

摩擦磨损与润滑

往复运动条件下润湿梯度表面对
限量供油润滑的影响孙楠楠^{1,2}, 晁坤^{1,2}, 朱桂香^{1,2}, 王永强³, 刘成龙³, 郭峰³

(1. 内燃机可靠性国家重点实验室, 山东 潍坊 261041; 2. 潍柴动力股份有限公司, 山东 潍坊 261041; 3. 青岛理工大学 机械与汽车工程学院, 山东 青岛 266520)

摘要: **目的** 探究有限量供油条件下, 润湿梯度表面对往复运动条件下的油膜润滑增效作用。**方法** 首先在玻璃试样表面制备一层疏油涂层, 降低工作表面润湿性。其次, 利用飞秒激光将一定宽度的条状图案刻蚀到掩膜板上, 通过掩膜法, 利用氧等离子刻蚀技术在玻璃块疏油涂层上构造不同宽度的亲油轨道, 形成了润湿梯度表面。然后使用往复运动光弹流膜厚测量仪对亲油轨道的膜厚及油池变化进行测试。试验选用低黏度的 PAO4 基础润滑油, 限量供给 0.04 μL 。钢球与玻璃试样表面构成点接触往复运动摩擦副模型。**结果** 具有一定亲油轨道宽度 (0.2、0.4 mm) 的润湿性梯度表面具有较好的集油性能。润湿性梯度表面在往复运动行程中心位置作用最为明显, 在所给试验条件下膜厚最大为原始表面的 3 倍。钢球-钢块接触副的摩擦测试结果表明, 本文提出的润湿梯度表面使摩擦因数最高下降 30%。另外, 由于载荷效应导致接触区外侧毛细集油作用减弱, 乏油程度增加, 随着载荷增加, 润滑油膜减小。油滴在一定宽度亲油轨道的扩散仿真结果说明润湿性梯度表面可以有效地将润滑油限制在轨道内, 有利于往复运动过程中润滑剂的回流。**结论** 提出的润湿性梯度表面有较强的集油作用, 改善往复运动弹流接触副的供油和润滑状态。

关键词: 有限量供油; 往复运动; 油膜厚度; 自集油; 润湿梯度表面; 载荷效应

中图分类号: TH117.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2023)07-0130-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.07.010

Effect of Wettability Gradient on Oil Film Lubrication under
Reciprocating Motion with Limited Lubricant SupplySUN Nan-nan^{1,2}, CHAO Shen^{1,2}, ZHU Gui-xiang^{1,2}, WANG Yong-qiang³,
LIU Cheng-long³, GUO Feng³

(1. State Key Laboratory of Engine Reliability, Shandong Weifang 261041, China; 2. Weichai Power Co., Ltd., Shandong Weifang 261041, China; 3. School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Shandong Qingdao 266520, China)

收稿日期: 2022-05-26; 修订日期: 2023-02-10

Received: 2022-05-26; Revised: 2023-02-10

基金项目: 内燃机可靠性国家重点实验室开放课题 (skler-202003); 国家自然科学基金项目 (52175173)

Fund: The Science Fund of the State Key Laboratory of Engine Reliability (skler-202003); National Natural Science Foundation of China (52175173)

作者简介: 孙楠楠 (1985—), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为动力工程。

Biography: SUN Nan-nan (1985-), Female, Doctor, Senior engineer, Research focus: power engineering.

通讯作者: 郭峰 (1968—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为润滑理论与试验、低摩擦化表面设计。

Corresponding author: GUO Feng (1968-), Male, Doctor, Professor, Research focus: theoretical and experimental research on lubrication, designing of low friction surface.

引文格式: 孙楠楠, 晁坤, 朱桂香, 等. 往复运动条件下润湿梯度表面对限量供油润滑的影响[J]. 表面技术, 2023, 52(7): 130-138.

SUN Nan-nan, CHAO Shen, ZHU Gui-xiang, et al. Effect of Wettability Gradient on Oil Film Lubrication under Reciprocating Motion with Limited Lubricant Supply[J]. Surface Technology, 2023, 52(7): 130-138.

ABSTRACT: Starvation can usually be found in lubrication of machine elements due to insufficient oil replenishment, and the present study is to explore the role of wettability gradient on the lubrication film building under reciprocating motion with limited oil supply. On the glass block specimens, oleophilic lubrication tracks with oleophobic side regions were prepared. Oleophobic AF (anti-fingerprint) layers were fabricated on the glass block surface. With masks by femtosecond laser, oxygen plasma etching was used to remove prescribed strip area of the oleophobic AF layer on the glass block surface in such a way that oleophilic track with different width were obtained. A custom-made optical EHL (elastohydrodynamic lubrication) test rig, which was capable of reciprocating motion with pure rolling, was used to measure the film thickness and oil pools in the present study. Lubricated point contact was formed between the steel ball and the prepared glass block surface. PAO4 base oil was employed in the test with a limited supply of 0.04 μL . AFM measurement showed that there was typical nanoscale papillae structure on the AF layer, which contributed as well to the oleophobic behaviours of the low surface energy surface of the glass block. The wettability gradient was justified by the movement of a PAO4 droplet to the glass region when it was placed on the boundary of the AF region and the glass region due to the high surface energy of the original glass block. Measurements of film thickness and oil pools showed that the wettability gradient, which was created at the two sides of the oleophilic tracks, generally demonstrated better oil replenishment performance when the track width was 0.2 mm and 0.4 mm, and then the film thickness was higher. On the contrary, the film thickness with a full AF layer (the oleophilic track width was 0 mm) was even lower than that with the original glass block due to its weak affinity to the lubricant. Moreover, it was observed that the film thickness was mostly increased at the center of the stroke, and the film thickness may be up to 3 times as much as that by the original surface. At the two stroke ends only slight film thickness increase was obtained. For film thickness enhancement, wettability gradient worked more efficiently under high frequency or at high speed. When the oleophilic track width was 0.8 mm, which was much larger than the diameter of the contact area, the film thickness was similar to that of the original glass surface, indicating that the induced oil replenishment did not work. It can be understood that when the oleophilic track width and the contact region were of the similar size, the lubricating performance can be improved. A steel ball-on-steel block test was also used to assess the role of wettability gradient, and it was observed that the friction with wettability gradient lubrication track was always lower than that without wettability gradient, and the friction difference between the two increased with running time, and a friction decrease of 30% could be realized. In addition, it was displayed that at low speed, the load had no obvious influences on the film thickness with limited lubricant supply. At high speed, more starvation was observed for heavy loads, thus the wettability gradient worked better for such conditions. At last, the enhanced oil transportation by wettability gradient was numerically investigated with computational fluid dynamics. The simulation results show that the wettability gradient surface can effectively confine the lubricating oil in the track, which is beneficial to the oil replenishment during the reciprocating motion. The proposed wettability gradient is proved to be an effective way to enhance oil replenishment on the lubricated surface, and consequently the oil supply and lubrication state with reciprocating motion can be significantly improved.

KEY WORDS: limited oil supply; reciprocating motion; oil film thickness; self-collecting oil; wettability gradient surface; load effect

往复运动常见于各种机械零部件,如内燃机的活塞、气门摇臂、摆动式轴承等,其载荷、速度以及接触状态等在运动过程中均会发生瞬态变化。往复运动条件下,润滑油膜极易发生破裂,最终导致润滑表面磨损失效,供油不足将进一步加剧润滑失效。为了达到良好的润滑效果,传统润滑设计往往采用过量供给润滑剂的方式,但会产生搅油能量损失、资源浪费和环境问题,降低设备的服役质量。近年来,人们提出了精准润滑的新型润滑设计概念^[1],有限量供油的润滑方式得到了应用^[2-4]。限量供油润滑是指主动控制润滑油的用量,使得接触副工作在减磨降摩的最优润滑状态,以少油量实现高效的润滑、低能耗的润滑要求。如精密电主轴的油气润滑^[5]与少油量润滑滚针轴

承的开发^[6]等。

当无连续供油时,摩擦副最终将工作在乏油(非充分供油)状态,严重乏油则会导致润滑失效。研究者对经典弹流润滑的被动乏油过程进行了理论和试验研究,对乏油润滑特点及影响因素进行了分析。Wedeven 等^[7]首次采用光干涉法测量了滚动点接触的弹性流体润滑(Elastohydrodynamic Lubrication, EHL)的乏油现象,最先通过引入入口距离参数来定义乏油。Chiu 等^[8]的研究中指出滚动接触中的乏油是由于润滑轨道上的润滑油回流不足所致。Pemberton 等^[9]发现在限量供油润滑中,侧带是补充入口区域润滑油的主要方式。Chevalier 等^[10]使用入口固体表面油层厚度来定义乏油程度,理论研究了入口供油量对弹流

润滑油膜厚度的影响。Cann 等^[11]根据油量、接触尺寸、油的黏度和速度,建立了点接触弹流润滑充分供油-乏油过渡判据。在往复运动中,载荷和速度等在运动过程中往往剧烈变化,也将加剧润滑的乏油程度。Nishikawa 等^[12]发现在短冲程、高频率条件下,接触区出口产生的空化导致下一冲程发生乏油,从而诱发油膜破裂。Stadler 等^[13]发现运动反转时的气蚀导致接触区乏油,并提出根据气蚀长度来预测乏油的出现。Yan 等^[14]考虑油气润滑的供气方式,评估了轴承腔内限量润滑剂的流动性,指出采用内外圈进气方式能够使润滑剂得到更好利用。张涛等^[15]针对多点接触乏油润滑特性进行分析,指出当各点的润滑轨道不重合时,前一个接触区被挤压到轨道两侧的润滑剂能够改善下一个接触区的润滑状态。李书义等^[16]建立了离散油滴供油的弹流润滑模型,数值模拟结果显示,当润滑剂以离散油滴方式参与润滑时,油滴间距是润滑油膜连续性的重要影响因素。综上,在限量供油条件下,润滑剂受到摩擦副挤压分离或者自身离散分布,将产生乏油问题,导致润滑效率低下。

通过主动抑制摩擦副润滑油流失或增强润滑油的回流,可提高润滑轨道上润滑油的集油(Oil Replenishment)能力,改善有限量供油的乏油特性。例如,在极端乏油条件下 Ali 等^[17]提出通过机械回填方式,提高弹流润滑接触润滑油集油能力。Nagata 等^[18]设计的接触点横向振动模型不断重新分布轨道两侧润滑剂,有效减弱了乏油。在表界面科学领域,固体表面自由液体定向输运的研究成果,为润滑油回流主动控制提供了有价值的帮助。如 Alheshibri 等^[19]利用氧等离子体曝光,在表面产生相间的强亲水和强疏水的楔形区域以快速驱动液滴。Feng 等^[20]仿造南洋松叶子制备的三维棘轮结构,成功实现了两种不同液体的双向输运。Jansen 等^[21]对试验中观察到的液滴在化学条纹表面的定向润湿行为。Bliznyuk 等^[22]使用交替疏水和亲水条纹组成的图案定向输运液体。Stark 等^[23]则通过激光干涉直写技术(DLIP)在摩擦表面制作微沟槽实现润滑油的定向驱动。Liu 等^[24]通过3D微打印技术,在有机材料表面制备了楔形输水图案,实现了水滴在图案中的定向输运。Li 等^[25]通过定制特殊的螺旋图案,将液滴的碰撞扩散转换成了旋转运动,减少了液滴的能量耗散。Lu 等^[26]通过制备超疏水到低疏水的梯度非润湿表面,对水滴的输运和动态黏附特性进行了有效调控。Dai 等^[27]在铝基体超疏水表面制备了锥形的超亲水沟槽,实现了液体的反重力输运。卢志成等^[28]对润湿性表面液滴导向运动的研究进行了总结,提出耦合外场驱动将进一步增强液滴驱动性能。以上研究多作用于高表面张力的水滴输运过程,无法直接适用于低表面张力润滑油的输运过程。但上述研究通过调控表面张力等方法实现液体的控制方案,为乏油润滑过程中油滴的主动调控提供了

思路。

研究者进一步针对工程应用中的润滑油等低表面张力液体进行了相关探索。孙鹏程等^[29]对液体自输送功能性表面技术进行了总结,针对油滴难在表面输运的问题,提出了利用毛细力或者拉普拉斯压力进行驱动的解决措施。Li 等^[30]基于简单的亲油/疏油边界,通过构造润湿性梯度来调节接触区两侧油池分布,其中润湿性梯度是由固体表面上两个憎油区域所包围的亲油润滑轨道产生。Liu 等^[31]构造了一种以疏油区域为边界的亲油润滑轨道,改善了接触区的供油状态,降低钢-钢接触的摩擦因数。Liu 等^[32]制备了一种三维梳齿沟槽阵列表面,通过毛细驱动增强了润滑剂的回流,结果产生了良好的润滑增效性。以上研究针对润滑剂的驱动进行了初步尝试,并得到了有益的效果。为本文通过润湿性梯度促进往复运动过程中润滑剂的有效回流提供了参考。

针对往复运动过程中心点处润滑油回流缓慢而易乏油的问题急需得到解决。本文通过构造润湿性梯度表面,加强润滑油回流。通过往复运动光弹流膜厚测量仪对其成膜特性及润滑油回流特性进行观察,探究了往复运动条件下,该表面对限量供油润滑的膜厚增效特性。

1 试验

1.1 设备与样品

使用往复运动光弹流膜厚测量仪记录试验过程中的膜厚及油池变化。往复运动光弹流膜厚测量仪结构如图1a所示,玻璃块试样固定在六边形夹具中,通过连杆机构实现夹具的往复运动。控制往复角度为 8.8° ,回转半径为65 mm时,往复行程为10 mm。往复轨迹如图1b所示,试验中取距离整个行程起点0、2.5、5、7.5、10 mm 5个测量点。试验所用润滑油为PAO4,其性质如表1所示。试验前,将限量润滑油通过微量进液器均布在运动轨道上。在夹具旋转过程中钢球随玻璃块做纯滚运动。通过钢球下方的加载单元实现钢球加载,本试验加载范围为3~50 N。采用CCD进行图像采集,采集速度为42 fps。试验中采用红(640 nm)/绿(525 nm)双色光作为光源,通过DIIM(Dichromatic Interference Intensity Modulation)技术^[33]进行膜厚计算,获得油膜厚度。试验时,保持室温在 $(22\pm 0.5)^\circ\text{C}$,相对湿度 $(85\pm 5)\%$,每组试验重复3次,每个测量点结果取3次平均值。

试验所采用的玻璃块试样尺寸为 $30\text{ mm}\times 30\text{ mm}\times 10\text{ mm}$,工作面($30\text{ mm}\times 30\text{ mm}$)镀有一层厚度为20 nm的析光铬膜和200 nm二氧化硅保护膜。试验前,分别采用石油醚和酒精对玻璃块进行超声清洗5 min,随后用干燥氮气吹干。干燥后在玻璃块工作面制备一层疏油涂层AF(Anti-fingerprint),在

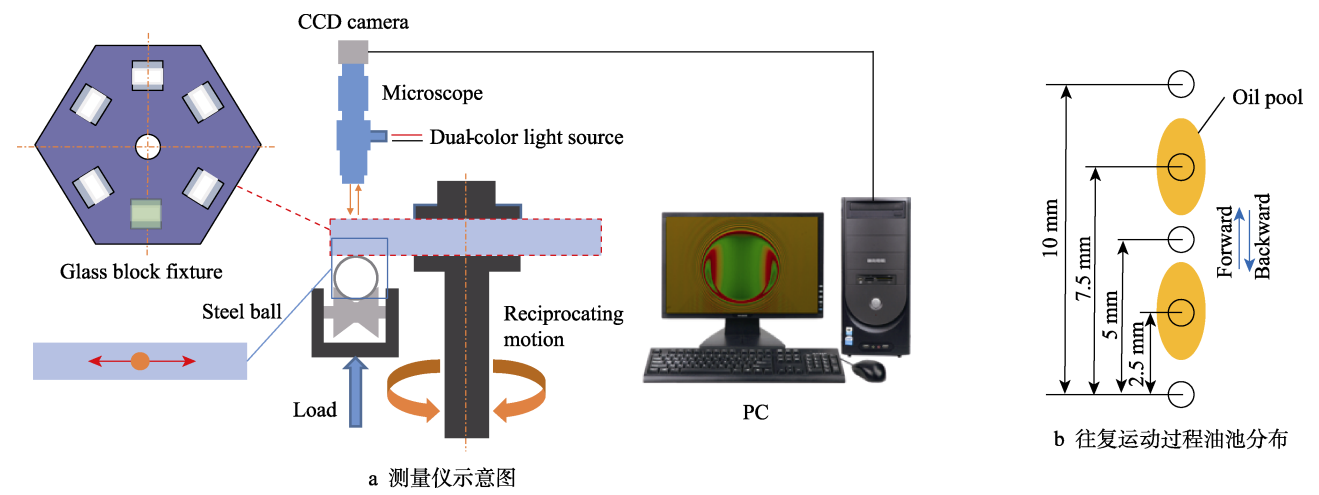


图 1 往复运动光弹流膜厚测量仪
Fig.1 Optical EHL test rig with reciprocating motion: a) set up of test rig;
b) oil pool distribution in reciprocating motion

表 1 PAO4 润滑油性质
Tab.1 Properties of PAO4 lubricating oil

Properties	Values
Viscosity (@ 20 °C)/(Pa·s)	0.025
Density (@ 20 °C)/(kg·m ⁻³)	819
Refractive index	1.456

80 °C 加热 30 min。使用激光加工铜箔掩模版, 图案为回转半径 65 mm 的不同轨道宽度的长条状图案。将加工好的铜箔掩模版压紧在镀膜后试样工作面, 使用氧等离子轰击试样表面 2 min, 如图 2 所示。形成的亲油轨道长度均为 10 mm, 宽度分别为 0.2、0.4、0.8 mm, 并分别命名为 AF-0.2、AF-0.4、AF-0.8。使用原子力显微镜测量 AF 镀层表面 (记为 AF-Full) 和氧等离子清洗后试样表面 (记为 Glass)。对两种表面进行接触角表征 (PAO4, 5 μ L), 结果见表 2, AF 表面的接触角明显高于氧等离子清洗后表面。

1.2 样品表征

图 3a 为纯 AF 表面的微观形貌, 从图中可以看

出 AF 镀层表面分布有纳米级别的乳突结构, 而经过氧等离子处理后, 如图 3b 所示, 其表面乳突结构已经消失, 这也是 PAO4 润滑油在两种表面呈现出不同润湿特性的原因。使用氧等离子技术, 将两种表面按照 1 : 1 的尺寸构造在同一试样块上, 其一侧为纯 AF 镀层表面, 另一侧为经过氧等离子处理的 Glass (玻璃) 表面。如图 4 所示, 在两表面边界处滴一滴 PAO4 润滑油, 由于 AF 表面对 PAO4 的润湿性明显小于 Glass 表面, 因此在表面张力的驱动下 PAO4 会由 AF 表面运动至 Glass 表面。润湿性差异可以主动驱动液体输运, 因此可以通过润湿梯度表面来改善润滑轨道的供油, 增强润滑效应。

表 2 PAO4 在 AF-Full 与 Glass 表面的接触角
Tab.2 Contact angles of PAO4 on AF-Full and Glass surfaces

Surfaces	Contact angles/(°)
AF-Full	68.5 \pm 1.2
Glass	9.8 \pm 2.7

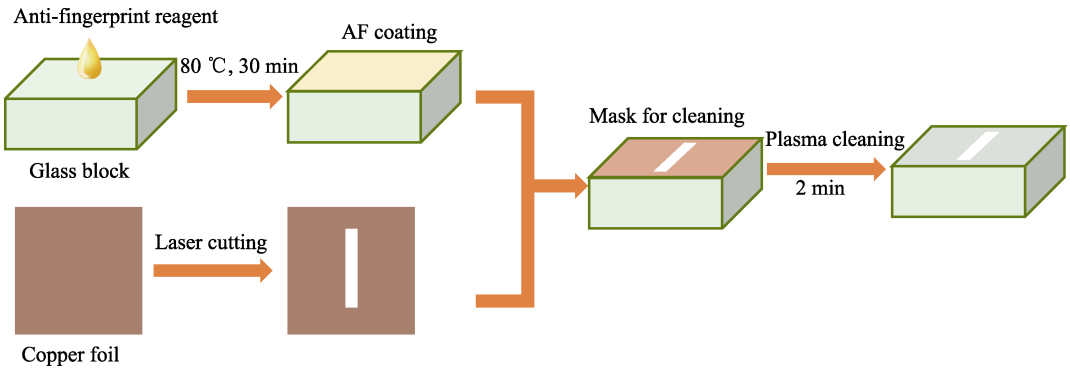


图 2 润湿梯度表面制备过程
Fig.2 Preparation process of wettability gradient surface

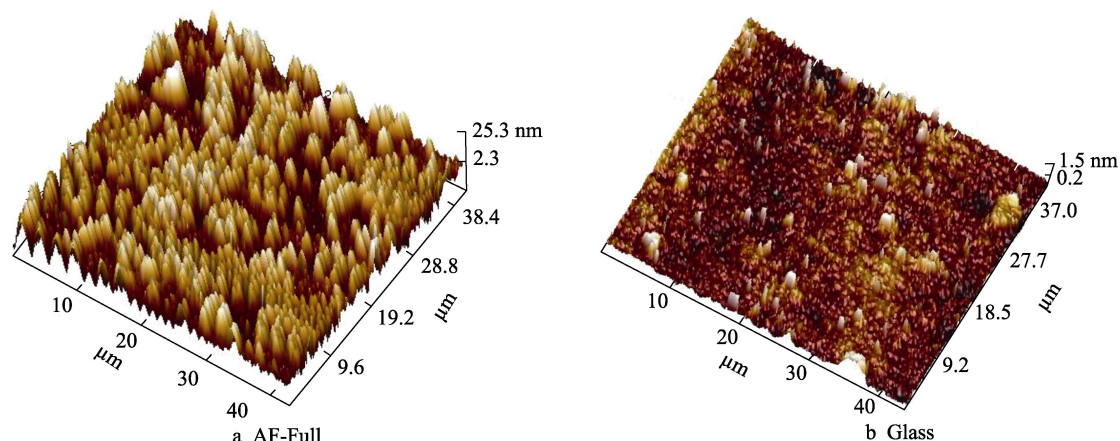


图3 全 AF 表面和原玻璃块表面形貌
Fig.3 Surface morphology of AF-full and Glass surfaces

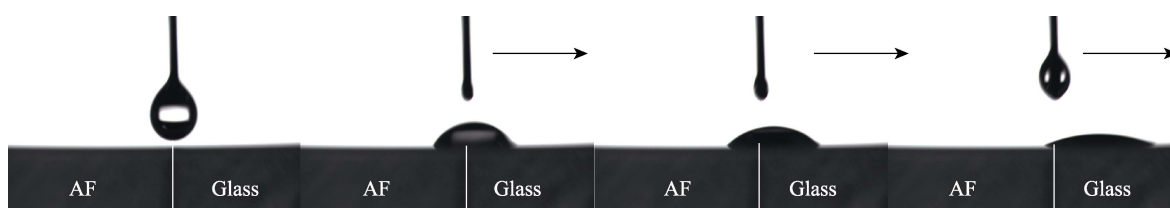


图4 PAO4 油滴在 AF 与 Glass 边界的定向运输
Fig.4 Uni-directional transportation of PAO4 oil droplet on border of AF and Glass

2 结果及分析

图5为往复行程中 AF-0.4 表面与 Glass 表面不同测量点处润滑油膜的干涉图像。AF-0.4 表面整个运动过程中供油均优于 Glass 表面。在往复运动行程中点位置（5 mm），Glass 表面接触区周围润滑轨道上已经产生严重乏油；而 AF-0.4 表面接触区侧面仍有较充沛的润滑油池。润滑油的回流来源于接触区几何间隙诱发的毛细迁移回流以及轨道侧脊处润滑油的自发回流。AF-0.4 表面通过张力梯度提高润滑区入口处润滑油的回流速度，改善了接触区供油状态和润滑状态。而 Glass 表面回流速度较低，当润滑副吸速度较高时，如图5中 Glass 表面，润滑油回流时间不足，产生严重乏油。钢球由 0 测量点运动至 5 测量点为加速过程，接触区油池逐渐减小，尽管 5 mm 测量点卷

吸速度最大，但其乏油程度最大，因此油膜厚度反而最低。而 AF-0.4 表面通过对有限量的润滑油的汇集，在 5 mm 测量点处油池仍然可产生较高膜厚。在 2.5 mm 与 7.5 mm 测量点处，AF-0.4 表面与 Glass 表面油池较充裕，乏油程度较低，两表面油池差异不大。图6为两表面的膜厚曲线对比，AF-0.4 表面与玻璃表面在 5 mm 位置处的膜厚差异进一步验证了 AF-0.4 表面的集油效果。以图6中的前进冲程为例（Forward），在 5 mm 位置处原始 Glass 表面的综合膜厚比为 1.8，而 AF-0.4 表面的膜厚比为 5.94，润滑状态得到改善。AF-0.4 表面较 Glass 表面明显提升的原因是润湿性差异表面促进润滑油在轨道回流，缓解了往复运动过程中的乏油问题，当乏油程度进一步增大时，该表面产生的润滑增效性更加明显。往复运动过程中，侧面油池跟随摩擦副运动。在 2.5 mm 与 7.5 mm 测量点处，摩擦副供油较充足，两表面膜厚并无明显差异。

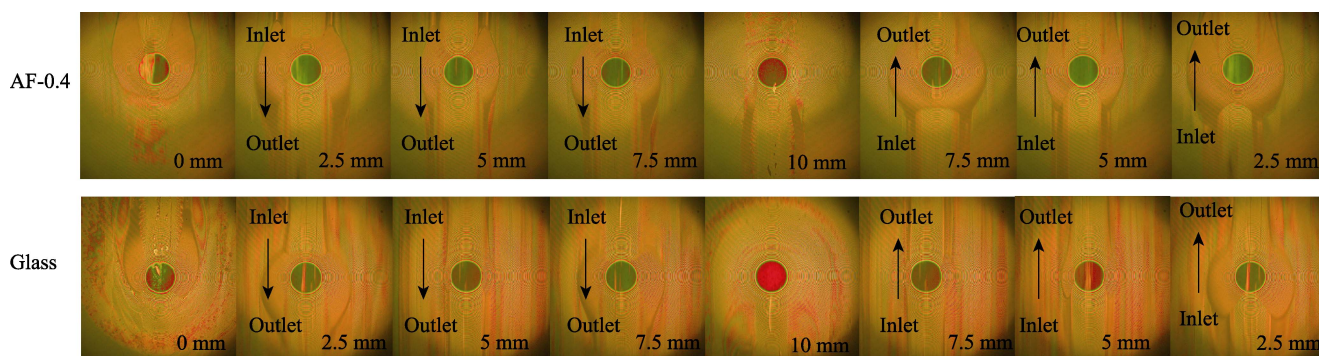


图5 往复行程中不同表面润滑油膜光干涉图像（PAO4, 0.04 μL , 30 N, 4 Hz）

Fig.5 Interferograms of lubricating films of AF-0.4 and glass surfaces under reciprocating motion (PAO4, 0.04 μL , 30 N, 4 Hz)

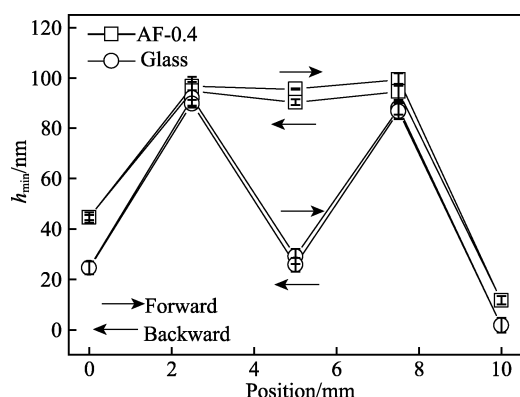


图 6 往复过程中不同表面润滑油膜厚度对比(PAO4, 0.04 μL , 30 N, 4 Hz)

Fig.6 Film thickness of different lubricating film surfaces under reciprocating motion (PAO4, 0.04 μL , 30 N, 4 Hz)

采用激光共聚焦显微镜对 AF-0.4 表面与 Glass 表面在中点位置 (5 mm 测量点) 产生的表面磨损进行观察, 如图 7 所示。可见 Glass 表面的划痕较多, 且呈现连续分布, 而 AF-0.4 表面的划痕数量较少, 且呈散点分布。说明一定宽度润湿性梯度表面有效改善了接触表面的润滑情况, 降低了表面磨损。两表面磨痕轮廓如图 7 中红线所示, 磨痕深度均为 159~200 nm, 说明玻璃块试样发生了镀层的疲劳剥落, 良好的润滑状态可有效减轻零部件的疲劳磨损。

为探究润湿性梯度表面对钢-钢接触润滑的影响, 分别制备了 GC15 轴承钢 AF-0.4 试样与氧等离子全刻蚀试样 (Steel 表面), 在 UMT-3 往复摩擦磨损试验机上与 GCr15 钢球在限量供油条件下进行往复运动的对磨试验 (钢球直径 9.5 mm, 往复行程

6 mm), 试验结果如图 8 所示, 整个试验过程中可以发现 AF-0.4 的摩擦因数明显低于 Steel 表面。随着时间的延长, 二者差别逐渐增大, 氧等离子处理钢表面摩擦因数持续升高, 而钢 AF-0.4 试样摩擦因数始终维持在较低水平。进一步说明润湿性差异表面的回流集油增强作用, 改善了有限量供油条件下的润滑状态, 降低了两接触钢表面的摩擦因数。而氧等离子处理钢表面随着摩擦时间的延长, 其润滑轨道上的润滑油回流作用减弱, 摩擦因数逐渐升高, 进而导致接触副润滑失效。

选取前进冲程 5 mm 处测量点 (即冲程的中点) 膜厚表征亲油轨道宽度的影响, 30 N 载荷条件下不同亲油轨道宽度表面对弹流润滑油膜厚度的影响如图 9 所示。当乏油产生时, AF-0.2 与 AF-0.4 表面的润滑增效性较显著, 相对于普通表面, 膜厚显著提高。而全 AF 表面 (AF-Full) 对膜厚不具有增益作用, 反而降低了油膜厚度。当轨道宽度为 0.8 mm 时, 远大于接触区直径 0.34 mm, 其膜厚结果与 Glass 表面相近, 说明当亲油轨道宽度过大时, 有效集油效果弱。可以理解, 亲油轨道宽度与接触区宽度相差不大时可以促进润滑油的有效回流, 并提高润滑性能。而 AF-Full 表面的表面能低, 导致润滑油不易黏附在其表面。在低速时, 可以观察到油池跟随钢球运动, 能够维持在接触区, 各表面膜厚相差不大。随着速度的增大, 往复过程大多处于乏油状态, 导致其在整个过程中膜厚都相对较低。由于润滑轨道两侧的润滑油是补充接触区供油的重要方式, 如前所述 AF-0.8 表面虽然可以进行一部分回流, 但其回流的润滑油距离接

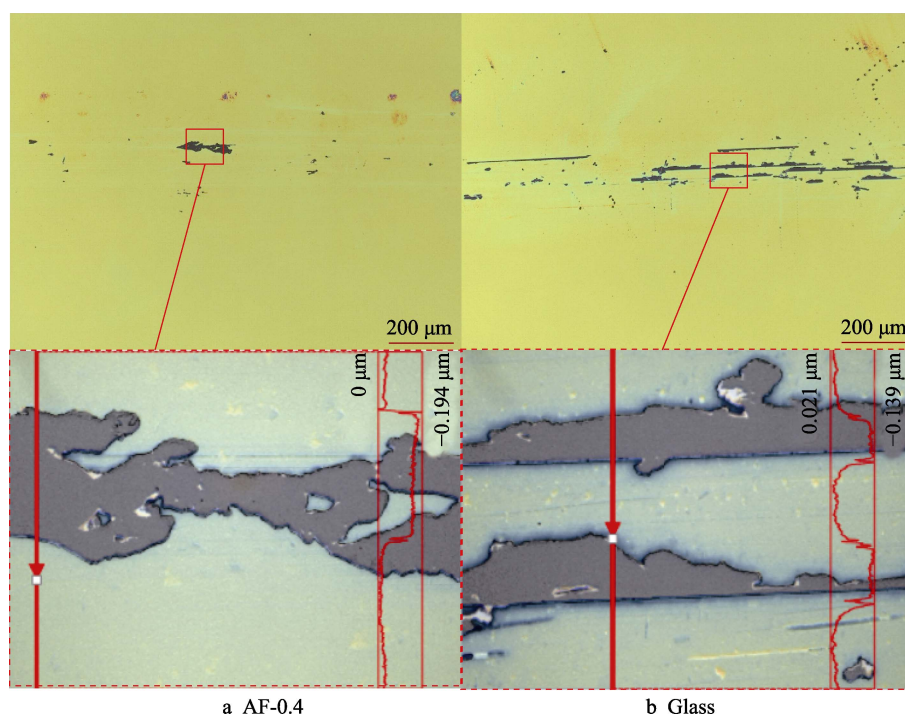


图 7 往复过程中不同表面的磨痕

Fig.7 Wear scars at different surfaces during reciprocating motion: a) AF-0.4; b) Glass

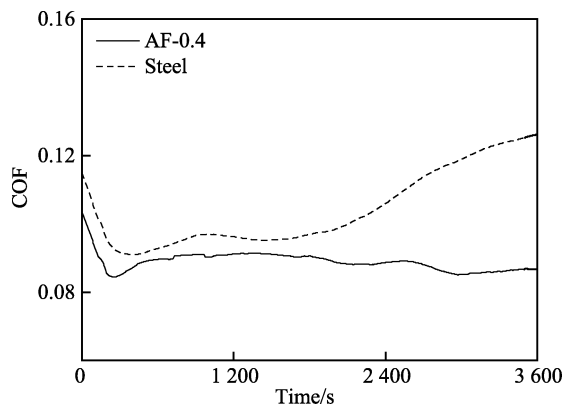


图8 不同表面摩擦因数对比
(PAO4, 0.5 μ L, 1 N, 4 Hz)

Fig.8 COFs at different surfaces (PAO4, 0.5 μ L, 1 N, 4 Hz)

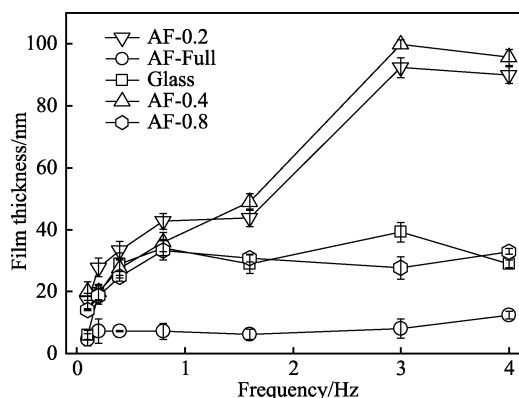


图9 不同亲油轨道宽度表面的油膜厚度对比
(PAO4, 0.04 μ L, 30 N)

Fig.9 Film thickness of surfaces with different oleophilic lubricating tracks (PAO4, 0.04 μ L, 30 N)

触区仍有一定的距离,因此其润滑效果与 Glass 表面的润滑效果相近。AF-0.2 与 AF-0.4 在往复过程中,润滑油回流速度较快,为接触区进行补油,有效地提升了其润滑油利用率,改善往复运动各个瞬时的润滑状态。

载荷是影响供油的另一个重要因素。图 10a 为不同载荷下 Glass 表面冲程中点 5 mm 处油膜厚度随速度的变化曲线,低速条件下载荷影响并不显著。这与

经典弹流理论中膜厚对载荷不敏感的结论是一致的。随着速度提高,乏油程度增加,此时载荷增加,膜厚减小。图 10b 为 AF-0.4 表面的测试结果,相对于 Glass 表面,低速区间时 AF-0.4 表面的膜厚随速度呈现明显上升趋势,高速区间膜厚也可以有效维持。在本文的有限量供油条件下,钢球往复运动碾压在润滑轨道上形成侧脊状的油层。随着载荷的增加,接触区的接触半径增大(对应于 3、30、50 N,接触区半径依次为 0.079、0.17、0.20 mm)从而导致油层宽度增加,油层分布越宽,回流对中央接触区供油的贡献越弱,有效供油减少,膜厚越低。此处载荷的影响另有一个不容忽视的原因是接触区两侧的界面张力作用。载荷较小时,沿接触区半径方向,接触区临近外侧间隙小,相对于高载荷对外侧润滑剂有较强的“毛细吸引”作用,增加了接触区侧面的供油量。如图 10c 所示,Hertz 接触区半宽 b 和接触边界处几何间隙楔形角随着载荷增加而增加。在限量供油条件下,润滑剂被摩擦副挤压到轨道两侧,在冲程中点 5 mm 处接触区入口油池呈接触区两侧分离状态,如图 5 所示。载荷越大,入口油池分离越宽,润滑剂回流距离变大,不利于入口供油。同时,楔形角 φ 越大,接触区两侧油池靠近乏油区侧弯月面曲率半径 R_1 越大(R_t 变化不明显),由公式(2)可得,接触几何间隙对润滑油池的毛细吸引力 ΔP 越弱,不利于毛细回流。

$$\Delta P = \gamma \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_t} \right) \quad (2)$$

制备的润湿性梯度表面增强润滑轨道外侧脊处润滑剂的回流,也对润滑轨道上润滑剂有限制外流的作用,即将润滑剂约束在制备的亲油轨道内。利用计算流体力学工具 (FLUENT) 对制备的润湿性梯度表面这一功能进行了仿真。图 11 为 PAO4 液滴在 AF-0.4 表面和 Glass 表面后扩散的计算结果。亲油轨道沿坐标轴 y 方向,计算中液滴在 Glass 表面与 AF 涂层表面的接触角用表 2 的测量结果,液滴半径 R 为 0.4 mm,下落初始球心距表面高度 h 为 0.45 mm,计算液滴在不同表面下落 0.02 s 时的扩散结果。图 11a

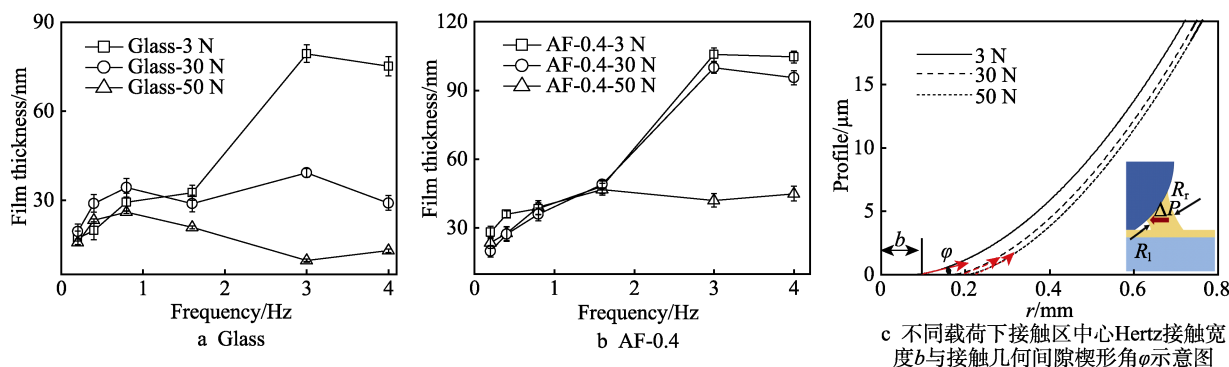


图10 不同载荷下的膜厚对比及接触区几何形貌

Fig.10 Film thickness under different applied loads and geometrical morphology of contact area

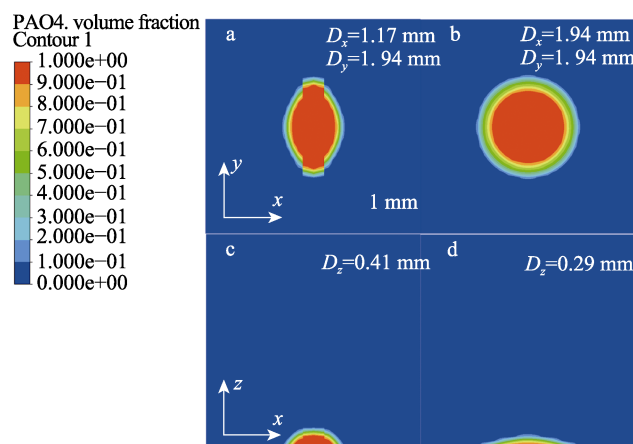


图 11 润湿性梯度表面液滴扩散仿真结果

($R=0.4$ mm, $h=0.45$ mm, $t=0.02$ s)Fig.11 Simulation results of droplet diffusion on wettability gradient surface ($R=0.4$ mm, $h=0.45$ mm, $t=0.02$ s)

为液滴在 AF-0.4 轨道扩散行为, 可见液滴在 x 、 y 方向表现出不同的扩散趋势, y 轴方向的长度 D_y 明显大于 x 轴方向的长度 D_x , 说明液滴在 AF-0.4 表面更趋向于在轨道方向上扩散。如图 11b 所示, 在 Glass 表面, 液滴呈圆形分布, 且在各个方向上的扩散距离相同, 均为 1.94 mm。图 11c 和图 11d 为两表面上液滴在截面 xoz 的形状, 可以发现 AF-0.4 表面上的液滴在 z 方向上的高度明显高于 Glass 表面, 大部分液滴都聚集在轨道上。该仿真结果说明, 润湿性梯度表面可以有效地将润滑油限制在运动方向, 有利于往复运动过程中润滑剂的回流。

通过润滑膜厚测量试验及摩擦力测量试验, 等离子刻蚀技术制备的润湿梯度表面相对于普通摩擦副表面能够有效抑制乏油。通过对速度、载荷以及亲油轨道宽度等因素的讨论, 易知, 当速度、载荷及乏油程度增加时, 所制备的润湿梯度表面的集油效果明显。另外, 接触区宽度接近亲油轨道宽度时具有更好的润滑效果。通过数值模拟对该表面的油池约束能力进行了讨论, 结果显示润湿性梯度表面可以有效地将润滑油限制在运动方向, 从而改善供油。

3 结论

在恶劣的润滑条件 (乏油严重) 下, 如重载、高速以及频繁往复等, 润滑轨道的自集油作用无法有效地建立润滑油膜。利用等离子刻蚀技术制备的润湿梯度表面通过增强亲油轨道的集油作用, 能够有效抑制乏油的进一步增加, 促使往复运动润滑状态由混合润滑向弹流润滑转变, 从而提高机械零部件的服役寿命和运行稳定性。

1) 在限量供油的往复运动过程中, 速度最高点 (冲程中点) 接触副极易出现乏油。本文构造的具有一定亲油轨道宽度的润湿性梯度表面具有很好的集油性能, 能够改善润滑状态, 增加接触区的油膜厚度,

降低其摩擦因数, 减少磨损。

2) 对比不同亲油轨道宽度对于其膜厚的影响, 30 N 载荷下 AF-0.2 和 AF-0.4 的润滑改善最佳, AF-Full 表面最差。亲油轨道宽度与接触区宽度相差不大, 有较好的润滑增强效果。

3) 不同载荷下, 在低速段膜厚没有明显差异; 而在高速下, 载荷越高膜厚越小。高载荷条件下接触区外间隙毛细作用减弱, 集油量小, 膜厚减小。高载条件下, 润湿性梯度表面润滑增效更加显著。

参考文献:

- [1] MANG T, BRAUN J. Antioxidants[M]. Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014: 56-58.
- [2] MA Jian, YI Peng, JIA Hong-yu, et al. Effects of Oil Retention Property for Sinusoidal Textures on Tribological Characteristics under Scarcity Oil Supply[J]. Tribology International, 2021, 158: 106918.
- [3] EBNER M, YILMAZ M, LOHNER T, et al. On the Effect of Starved Lubrication on Elastohydrodynamic (EHL) Line Contacts[J]. Tribology International, 2018, 118: 515-523.
- [4] LIU Ming-yong, ZHANG Jin-xi, XU Pei-dong, et al. Thermal Elastohydrodynamic Lubrication Analysis of Helical Gear Pair under Starved Lubrication Condition[J]. Lubrication Science, 2019, 31(7): 321-334.
- [5] WU C H, KUNG Y T. A Parametric Study on Oil/Air Lubrication of a High-Speed Spindle[J]. Precision Engineering, 2005, 29(2): 162-167.
- [6] NSL. Super-Long-Life Needle Rollers for Automobile Transmissions[EB/OL]. <https://www.jp.nsk.com/app01/en/techJournal/index.cgi>, 2018-06-29.
- [7] WEDEVEN L D, EVANS D, CAMERON A. Optical Analysis of Ball Bearing Starvation[J]. Journal of Lubrication Technology, 1971, 93(3): 349-361.
- [8] CHIU Y P. An Analysis and Prediction of Lubricant Film Starvation in Rolling Contact Systems[J]. ASLE Transactions, 1974, 17(1): 22-35.
- [9] PEMBERTON J, CAMERON A. A Mechanism of Fluid Replenishment in Elastohydrodynamic Contacts[J]. Wear, 1976, 37(1): 185-190.
- [10] CHEVALIER F, LUBRECHT A A, CANN P M E, et al. Film Thickness in Starved EHL Point Contacts[J]. Journal of Tribology, 1998, 120(1): 126-133.
- [11] CANN P M E, DAMIENS B, LUBRECHT A A. The Transition between Fully Flooded and Starved Regimes in EHL[J]. Tribology International, 2004, 37(10): 859-864.
- [12] NISHIKAWA H, HANDA K, KANETA M. Behavior of EHL Films in Reciprocating Motion[J]. JSME International Journal Ser C, Dynamics, Control, Robotics, Design and Manufacturing, 1995, 38(3): 558-567.
- [13] STADLER K, IZUMI N, MORITA T, et al. Estimation of

- Cavity Length in EHL Rolling Point Contact[J]. *Journal of Tribology*, 2008, 130(3): 1.
- [14] YAN Ke, DONG Lei, ZHENG Jun-hao, et al. Flow Performance Analysis of Different Air Supply Methods for High Speed and Low Friction Ball Bearing[J]. *Tribology International*, 2018, 121: 94-107.
- [15] 张涛, 陈晓阳, 陈世金, 等. 多点接触乏油弹流润滑模型及试验研究[J]. *润滑与密封*, 2020, 45(2): 125-134.
ZHANG Tao, CHEN Xiao-yang, CHEN Shi-jin, et al. Study on Starved Oil Elastohydrodynamic Lubrication Model and Experiments of Multi-Point Contacts[J]. *Lubrication Engineering*, 2020, 45(2): 125-134.
- [16] 李书义, 郭峰, 栗心明, 等. 离散供油弹流润滑条件下油滴间临界值的研究[J]. *中国科学: 技术科学*, 2019, 49(7): 767-777.
LI Shu-yi, GUO Feng, LI Xin-ming, et al. Study on the Critical Value of Oil Droplet Spacing Distance under Conditions of Discrete Droplet Supply in Elastohydrodynamic Lubrication[J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2019, 49(7): 767-777.
- [17] ALI Fa-di, KŘUPKA I, HARTL M. Enhancing the Parameters of Starved EHL Point Conjunctions by Artificially Induced Replenishment[J]. *Tribology International*, 2013, 66: 134-142.
- [18] NAGATA Y, KALOGIANNIS K, GLOVNEA R. Track Replenishment by Lateral Vibrations in Grease-Lubricated EHD Contacts[J]. *Tribology Transactions*, 2012, 55(1): 91-98.
- [19] ALHESHBRI M H, ROGERS N G, SOMMERS A D, et al. Spontaneous Movement of Water Droplets on Patterned Cu and Al Surfaces with Wedge-Shaped Gradients[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(17): 174103.
- [20] FENG Shi-le, ZHU Pin-gan, ZHENG Huan-xi, et al. Three-Dimensional Capillary Ratchet-Induced Liquid Directional Steering[J]. *Science*, 2021, 373(6561): 1344-1348.
- [21] JANSEN H P, SOTTHEWES K, VAN SWIGCHEM J, et al. Lattice Boltzmann Modeling of Directional Wetting: Comparing Simulations to Experiments[J]. *Physical Review E*, 2013, 88: 013008.
- [22] BLIZNYUK O, JANSEN H P, KOUIJ E S, et al. Smart Design of Stripe-Patterned Gradient Surfaces to Control Droplet Motion[J]. *Langmuir*, 2011, 27(17): 11238-11245.
- [23] STARK T, KIEDROWSKI T, MARSCHALL H, et al. Avoiding Starvation in Triboccontact through Active Lubricant Transport in Laser Textured Surfaces[J]. *Lubricants*, 2019, 7(6): 54.
- [24] LIU Ming, YAO Yin, YANG Ya-zheng, et al. Directional Transport Behavior of Droplets on Wedge-Shaped Functional Surfaces[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2019, 123(20): 12736-12743.
- [25] LI Hui-zeng, FANG Wei, LI Ya-nan, et al. Spontaneous Droplets Gyration via Asymmetric Self-Splitting on Heterogeneous Surfaces[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 950.
- [26] LU Yang, SHEN Yi-zhou, TAO Jie, et al. Droplet Directional Movement on the Homogeneously Structured Superhydrophobic Surface with the Gradient Non-Wettability[J]. *Langmuir: the ACS Journal of Surfaces and Colloids*, 2020, 36(4): 880-888.
- [27] DAI Qing-wen, QIU Zhong-hua, CHONG Zhe-jun, et al. Propelling Liquids on Superhydrophobic Surfaces with Superhydrophilic Diverging Grooves[J]. *Surface Innovations*, 2020, 8(3): 158-164.
- [28] 卢志成, 郑佳宜, 余延顺. 润湿性表面液滴导向运动的研究进展[J]. *表面技术*, 2021, 50(1): 138-149.
LU Zhi-cheng, ZHENG Jia-yi, YU Yan-shun. Research Progress of Droplet Guided Motion on Wetting Surface[J]. *Surface Technology*, 2021, 50(1): 138-149.
- [29] 孙鹏程, 郝秀清, 牛宇生, 等. 液体自输送功能性表面及其应用[J]. *表面技术*, 2021, 50(1): 71-93.
SUN Peng-cheng, HAO Xiu-qing, NIU Yu-sheng, et al. Functional Surfaces for Spontaneous and Directional Fluidic Transport and Their Applications[J]. *Surface Technology*, 2021, 50(1): 71-93.
- [30] LI X M, GUO F, WONG P L, et al. Regulation of Lubricant Supply by Wettability Gradient in Rolling EHL Contacts[J]. *Tribology International*, 2018, 120: 565-574.
- [31] LIU C L, GUO F, WONG P L, et al. Tribological Behaviour of Surfaces with Stepped Wettability under Limited Lubricant Supply[J]. *Tribology International*, 2020, 141: 105880.
- [32] LIU Cheng-long, GUO Feng, WONG P, et al. Laser Pattern-Induced Unidirectional Lubricant Flow for Lubrication Track Replenishment[J]. *Friction*, 2022, 10(8): 1234-1244.
- [33] LIU Hai chao, GUO Feng, GUO Liang, et al. A Dichromatic Interference Intensity Modulation Approach to Measurement of Lubricating Film Thickness[J]. *Tribology Letters*, 2015, 58(1): 15.

责任编辑: 万长清