

# 自集油涂层对凸轮-挺柱副限量润滑性能影响研究

李常腾, 李书义, 刘明海

(青岛理工大学 机械与汽车工程学院, 青岛 266520)

## Study on the Effects of Self-Oil Collection Coating on the Limited Lubrication Performance of Cam-Tappet Pairs

LI Changteng, LI Shuyi, LIU Minghai

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China)

**Abstract:** A patterned functional surface with arc-shaped oleophobic zones alternating with the original oleophilic zones was designed and prepared to achieve automatic aggregation of a small amount of lubricant and to explore the improvement of limited lubrication performance on the cam-tappet sub-surface. The results show that the coated functional surface leads to a wettability gradient on the surface of the cam-tappet sub-surface, limiting the directional flow of the lubricant without external force, increasing the oil supply amount to the contact area and thus improving the lubrication performance. The effects of oleophilic track width on lubricant return are not uniform, and a suitable width design can produce a good oil collection effect. The high viscosity lubricant is hindered by the pinning effect to flow outward during the extrusion stage. The moving parts are in a serious oil-shortage state when the oil supply amount is reduced to 0.5  $\mu\text{L}$ , and the oil collection surface cannot play a role in improving the lubrication effect.

**摘要:** 设计制备了一种圆弧形疏油区与原始亲油区交替排列的图案化功能表面, 实现少量润滑油的自动聚集, 探索其对凸轮-挺柱副限量润滑性能的改善。结果表明, 涂层功能表面使接触副表面产生润湿性梯度, 限量润滑油在无外部力驱动情况下定向流动, 改善了接触区供油进而实现改善润滑性能的目的。亲油轨道宽度对润滑油回流影响并非一致的, 合适的宽度设计能够产生良好的集油效果; 高黏度润滑油受到钉扎作用阻碍其挤压阶段的向外流动; 供油量降低至 0.5  $\mu\text{L}$  时运动副已处于严重乏油状态, 集油表面无法发挥改善润滑的作用。

**关键词:** 凸轮-挺柱; 润湿性梯度; 限量供油; 自集油增强

**Key words:** cam-tappet; wettability gradient; limited oil supply; self-oil collection enhancement

**DOI:** 10.13949/j.cnki.njgc.2024.05.005

**中图分类号:** TH117.2

### 0 概述

润滑油供给对凸轮-挺柱副润滑性能有重要影响, 润滑油膜的存在可增大接触区承载, 降低摩擦磨

损, 为保证其最佳工作状态, 接触副应处于良好的润滑状态。凸轮-挺柱副的接触点位置随凸轮转动而周期性往复运动, 润滑表面润滑油受挤压后铺展到轨道两侧, 在无法及时补充润滑油的情况下, 轨道两

收稿日期: 2024-02-07

修回日期: 2024-04-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(52005278)

Foundation Item: National Natural Science Foundation of China (52005278)

作者简介: 李常腾(1996—), 男, 硕士生, 主要研究方向为内燃机润滑与摩擦, E-mail: lil5069531970@foxmail.com;

李书义(通信作者), E-mail: mesyli@qut.edu.cn。

侧润滑油回流情况直接影响接触区供油状态。但由于高频次挤压留给两侧润滑油的回流时间较短,难以保证接触区润滑油供给,从而使凸轮-挺柱副处于严重乏油状态,影响其运动精度并缩短使用寿命。

早期人们便意识到润滑状态对凸轮-挺柱副摩擦磨损的重要性,从油膜厚度与摩擦力两方面进行了研究,为凸轮-挺柱副润滑条件的改善提供参考。文献[1]中使用电容法测量凸轮-挺柱副接触区的油膜厚度。文献[2]中通过电阻法测量了凸轮-挺柱副在不同工况下的油膜状态。文献[3]中建立凸轮-挺柱副的摩擦耗散解析模型,并指出可通过优化凸轮-挺柱副的设计参数降低摩擦损耗。文献[4]中建立分析模型考虑类金刚石(diamond-like carbon, DLC)涂层对凸轮-挺柱副摩擦损失的影响,含涂层表面展现出良好的减摩性能。文献[5]中通过试验台模拟凸轮-挺柱运动形式,给出凸轮不同旋转角度下,接触点在3个方向的力及变化趋势,并测试油温对每转机械损失的影响。文献[6]中研制了新的测量装置,将凸轮刚性连接到应变梁上并通过记录应变片的变化来得到摩擦力变化。文献[7]中测量了在不同转速、载荷下,凸轮旋转过程各接触力分量的变化趋势,指出凸轮-挺柱接触主要运行在边界润滑与混合润滑阶段。对凸轮-挺柱副的研究主要集中在油膜厚度、摩擦磨损、接触力的测量,忽略了凸轮-挺柱在工作过程所存在的乏油问题,文献[8]中通过球盘测试纯滑动接触下的往复运动,指出在短冲程和高频率时接触点出口区气穴会导致下一冲程乏油。而凸轮-挺柱副接触点在高频往复运动的同时,卷吸速度、载荷、滑滚比等参数随凸轮转角实时变化,更容易出现接触区乏油,导致严重的摩擦磨损,甚至影响配气机构的正常工作。

乏油现象及如何缓解其对接触副的不良影响一直是人们关注的焦点。文献[9]中最早发现膜厚降低率与油池入口边界到接触区的距离有关,并通过引入入口距离这一参数来衡量乏油程度。文献[10]中采用数值方法研究入口区油量对膜厚的影响,指出润滑油在接触区外的回流是解决乏油问题的关键。文献[11]中分析了非接触区润滑油在表面张力作用下回流速率对接触区摩擦学性能的影响。文献[12]中试验验证了接触区外油池侧脊向接触点补充润滑剂的作用机制,当润滑油的挤压流出与毛细力回流维持平衡,接触区将不会发生乏油。文献[13]中分析了乏油条件下润滑油回填速率对接触区润滑状态的影响,结果与文献[12]中试验具有较高的相似性。文献[14]中提出轴承启动时重力和表面张力

引起的润滑油分配理论模型,并分析了黏度、表面张力系数、初始油层厚度等因素对润滑油补给的影响。乏油现象的发生受到多重因素的影响,通过对接触条件的改善能一定程度缓解这一现象。文献[15]中指出在弹流润滑中横向振动可以将侧脊润滑油重新带入接触区重新参与润滑。文献[16]中试验研究了异向卷吸效应对润滑油回填的影响,表示异向卷吸可明显改善接触区入口供油状态。文献[17]中使用滑块式刮板将润滑油重新引导至接触区轨道以改善摩擦系数和油膜厚度。可见,有限量润滑油供给下充分发挥有限量润滑油作用,可以达到良好的润滑状态。

对于内燃机凸轮-挺柱副,受其工作环境制约,以往润滑改善方法难以应用,需寻求新的润滑增效方法。文献[18]中观测微量润滑油供给时的油池分布,提出可应用织构或疏油涂层促进润滑油的快速回流。文献[19]中研究发现猪笼草表面存在纳米级分层通道结构,可将液体反重力运输到固定区域。文献[20]中受这一发现启发提出一种各向异性润湿性表面,采用周期性排列的拱形微腔与铁磁性流体组合实现连续液滴的快速运输。文献[21]中采用化学蚀刻与蒸汽扩散相结合的方式制备了具有梯度非润湿性表面实现了液滴沿特性方向的迁移。这一发现启发人们通过该方法进行油的定向运输来改善接触区润滑状态。

随着研究工作的深入,更多学者将增强接触区外润滑油回流作为改善润滑状态的关键方法。此前已有研究人员证实,接触区轨道外围的润湿性梯度可以改善润滑油在接触副表面的分布,但润滑油的回填速率有待提高,仅依靠润湿性梯度或表面结构带来的润滑油回填无法满足现代机械高速运转需求。本文中设计了一种图案化润湿性梯度的润滑油回填方案,通过在接触轨道两侧布置疏油性质的圆弧齿条对轨道内润滑油产生钉扎力、拉普拉斯压力,以减少接触副运动过程中对润滑油的挤压流出,并加速接触轨道外润滑油的回流,来提高有限量润滑油在凸轮-挺柱副中的利用率,探究新的润湿性梯度对改善润滑的可能性。

## 1 试验条件与试样制备

### 1.1 试验条件

通过自行搭建的凸轮-挺柱润滑测量系统<sup>[22]</sup>进行相关试验,凸轮-挺柱测量系统示意图如图1所示,用偏心钢球代替凸轮,以钢块或蓝宝石盘代替挺柱,实现接触副摩擦系数与油膜厚度测量。钢球、钢

块材料为 GCr15 轴承钢,粗糙度为 14 nm,钢球直径为 25.4 mm。为保证光干涉法<sup>[23]</sup>对油膜厚度的采集,采用厚度 15 mm、直径 150 mm 的透光蓝宝石圆盘作为油膜测量接触副。涂层材料使用日本信越公司生产的防指纹(anti-fingerprint, AF)纳米涂层,主要成分为氟基团和硅基团,涂覆固化后可降低样品表面液体附着力,达到表面疏油效果。试验条件如表 1 所示,试验所采用的润滑油均为 PAO 基础油,黏度如表 2 所示。

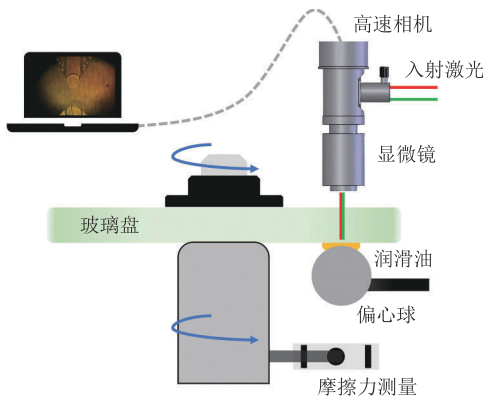


图1 凸轮-挺柱测量系统示意图

Figure 1 Schematic diagram of cam-tappet measurement system

表 1 试验参数

Table 1 Test parameters

项目	参数
凸轮转速 $n/(r \cdot \min^{-1})$	25、50、75、100
初始载荷 $F_0/N$	5、10
供油量 $v/\mu L$	0.5、1.0、2.0
接触副	钢球-蓝宝石盘,钢球-钢块
偏心距 $e/mm$	2、4
环境温度 $T/^\circ C$	$23 \pm 1$
润滑油	PAO6、PAO10、PAO20

表 2 润滑油黏度(23 °C)

Table 2 Lubricant viscosity (23 °C)

润滑油	动力黏度 $\eta/(mPa \cdot s)$
PAO6	52.26
PAO10	112.7
PAO20	297.36

1.2 试样制备

为改善凸轮-挺柱副乏油润滑情况,使用 AF 疏油涂层制备带有特殊结构的集油表面。固体表面油滴总是流向降低系统表面能的方向,原始表面具有较高的表面能,能够为润滑油铺展提供更多的能量,而经 AF 处理后材料表面能降低,当液滴同时接触两种表面,将更易朝着原始表面方向铺展,并且亲油

区梯形结构的宽度差能够提供额外拉普拉斯压力,使润滑油从外部较窄一侧流向内部较宽的轨道一侧。在润湿性梯度产生的表面张力和拉普拉斯压力的综合作用下流向接触区轨道,增加接触副入口区的润滑油供给。图 2 为样品的结构与制备流程图。制备的集油轨道结构如图 2(a)所示,其中阴影部分为疏油区,其余为亲油区,疏油区为高度  $d=1.0$  mm,底面宽  $w=0.5$  mm,顶部半径  $r=0.1$  mm 半圆的圆弧形齿条,疏油区表面能低于原始表面,亲油区为原始表面。定义两侧齿顶间的距离为  $D$ ,分别设置 0.45 mm、0.65 mm、1.00 mm、1.20 mm 四种宽度,对应样品依次记为 D1、D2、D3、D4。制备流程如图 2(b)所示,使用酒精、石油醚擦拭样品表面,放入烘干箱预热至 70 °C 后均匀涂覆 AF,设定烘干箱温度 85 °C 加热 35 min,然后自然冷却,使涂层固定到样品表面。将定制的掩膜贴合到样品表面,使用等离子清洗机对所需亲油区进行氧离子清洗去除 AF,得到最终样品。

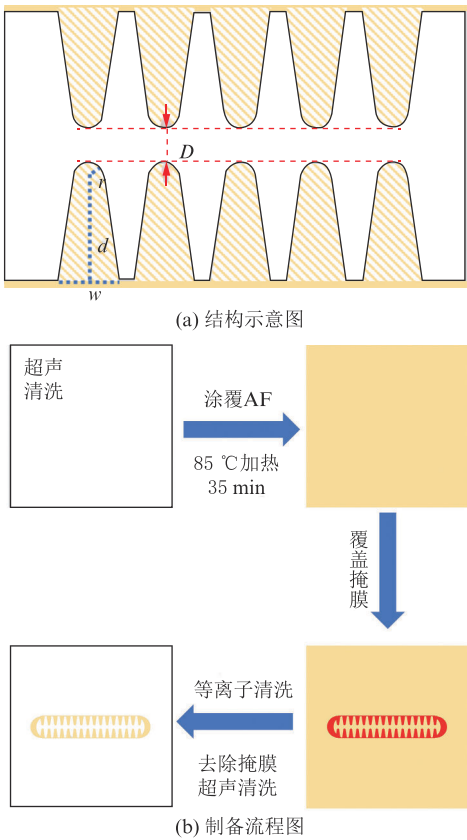


图 2 集油表面制备

Figure 2 Preparation of oil collecting surfaces

图 3 为润滑油在 D3 样品表面的迁移。如图 3 所示,使用微量进液器将 3  $\mu L$  的 PAO10 基础油滴至 D3 表面轨道边缘,测得油滴进入接触轨道(阴影部分)的时间及进入轨道后的表面接触角。油滴与集油表面接触的瞬间,润湿性梯度产生表面张力差



使润滑油朝向接触轨道的方向迁移,并最终停留在轨道中心,另一方面润滑油在轨道区域的接触角大于原始表面,这有利于提高入口区油层厚度。

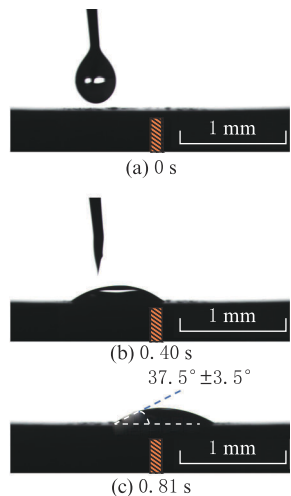


图3 润滑油在D3样品表面的迁移

Figure 3 Migration of lubricating oil on the sample D3 surface

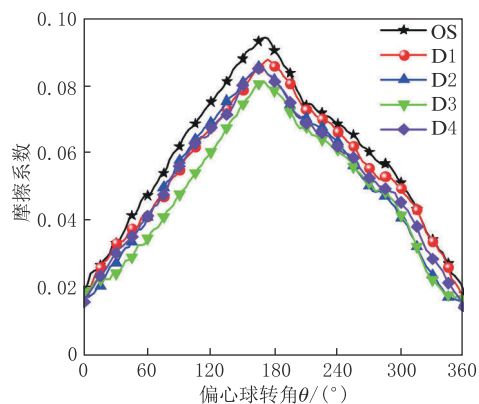
## 2 结果与讨论

### 2.1 齿顶距 $D$ 对润滑性能的影响

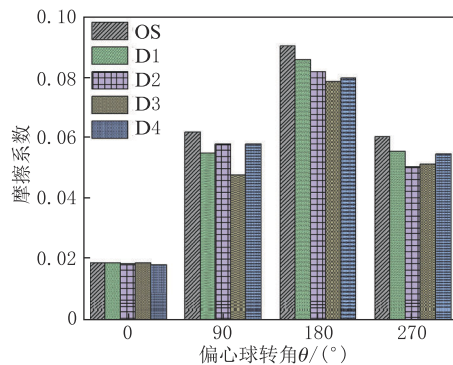
偏心凸轮-挺柱的运动过程中,接触点移动使润滑油受挤压流向接触点左右两侧,形成一定宽度的蝶状油池,集油表面的作用便是通过界面效应使这一部分润滑油再分布,以提高润滑油利用率,减缓乏油现象出现。集油表面亲油区的宽度是影响界面效应的关键因素,通过摩擦测试验证了轨道宽度对集油表面性能的影响。

图4为不同齿顶距  $D$  下摩擦系数变化。如图4所示,测量了原始表面(original surface, OS)与集油表面不同齿顶距  $D$  下接触副摩擦系数变化,其中偏心距  $e=4$  mm,初始载荷 10 N,润滑油为 PAO10 基础油,供油量  $1.0 \mu\text{L}$ ,转速 50 r/min。由图4(a)可以看出,在集油表面整个旋转周期内接触副摩擦系数均出现降低,但随齿顶距增加,摩擦系数的降幅趋势并非线性。齿顶距过小或过大均会降低集油效果。D1与D4表面的减摩效果低于D2、D3表面,D1表面齿顶距接近接触区赫兹直径,润滑油在接触点往复过程中容易挤压到集油轨道外侧,无法回流。当D4齿顶距大于1.00 mm时(D4样品)润滑油铺展距离与设计的亲油轨道宽度接近,削弱了集油表面对润滑油的驱动,减摩效果下降。综上,齿顶距对集油效果的影响与油池分布范围有关,轨道宽度过小时油池范围大于集油轨道,集油轨道外侧疏油区域对润滑油黏附性低,部分润滑油甩出轨道,对集油

产生负面效果;当轨道宽度增加,油池范围小于外侧疏油轨道时,集油轨道对润滑效果的提升减弱直至消失。与此同时,由图4(b)可知,在特殊转角位置,集油表面中摩擦系数相对于原始表面都呈现不同程度降幅,在  $0^\circ$  位置不同表面之间的摩擦系数无明显变化,该位置赫兹接触直径为整个周期最小,油池宽度小于齿顶距导致集油效果减弱。而  $90^\circ$ 、 $180^\circ$  和  $270^\circ$  三个转角下4种齿顶距样品的减摩效果较好,此时接触区赫兹直径的增加使油池范围相应增大,油池被集油表面钉扎与回流双重作用约束在接触区轨道上,与原始表面相比相同供油量下可利用的润滑油量增加,摩擦系数降低。



(a) 完整周期内摩擦系数对比



(b) 特殊旋转角度下摩擦系数对比

图4 不同齿顶距  $D$  下摩擦系数变化

Figure 4 Changes in friction coefficient under different tooth tip distance  $D$

选取宽度限量供油条件下的减摩效果较好的D2、D3表面,观测试验过程中集油表面对润滑油分布的改善及膜厚提升效果,通过高速摄像机拍摄记录接触区光干涉图像,使用DIIM<sup>[24]</sup>处理软件对油膜厚度进行处理。

图5为3种表面接触区光干涉图像,使用偏心距  $e=4$  mm的钢球,初始载荷 10 N,转速 75 r/min,采用PAO10基础油,供油量  $1.0 \mu\text{L}$ 。  $0^\circ$  与  $180^\circ$  分别为凸轮-挺柱副最柔和与最恶劣的工作位置,最具代表性。

由图 5(a)、图 5(d)可以看出原始表面油池范围出现不同程度的缩小,而在图 5(b)、图 5(c)、图 5(e)、图 5(f)中,两种集油表面接触区到油池边界的乏油距离增加,油池面积增大,特别是 D3 表面表现最佳,油池分布范围明显高于原始表面。

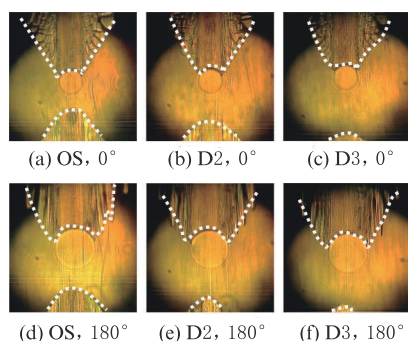


图 5 不同齿顶距  $D$  时的光干涉图

Figure 5 Optical interferogram at different tooth pitch  $D$

图 6 为 3 种表面的油膜厚度对比,油膜厚度随着偏心球的角度变化呈先减小后增加的趋势。在工况最为恶劣的  $180^\circ$  位置,原始表面油膜厚度仅为 20 nm。而两种集油表面在不同位置的最小膜厚均有提升: $0^\circ$  位置的工况相对柔和,提升幅度不大; $180^\circ$  位置,D3 表面膜厚提升至 50 nm。值得注意的是,在  $90^\circ$  和  $270^\circ$  两个位置,接触点运动方向瞬时变化使压力增加,进而使膜厚增加。因此,集油表面能够显著改善润滑油在入口区的分布和接触区油膜厚度,尤其是在极端工况下,更好地提升润滑性能。

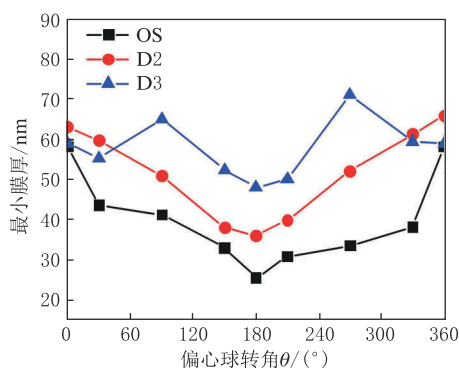


图 6 不同齿顶距对膜厚的影响

Figure 6 Effects of different tooth top pitches on film thickness

## 2.2 转速对集油轨道性能的影响

在限量供油条件下,回流时间是影响接触区润滑油回流再分布的重要因素。对于凸轮-挺柱副,转速提高会缩短接触点再次回到某一位置的时间间隔,为此试验测试了随转速升高,集油表面对接触副

润滑性能的改善。

以 D3 为例分析不同转速下原始和集油表面在  $180^\circ$  位置处的摩擦系数变化如图 7 所示,其中偏心距  $e=4$  mm,初始载荷 10 N,采用 PAO10 基础油和  $1.0 \mu\text{L}$  供油量。可以看出,采用原始表面时当转速增加至 130 r/min,摩擦系数开始急剧增大,而经涂层处理的集油表面摩擦系数随转速增加呈下降趋势。这是由于转速提高使接触点经过相同行程需要的时间缩短,原始表面的润滑油回流不及时,打破了接触轨道内润滑油流入与流出的供油平衡,润滑油供应量减少使两表面间粗糙峰接触面积增加,造成摩擦系数增大,随转速继续升高,乏油现象加剧,最终导致润滑失效。集油轨道的应用直接影响到润滑油在接触区附近的流动,微量润滑油挤压铺展受到钉扎阻碍难以继续向外流动,而回流的润滑油又会在表面张力和拉普拉斯压力作用下流回接触区轨道继续参与润滑。相比于原始表面,在同工况条件下接触区轨道内润滑油供应量大幅增加,减少了两表面粗糙峰接触,摩擦系数降低。

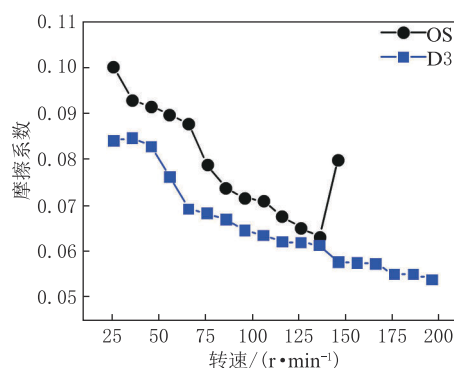


图 7  $180^\circ$  位置两种表面随转速的摩擦系数变化

Figure 7 Variation of the friction coefficients of the two surfaces at  $180^\circ$  with rotational speeds

图 8 为在偏心球转角  $180^\circ$  位置,两种表面的光干涉图对比。其中偏心距  $e=4$  mm,初始载荷 10 N,采用 PAO10 基础油和  $1.0 \mu\text{L}$  供油量。由图 8(a)~图 8(d) 光干涉图的油池分布可以看出,原始表面在 50 r/min 时入口区出现乏油,转速升高,乏油边界向接触区方向移动,转速升高至 100 r/min 时接触区严重乏油,润滑油回流不足是造成这一现象的主要原因。而由图 8(e)~图 8(h) 可见,相同工况下集油表面的油池分布范围有所提高,即使在高转速时集油表面仍能保证润滑油供应。

为详细描述集油表面随转速变化对润滑状态的改善效果,对不同转速下原始和 D3 集油表面的最小膜厚值进行了对比,如图 9 所示。可以看出,在 25 r/min 时

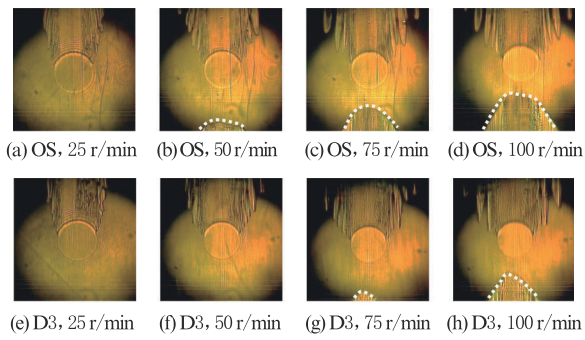


图 8 两表面光干涉图对比

Figure 8 Comparison of optical interferograms between two surfaces

集油表面与原始表面的最小膜厚值基本相同,该速度下的接触点往复频率低,原始表面润滑油的回流速度

能够满足接触区润滑油供给。随转速升高,50 r/min 时接触点运动一个周期所用的时间缩短,原始表面出现轻微乏油,集油表面的润滑改善对膜厚增加起到一定效果。然而转速达到 75 r/min,原始表面润滑油在轨道内的挤压流出与毛细回流平衡被打破,大部分挤压出的润滑油无法在接触点下一次到达该位置前回流到接触轨道中,这导致了入口区润滑油供应不足,膜厚相应下降。当转速达到 100 r/min,两表面的膜厚差距进一步加大。集油表面通过抑制润滑油向轨道外铺展,在表面张力差及拉普拉斯压力作用下使挤压至接触区外侧的润滑油加速回流,对限量供油条件下的润滑增效起到了积极作用,油膜厚度显著提升。

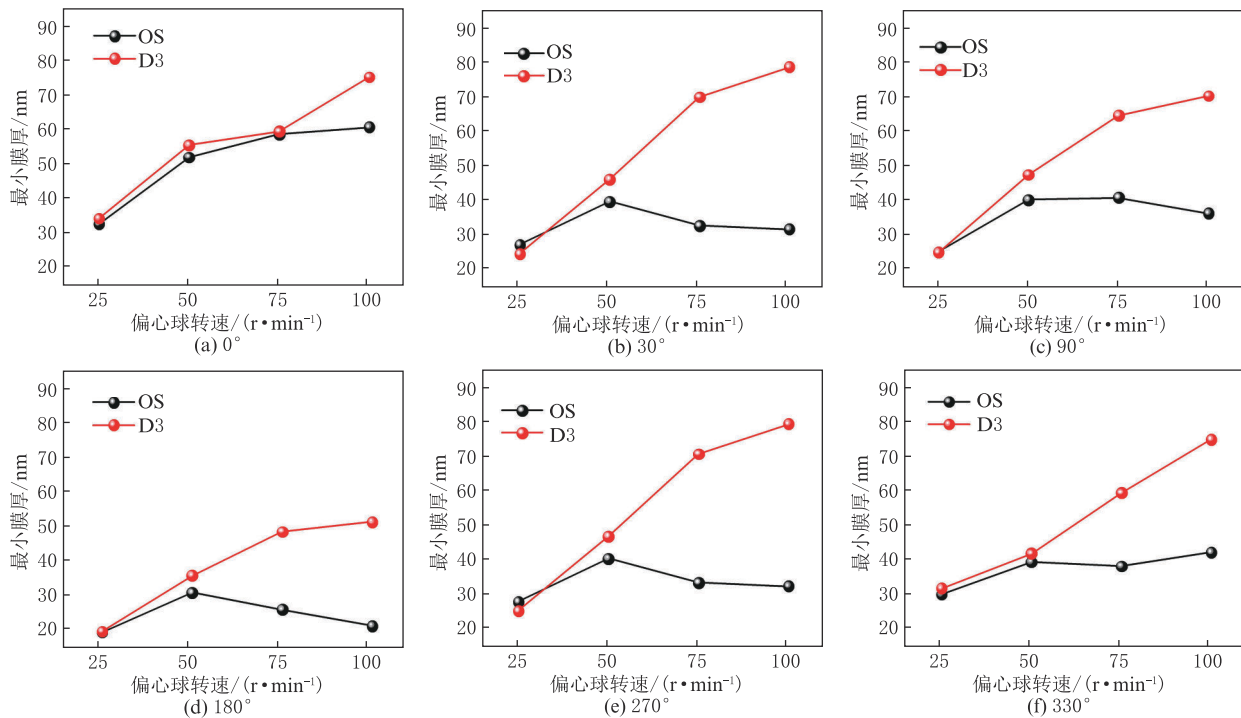


图 9 不同转速下织构表面对膜厚的改善

Figure 9 Improvement of the texture surface on the film thickness at different speeds

总体而言,集油表面在限量供油条件下提升了润滑效果,确保了高速运转时接触区域的润滑油供应。

### 2.3 润滑油黏度对集油轨道性能的影响

不同黏度润滑油的流动性直接影响接触副在接触表面的分布与补充,特别是在限量供油条件下对接触副润滑状态的影响较大,本节试验对比了在不同黏度时,集油表面对润滑性能的提升效果。

图 10 为原始和 D3 集油表面在不同润滑油黏度时的摩擦系数,其中偏心距  $e=4$  mm,转速 75 r/min,初始载荷 10 N,润滑油为 PAO6、PAO10、PAO20,供油量为  $1.0 \mu\text{L}$ 。可以看出,集油表面对低黏度润滑

油 PAO6 的减摩效果较好,各个角度下摩擦系数均有所降低。黏度增加集油表面仍表现出良好的回流效果,PAO10 在两种表面都产生了最低的摩擦系数,但集油表面相对于原始表面的降幅缩小。高黏度润滑油 PAO20 由于其黏滞力大,被挤压流出接触区后回流较为困难,使接触区极易出现乏油现象,但集油表面对接触区润滑油的钉扎约束使润滑油供给得到保障,表现出优异的减摩效果。

图 11 为不同黏度润滑油在两种表面的油膜厚度对比,图 12~图 14 为不同黏度润滑油两种表面的光干涉图对比,其中偏心距  $e=4$  mm,供油量  $1.0 \mu\text{L}$ ,初



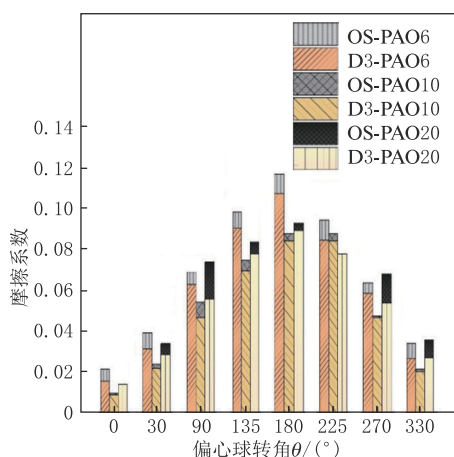


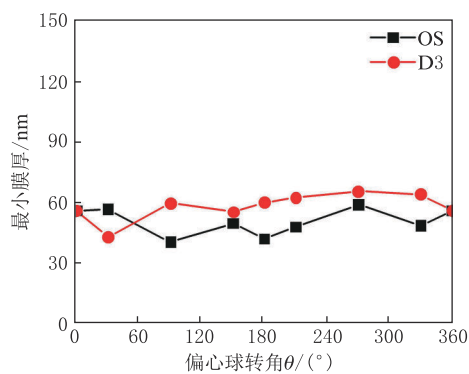
图10 不同黏度下集油轨道的减摩效果

Figure 10 Friction reducing effect of oil collection track under different viscosities

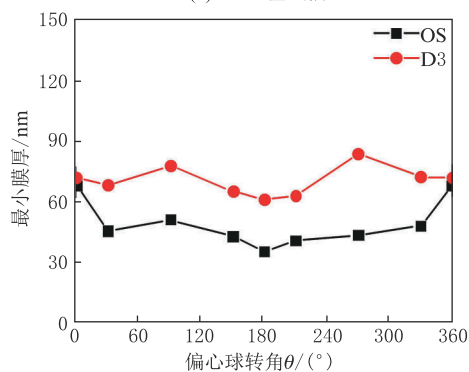
始载荷 10 N, 转速 75 r/min。从图 11 中可以看出, 对于不同黏度润滑油, 集油表面均有一定的膜厚提升效果。在图 12 中, 集油表面提高了低黏度润滑油 PAO6 在接触区附近的油池分布, PAO6 自身具有良好的流动性, 可在球-盘毛细力作用下迅速回流至接触区轨道而不需要过多外力干预, 集油轨道对低黏度油的作用主要为接触区外润滑油的回流, 对膜厚提升不显著。图 13 中, PAO10 润滑油的油池与膜厚改善最为明显, 相对于原始表面, 集油表面的乏油边界距接触区距离增加, 接触区膜厚大幅提高。图 14 中, 高黏度润滑油 PAO20 流动性差, 接触副机械挤压出的润滑油受集油表面钉扎作用, 维持在接触轨道附近不向外流动, 相比于原始表面乏油现象有一定改善, 其对应 PAO20 膜厚增幅相对较小, 其较差的流动性可能限制了集油轨道的效果。试验结果表明, 集油表面在不同黏度润滑油的情况下均展现出对润滑效果的改善, 尤其对 PAO10 效果最为显著。

## 2.4 供油量对集油轨道性能影响

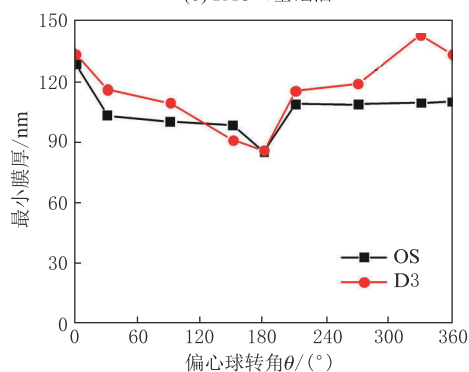
图 15 为不同供油量时原始和 D3 集油表面摩擦系数对比, 其中偏心距  $e=4$  mm, 采用 PAO10 基础油, 初始载荷 10 N, 转速 75 r/min。由图 15(a) 可知, 当供油量为  $2.0 \mu\text{L}$  时, 集油表面摩擦系数略低于普通表面, 在集油表面抑制润滑油外流与加速回流双重作用下, 入口区润滑油供应增加, 不同转角下摩擦系数略有下降。图 15(b) 中, 当供油量减少至  $1.0 \mu\text{L}$  时, 原始表面出现严重乏油, 使接触点粗糙峰接触面积增加, 摩擦系数增大, 受集油表面对润滑油集聚作用的影响, 摩擦系数出现了更大程度的降幅。图 15(c) 中, 供油量继续降低至  $0.5 \mu\text{L}$ , 原始表面的乏油状况加



(a) PAO6基础油



(b) PAO10基础油



(c) PAO20基础油

图 11 原始和 D3 集油表面对不同黏度润滑油膜厚的改善  
Figure 11 Effects of oil collecting surface on improving film thickness with different viscosities

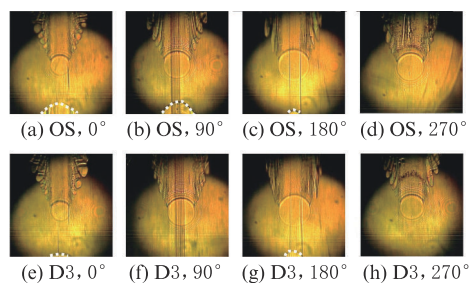


图 12 PAO6 基础油不同表面光干涉图

Figure 12 Optical interference patterns of different surfaces of PAO6

剧, 摩擦系数急剧增大, 特别在  $90^\circ$  与  $270^\circ$  两个位置摩擦系数出现两个尖峰。由于对油池形态的观察是基于光干涉方法, 对钢-钢接触中对油池状态的观测

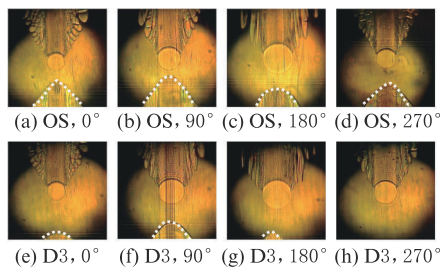


图 13 PAO10 基础油不同表面光干涉图

Figure 13 Optical interference patterns of different surfaces of PAO10

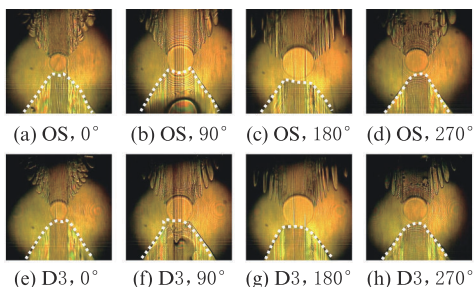


图 14 PAO20 基础油不同表面光干涉图

Figure 14 Optical interference patterns of different surfaces of PAO20

困难,图 16 中给出了钢-蓝宝石接触中在  $270^\circ$  位置处的光干涉图。由图 16 可见油池中的磨屑分布有着明显差异,原始表面产生的磨屑堆积在轨道端点位置,而集油表面磨屑被推离接触轨道。同理可推断在钢-钢接触副中,供油量减少使得材料表面粗糙峰接触面积增大,磨损形成磨屑残留在油池中, $90^\circ$  与  $270^\circ$  分别是接触点往复行程的两个端点,接触点移动方向瞬间改变使得残留在油池中的磨屑在此处堆积,加剧了两个位置的磨损,摩擦系数增加。集油表面对润滑油向轨道内的约束作用使两个位置油池面积与厚度增加,足量的润滑油供给可以将磨屑推离接触区轨道起到清洁作用,降低接触副摩擦系数的同时减少进一步磨损。

图 17~图 19 分别为  $2.0 \mu\text{L}$ 、 $1.0 \mu\text{L}$ 、 $0.5 \mu\text{L}$  供油量下原始和 D3 集油表面的光干涉图。图 20 为不同供油量时原始和 D3 集油表面膜厚对比。其中偏心距  $e=4 \text{ mm}$ ,采用 PAO10 基础油,初始载荷  $10 \text{ N}$ ,转速  $75 \text{ r/min}$ 。由图 17 可知,当润滑油供应量为  $2.0 \mu\text{L}$  时集油表面在一定程度上增大了入口区油池的面积,但图 20(a)中各转角的膜厚未明显增加,这表明在此供油量下,入口区出现的乏油未对接触区膜厚产生显著影响。由图 18 可知,当润滑油供应量减少至  $1.0 \mu\text{L}$  时,原始表面入口区油池边界进一步缩小,而集油表面对润滑油的回流作用仍可在入口区保持足够的润滑油供应,由图 20(b)可知,集

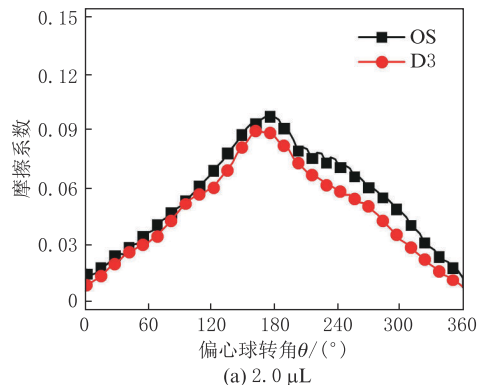
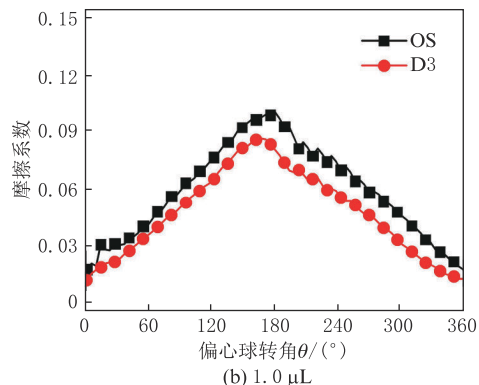
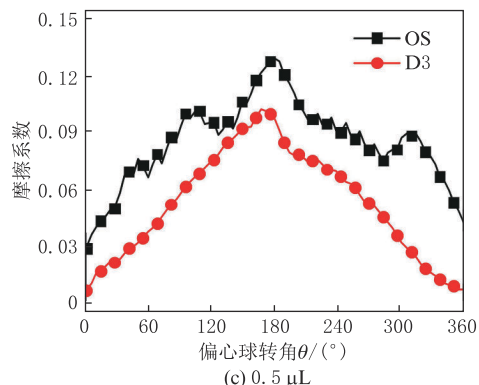
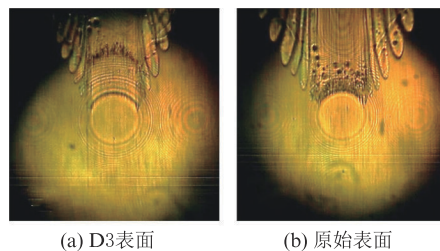
(a)  $2.0 \mu\text{L}$ (b)  $1.0 \mu\text{L}$ (c)  $0.5 \mu\text{L}$ 

图 15 不同供油量时集油轨道减摩情况

Figure 15 Friction reduction of the oil collection track at different oil supply rates



(a) D3 表面

(b) 原始表面

图 16 原始表面与集油表面在  $270^\circ$  位置处的油池Figure 16 Oil pool distribution on the original surface and oil collection surface at  $270^\circ$ 

油表面的膜厚值相应升高。这表明集油表面可以在低润滑油供应量对接触副内的润滑性能产生显著影响。由图 19 可知,当润滑油供应量继续降至  $0.5 \mu\text{L}$  时,集油表面的润滑改善效果并不显著。这是由于



供油量过低且集油表面设计的轨道宽度超过两侧油池宽度,集油表面对润滑油的回流效果降低。此时乏油边界开始侵入接触区,两种表面的膜厚差异缩小,如图 20(c)所示。也就是说在极低供油量情况下,集油表面的设计不足以维持良好的集油性能。

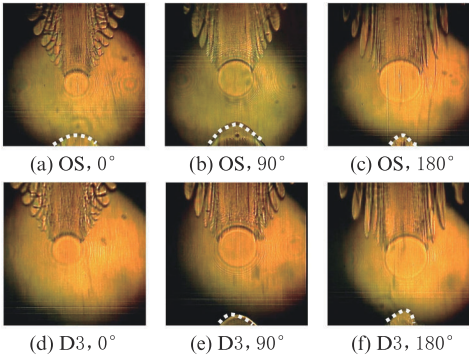


图 17 2.0  $\mu\text{L}$  供油量下光干涉图

Figure 17 Optical interference patterns under 2.0  $\mu\text{L}$  fuel supply amount

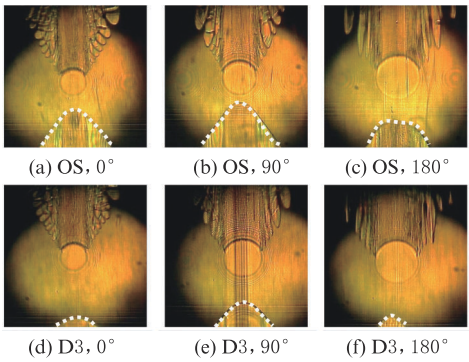


图 18 1.0  $\mu\text{L}$  供油量下光干涉图

Figure 18 Optical interference patterns under 1.0  $\mu\text{L}$  fuel supply amount

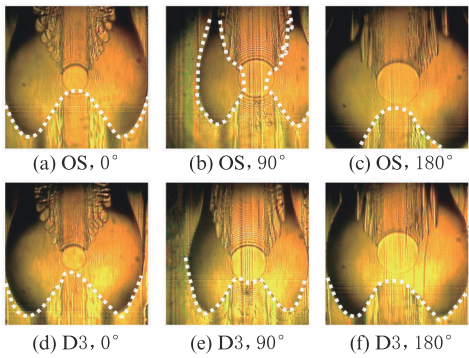


图 19 0.5  $\mu\text{L}$  供油量下光干涉图

Figure 19 Optical interference patterns under 0.5  $\mu\text{L}$  fuel supply amount

3 结论

(1) 集油表面改善了凸轮-挺柱副的润滑性能,

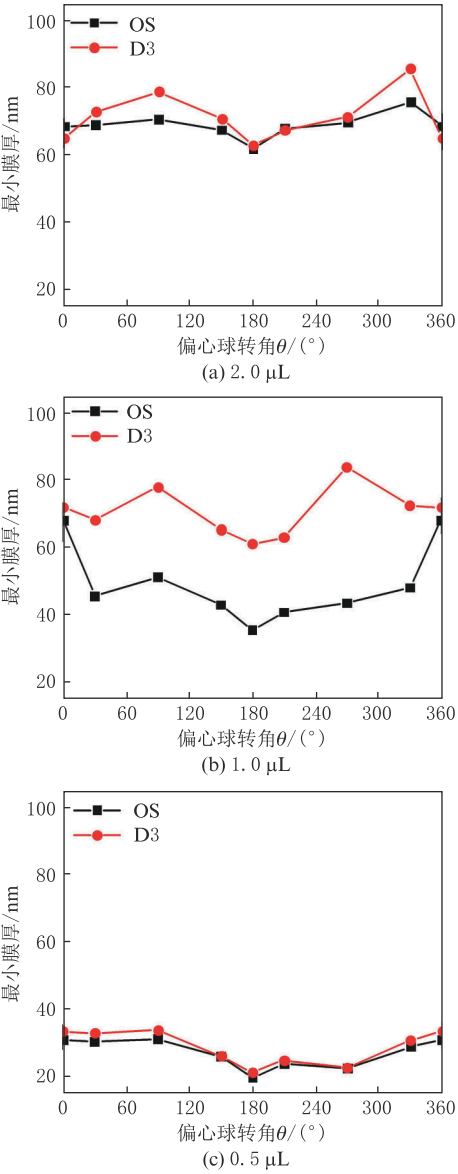


图 20 不同供油量时两表面膜厚对比

Figure 20 Comparison of film thicknesses on the two surfaces with different oil supply amounts

通过钉扎作用、表面张力及拉普拉斯压力,阻挡润滑油流失并促进了回流,确保了入口区的供油。降低了接触副之间的摩擦系数并提高了油膜厚度。

(2) 亲油轨道宽度影响集油效果。轨道宽度应小于接触区油池宽度,以最大限度实现润滑剂回流,避免润滑油甩出。

(3) 偏心球转速、润滑油黏度、供油量对集油效果有影响,转速升高需要润滑油具备更快的回流速度,而集油表面可以有效提高其回流速度;集油表面对低黏度润滑油有更好的回流,而高黏度油主要受钉扎作用影响;供油量可满足接触区需求时集油轨道带来的提升作用不明显,当供油量极低使油池宽度小于集油轨道宽度时集油轨道不再发挥作用。

## 参考文献:

- [1] HAMILTON G M. The hydrodynamics of a cam follower[J]. Tribology International, 1980,13(3):113 - 119.
- [2] DOWSON D, HARRISON P, TAYLOR C M, et al. Experimental observation of lubricant film state between a cam and bucket follower using the electrical resistivity technique [C]//Proceedings of the Japan International Tribology Conference. Nagoya:Japanese Society of Tribologists, 1990:119 - 124.
- [3] SANSONE P, LAVELLA M. Friction dissipation in reciprocating internal combustion engines: cam tappet contact [C/OL]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2021,1038(1):012041 (2020-09-02) [2024-02-27]. DOI:10.1088/1757-899X/1038/1/012041.
- [4] LYU B, MENG X H, ZHANG R, et al. A comprehensive numerical study on friction reduction and wear resistance by surface coating on cam/tappet pairs under different conditions[J/OL]. Coatings, 2020, 10 (5) : 485 (2020-05-18) [2024-02-27]. DOI: 10.3390/coatings10050485.
- [5] BAIR S, GRIFFIOEN J A, WINER W O. The tribological behavior of an automotive cam and flat lifter system[J]. Journal of Tribology, 1986,108(3):478 - 486.
- [6] BAŞ H, BIYIKLIOĞLU A, CUVALCI H. A new test apparatus for the tribological behavior of cam mechanisms[J]. Experimental Techniques, 2003,27:28 - 32.
- [7] CIULLI E, FAZZOLARI F, PUGLIESE G. Contact force measurements in cam and follower lubricated contacts[J/OL]. Frontiers in Mechanical Engineering, 2020,6:601410(2020-11-13)[2024-02-27]. DOI:10.3389/fmech.2020.601410.
- [8] NISHIKAWA H, HANDA K, KANETA M. Behavior of EHL films in reciprocating motion [J]. JSME International Journal: Series C, Dynamics, Control, Robotics, Design and Manufacturing, 1995,38(3):558 - 567.
- [9] WEDEVEN L D, EVANS D, CAMERON A. Optical analysis of ball bearing starvation [J]. Journal of Lubrication Technology, 1971,93(3):349 - 361.
- [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] GUANGTENG G, SPIKES H A. The role of surface tension and disjoining pressure in starved and parched lubrication [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 1996,210(2):113 - 124.
- [12] PEMBERTON J, CAMERON A. A mechanism of fluid replenishment in elastohydrodynamic contacts[J]. Wear, 1976, 37(1):185 - 190.
- [13] CHIU Y P. An analysis and prediction of lubricant film starvation in rolling contact systems[J]. ASLE Transactions, 1974,17(1):22 - 35.
- [14] GAO M, LIANG H, WANG W Z, et al. Oil redistribution and replenishment on stationary bearing inner raceway [J/OL]. Tribology International, 2022, 165: 107315 (2021-10-16) [2024-02-27]. DOI:10.1016/j.triboint.2021.107315.
- [15] NAGATA Y, KALOGIANNIS K, GLOVNEA R. Track replenishment by lateral vibrations in grease-lubricated EHD contacts[J]. Tribology Transactions, 2012,55(1):91 - 98.
- [16] 栗心明,周广运,郭峰,等. 异向卷吸作用下润滑剂回填增强效应试验研究[J]. 机械工程学报,2020,56(17):225 - 232.
- LI X M, ZHOU G Y, GUO F, et al. Experimental investigation into enhancement of lubricant replenishment induce by angled entrainment[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020,56(17):225 - 232.
- [17] ALI F, KRUPKA I, HARTL M. Enhancing the parameters of starved EHL point conjunctions by artificially induced replenishment [J]. Tribology International, 2013, 66:134 - 142.
- [18] 梁鹤,李闯,王文中,等. 球盘点接触区外润滑油分布的试验研究[J]. 摩擦学学报,2022,42(5):945 - 953.
- LIANG H, LI C, WANG W Z, et al. Experimental research on the lubricant distribution out of the ball-on-disc point contact zone[J]. Tribology, 2022,42(5):945 - 953.
- [19] CHEN H W, ZHANG P F, ZHANG L W, et al. Continuous directional water transport on the peristome surface of Nepenthes alata[J]. Nature, 2016,532(7597):85 - 89.
- [20] SHANG L R, YU Y R, GAO W, et al. Bio-inspired anisotropic wettability surfaces from dynamic Ferrofluid assembled templates [J/OL]. Advanced Functional Materials, 2018, 28(7):1705802 (2017-12-15)[2024-02-27]. DOI:10.1002/adfm.201705802.
- [21] LIU C R, SUN J, LI J, et al. Long-range spontaneous droplet self-propulsion on wettability gradient surfaces[J/OL]. Scientific Reports, 2017, 7(1):7552 (2017-08-08) [2024-02-27]. DOI: 10.1038/s41598-017-07867-5.
- [22] 周易,朱建荣,孙楠楠,等. 偏心圆凸轮油膜润滑测试系统[J]. 润滑与密封,2020,45(5):72 - 78.
- ZHOU Y, ZHU J R, SUN N N, et al. Lubricated film test system for cam-tappet contact [J]. Lubrication Engineering, 2020,45(5):72 - 78.
- [23] 刘海超,郭峰,赵国全. 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 H C, GUO F, ZHAO G L. A dichromatic interference intensity modulation approach to lubricating film thickness measurement[J]. Tribology, 2015,35(3):282 - 287.
- [24] 周广梅,郭峰,李宏升. 润滑油膜双色光干涉测量系统的特性研究[J]. 光学学报,2012,32(3):113 - 118.
- ZHOU G M, GUO F, LI H S. Dichromatic interferogram of lubricant film measurement [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3):113 - 118.