

摩擦学学报

TRIBOLOGY



滑滚条件下定量润滑状态与润滑剂回填效应试验观察

江楠, 栗心明, 杨萍, 郭峰

Observation of Lubrication State and Lubricant Replenishment under Sliding-Rolling Motions with Single-Charging Amount

JIANG Nan, LI Xinming, YANG Ping, GUO Feng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2020045>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

表面速度异向条件下定量脂润滑特性试验观察

Experimental Observation of Single-Charging Grease Lubrication with Different Directions of Surface Motion

摩擦学学报. 2019, 39(5): 635 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018200>

不同滑滚比下润滑油膜流变特性试验观察与数值模拟

Experimental Observation and Numerical Simulation of Rheological Properties of Lubricating Films under Different Sliding-Rolling Ratios

摩擦学学报. 2020, 40(2): 158 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2019100>

轴承内部润滑油分布及回流的试验观察与研究

Experimental Observation and Investigation of oil Distribution and Replenishment in a Rolling Bearing Model

摩擦学学报. 2020, 40(4): 450 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2019180>

纳米级稠化剂颗粒沉积膜在乏脂润滑中的作用机制研究

Mechanism of Nano-Scale Thickeners Deposited Film in Starved Grease Lubrication

摩擦学学报. 2017, 37(6): 725 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2017.06.003>

混合/流体润滑状态下原位离子液体添加剂的摩擦学性能研究

Tribological Properties of In-situ Ionic Liquid Additives for Mixed and Hydrodynamic Lubrication

摩擦学学报. 2018, 38(3): 342 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018.03.012>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16078/j.tribology.2020045

滑滚条件下定量润滑状态与润滑剂回填效应试验观察

江楠, 栗心明*, 杨萍, 郭峰
(青岛理工大学机械与汽车工程学院, 山东 青岛 266520)

摘要: 采用球-盘点接触光干涉油膜与摩擦力测量装置观察了滑滚条件下接触区润滑状态与润滑剂回填效应。结果显示, 在定量供油和恒定滑滚比下, 不同供油量使接触区呈现出从边界润滑状态向弹流润滑状态的不同转化趋势, 非接触回填机制是其诱因; 在恒定卷吸速度下, 随着滑滚比从负值向正值变化, 入口距离减小、乏油宽度增加, 接触区两表面润滑剂回填时间的差别是其主要原因; 完全乏油条件下, 接触回填机制对局部润滑油膜建立发挥明显作用。

关键词: 滑滚比; 定量润滑; 乏油; 润滑剂回填; 润滑状态

中图分类号: TH117.22

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2021)01-0009-08

Observation of Lubrication State and Lubricant Replenishment under Sliding-Rolling Motions with Single-Charging Amount

JIANG Nan, LI Xinming*, YANG Ping, GUO Feng

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

Abstract: Using a ball-on-disc film and friction measurement apparatus, the lubrication states, and lubricant replenishment behaviors were experimentally observed under sliding-rolling conditions with single-charging amount. The results showed that for a fixed sliding-rolling-ratio (SRR), the transitions of contacts from boundary lubrication to elastohydrodynamic lubrication (EHL) were found, the trends of which were highly dependent on the lubricant charging amount. The out-of-contact replenishment mechanism was responsible for the transitions. Given entrainment velocity, the inlet distance decreased and starvation width broadened with variations of SRR from a negative value to a positive value, which was attributed to the large differences of replenishment time. Under fully starvation states, the contact replenishment mechanism played a significant role in the establishment of local EHL films.

Key words: sliding-rolling-ratio; single-charging lubrication; starvation; lubricant replenishment; lubrication states

入口区润滑剂特性(如黏度、黏压系数)、运动工况(如速度、载荷)、接触副材料及几何外形, 共同决定了弹性流体动力润滑(弹流润滑)的油膜厚度^[1]。但上述因素与油膜厚度之间的关系建立在充分供油条件下。事实上, 运行于高速^[2]、高温等苛刻工况及脂润滑方式^[3]

下的诸多零部件, 往往因入口区供油不足而处于乏油润滑状态下, 即入口区供油量是润滑油膜建立另一关键因素。Wedeven等^[4]首次用光干涉技术对乏油润滑进行了观察, 以入口距离来量化入口供油状态, 建立了入口距离与润滑油膜减小之间的关系。此后, 乏油

Received 25 March 2020, revised 31 May 2020, accepted 24 June 2020, available online 28 January 2021.

*Corresponding author. E-mail: mexinmingli@163.com, Tel: +86-18660261702.

The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (51875299, 51775286) and the Natural science foundation of Shandong province (ZR2019MEE044).

国家自然科学基金面上项目(51875299, 51775286)和山东省自然科学基金面上项目(ZR2019MEE044)资助。

润滑受到关注,国内外学者围绕乏油产生机理^[4]、乏油计算方法^[5-6]和乏油程度判定^[7]等开展了大量的试验与理论研究。

在乏油润滑试验研究中,大都采用定量限制性供油的方式,以便于观察乏油的产生过程^[4]。例如,纯滚条件下定量脂润滑试验研究表明^[8],润滑油膜可在较短时间内衰减到完全乏油状态,这增加了接触副润滑失效的潜在风险。然而,在实际工程中的零部件,如滚动轴承在乏油状态下仍可长时间运行,且因入口润滑剂量减少而降低了入口逆流剪切,对轴承滚动力矩起到抑制作用。此外,乏油下油膜厚度的减小,增大了滚动体与内外圈之间的剪切率,降低了滚动体的打滑。乏油润滑的基础研究与工程应用的差别,暗示了运转的滚动轴承内存在润滑剂回填潜在机制。如滚动轴承保持架间隙^[9]、载荷变化^[10]和启停^[11]等均会影响润滑剂的回填与乏油状态。Nagata等^[12]在试验中发现,添加横向的震动后,膜厚会增加30%~35%,证实横向震动有利于润滑脂的回流。在近期研究中,周广运等^[8]观察到表面速度异向可增强润滑脂的回填;Li等^[13]通过制备润湿性梯度表面也实现了润滑剂的有效回填。

以往的乏油润滑研究集中于纯滚动运行工况,而滚动轴承实际过程中存在滚动体打滑现象,即接触副将处于不同滑滚状态下。当接触副两表面因滑滚而出现速度差时,滚道两侧润滑剂的回填时间将发生变化,进而对入口供油状态产生影响。目前关于滑滚条件下乏油润滑研究有限,特别是缺少了对入口区润滑剂分布状态的定量观察。本文作者采用球-盘接触光干涉润滑油膜测量装置,对入口区供油状态、润滑油膜厚度和摩擦力进行观察和分析,以揭示滑滚条件下乏油润滑特征,为滚动轴承润滑状态分析提供试验依据。

1 试验部分

1.1 试验装置

试验在球-盘点接触润滑油膜与摩擦力测量装置上进行。如图1所示,玻璃盘与钢球组成接触副,由于玻璃盘与钢球独立驱动,故通过控制电机转速即可在接触点获得不同滑滚状态。接触区入口润滑剂分布及接触区内油膜干涉图,经显微镜放大后被CCD捕获并储存。采用双色光调制光强技术对干涉图片进行离线处理^[14],以获得油膜厚度和油膜外形。为了实现滑滚

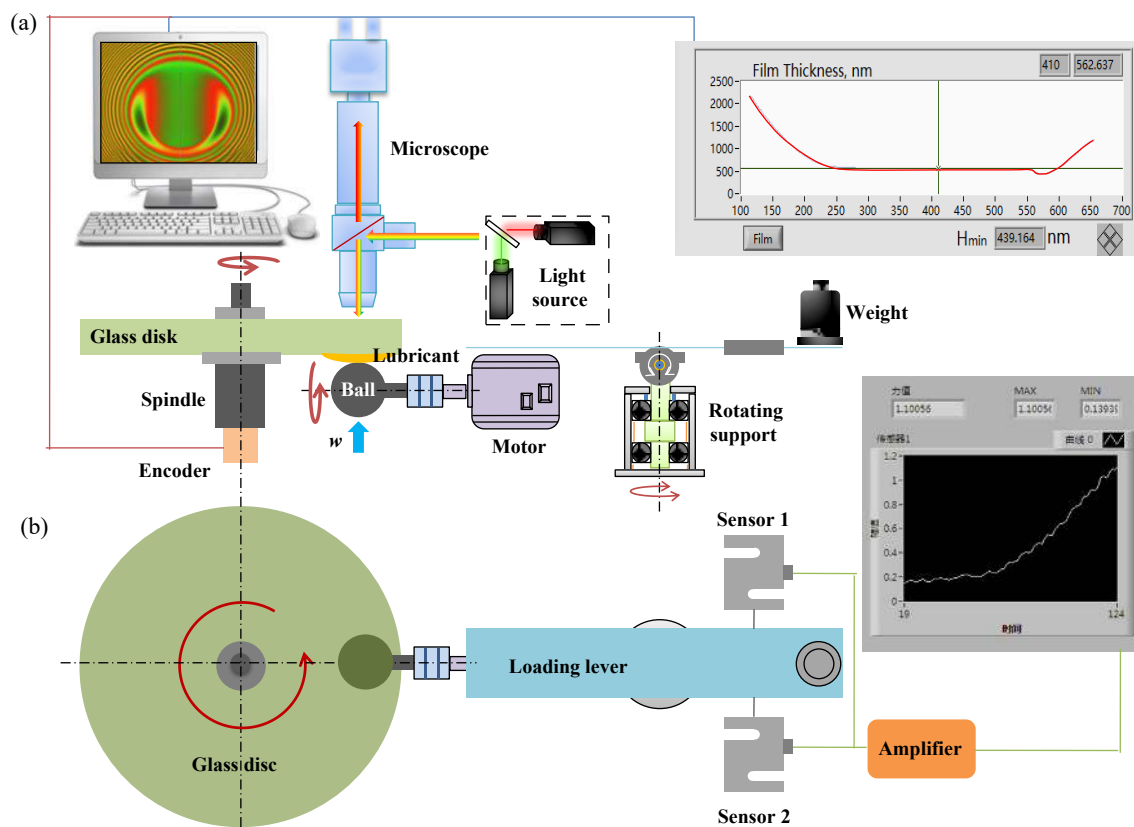


Fig. 1 Structure of apparatus and measurement scheme

图1 测量装置结构图及测量原理

状态下摩擦力的测量, 钢球驱动电机及加载杠杆置于回转支撑上, 当接触副两表面存在滑差时, 摩擦力被限制加载杠杆回转的两个压力传感器捕获. 试验前对回转支撑轴承产生的系统误差进行标定, 并施加预拉力抵消系统误差, 以保证测量结果准确性.

1.2 试验条件

试验所用玻璃盘为K9玻璃, 直径为150 mm, 接触盘面镀有析光Cr膜; 钢球为G5精度, 直径为25.4 mm. 玻璃盘和钢球的表面粗糙度分别约为20 nm和14 nm. 试验条件列于表1中. 为了定量表示不同滑滚状态, 定义滑滚比 $\zeta = \Delta u/u_e$, $\Delta u = (u_d - u_b)$; 其中 $u_e = (u_d + u_b)/2$ 为卷吸速度, u_d 和 u_b 分别为玻璃盘和钢球接触点线速度. 为了考察恒定卷吸速度下滑滚比对润滑油膜的影响, 试验设定卷吸速度为 $u_e = 128 \text{ mm/s}$, 滑滚比在-1.0至1.0的范围内变化, 与滑滚比对应的盘速和球速值列于表2中. 依据滑滚比定义, 当盘速大于球速时滑滚比为正值, 反之为负值. 试验采用了PAO4、PAO10和PAO40三种不同黏度的润滑油, 其性质列于表3中. 试验前, 通过试验装置平移单元确保每次供油下接触点线速度与滑滚比相等. 每次布油前, 使钢球与玻璃盘处于刚刚接触状态, 通过纯滚动的方式将润滑油布置到玻璃盘轨道上.

2 试验结果

2.1 恒定滑滚比下供油量对润滑油膜及摩擦系数的影响

图2给出了恒定滑滚比 $\zeta = 0.6$ 条件下, 供油量分别为5、10、20和100 μL 时油膜干涉图随速度的变化规律.

表 1 试验条件

Parameters	Specification
Entrainment speed, $u_e/(\text{mm/s})$	2 ~ 512
Sliding-rolling-ratio, ζ	-1.0 ~ 1.0
Load/N, Maximum Hertz pressure/GPa	32, 0.49
Lubricant amount/ μL	5, 10, 20, 100
Ambient temperature/ $^{\circ}\text{C}$	20 $\pm$ 1

表 2 不同滑滚比下的盘速和球速, $u_e = 128 \text{ mm/s}$

Table 2 Disc speed and ball speed under different sliding-rolling ratios, $u_e = 128 \text{ mm/s}$							
x	-1.0	-0.6	-0.2	0	0.2	0.6	1.0
$u_d/(\text{mm/s})$	64.0	89.6	115.2	128.0	140.8	166.4	192.0
$u_b/(\text{mm/s})$	192.0	166.4	140.8	128.0	115.2	89.6	64.0

表 3 试验用润滑油性质

Table 3 Properties of lubricants used in experiments		
Lubricant	Viscosity(Pa·s@20 $^{\circ}\text{C}$)	Density(kg/m^3 @ 20 $^{\circ}\text{C}$)
PAO4	0.03	0.820
PAO10	0.13	0.835
PAO40	0.78	0.842

图2中入口区域的白色虚线为入口油-气乏油边界, 该边界与接触区边缘的距离 l_1 可用来量化乏油程度^[4], 即 l_1 越小乏油程度越严重. 可以看出, 在供油量为5 μL 的条件下, 当卷吸速度为 $u_e = 64 \text{ mm/s}$ 时, 在试验可视范围内已经出现乏油边界, 并对接触区外形与膜厚产生微弱影响; 在卷吸速度为 $u_e = 96 \text{ mm/s}$ 时乏油边界已到达接触区边界, 即 $l_1 = 0$; 当 $u_e \geq 128 \text{ mm/s}$ 时, 乏油边

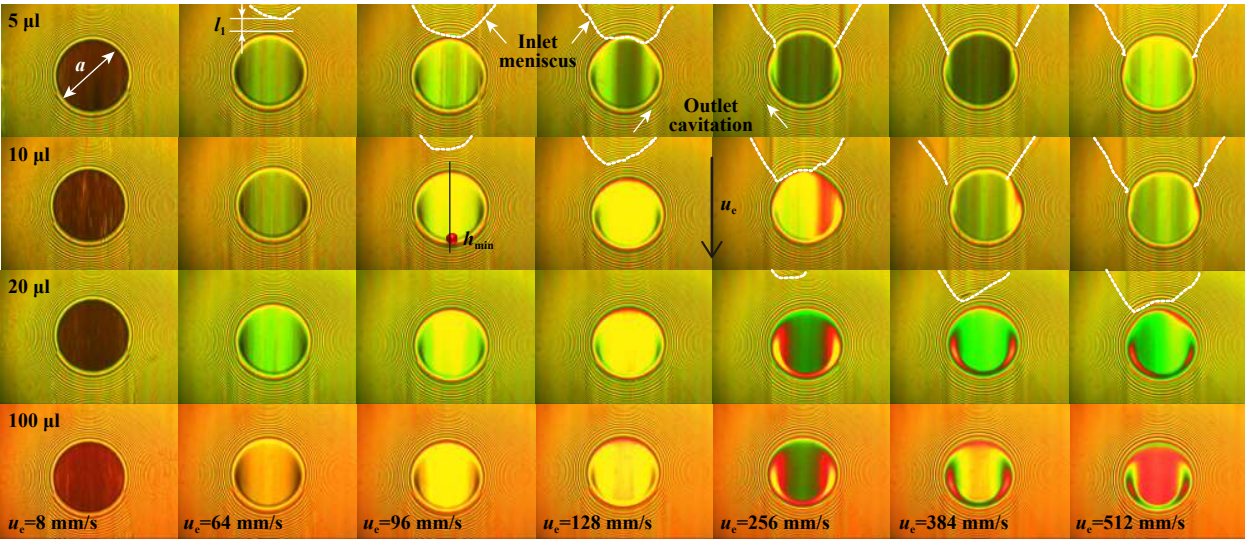


Fig. 2 Variations of images with entrainment velocities under different lubricant charging amount, PAO10, $\zeta = 0.6$
图 2 不同供油量下油膜干涉图随卷吸速度变化, PAO10, $\zeta = 0.6$

界逐渐与接触区边界交叉,且接触区外形呈现“梨”形,该条件下触区中央油膜厚度明显下降,且小于接触区两侧膜厚.随着供油量的增加,各速度下乏油程度也逐渐减弱.在供油量为10和20 μL 的条件下,当速度分别 $u_e = 128 \text{ mm/s}$ 和 $u_e = 384 \text{ mm/s}$ 时乏油边界靠近接触区并开始对膜厚及外形产生影响.在供油量为100 μL 的条件下,在当前速度范围内并未观察到入口乏油边界,表明该供油量下接触区始终处于富油润滑状态下.

为了定量分析恒定滑滚比不同供油量对润滑油膜的影响,图3给出了油膜厚度、摩擦系数和特征膜厚(即膜厚比 λ ,其值为最小膜厚 $h_{\min}$ 与两表面粗糙度的合成均方根偏差的比值)随卷吸速度的变化曲线.因在完全乏油条件下,接触区中心与出口颈缩处最小膜厚趋向一致,因而图3中采用了最小膜厚 $h_{\min}$,即图2干涉图中出口颈缩处(红色斑点)所示的膜厚.图3膜厚曲线显示,在供油量为5、10和20 μL 下,膜厚随速度增加偏离100 μL 下的油膜曲线,其膜厚偏离点对应的临界速度分别为64、160和448 mm/s.在图2干涉图中可以看出,处于临界速度时乏油边界到达接触区边缘,导致了油膜厚度下降.当供油量为100 μL 时,在测量速度范围内膜厚随着速度的增加而单调增加.

由图3的摩擦系数曲线可以看出,在供油量为5和10 μL 的条件下,摩擦系数随着速度增加呈现先减小再增大的趋势,该趋势与Stribeck曲线变化规律类似,表明在速度增大过程中接触区润滑状态发生了转化.为了定量界定润滑状态,图3还给出了供油量5 μL 下的特征膜厚 λ 随速度变化曲线,图中以 λ_5 表示.由图3中数据可知,当 $2 \text{ mm/s} \leq u_e \leq 8 \text{ mm/s}$ 时, λ_5 的数值从0.26增至0.78,表明接触区处于边界润滑润状态下;当 $8 \text{ mm/s} < u_e \leq 96 \text{ mm/s}$ 时, λ_5 的数值从1.07增加2.33,表明接触区处于混合润滑状态下;当 $u_e > 96 \text{ mm/s}$, λ_5 的数值达到3,表明接触区接近弹流润滑状态,因乏油使最小膜厚几乎不发生变化,因而特征膜厚曲线趋向定值.由于接触区油膜所承受的剪应变率为两表面滑差($u_d - u_b$)与膜厚的比值,则在定滑滚比条件下低膜厚具有较高的剪应变率,因而图中摩擦系数与膜厚呈现出对应关系.例如供油量5 μL 下的低膜厚使得摩擦系数整体较高;在较高速度下5与10 μL 的膜厚接近,则摩擦系数也趋向一致.因5 μL 下的特征膜厚数值已达到3,则不难推测其它较大供油量下的特征膜厚将超过3,表明接触区为弹流润滑状态,该状态从图2的干涉图上也可看出.

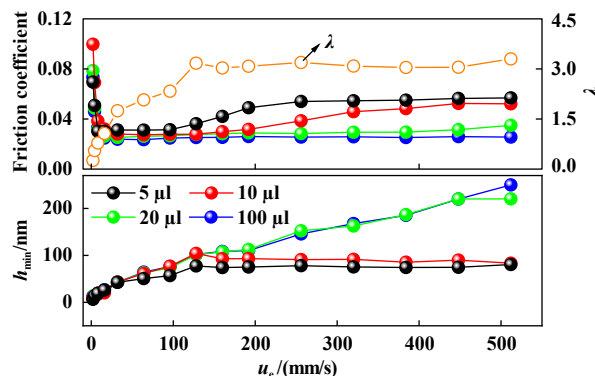


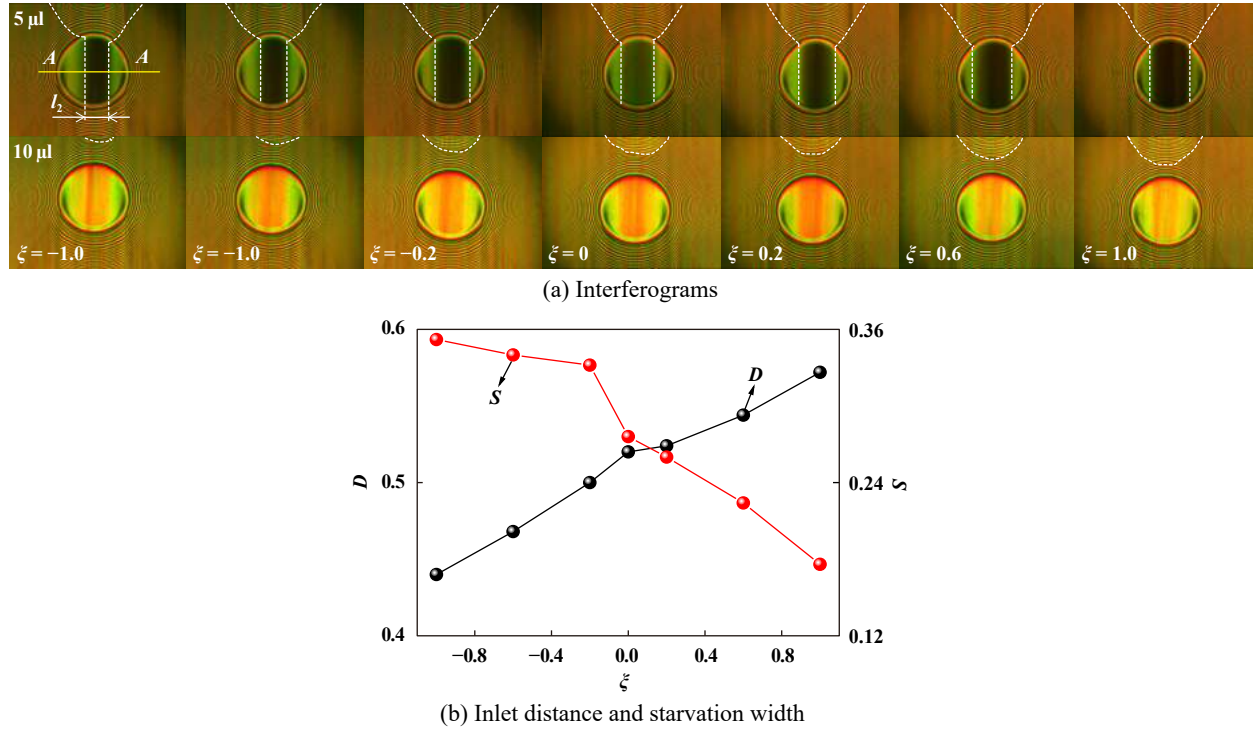
Fig. 3 Variations of film thickness, friction coefficient and specific film thickness with entrainment velocities under different lubricant charging amount, $\zeta = 0.6$

图3 不同供油量下膜厚、摩擦系数与特征膜厚随卷吸速度变化, PAO10, $\zeta = 0.6$

在供油量为20 μL 条件下,因乏油在较高速度下才出现且乏油程度较轻,使得摩擦系数升高的趋势不明显.在供油量为100 μL 的全膜润滑状态下,接触区油膜承受的剪应变率较低,在恒定滑滚比下接触副两表面速度差 Δu 和膜厚均随卷吸速度增加,且将受到一定程度的剪稀效应和热效应影响,因而摩擦系数随速度增加趋向于定值.尽管供油量20 μL 仅为供油量100 μL 的20%,但两者测量结果接近,表明达到相同润滑效果时存在最佳供油量.

2.2 恒定卷吸速度下滑滚比对入口供油状态的影响

为了观察滑滚比对润滑油膜的影响,图4给出了恒定卷吸速度 $u_e = 128 \text{ mm/s}$ 下润滑油膜随滑滚比的变化规律.图4中滑滚比在-1.0至1.0的范围内变化,各滑滚比下盘速和球速数值列于表2中.由图2~3中的结果可知,供油量为20 μL 时接触区在较大的速度范围内处于全膜润滑状态下,因而图4仅给出了供油量为5和10 μL 下的试验结果.从图4(a)的干涉图上可以看出,在供油量为5 μL 条件下,入口乏油边界已与接触区边界交叉,受到乏油影响接触区中央区域的油膜“塌陷”而明显低于两侧膜厚,这与充分供油条件下接触区典型油膜分布特征相反.图5定量给出了垂直卷吸方向(图4干涉图A-A方向)的乏油下油膜外形,可明显看出接触区两侧油膜较高的特征.但图4(a)也显示,不同滑滚比条件下接触区中央区域的宽度不同.这与入口区润滑油分布状态有关,即入口乏油边界与接触区边界交叉范围越大,接触区内“塌陷”区域越大.为量化这一变化趋势,图4(a)中定义了乏油宽度 l_2 ,并定义无量纲参数 $D = l_2/a$ (a 为赫兹接触直径)来评价入口供油状态及乏油程度.图4(b)给出了乏油宽度 D 随滑滚比 ζ 的变化曲

Fig. 4 Influence of sliding-rolling-ratio on films, PAO10, $u_e = 128$ mm/s图 4 滑滚比对润滑油膜的影响, PAO10, $u_e = 128$ mm/s

线, 可见随着滑滚比从-1.0变化到1.0, 乏油宽度 D 基本呈现出线性增加. 从图5的油膜外形上同样可看出正滑滚比下的乏油宽度较大. 显然, D 的数值越大, 入口供油状态越差、乏油程度越严重.

在供油量为10 μL 的条件下, 由图4(a)可见入口乏油边界未到达接触区边界, 接触区内油膜无明显变化, 乏油程度明显减弱. 但随着滑滚比从-1.0变化到1.0, 乏油边界与接触区边界的距离越来越小. 图4(b)定量给出了无量纲乏油距离 $S = l_1/a$ 随滑滚比的变化趋势, 可明显看出 S 随滑滚比增加而逐渐下降. 尽管接

触区内油膜变化不大, 但入口距离 S 的减小反映了入口区供油状态变差, 这与供油量为5 μL 的观察类似.

3 机理分析

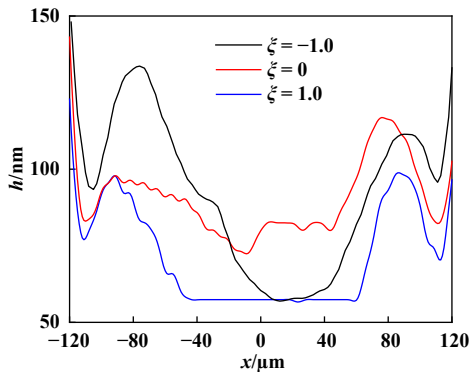
3.1 供油量和速度对润滑状态的影响机理

由上述试验观察显示在定量供油条件下, 取决于供油量、速度及滑滚比的大小, 接触区入口供油状态、乏油程度和接触区润滑状态呈现出不同变化趋势. 在本质上, 入口区油量及分布形态决定了接触区油膜厚度及局部分布. 试验过程中, 钢球的滚动将玻璃盘表面上的润滑剂挤压到滚道两侧, 接触区入口油量由玻璃盘与钢球表面粘附油层与滚道两侧润滑剂回填量共同决定, 可用下式表示为

$$h_{\text{inlet}} = h_d + h_b + h_{\text{rep}} \quad (1)$$

式中: h_{inlet} 为入口油量; h_d 和 h_b 分别为玻璃盘和钢球表面粘附油层厚度, 其定义如图6所示; h_{rep} 为滚道两侧润滑剂的回填量. 图6(d)示意了滚道两侧润滑剂的回填机制, 其本质是在表面张力作用下润滑剂向滚道回流, 由于该回填机制在接触副两表面非接触时间内发挥作用, 称为非接触回填^[15-16]. h_{rep} 即为非接触回填量, 可用式(2)表示^[17].

$$h_{\text{rep}} = \frac{k_d \gamma C_d}{2\eta u_d} + \frac{k_b \gamma C_b}{2\eta u_b} \quad (2)$$

Fig. 5 Film profiles under starvation, PAO10, 5 μL , $u_e = 128$ mm/s图 5 乏油条件下接触区油膜外形, PAO10, 5 μL , $u_e = 128$ mm/s

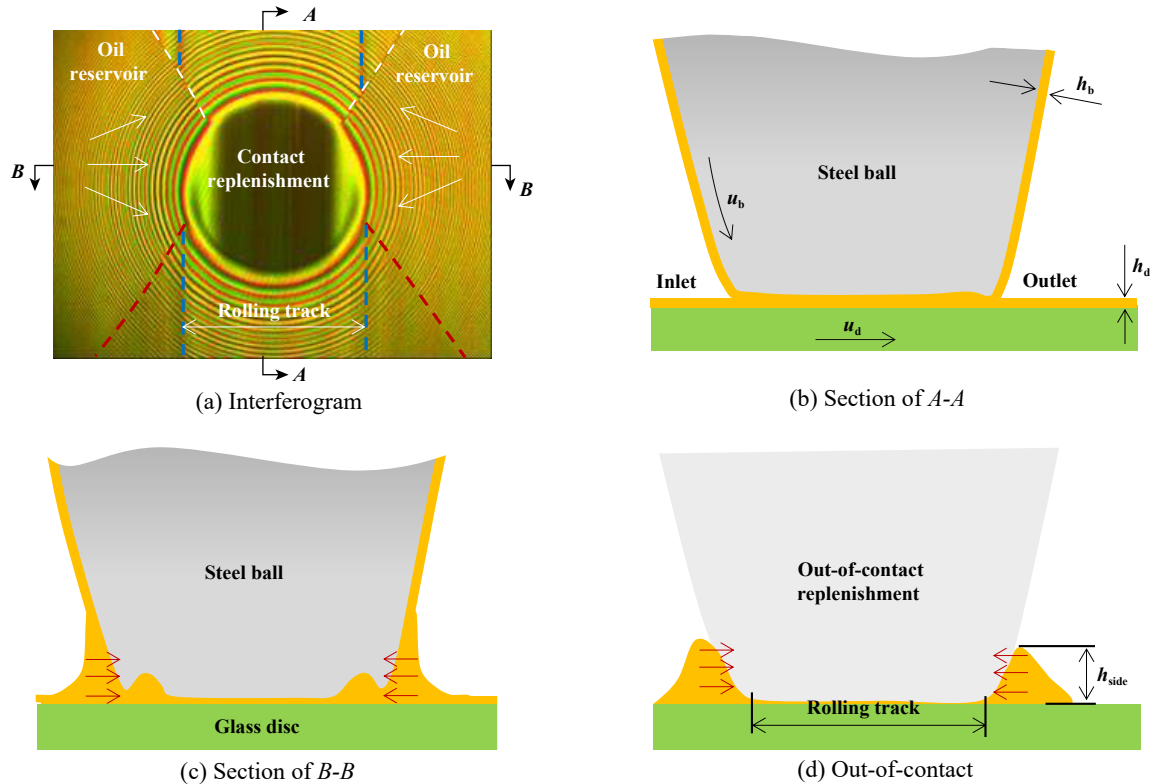


Fig. 6 Mechanisms of starvation and lubricant replenishment

图6 乏油产生机理与润滑剂回填机制

式中: k_d 和 k_b 分别为玻璃盘和钢球表面滚道润滑剂回填系数,其数值取决于滚道两侧的油脊高度 h_{side} [见图6(d)]与赫兹接触直径 a 的比值,可由计算得到; γ 为空气与润滑剂界面的表面张力; η 为润滑剂黏度; C_d 和 C_b 分别为玻璃盘和钢球表面滚道周长. 显然, C_d/u_d 和 C_b/u_b 分别为玻璃盘表面和钢球表面非接触回填时间,可分别记为 t_d 和 t_b .

由上式(1)和(2)可知,当润滑剂供给量较大时,滚道两侧具有较高的油脊高度 h_{side} ,使得(2)中的回填系数较大,相应的润滑剂回填量 h_{rep} 较大,使得入口区具有较多润滑剂的量和较高的油膜厚度. 同时,玻璃盘和钢球表面粘附油层厚度 h_d 和 h_b 由接触区油膜厚度决定,可近似视为接触区油膜中心厚度的一半,则油膜厚度升高可进一步增加入口区油量(因 h_d 、 h_b 和 h_{rep} 在入口区汇合). 因而图2和图3中显示较大供油量对应于较好的润滑状态. 当表面速度增加时,在恒定的滚道周长条件下,接触副两表面的润滑剂回填时间 t_d 和 t_b 减小,将削弱回填量 h_{rep} 及加剧乏油程度,使接触区润滑状态变差、摩擦系数升高,如图2和图3结果所示.

3.2 黏度对润滑剂回填的影响机理

在式(2)还可看出,润滑剂黏度是影响润滑剂回填的另一个重要参数,显然黏度将导致回填量 h_{rep} 减小.

为了观察黏度对润滑剂回填的影响,图7给出了PAO4和PAO40两种黏度下的油膜干涉图. 图7中供油量与图5(a)中的10 μ L供油量一致,且在不同滑滚比下保持与图5(a)具有相近的入口区供油状态(入口距离),以便于对三种黏度下的润滑剂回填特性进行比较.

对比图5(a)和图7干涉图可以看出,三种黏度下相近的入口区供油状态所对应的卷吸速度明显不同. 低黏度润滑剂PAO4和高黏度润滑剂PAO40分别在 $u_e = 488$ mm/s和 $u_e = 8$ mm/s时达到与PAO10相近的状态. 由式(2)可知,若将相近的入口区状态视为相近的润滑剂回填量 h_{rep} ,则在相同回填量条件下高黏度将对应较低的表面速度及卷吸速度,这与图5(a)和图7的试验观察相一致. 简言之,高黏度润滑剂抑制了滚道两侧润滑剂的回填,在低供油量条件下易造成乏油.

3.3 滑滚比对润滑剂回填的影响机理

图5和图7显示,在滑滚比从-1.0变为1.0的过程中,乏油宽度增大或入口距离减小,暗示了入口供油状态变差和乏油程度的加剧. 这可从式(2)中润滑剂回填量 h_{rep} 与表面速度 u_d 和 u_b 的关系进行分析. 试验中,玻璃盘与钢球表面滚道周长比值 $C_d/C_b \approx 5.4$,则玻璃盘与钢球表面润滑剂回填时间比值,如式(3)所示.

$$\frac{t_d}{t_b} = \frac{C_d}{C_b} \frac{C_b}{u_d} \frac{u_b}{u_b} = \frac{C_d}{C_b} \frac{u_b}{u_d} \approx 5.4 \frac{u_b}{u_d} \quad (3)$$

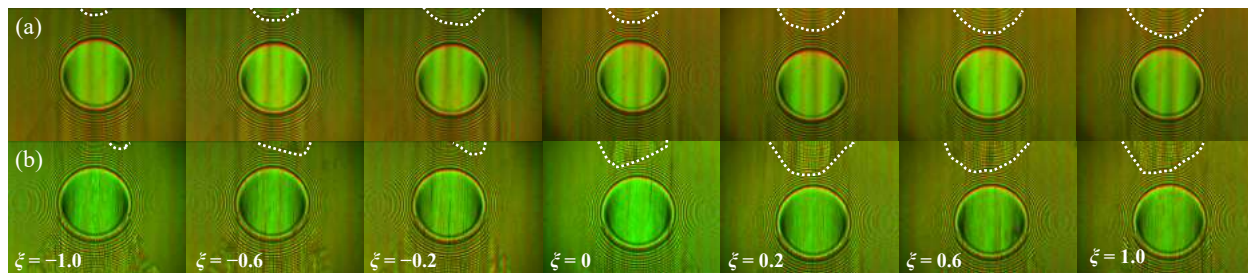


Fig. 7 Comparisons of interferograms under different viscosities and SRRs, 10 μl , (a) PAO4, $u_e = 488 \text{ mm/s}$;
(b) PAO40, $u_e = 8 \text{ mm/s}$

图 7 采用不同黏度润滑油在不同滑滚比时的油膜干涉图比较, 10 μl , (a) PAO4, $u_e = 488 \text{ mm/s}$;
(b) PAO40, $u_e = 8 \text{ mm/s}$

依据式(3)可得出 t_d/t_b 与滑滚比 ξ 的变化规律. 如图8所示, 随着滑滚比从-1.0变化到1.0, t_d/t_b 大幅度衰减. 在各滑滚比下 t_d 始终大于 t_b , 两者最大比值为16.2. t_d/t_b 反映了式(2)中两项对总回填量的作用. 显然, 钢球的高频回转对回填量的作用较弱. 因而, 对于恒定的卷吸速度, $u_d > u_b$ (滑滚比为负值)可促进回填量得到较大程度提升, 使图4和图7中的入口距离增大和乏油宽度减小.

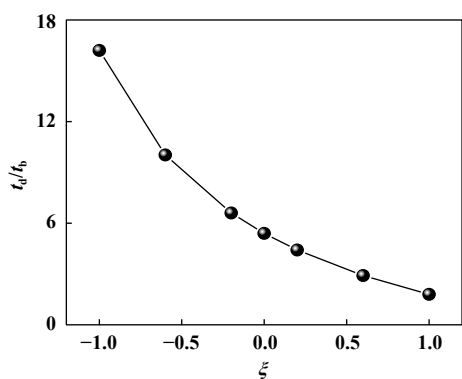


Fig. 8 Variations of t_d/t_b with sliding-rolling-ratios
图 8 t_d/t_b 随滑滚比的变化

3.4 完全乏油状态下润滑剂回填机理

图4(a)中, 在供油量为5 μL 的条件下入口乏油边界与接触区边界交叉, 可视为完全乏油状态. 在完全乏油状态下, 非接触回填的作用被削弱. 但接触副两侧微间隙内毛细力诱发润滑剂瞬时回填作用不可忽略, 该回填机制称为接触回填^[15-16]. 如图6(a)和图6(c)所示, 接触区两侧存在明显的油池, 该油池由毛细力作用下润滑剂回填和接触副表面挤压作用形成. 两侧油池的形成有利于接触区两侧局部动压油膜的建立, 是接触区两侧油膜高于接触区中央区域油膜的主要原因. 这种局部回填机制在严重乏油(如干涸润滑)下发挥重要作用.

4 结论

a. 恒定滑滚比条件下, 随着卷吸速度增加接触区润滑状态从边界润滑向弹流润滑转化. 供油量较少时乏油程度较大, 摩擦力呈现出先减小再增大的趋势; 较大供油量可降低乏油程度, 摩擦力随速度增加趋向于定值. 非接触回填机制是决定入口区供油及接触区润滑状态的主要原因.

b. 恒定卷吸速度下, 随滑滚比从负值向正值变化入口距离减小、乏油宽度增大. 滑滚比为负值时具有较长的润滑剂回填时间, 有利于接触区两侧油膜的建立.

c. 完全乏油状态下, 基于毛细力的局部回填机制发挥重要作用, 有助于接触区两侧油层的形成和局部动压油膜的建立.

参考文献

- [1] Hamrock B J, Dowson D. Isothermal elastohydrodynamic lubrication of point contacts, part 3—fully flooded results[J]. ASME Journal of Lubrication Technology, 1977, 99: 264–276. doi: 10.1115/1.3453074.
- [2] Liang H, Guo D, Luo J B. Experimental investigation of lubrication film starvation of polyalphaolefin oil at high speeds[J]. Tribology Letters, 2014, 56(3): 491–500. doi: 10.1007/s11249-014-0426-9.
- [3] Cann P M. Thin-film grease lubrication[J]. Proceedings of the IMechE, Part J: Journal of Engineering Tribology, 1999, 213(5): 405–416. doi: 10.1243/1350650991542776.
- [4] Wedeven L, Evans D, Cameron A. Optical analysis of ball bearing starvation[J]. ASME Journal of Tribology, 1971, 93: 349–363.
- [5] Chevalier F, Lubrecht A A, Cann P M, et al. Film thickness in starved EHL point contacts[J]. ASME Journal of Tribology, 1998, 120(1): 126–133. doi: 10.1115/1.2834175.
- [6] Damiens B, Venner C H, Cann P M, et al. Starved lubrication of elliptical EHD contacts[J]. ASME Journal of Tribology, 2004, 126(1): 105–111. doi: 10.1115/1.1631020.

- [7] Cann P M, Damiens B, Lubrecht A A. The transition between fully flooded and starved regimes in EHL[J]. *Tribology International*, 2004, 37: 859–864. doi: [10.1016/j.triboint.2004.05.005](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2004.05.005).
- [8] Zhou Guangyun, Li Xinming, Guo Feng, et al. Experimental observation of single-charging grease lubrication with different directions of surface motion[J]. *Tribology*, 2019, 39(5): 635–642 (in Chinese) [周广运, 栗心明, 郭峰, 等. 表面速度异向条件下定量脂润滑特性试验观察[J]. *摩擦学学报*, 2019, 39(5): 635–642]. doi: [10.16078/j.tribology.2018200](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018200).
- [9] Cann P M, Damiens B, Lubrecht A A. The effect of transient loading on contact replenishment with lubricating greases[J]. *Tribology Series*, Elsevier, 2003, 43: 745–750.
- [10] Damiens B, Cann P M, Lubrecht A A. Influence of cage clearance on bearing lubrication[J]. *Tribology Transactions*, 2004, 47(1): 2–6. doi: [10.1080/05698190490279128](https://doi.org/10.1080/05698190490279128).
- [11] Cann P M, Lubrecht A A. Analysis of grease lubrication in rolling element bearings[J]. *Lubrication Science*, 1999, 11(3): 227–245. doi: [10.1002/ls.3010110303](https://doi.org/10.1002/ls.3010110303).
- [12] Nagata Y, Kalogiannis K, Glovnea R. Track replenishment by lateral vibrations in grease-lubricated EHD contacts[J]. *Tribology Transactions*, 2012, 55(1): 91–98. doi: [10.1080/10402004.2011.629404](https://doi.org/10.1080/10402004.2011.629404).
- [13] 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. doi: [10.1016/j.triboint.2018.01.020](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.01.020).
- [14] Liu Haichao, Guo Feng, Zhao Guolei. A dichromatic interference modulation approach to lubricating film thickness[J]. *Tribology*, 2015, 35(3): 282–287 (in Chinese) [刘海超, 郭峰, 赵国磊. 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]. doi: [10.16078/j.tribology.2015.03.006](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2015.03.006).
- [15] Jacod B, Pabilier F, Cann P M E, et al. An analysis of track replenishment mechanisms in the starved regime[J]. *Proceedings of the 25th Leeds–Lyon Symposium on Tribology*, 1998: 483–492.
- [16] Han Bing, Wang Wenzhong, Zhao Ziqiang. Oil replenishment mechanism of lubricated contact at low speed[J]. *Tribology*, 2016, 36(3): 341–347 (in Chinese) [韩兵, 王文中, 赵自强. 低速下润滑接触区补充供油机制的研究[J]. *摩擦学学报*, 2016, 36(3): 341–347]. doi: [10.16078/j.tribology.2016.03.011](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2016.03.011).
- [17] Chiu Y P. An analysis and prediction of lubricant film starvation in rolling contact systems[J]. *Tribology Transactions*, 1974, 17(1): 22–35.