

DOI: 10.3901/JME.2020.17.225

异向卷吸作用下润滑剂回填增强效应试验研究*

栗心明^{1,2} 周广运¹ 郭峰¹ 张建军¹

(1. 青岛理工大学机械与汽车工程学院 青岛 266520;

2. 中国科学院青岛生物能源与过程研究所 青岛 266101)

摘要: 试验研究了异向卷吸作用对润滑剂回填增强效应和成膜特性的影响。采用球-盘点接触光干涉油膜测量仪,通过控制钢球运动方向产生卷吸速度与滑动速度呈夹角的异向卷吸作用。试验发现,限量供油条件下异向卷吸与同向卷吸相比,接触区入口供油状态得到明显改善,其特征是在入口区产生了与经典乏油工况不同的充盈油池,该油池的出现使油膜厚度接近于充分供油下油膜厚度。试验观察了不同角度、速度、供油量和黏度下的入口油池外形及非对称性油膜特征。接触副表面上侧带与滚道重叠并被卷吸到入口区,是入口油池形成的主要机制;热黏度楔效应是诱发油膜外形非对称性的原因;入口剪切热、侧泄、接触区热量向入口区迁移和剪稀效应,是润滑油膜厚度随角度减小的原因。试验结果表明,将经典的乏油边界条件应用于异向卷吸工况具有局限性。

关键词: 异向卷吸; 润滑剂回填; 入口油池; 乏油; 光干涉

中图分类号: TH117

Experimental Investigation into Enhancement of Lubricant Replenishment Induced by Angled Entrainment

LI Xinming^{1,2} ZHOU Guangyun¹ GUO Feng¹ ZHANG Jianjun¹

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520;

2. Qingdao Institute of Bioenergy and Bioprocess Technology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266101)

Abstract: The enhancement of lubricant replenishment and film formation induced by angled entrainment effects are investigated. Using ball-on-disc optical apparatus, angled entrainment is formed by adjusting the motion direction of steel ball which could induce different angles between entrainment and sliding velocities. Comparing with the situations of entrainment in the same directions under fixed amount of oil feeding, it is found that the inlet lubricant supplying conditions are significantly improved, characterized by the appearance of a remarkable inlet oil reservoir. This reservoir pushes the film thickness approach the fully flooded states, which is quite different with the situations of traditional starved contacts. The patterns of inlet reservoir varying with angles, velocities, oil feeding amounts and viscosities, as well as the asymmetry film shapes are investigated. The main mechanisms resulting in the inlet oil reservoir was the delivery of overlapped side bands into the inlet conjunctions. The effect of thermal wedge viscosity is response for the distorted film shape. The reduction in film thickness with angle increasing is attributed to the inlet shear heating effect, side leakage, inflow of heat from contact zone into inlet zone and shear thinning effect. The observations suggest the tradition boundaries under starvation are limited to be applied to present situations.

Key words: angled entrainment; lubricant replenishment; inlet oil reservoir; starvation; interferometry

0 前言

运行于高速^[1]、低温工况^[2]或采用较高黏度(如润滑脂)^[3]及限制性供油(如油-气润滑方式)^[4]下的滚动轴承,易产生乏油润滑现象。其主要原因是在

滚动体反复碾压作用下,润滑剂被推挤到滚道两侧,受到润滑剂黏度(对润滑脂而言还要考虑其屈服应力)、滚动相继运动时间间隔的限制,润滑剂的回填量极其有限,依靠接触副壁面黏附油层难以充分填充接触入口间隙,进而造成运动乏油。

理论上,滚动的回填可通过表面张力作用^[5]或局部毛细力作用^[6]来实现。但研究表明高速轴承内由表面张力引起的润滑剂回填量可忽略,此时离心

* 国家自然科学基金(51875299, 51775286)和中国博士后科学基金面上(2017M622296)资助项目。20190917收到初稿,20191209收到修改稿

力将发挥主要作用^[7]。此外,由球-盘点接触装置测得的乏油产生临界速度,远低于轴承实际运行下的临界速度,且轴承可长时间安全运行,这说明存在其它回填机制发挥作用。比如,滚动体的自旋效应^[8]、保持架间隙^[9]、滚动体法向载荷变化(由非承载区进入承载区)^[10]、轴承周期性停止^[11]等都影响润滑剂的回填,上述因素已在球-盘模拟装置上被分别研究。

在基础研究中,为观察润滑剂回填对油膜建立的影响,一些外加强制措施被用来促进润滑剂的回填。例如,ALI等^[12]通过在钢球表面施加弹性导流元件,将润滑剂收集回滚道;NAGATA等^[13]通过钢球周期性侧向往复运动将部分润滑剂刮回滚道;ANDABLO-REYES等^[14]则通过对磁流变液施加外部磁场使润滑剂回填。这些方法均使乏油工况得到不同程度的改善。此外,SVOBODA等^[15]基于自由边界层理论,设计了润滑剂入口油层厚度的控制方法,实现了对乏油状态的控制。然而,上述控制手段并不适用于实际工况。

显然,所期望的润滑剂回填应为基于无外力辅助的自发回填机制。为此,LI等^[16]通过改变接触表面的润湿性梯度,实现了润滑剂的高效自发回填。除此以外,滚动轴承陀螺效应的产生,使接触副两表面的卷吸速度与滑动速度呈现一定角度,即异向卷吸,是润滑剂自发回填的另外一种机制^[17]。由于异向卷吸普遍发生在准双曲面齿轮、螺旋齿轮等啮合过程,该方面研究一直受到关注。但早期研究侧重于算法的改进^[18-19]及热效应分析^[20-21],且均在富油工况下。近期,MOHAMMADPOUR等^[22]在准双曲面齿轮润滑研究中引入了经典的乏油边界条件;国内的蒲伟等^[23]也对准双曲面齿轮乏油润滑进行了数值模拟,并与SVOBODA等^[15]试验结果取得较好一致性。然而,在异向卷吸条件下接触区入口条件与经典的乏油入口状态并不相同,而是存在一个独特的入口油池并抑制了乏油的产生。但已有研究仅局限于数值计算,其采用的入口边界条件需要进一步的试验观察与验证,以正确描绘限量油润滑条件下的油膜建立过程。

因此,有必要对异向卷吸下的油润滑进行试验研究,观察角度、速度、供油量和黏度对入口油池和膜厚建立的影响,并分析其机理。该研究有助于正确理解异向卷吸作用下的入口状态及润滑机理。

1 试验部分

1.1 试验方法

试验在球-盘点接触光干涉润滑油膜测量装置上进行。图1给出了测量装置结构组成、测量原理

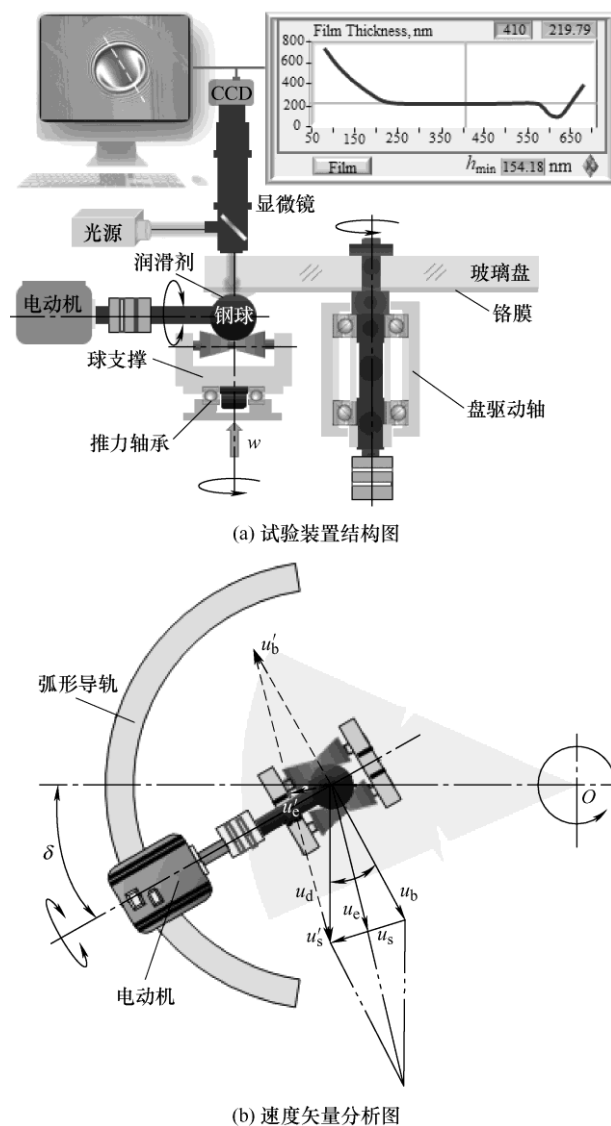


图1 试验装置及速度分析

及速度分析。图中玻璃盘与钢球分别由电动机驱动,其中钢球驱动单元连接于弧形导轨上,可沿导轨滑动一定角度,进而使接触点处的玻璃盘表面速度 u_d 与钢球表面 u_b 产生一个夹角。与此同时,钢球支撑置于推力轴承上,与钢球主轴的倾斜相适应。原则上,电动机正向运行时 δ 可在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 的范围内连续变化,但在 90° 的位置上电动机与加载装置干涉,使该位置的测量数据无法获取。而 $\delta > 90^\circ$ 则可通过电动机反转来实现。如图1b所示,实线表示 $\delta < 90^\circ$ 下的速度矢量分布;虚线表示 $\delta > 90^\circ$ 下的速度矢量分布。以 u_e 表示卷吸速度,其为速度矢量和的一半,即 $u_e = (u_b + u_d)/2$;以 u_s 表示滑动速度,其为速度矢量差,即 $u_s = u_b - u_d$ 。可见,取决于表面速度数值的大小, u_e 与 u_s 之间可呈现出不同的夹角,该情况称为异向卷吸。特别地,当 $u_d = u_b$ 时,卷吸速度与滑动速度将相互垂直,即 $u_e \perp u_s$ 。需要说明的是,下述试验结果均在 $u_e \perp u_s$ 工况下获得。试验过程中,

干涉图像经显微镜放大后, 被相机捕获并保存, 再通过 MBI 处理软件^[24]得到润滑油膜厚度与外形。

1.2 试验方案

试验采用玻璃盘为直径为 150 mm 的 K9 玻璃, 表面粗糙度约 20 nm, 其与钢球接触一侧镀有析光铬膜, 以获得高分辨干涉图像; 试验用钢球直径为 25.4 mm, 其表面粗糙度约 14 nm。试验所用工况如表 1 所示。润滑剂的供给分为充分供油和限量供油两种, 其中限量供油使用 2.0 μL 规格的微量进样器进行布油。试验使用 3 种同种类型的 PAO 润滑油, 其中第二种润滑油为 PAO10 和 PAO40 调和油, 其性质如表 2 所示。

表 1 试验条件

试验参数	数值
卷吸速度/(mm/s)	32, 96, 192, 288, 384, 512
角度/(°)	0, 10, 30, 45, 60, 120, 135, 150
载荷/N	30
赫兹压力/GPa	0.49
润滑剂供给量/ μL	1.0, 1.5, 2.0
温度/°C	23 \pm 1

表 2 试验用润滑油性质

润滑油	密度 (kg/m^3 @20 °C)	动力黏度 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$ @20 °C)
PAO10	706	0.13
PAO10+PAO40	795	0.44
PAO40	825	0.78

2 结果与讨论

图 2 给出了异向卷吸条件下的典型油膜特征。可见, 在供油量为 1.0 μL 下, 接触区入口存在一个明显的油池, 该油池的出现保证了润滑油膜的有效建立。同时, 沿着卷吸方向该油池呈现“外凸”形状, 而经典乏油工况下油池外形则“内凹”且呈“蝶”形。入口油池的大小和形状, 反应了入口区供油状态。图 2 所示的入口油池边界到接触区边缘的距离, 常用来量化乏油程度与膜厚之间的关系(PAO10, $u_e = 96 \text{ mm/s}$, $\delta = 45^\circ$, 供油量 1.0 μL)。定义接触区中心的油膜厚度为 h_{cen} , 以便对润滑油膜的成膜特性进行比较。润滑油膜外形沿直线 AB 绘制, 以对不同参数下油膜特征进行比较。

2.1 不同夹角对入口油池及膜厚的影响

图 3 分别给出了 $u_e = 96 \text{ mm/s}$ 和 $u_e = 288 \text{ mm/s}$ 两种卷吸速度下, 中心膜厚随速度夹角 δ 的变化。为了考察异向卷吸下润滑油膜的成膜性能, 图中还

对比了充分供油和限量供油(2.0 μL)下的中心油膜厚度。从图 3a 的干涉图上可以看出, 在限量供油条件下当速度夹角 $\delta = 0^\circ$ 时, 接触区入口处的油-气乏油边界呈现为经典的乏油外形, 即向接触区方向“内凹”, 其边界已与接触区交叉, 使接触区达到严重乏油状态, 该现象与已有的试验观察相符^[3]。然而, 在 $\delta > 0^\circ$ 的异向卷吸条件下, 入口区供油状态与 $\delta = 0^\circ$ 的情形完全不同, 即在接触区入口处形成了充盈的油池。整体来看, $\delta < 90^\circ$ 下的入口油池尺寸较大, 可包围整个接触区; 而 $\delta > 90^\circ$ 下入口油池相对较小, 其边界仅能与接触区部分交叉, 且随着角度增加油池有缩小的趋势。由于干涉图像可见, 尽管在异向卷吸下入口区出现的油池大小不同, 但因入口距离足够大, 限量供油下接触区内的润滑油膜与充分供油下的富油润滑状态非常接近。此外, 干涉图中还显示润滑油膜外形随着角度的增加非对称性增强。在 $\delta = 135^\circ$ 和 $\delta = 150^\circ$ 下油膜被整体扭曲。

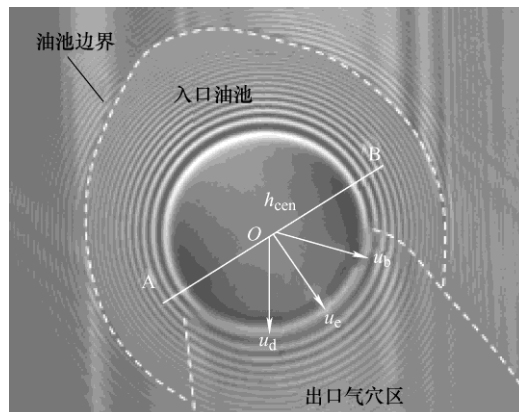


图 2 异向卷吸条件下典型油膜特征

为了定量比较两种供油条件下的油膜厚度, 图 3b 给出了中心油膜厚度随速度夹角 δ 的变化曲线。可以看出, 在给定的两种卷吸速度下, 除了在 $\delta = 0^\circ$ 下因乏油导致其膜厚明显低于充分供油膜厚外, 在 $\delta > 0^\circ$ 的其余夹角下, 限量供油膜厚与充分供油膜厚均接近。这说明在供油量为 2.0 μL 条件下的润滑油膜与充分供油有相近的成膜能力。此外, 图 3b 还显示在充分供油和 $\delta > 0^\circ$ 的限量供油条件下, 润滑油膜厚度随着角度增加呈减小的趋势。

图 4 进一步对比了不同供油量下的油膜干涉图。可见, $\delta = 0^\circ$ 下油池呈现出典型的“蝶”形分布, 该工况下润滑油被挤压到滚道两侧而形成带状分布的侧缘油池, 称为侧带。同时接触区外由收敛微间隙产生的毛细效应, 还将引起润滑剂的局部回填, 导致图中接触区两侧油池瞬时膨胀而形成“蝶”形。整体来看, 各角度下油池外形随着供油量的增加而变大。但供油量的增加并未使 $\delta = 0^\circ$ 下的润滑

状态得到改善;相反,在 $\delta > 90^\circ$ 下尽管供油量减小一半、油池缩小,但对润滑状态几乎未产生影响,表明了异向卷吸下油膜良好的成膜能力。

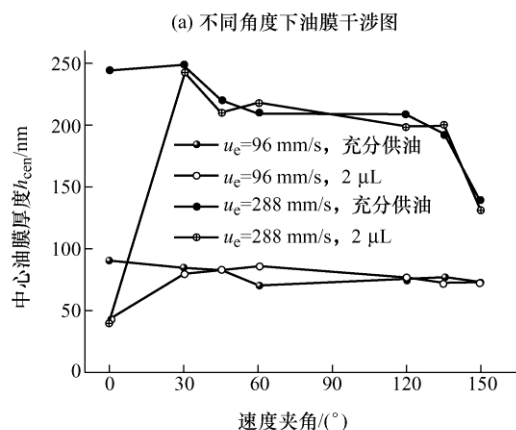
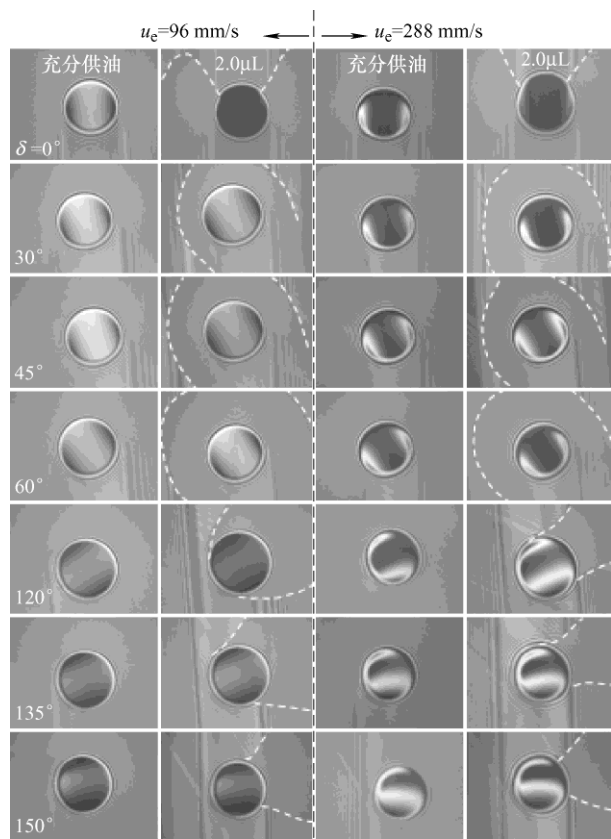


图3 充分供油与限量供油下中心油膜随角度的变化

2.2 速度对入口油池及膜厚的影响

图5中分别给出了充分供油和限量供油下润滑油膜随速度的变化规律。在图5a的干涉图上可以看出, $\delta = 45^\circ$ 下入口油池尺寸整体大于 $\delta = 120^\circ$ 下的入口油池尺寸。两种夹角下的入口油池尺寸均随着速度的增加而呈现减小的趋势。尽管油池的尺寸逐渐减小,但润滑油膜特征仍然与充分供油下的油膜特征非常接近。此外,干涉图上还显示在 $\delta = 120^\circ$ 条件下,润滑油膜外形随着速度增加非对称性增强。

图5b定量对比了两种供油状态下的中心油膜厚度。可见,中心油膜厚度均随着速度的增加而升高,且两种供油状态下的中心油膜厚度几乎重合。再次表明了异向卷吸下润滑油膜良好的成膜性能。

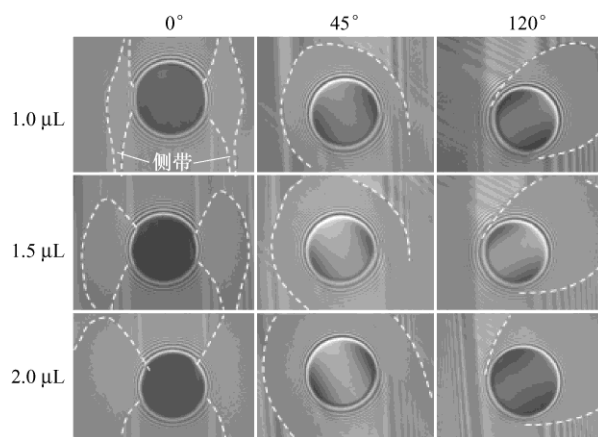
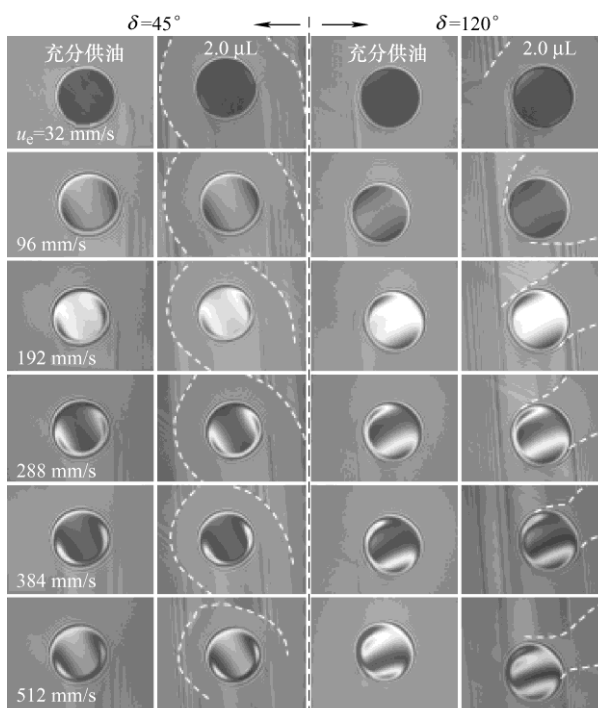
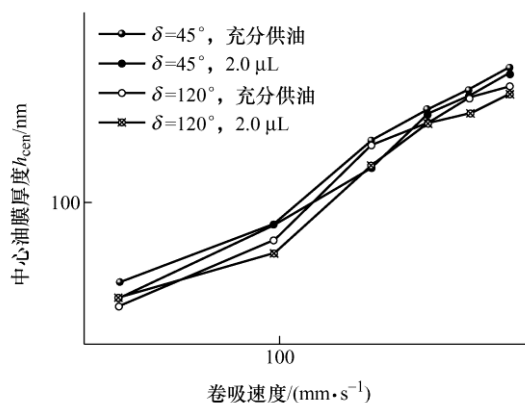


图4 不同供油量下油膜干涉图($u_e = 96 \text{ mm/s}$, PAO10)



(a) 不同速度下油膜干涉图



(b) 不同速度下中心油膜厚度

图5 充分供油与限量供油下润滑油膜随速度的变化(PAO10)

2.3 黏度对入口油池及膜厚的影响

图 6 给出了润滑油膜中三种润滑油黏度(表 2)的变化。由干涉图看见, 入口油池随着黏度的增加有减小的趋势, 但仍显示为富油润滑油膜特征。同时, 油膜外形随着黏度的增加非对称性增强。图 6b 显示, 中心油膜厚度随着黏度的增加而明显升高, 但三种黏度下限量供油膜厚仍然与充分供油下的膜厚非常接近。此外, 从图 6b 中还可以看出, $\delta = 45^\circ$ 下的膜厚高于 $\delta = 120^\circ$ 下的膜厚, 这种差距随着黏度的增加而增大。

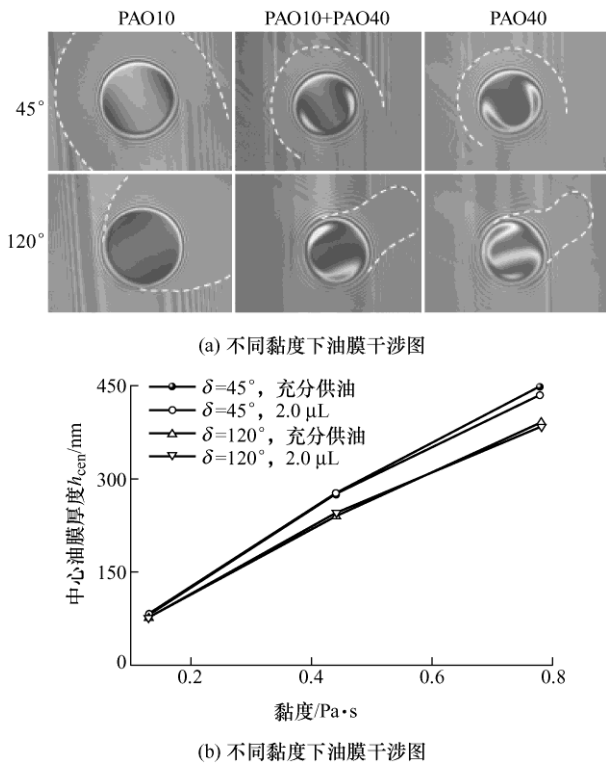


图 6 中心油膜随黏度的变化($u_e = 96 \text{ mm/s}$)

2.4 入口回填增强机制与成膜机理

上述结果显示了异向卷吸运动使入口供油条件得到明显改善, 进而促进油膜有效建立, 其润滑状态与充分供油工况相当。为了便于对异向卷吸下入口回填机制进行分析, 图 7a 和 7b 给出了入口油池形成机制示意图。如在图 4 中所分析的, 在 $\delta = 0^\circ$ 的条件下, 润滑油滚道两侧形成侧带, 因润滑剂回填量有限, 而造成严重乏油。而在 $\delta > 0^\circ$ 的条件下, 玻璃盘表面的侧带与钢球表面的侧带不再重合, 而是呈现出一定角度。如图 7 所示, 侧带 1 和 3 为球表面的侧带且与玻璃盘滚道重叠, 侧带 2 和 4 为玻璃盘表面的侧带且与钢球滚道重叠。显然, 这四段与滚道重叠的侧带将被滚道输送到接触区入口。为了便于清晰表示, 图 7 中仅给出了这四段与滚道重叠的侧带。当 $\delta < 90^\circ$ 时, 两表面运动速度方向如实

线所示, 该条件下侧带 1 和 2 将被输送到入口区; 当 $\delta > 90^\circ$ 时, 两表面运动速度方向如虚线所示, 该条件下侧带 3 和 4 将被输送到入口区。这是异向卷吸条件入口油池形成的主要机制。

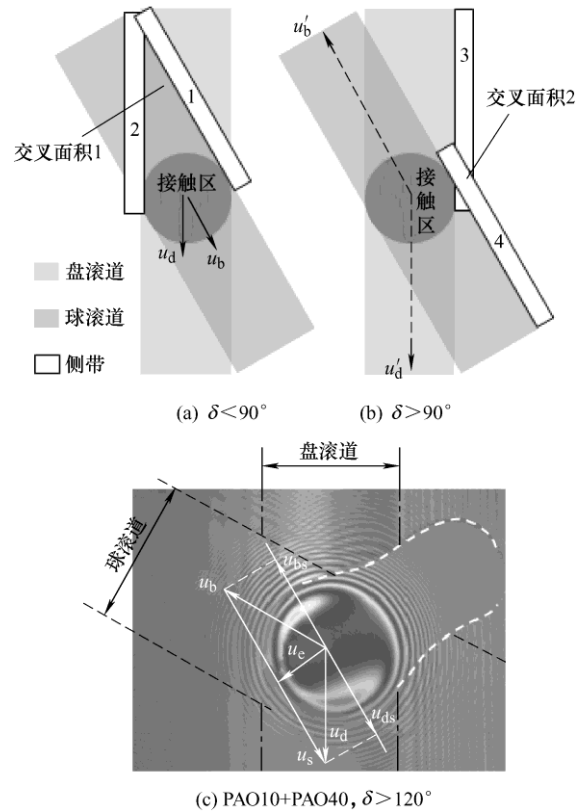


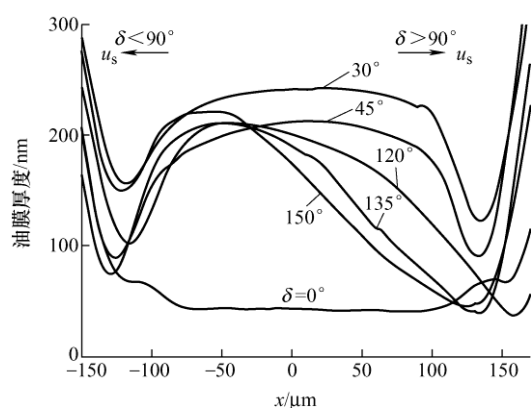
图 7 入口回填增强机制与成膜机理

在 $\delta < 90^\circ$ 的条件下, 其入口区交叉面积 1 要大于 $\delta > 90^\circ$ 下的交叉面积 2, 这是图 3 至图 6 干涉图中 $\delta < 90^\circ$ 的入口油池较大的原因。但另一方面, $\delta > 90^\circ$ 条件下侧带交叉点到接触区边缘的距离比要 $\delta < 90^\circ$ 的短, 这使得润滑油进入接触区的路径缩短, 即润滑剂的供给润滑效率较高。而且, $\delta < 90^\circ$ 条件下刚进入交叉区的润滑剂被首先输送到接触区的两侧缘; 而 $\delta > 90^\circ$ 下的润滑剂则被径直输送到接触中心。上述因素使得润滑油膜在 $\delta > 90^\circ$ 条件下, 尽管入口油池尺寸较小, 但仍具有较好的成膜能力。

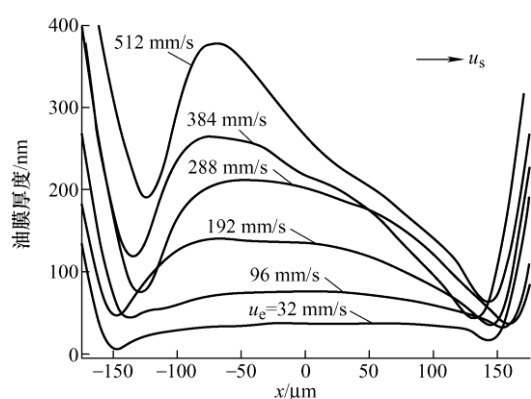
上述干涉图还显示出油膜外形随着角度、速度和黏度增加非对称增强的现象, 这主要归因于热黏度楔效应。如图 7c 所示, 玻璃盘 u_d 和钢球的表面速度 u_b 可沿着卷吸速度方向和滑动速度方向进行分解。其中, 沿着滑动方向可分解为 u_{ds} 和 u_{bs} 。可见, u_{ds} 和 u_{bs} 大小相等而方向相反, 即零卷吸。则异向卷吸运动实际上为零卷吸运动与同向卷吸运动的叠加。已有的研究表明, 零卷吸下因热黏度楔效应, 温度较低的钢球表面附带一层黏度较高的润滑油进入接触区, 产生额外的压力使表面变形而形成

“凹陷”，且“凹陷”偏向钢球运动方向一侧，或沿着相对运动方向倾斜^[25-26]。在异向卷吸条件下，该机制仍然成立，即膜厚沿着图示的滑动方向倾斜。

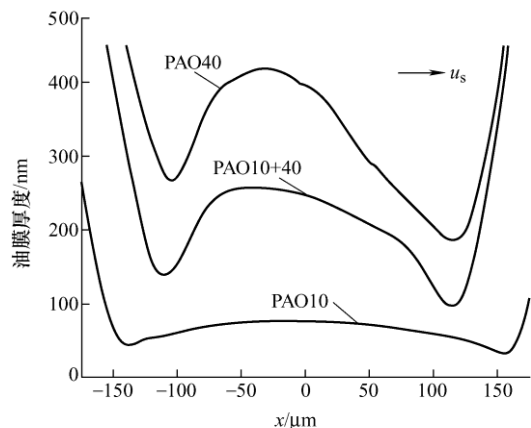
为了直观观察角度、速度和黏度对油膜外形的影响。图8中给出了油膜外形随三个参数的变化规律，图中标识了滑动速度 u_s 的运动方向。可以看出，由于热黏度楔效应，油膜沿着 u_s 方向倾斜。图8a中因 $\delta < 90^\circ$ 下热黏度楔效应不明显，油膜外形非对称性不明显；而在 $\delta > 90^\circ$ 下，由于相同卷吸速度下 u_s 的绝对值随着角度的增加而急剧增加，导致油膜外形非对称性增强，其外形变得越来越陡。类似地，



(a) 油膜外形随角度变化, $u_c = 288 \text{ mm/s}$



(b) 油膜外形随速度变化, $\delta = 120^\circ$



(c) 油膜外形随黏度变化, $u_c = 96 \text{ mm/s}$, $\delta = 120^\circ$

图8 角度、速度和黏度对润滑油膜外形的影响(2.0 μL)

卷吸速度增加也将导致 u_s 的绝对值增加，因而图8b中油膜外形随速度增加而变得更加陡峭。在相同的剪应变率下，黏度的增加导致剪应力的增加和热效应的增强，因而图8c中油膜外形随着黏度增加非对称性逐渐增强。

图8b中所示的中心油膜厚度随角度的增加而减小，由以下原因导致：①入口剪切热效应使入口润滑剂黏度降低，润滑剂在进入接触区前的交叉区域内就已经承受剪切；②如图7c中所示的 u_{ds} 和 u_{bs} 分量导致润滑剂侧泄增强；③大角度下接触区热量被传导到入口区，导致入口黏度下降；④润滑剂的剪稀效应，但该效应需要借助摩擦力曲线才能表征。上述因素的共同作用导致了膜厚的下降。

由此可见，异向卷吸条件下入口区供油状态及油膜特征明显不同于同向卷吸工况，经典的乏油边界条件并不适用于异向卷吸工况。因而，在计算圆锥齿轮准双曲面齿轮乏油问题时应给考虑其入口边界条件的变化。

然而，目前研究中所采用的角度范围主要出现在齿轮润滑中，但在滚动轴承中并不常见，仅在圆柱推力轴承和大型回转轴承中发生，即便出现较大角度的异向卷吸，能量损耗及其它相关问题应将变为主要考虑因素。为了考察滚动轴承中发生的小角度异向卷吸对油池影响，图9中给出了 $\delta = 10^\circ$ 下油膜干涉图，并与 $\delta = 0^\circ$ 和充分供油干涉图进行了对比。可以看出，在 $\delta = 10^\circ$ 下接触区入口已经出现了“内凹”的经典油池边界，且油膜厚度相对充分供油有一定程度的下降。尽管如此， $\delta = 10^\circ$ 下的油膜仍比 $\delta = 0^\circ$ 工况得到明显改善，说明了轴承内的自旋运动对于润滑剂的回填有促进作用。

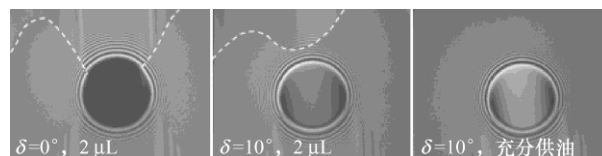


图9 小角度异向卷吸油膜干涉图($u_c = 96 \text{ mm/s}$)

此外，试验中的球-盘接触得到的接触区为圆形，而实际接触为椭圆形。采用圆形接触是为了排除因接触副曲率变化而产生的额外动压效应的影响，否则将给试验结果的分析带来困难。

3 结论

(1) 限量供油条下，异向卷吸运动可使润滑剂回填效应得到明显增强，在接触区入口形成充盈的油池，有效保证了润滑油膜的建立。

(2) 限量供油条下, 与速度夹角为 0° 相比, 异向卷吸条件下的油膜厚度得到明显提升, 且与充分供油条件下的油膜厚度相当。

(3) 随着角度、速度和黏度的增加, 润滑油膜的非对称性增强, 热黏度楔效应是其诱因。

(4) 入口剪切热、测泄、接触区热量向入口区迁移和剪稀效应, 是润滑油膜随角度增加而降低的原因。

(5) 试验所观察到的入口供油状态, 在准双曲面齿轮和螺旋斜面齿轮的乏油计算中应给予考虑。

参 考 文 献

- [1] LIANG H, GUO D, LUO JB. Experimental investigation of lubrication film starvation of polyalphaolefin oil at high speeds[J]. Tribology Letters, 2014, 56(3): 491-500.
- [2] WIKSTRÖM V, HÖGLUND E. Starting and steady-state friction torque of grease-lubricated rolling element bearings at low temperatures—Part I: A parameter study[J]. Tribology Transactions, 1996, 39(3): 517-526.
- [3] CANN P M. Thin-film grease lubrication[J]. Proceedings of the IMechE, Part J: Journal of Engineering Tribology, 1999, 213(5): 405-416.
- [4] LIANG H, GUO D, MA L R, LUO J B. The film forming behavior at high speeds under oil-air lubrication[J]. Tribology International, 2015, 91: 6-13.
- [5] CHIU Y P. An analysis and prediction of lubricant film formation in rolling contact systems[J]. ASLE Tribology Transactions, 1974, 17(1): 22-35.
- [6] PEMBERTON J, CAMERON A. A mechanism of fluid replenishment in elastohydrodynamic contacts[J]. Wear, 1976, 37(1): 185-190.
- [7] GERSHUNI L, LARSON M G, LUGT P M. Replenishment in rolling bearings[J]. STLE Tribology Transactions, 2008, 5(5): 643-651.
- [8] ÅSTRÖM H, ÖSTENSEN J, HÖGLUND E. Lubricating grease replenishment in an elastohydrodynamic point contact[J]. ASME Journal of Tribology, 1993, 115(3): 501-506.
- [9] DAMIENS B, CANN P M, LUBRECHT A A. Influence of cage clearance on bearing lubrication[J]. Tribology Transactions, 2004, 47(1): 2-6.
- [10] CANN P M, DAMIENS B, LUBRECHT A A. The effect of transient loading on contact replenishment with lubricating greases[J]. Triology Series, Elsevier, 2003, 43: 745-750.
- [11] CANN P M, LUBRECHT A A. Analysis of grease lubrication in rolling element bearings[J]. Lubrication Science, 1999, 11(3): 227-245.
- [12] FADI A, IVAN K, MARTIN H. Enhancing the parameters of starved EHL point conjunctions by artificially induced replenishment[J]. Tribology International, 2013, 66: 134-142.
- [13] NAGATA Y, KALOGIANNIS K, GLOVNEA R. Track replenishment by lateral vibrations in grease-lubricated EHD contacts[J]. Tribology Transactions, 2012, 55(1): 91-98.
- [14] ANDABLO-REYES E, de VICENTE J, HIDALGO-ÁLVAREZ R, et al. Soft elasto-hydrodynamic lubrication[J]. Tribology Letters, 2010, 39(1): 109.
- [15] SVOBODA P, KOSTAL D, KRUPKA I, et al. Experimental study of starved EHL contacts based on thickness of oil layer in the contact inlet[J]. Tribology International, 2013, 67: 140-145.
- [16] LI XM, GUO F, WONG PL, et al. Regulation of lubricant supply by wettability gradient in rolling EHL contacts[J]. Tribology International, 2018, 120: 565-574.
- [17] THORP N, GOHAR R. Hydrodynamic friction in elliptical and circular point contacts[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 1974, 16(4): 243-249.
- [18] JALALI-VAHID D, RAHNEJAT H, GOHAR R, et al. Prediction of oil-film thickness and shape in elliptical point contacts under combined rolling and sliding motion[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2000, 214(5): 427-437.
- [19] WANG J, QU S, YANG P. Simplified multigrid technique for the numerical solution to the steady-state and transient EHL line contacts and the arbitrary entrainment EHL point contacts[J]. Tribology International, 2001, 34(3): 191-202.
- [20] OMASTA M, KRUPKA I, HARTL M. Effect of surface velocity directions on elastohydrodynamic film shape[J]. Tribology Transactions, 2013, 56(2): 301-309.
- [21] 张建军, 郭峰, KANETA M, 等. 卷吸与滑动正交的热弹流润滑研究[J]. 摩擦学学报, 2015, 35(4): 477-484. ZHANG Jianjun, GUO Feng, KANETA M, et al. A study of thermal EHL behaviours under orthogonal entrainment and sliding[J]. Tribology, 2015, 35(4): 477-484.
- [22] MOHAMMADPOUR M, THEODOSSIADES S, RAHNEJAT H. Transient mixed non-Newtonian thermo-elastohydrodynamics of vehicle differential hypoid gears

- with starved partial counter-flow inlet boundary[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2014, 228(10): 1159-1173.
- [23] 蒲伟, 汪巨基, 肖科, 等. 乏油状态下准双曲面齿轮传动润滑机理分析[J]. 中国科学与技术, 2019, 51(1): 236-240.
- PU Wei, WANG Juji, XIAO Ke, et al. Analysis on lubrication behavior of hypoid gears under starved condition[J]. Advanced Engineering Sciences, 2019, 51(1): 236-240.
- [24] GUO F, WONG P L. A multiple-beam intensity-based approach for thin lubricant film measurement in non-conformal contacts[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2002, 216(5): 281-291.
- [25] GUO F, YANG P, YAGI K. Film formation in EHL point contacts under zero entraining velocity conditions[J]. Tribology Transactions, 2002, 45(4): 521-530.
- [26] YAGI K, KYOGOKU K, NAKAHARA T. Relationship between temperature distribution in EHL film and dimple formation[J]. ASME Journal of Tribology, 2005, 127(3): 658-665.
-
- 作者简介: 栗心明(通信作者), 男, 1979 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为滚动轴承脂润滑与微量润滑机理。
E-mail: mexinmingli@163.com