 100 mm/s, 载荷 2 N)



(c) 最优电压 (-1.0 V) 下滑移速度对 PEG600 摩擦性能的影响 (载荷 2 N)



(d) 最优电压 (-1.0 V) 下载荷对 PEG600 摩擦性能的影响 (滑移速度 100 mm/s)

图 2 电场环境下的摩擦试验结果

为进一步研究外部电场对 PEG 摩擦性能的影响规律, 利用 PEG600 作为润滑剂开展转换电压试验。首先在无电场条件下开展摩擦试验, 待润滑状态稳定后, 在运行条件下直接接入 ± 1.0 V 的电压, 并每 200 s 转换一次电流方向。结果如图 3 所示, 当润滑状态稳定时 ($\mu \approx 0.063$), 接入 $+1.0$ V 电压后摩擦因数在短时内明显快速上升, 最终稳定在 0.081 左右; 随后的 200 s 将电压转换为 -1.0 V, 可见摩擦因数迅速下降至 0.032 左右。如此反复多次, 均可得到相似结果, 即 $+1.0$ V 电压导致摩擦因数增加, -1.0 V 电压促进摩擦因数减小。该结果表明, 不同

的外部电场会显著影响 PEGs 的摩擦性能, -1.0 V 电压条件有利于减摩性能提高; 而 $+1.0\text{ V}$ 电压条件增摩效果明显。根据以上结果和相关文献, 我们推测在 -1.0 V 电压条件下, 摩擦表面可能会形成一种利于减摩的吸附膜^[33]; 而在 $+1.0\text{ V}$ 电压条件下, 该种吸附膜可能减少甚至消失进而表现出较差的减摩性能。

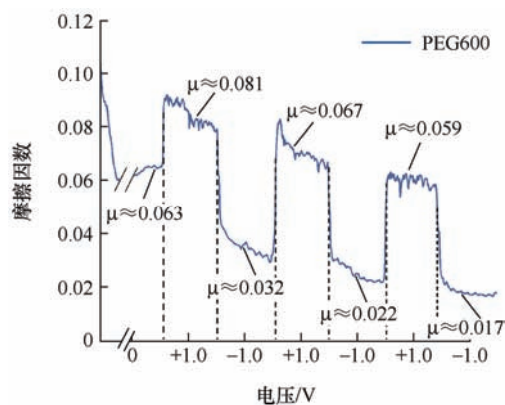


图3 转换电压试验(滑动速度 100 mm/s, 载荷 2 N)

2.2 讨论

为分析 PEG 在 -1.0 V 条件下的减摩机理, 对磨斑直径、磨损表面粗糙度和表面形貌进行了分析。对于钢球的磨斑直径(图 4a~4c), $+1.0\text{ V}$ 电压下的磨斑($\sim 254\text{ }\mu\text{m}$)和 -1.0 V 电压下的磨斑($\sim 208\text{ }\mu\text{m}$)均大于无电场下的磨斑($\sim 160\text{ }\mu\text{m}$), 表明施加外部电压会加剧磨损, 同时负电压下的磨损要小于正电压的磨损情况。对于磨损表面形貌(图 4d~4f), -1.0 V 电压下的磨损表面相对光滑, 几乎观察不到

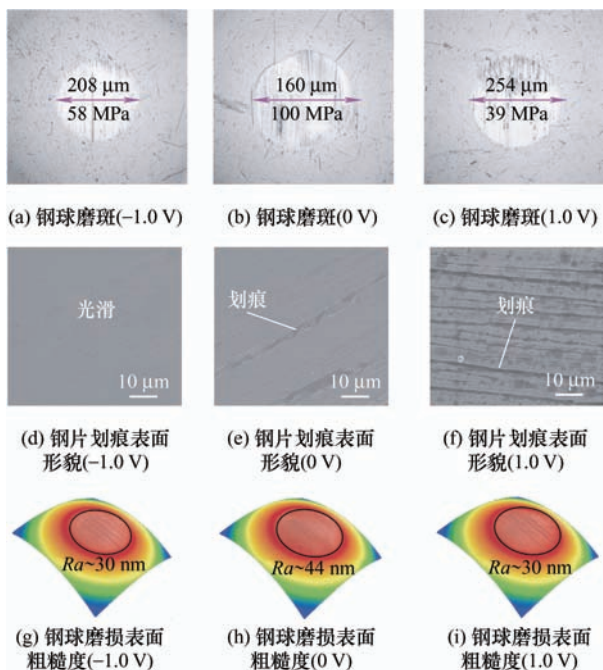


图4 不同电压下摩擦试验后的磨损表面

划痕或犁沟; 而无电场条件下的磨损表面存在少量的划痕和犁沟, $+1.0\text{ V}$ 电压下的磨损表面存在大量的划痕和犁沟。利用三维白光干涉仪测得三种电场条件下钢球磨损表面粗糙度分别约为 30 nm (-1.0 V)、 44 nm (0 V)和 30 nm ($+1.0\text{ V}$)。该结果表明外部电场会加剧轴承钢表面的磨损, 且正电压条件下的磨损更严重。

为确定 PEG600 在 -1.0 V 电压下的润滑状态, 采用 H-D 公式(式(1))^[34]估算稳定润滑状态下的液体膜厚

$$h_c = 2.69 \frac{(Q^{0.53} R S^{0.67})}{M^{0.067}} (1 - 0.61 e^{-0.73c}) \quad (1)$$

式中, $Q = \kappa E'$, $S = \eta u / E' R$, $M = w / E' R^2$; κ 是 PEG600 的黏压系数, 约 6 GPa^{-1} ; η 是 PEG600 的动力黏度, 约 $141\text{ mPa}\cdot\text{s}$; u 为摩擦副的平均相对滑动速度, 约 50 mm/s ; w 为法向载荷, 2 N ; c 为常数, 一般取 1; E' 为摩擦副材料的等效弹性模量, 可由式(2)计算得到

$$E' = 2 / [(1 - \nu_1^2) / E_1 + (1 - \nu_2^2) / E_2] \quad (2)$$

式中, E_1 、 E_2 为摩擦副材料(GCr15)的弹性模量, 均取 208 GPa ; ν_1 、 ν_2 为摩擦副材料的泊松比, 均取 0.3。为得到摩擦副的有效接触半径(R), 将钢球磨斑直径假定为由法向载荷引起的赫兹弹性形变, 即钢球磨斑直径($d=208\text{ }\mu\text{m}$)可由式(3)描述

$$\frac{d}{2} = \left(\frac{3Rw}{4E''} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

故有效接触半径可由式(4)计算得到

$$R = \frac{E'' d^3}{6w} \quad (4)$$

式中, E'' 为摩擦副材料的有效综合弹性模量, 可由式(5)计算得到

$$E'' = 1 / [(1 - \nu_1^2) / E_1 + (1 - \nu_2^2) / E_2] \quad (5)$$

综上, 可计算得到 PEG600 在稳定润滑阶段的油膜厚度 h_c 约为 136.4 nm 。利用膜厚比公式(式(6))区分相对应的润滑状态

$$\lambda = \frac{h_c}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}} \quad (6)$$

式中, σ_1 ($\sim 30\text{ nm}$)为钢球磨损表面处粗糙度, σ_2 ($\sim 48\text{ nm}$)为钢片磨损表面处粗糙度。可以得到 λ 约为 2.41, 表明稳定润滑阶段的润滑状态为混合润滑, 即在摩擦界面同时存在边界膜(摩擦化学膜)和流体膜。PEG 黏度、滑动速度和载荷的改变都会引起流

体膜厚的变化,进而导致摩擦因数的变化,说明存在最优的 PEG 黏度、滑动速度和载荷以使 PEGs 表现出最优的减摩性能。该结果解释了摩擦因数随 PEG 黏度、滑动速度和载荷的变化而变化的现象(图 2b~2d)。

为分析磨损表面的化学状态,利用 XPS 对磨损表面进行了表征分析,结果如图 5 所示。对于 C1s 能谱,几种电场条件下得到的磨损表面上存在的化学键是相似的,包括 C-O/C-H (284.8 eV)^[35]、C-O-R(286.0/286.2 eV)^[35-37] 和 C=O(288.1/288.8 eV)^[38],这可能是由 PEG 在接触表面吸附所致。对于 O1s 能谱,530.1~531.7 eV 处的特征峰表明摩擦过程中通过摩擦化学反应生成了铁的氧化物,531.8 eV 处的特征峰表明有碳-氧化合物生成。Fe2p 能谱中 711.5 eV 和 724 eV 两处的特征峰进一步表明在接触表面产生了 FeOOH 和 Fe_xO_y^[39]。该结果表明,几种电场条件下发生的摩擦化学反应和极性分子吸附效应在磨损表面形成的化学物质相似,因此生成物类型不是影响摩擦性能的关键因素。

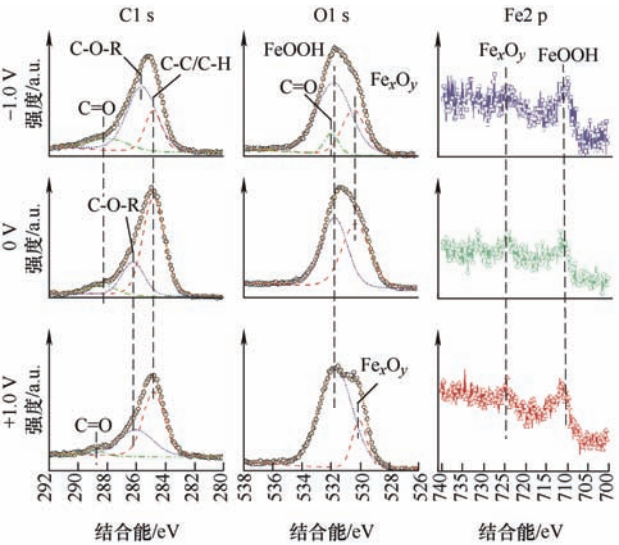


图 5 不同电场下钢片磨痕内的 XPS 结果

由于生成物类型没有明显差异,故进一步研究了各生成物的占比。表 1、2 为根据 C1s 和 O1s 能谱给出的碳氧化合物和铁的氧化物的占比。结果表明在-1.0 V 条件下,钢片上的醚键(C-O-R)占比显著增加(~62%)。此条件下电源的正极和钢片相连,有利于带负电的醚键吸附在钢片上,从而导致 PEG 在钢片上的吸附增多,形成 PEG 吸附膜,以提高减摩性能。此外,无电场情况下的生成物中 Fe_xO_y 约占 50%,而两种电场环境下 Fe_xO_y 的占比则降低到 20% 左右。相反 FeOOH 占比由无电场的 50% 左右增加至 60%~80%。该结果说明电场环境可促进 Fe_xO_y

向 FeOOH 转变,但正负电压条件下磨损表面生成物的占比相近,因此磨损表面生成物占比不是影响电场环境下摩擦性能的关键因素。

表 1 XPS 扫描结果中生成物 C1s 的占有比例

电压 / V	代表物	质量分数(%)
+1.0 V	C-O / C-H	58.14
	C-O-R	38.55
	C=O	3.31
0.0 V	C-O / C-H	67.59
	C-O-R	24.38
	C=O	8.04
-1.0 V	C-O / C-H	23.48
	C-O-R	61.72
	C=O	14.80

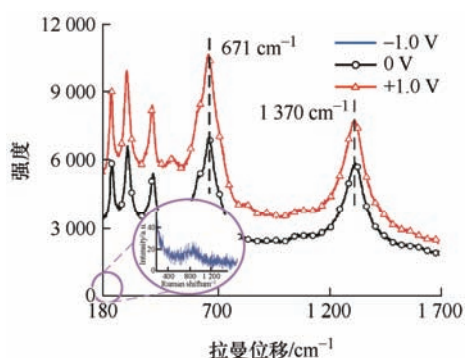
表 2 XPS 扫描结果中生成物 O1s 的占有比例

电压 / V	代表物	质量分数(%)
+1.0 V	FeOOH	82.45
	Fe _x O _y	17.55
0.0 V	FeOOH	50.46
	Fe _x O _y	49.54
	FeOOH	64.55
-1.0 V	Fe _x O _y	27.56
	C-O/C=O	7.89

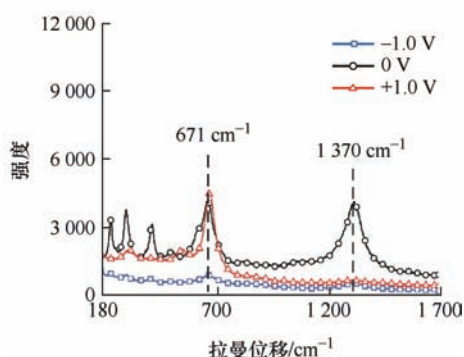
为进一步研究 PEG 在-1.0 V 条件下的减摩机理,利用拉曼光谱分析了磨损表面生成物的总量,其结果如图 6 所示。可见 FeOOH(671 cm⁻¹)和 Fe_xO_y(1 370 cm⁻¹)的特征峰存在^[40],且无电场环境和+1.0 V 条件下 Fe_xO_y 的含量低于 FeOOH,该结果和 XPS 结果一致。值得注意的是,无电场环境和+1.0 V 条件下的钢球和钢片的磨损表面存在大量的 FeOOH 和 Fe_xO_y;但-1.0 V 条件下钢球磨损表面几乎检测不到生成物的存在,仅在钢片磨损表面检测到极少量的 FeOOH 和 Fe_xO_y。该结果表明-1.0 V 条件下减摩性能的提升可能归因于钢球和钢片磨损表面上 FeOOH 和 Fe_xO_y 总量的降低。

为验证这一推论,设计并开展了验证试验。首先在±1.0 V 电压条件下开展摩擦试验。当润滑状态稳定后暂停试验,更换新钢片以去除原钢片上的摩擦化学生成物,随后在钢球的同一磨斑上继续摩擦试验。结果如图 7 所示,对于-1.0 V 电压条件,更换钢片前摩擦因数稳定在 0.028 7 左右,更换钢片后摩擦因数轻微减小至 0.027 6,待试验结束时摩擦因数稳定在 0.025 3 左右。在+1.0 V 条件下,更换钢片前可以摩擦因数稳定在 0.071 2 左右,在更换钢片后,摩擦因数持续下降,试验结束时摩擦因数稳定

在 0.023 5, 与 -1.0 V 条件时的摩擦因数相近。该试验结果支持了前面的推论, 即去除钢片上的摩擦化学膜(或物质)有利于提高 PEG 在电场环境、钢/钢界面的减摩性能。

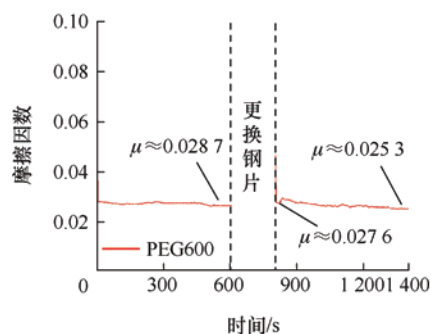


(a) 钢球磨损表面

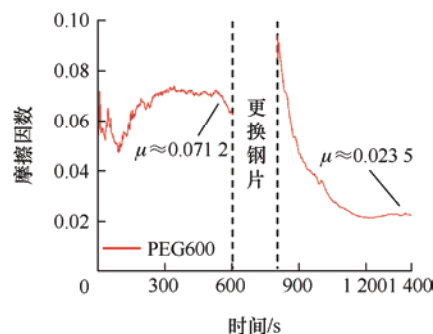


(b) 钢片磨损表面

图6 磨损表面的拉曼光谱



(a) 更换钢片实验(-1.0 V)



(b) 更换钢片实验($+1.0\text{ V}$)

图7 更换钢片试验

根据以上分析, 提出了 -1.0 V 电压环境下 PEG 可能的润滑模型(图 8)。在 -1.0 V 电压条件下, 钢片和电源正极相连, PEG 分子可通过带负电的醚键吸附到钢片上形成 PEG 吸附膜。在摩擦过程中, 钢片磨损轨迹内的一点处于间歇接触状态。当钢球与钢片接触时, PEG 吸附膜对表面起到保护作用, 有利于减小摩擦; 当钢片磨损轨迹内该点不接触时, 磨损的 PEG 吸附膜在外部电场诱导下快速恢复, 并等待下一轮接触。因此, -1.0 V 电压条件下在钢片表面形成的 PEG 吸附膜可以对接触表面进行持续有效的保护, 从而改善摩擦性能。此外, XPS 结果表明, 减少摩擦化学膜中 Fe_xO_y 和 FeOOH 的含量可能有利于减小摩擦。在正电压条件下, 电源正极和钢球相连, PEG 分子在电场作用下吸附到钢球上。由于钢球在摩擦过程中始终处于接触状态, PEG 分子一直受到摩擦作用影响, 难以形成稳定的 PEG 吸附膜, 因此在正电压条件下的摩擦性能未得到改善。在电压转换试验中(图 3), $+1.0\text{ V}$ 电压加剧磨损, 导致接触面积增加, 接触应力减小; -1.0 V 电压通过 PEG 吸附膜改善摩擦性能, 两种因素在电压转换试验中相互促进, 使摩擦因数整体呈减小趋势。

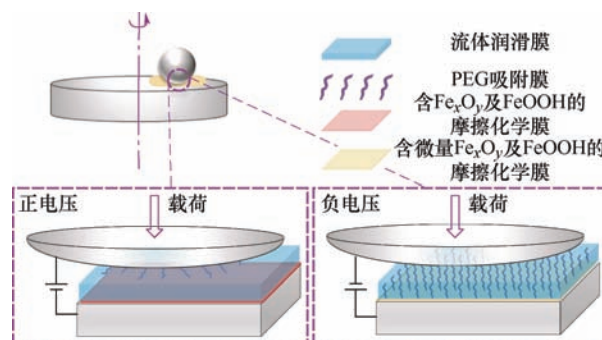


图8 PEG 在不同电场下的润滑机理原理图

3 结论

本文研究了在电场作用下 PEG 在钢界面的润滑性能。结果表明, 在正电压条件下, 摩擦随电压的增加而增大; 在负电压条件下, 存在一个最优的负电压(-1.0 V)以提高 PEG 的摩擦性能。H-D 计算结果表明, PEG 在 -1.0 V 电压条件下的润滑状态为混合润滑。通过试验和分析结果证实了在磨损表面存在摩擦化学膜、PEG 吸附膜和流体膜。在 -1.0 V 电压条件下摩擦性能的改善可归因于钢片上形成的 PEG 吸附膜以及摩擦化学膜中 Fe_xO_y 和 FeOOH 含量的降低。提出了一种含醚键的润滑剂在电场环境下的润滑模型, 以阐明含醚键润滑剂在电场环境下的减摩机理。

参 考 文 献

- [1] XIE G, GUO D, LUO J. Lubrication under charged conditions[J]. *Tribology International*, 2015, 84: 22-35.
- [2] PRASHAD H. Diagnosis of rolling-element bearings failure by localized electrical current between track surfaces of races and rolling-elements[J]. *Journal of Tribology*, 2002, 124(3): 468-473.
- [3] WHITTLE M, TREVELYAN J, TAVNER P J. Bearing currents in wind turbine generators[J]. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2013, 5(5): 053128.
- [4] 孙远航, 王永松, 孙习武, 等. 航天用导电滑环失效建模与工艺优化研究[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(16): 1-12.
- SUN Yuanhang, WANG Yongsong, SUN Xiwu, et al. Research on failure modeling and process optimization of transmission conductive slip ring for aerospace[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(16): 1-12.
- [5] 温诗铸. 纳米摩擦学研究进展[J]. *机械工程学报*, 2007, 43(10): 1-8.
- WEN Shizhu. Progress of research on nanotribology[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(10): 1-8.
- [6] 石德全, 康凯娇, 高桂丽. 磁盘高速运行过程中磁头运行状态的监测方法[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(5): 228-232.
- SHI Dequan, KANG Kaijiao, GAO Guili. Method of monitoring the working status of the magnetic head during high speed revolution of hard disk[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(5): 228-232.
- [7] BECKER A, ABANTERIBA S. Electric discharge damage in aircraft propulsion bearings[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2014, 228(1): 104-113.
- [8] SJÖHOLM M, MÄUSLI P A, BONNER F, et al. Development and qualification of the international space station centrifuge slip ring assembly[C]//11th European Space Mechanisms and Tribology Symposium, ESMATS 2005. 2005, 591: 133-140.
- [9] SPIKES H A. Triboelectrochemistry: Influence of applied electrical potentials on friction and wear of lubricated contacts[J]. *Tribology Letters*, 2020, 68(3): 1-27.
- [10] HE F, XIE G, LUO J. Electrical bearing failures in electric vehicles[J]. *Friction*, 2020, 8(1): 4-28.
- [11] WHITE R E. Comprehensive treatise of electrochemistry[M]. New York: Plenum Press, 1980.
- [12] GAJEWSKI J B, GŁOGOWSKI M J. How do the temperature, angular velocity and electric fields affect mechanical and electrokinetic phenomena in a friction junction?[J]. *Tribology International*, 2015, 87: 139-144.
- [13] SALMERON G C, LECKNER J, SCHWACK F, et al. Greases for electric vehicle motors: Thickener effect and energy saving potential[J]. *Tribology International*, 2022, 167: 107400.
- [14] CAO Z, XIA Y, CHEN C, et al. A synergetic strategy based on laser surface texturing and lubricating grease for improving the tribological and electrical properties of Ag coating under current-carrying friction[J]. *Friction*, 2021, 9(5): 978-989.
- [15] CAI M, YAN H, LI Y, et al. Ti3C2Tx/PANI composites with tunable conductivity towards anticorrosion application[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 410: 128310.
- [16] KIMURA Y, NAKANO K, KATO T, et al. Control of friction coefficient by applying electric fields across liquid crystal boundary films[J]. *Wear*, 1994, 175(1-2): 143-149.
- [17] LUO J B, SHEN M W, WEN S Z. Tribological properties of nanoliquid film under an external electric field[J]. *Journal of Applied Physics*, 2004, 96(11): 6733-6738.
- [18] HE Y, LUO J, XIE G. Characteristics of thin liquid film under an external electric field[J]. *Tribology International*, 2007, 40(10-12): 1718-1723.
- [19] XIE G, LUO J, LIU S, et al. Thin liquid film lubrication under external electrical fields: Roles of liquid intermolecular interactions[J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 109(11): 114302.
- [20] XIE G, LUO J, LIU S, et al. Nanoconfined liquid aliphatic compounds under external electric fields: Roles of headgroup and alkyl chain length[J]. *Soft Matter*, 2011, 7(9): 4453-4460.
- [21] HUANG W, KONG L, WANG X. Electrical sliding friction lubricated with ionic liquids[J]. *Tribology Letters*, 2017, 65(1): 1-6.
- [22] CAO Z, XIA Y, LIU L, et al. Study on the conductive and tribological properties of copper sliding electrical contacts lubricated by ionic liquids[J]. *Tribology International*, 2019, 130: 27-35.
- [23] FAN X, WANG L. Highly conductive ionic liquids toward high-performance space-lubricating greases[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2014, 6(16): 14660-14671.
- [24] MICHALEC M, SVOBODA P, KRUPKA I, et al.

- Investigation of the tribological performance of ionic liquids in non-conformal EHL contacts under electric field activation[J]. *Friction*, 2020, 8(5): 982-994.
- [25] YANG X, MENG Y, TIAN Y. Effect of imidazolium ionic liquid additives on lubrication performance of propylene carbonate under different electrical potentials[J]. *Tribology Letters*, 2014, 56(1): 161-169.
- [26] DONG R, BAO L, YU Q, et al. Effect of electric potential and chain length on tribological performances of ionic liquids as additives for aqueous systems and molecular dynamics simulations[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(35): 39910-39919.
- [27] WEN X, YUWEN F, DING Z, et al. Electric arc-induced damage on electroless Ag film using ionic liquid as a lubricant under sliding electrical contact[J]. *Tribology International*, 2019, 135: 269-276.
- [28] CHEN Q D, SHYU S H, LI W L. An overlapped electrical double layer model for aqueous electrolyte lubrication with asymmetric surface electric potentials[J]. *Tribology International*, 2020, 147: 106283.
- [29] 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 Guoxin, LUO Jianbin, GUO Dan, et al. Film forming characteristics of common ionic liquid lubricants[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(11): 82-86.
- [30] ZUO Q, HUANG P, SU F. Theory analysis of asymmetrical electric double layer effects on thin film lubrication[J]. *Tribology International*, 2012, 49: 67-74.
- [31] CAI M, LIANG Y, ZHOU F, et al. Anticorrosion imidazolium ionic liquids as the additive in poly (ethylene glycol) for steel/Cu-Sn alloy contacts[J]. *Faraday Discussions*, 2012, 156(1): 147-157.
- [32] LIU X, ZHOU F, LIANG Y, et al. Benzotriazole as the additive for ionic liquid lubricant: One pathway towards actual application of ionic liquids[J]. *Tribology Letters*, 2006, 23(3): 191-196.
- [33] 吴波, 古乐, 曹华军, 等. 盐溶液条件对边界润滑添加剂在带电表面吸附行为的影响[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(9): 118-126.
- WU Bo, GU Le, CAO Huajun, et al. Effect of salt solution condition on adsorption behaviors of boundary lubrication additive on charged surfaces[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(9): 118-126.
- [34] GE X, LI J, LUO R, et al. Macroscale superlubricity enabled by the synergy effect of graphene-oxide nanoflakes and ethanediol[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(47): 40863-40870.
- [35] ZENG D W, YUNG K C, XIE C S. XPS investigation of the chemical characteristics of Kapton films ablated by a pulsed TEA CO₂ laser[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2002, 153(2-3): 210-216.
- [36] GLASER T, MEINECKE J, LÄNGER C, et al. Combined XPS and DFT investigation of the adsorption modes of methyl enol ether functionalized cyclooctyne on Si (001)[J]. *Chem. Phys. Chem.*, 2021, 22(4): 404-409.
- [37] KUNDU S, WANG Y, XIA W, et al. Thermal stability and reducibility of oxygen-containing functional groups on multiwalled carbon nanotube surfaces: A quantitative high-resolution XPS and TPD/TPR study[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2008, 112(43): 16869-16878.
- [38] National Institute of Standards and Technology (NIST). NIST X-ray Photoelectron Spectroscopy Database [DB/OL]. (2012.09.15)[2022.03.05]. <http://srdata.nist.gov/xps/>.
- [39] ZHAO G, WU X, LI W, et al. Hydroquinone bis (diphenyl phosphate) as an antiwear/extreme pressure additive in polyalkylene glycol for steel/steel contacts at elevated temperature[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2013, 52(22): 7419-7424.
- [40] WHITE S N. Qualitative and quantitative analysis of CO₂ and CH₄ dissolved in water and seawater using laser Raman spectroscopy[J]. *Applied Spectroscopy*, 2010, 64(7): 819-827.

作者简介: 葛翔宇, 男, 1987 年出生, 副研究员。主要研究方向为电场下的超低摩擦机理, 轮毂电机轴承润滑增效机理, 宏观固-液协同超低摩擦机理。

E-mail: gexy@bit.edu.cn

吴晓东, 男, 1996 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为电场环境下离子的超低摩擦行为机理。

E-mail: Wuxd_me@163.com