

润湿梯度表面限量润滑油挤压铺展与回流特性仿真研究

刘明海¹, 李书义^{*}, 郭峰¹, 梁鹏¹, 安钰坤²

(1. 青岛理工大学 机械与汽车工程学院, 山东 青岛 266520;

2. 山东理工大学 机械工程学院, 山东 淄博 255000)

摘要: **目的** 机械运动副中普遍存在着限量润滑油受挤压铺展与回流现象, 其直接关系接触副供油状态, 而表面润湿性是影响润滑油流动的关键因素, 进而对接触副润滑性能产生重要影响。基于此, 十分有必要研究润湿性梯度表面润滑油流动特性, 并揭示其运行机制。**方法** 基于 VOF 模型结合动网格技术, 建立微量润滑油在润湿梯度表面挤压铺展与回流动态模型, 运用数值模拟方法, 探索亲油轨道两侧疏油区接触角、轨道宽度、润滑油黏度对油滴铺展与回流过程的影响。**结果** 润湿性梯度表面的润滑油在受挤压后快速铺展, 而一旦挤压作用消失润滑油就会自动回流, 并且在回流阶段发现润滑油内部存在较大的压力梯度与速度漩涡。通过调整疏油区接触角 (从 67° 至 130°) 改变轨道两侧疏油程度, 发现润滑油最大铺展系数 β 与最大润湿面积 A_n 分别减小 23.6% 和 14.3%, 液膜中心高度系数 h_n 增长时间点提前 57.2%, 完全回流时间减小 76.9%。通过增加轨道宽度, 发现无量纲轨道宽度 w_n 从 0.8 增至 1.4 时, 最大 β 与 h_n 增长时间点保持稳定, 但最大 A_n 增大 64.2%, 完全回流时间减小 39.4%。在润滑油物性参数方面, 增大润滑油黏度 (从 $0.032 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 至 $0.108 \text{ Pa}\cdot\text{s}$) 时, 最大 β 与最大 A_n 分别减小 13.5% 和 12.9%, 但 h_n 增长时间点延后 72.2%, 完全回流时间延长 58.3%。此外, 低黏度区间内, 虽然相邻黏度值增幅最小 ($0.032 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 至 $0.046 \text{ Pa}\cdot\text{s}$), 但润滑油回流速度与 A_n 减小速度降幅最大。**结论** 润湿性梯度表面可以抑制润滑油铺展, 促进回流, 其中内部压力梯度是回流的主要原因之一。随着轨道两侧疏油程度增加, 抑制铺展和促进回流的效果进一步增强, 回流速度增大, 完全回流时间减小。增大亲油轨道宽度可提升稳定后的润湿面积, 缩短完全回流时间, 但轨道宽度过大导致油液分布过于分散, 过小则使回流时间延长。此外, 在低黏度区间, 润湿性梯度表面对润滑油回流影响更显著, 润滑油黏度增大导致最大铺展系数与最大无量纲润湿面积均减小, 回流距离缩短, 液膜中心高度系数增长点相对延后, 完全回流时间延长。

关键词: 润湿性梯度; 挤压铺展; 回流; 限量润滑油; 数值模拟; 动网格

中图分类号: TH117 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3660(2025)01-0181-10

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2025.01.017

收稿日期: 2024-01-08; 修订日期: 2024-03-29

Received: 2024-01-08; Revised: 2024-03-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52175173, 52375190)

Fund: National Natural Science Foundation of China (52175173, 52375190)

引文格式: 刘明海, 李书义, 郭峰, 等. 润湿梯度表面限量润滑油挤压铺展与回流特性仿真研究[J]. 表面技术, 2025, 54(1): 181-190.

LIU Minghai, LI Shuyi, GUO Feng, et al. Simulation Study on Squeeze Spreading and Reflux Characteristics of Limited Lubricating Oil on Wetting Gradient Surfaces[J]. Surface Technology, 2025, 54(1): 181-190.

*通信作者 (Corresponding author)

Simulation Study on Squeeze Spreading and Reflux Characteristics of Limited Lubricating Oil on Wetting Gradient Surfaces

LIU Minghai¹, LI Shuyi^{1*}, GUO Feng¹, LIANG Peng¹, AN Yukun²

(1. School of Mechanical & Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Shandong Qingdao 266520, China;

2. School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Shandong Zibo 255000, China)

ABSTRACT: In mechanical motion pairs, the phenomenon of limited lubricating oil undergoing squeeze spreading and reflux is prevalent, directly influencing the lubrication supply state in the contact pairs. The surface wetting property emerges as a critical factor impacting the flow of lubricating oil, and consequently plays a pivotal role in the lubrication performance of the contact pairs. Therefore, it is imperative to investigate the flow characteristics of lubricating oil on surfaces with wetting gradients and unveil their operational mechanisms.

Utilizing the Volume of Fluid (VOF) model in conjunction with dynamic mesh techniques, a dynamic model was established for the squeeze spreading and reflux of minute lubricating oil droplets on surfaces with wetting gradients. Numerical simulation methods were employed to explore the effects of the contact angle on the oleophilic track's outer side, track width, and lubricating oil viscosity on the processes of droplet spreading and reflux. The lubricating oil on surfaces with wetting gradients rapidly spread after being subject to pressure. Once the pressure diminished, the lubricating oil automatically underwent reflux. During the reflux phase, significant pressure gradients and velocity vortices were observed within the lubricating oil. By adjusting the contact angle of the oleophobic region (from 67° to 130°), the degree of oleophobicity on both sides of the track was altered, the maximum spreading coefficient β and the maximum wetted area A_n decreased by 23.6% and 14.3%, respectively. The growth time point of the height coefficient h_n advanced by 57.2%, and the complete reflux time decreased by 76.9%. Increasing the track width revealed that, as the dimensionless track width w_n increased from 0.8 to 1.4, the maximum β and h_n growth time point remained stable, while the maximum A_n increased by 64.2%, and the complete reflux time decreased by 39.4%. Concerning the physical properties of the lubricating oil, the increase in lubricating oil viscosity (from 0.032 Pa·s to 0.108 Pa·s) resulted in a reduction of 13.5% in both the maximum β and the maximum A_n . However, the h_n growth time point was delayed by 72.2%, and the complete reflux time was extended by 58.3%. Furthermore, within the low viscosity range, even though the smallest viscosity increment occurred between adjacent viscosity values (0.032 Pa·s to 0.046 Pa·s), the reflux velocity and the rate of decrease in A_n were the most pronounced. In conclusion, surfaces with wetting gradients can inhibit lubricating oil spreading and promote reflux, with internal pressure gradients being one of the primary reasons for reflux. As the degree of oil repellency increases on both sides of the track, the inhibitory effect on spreading and the promoting effect on reflux are further enhanced, leading to an increase in reflux velocity and a reduction in complete reflux time. Enlarging the oleophilic track width enhances the stabilized wetted area and shortens the complete reflux time. However, excessively wide tracks lead to overly dispersed oil distribution, while excessively narrow tracks prolong reflux time. Additionally, within the low viscosity range, wetting gradient surfaces exhibit a more pronounced impact on lubricating oil reflux. An increase in lubricating oil viscosity results in a decrease in both the maximum spreading coefficient and the maximum dimensionless wet area. This leads to a shorter reflux distance, a relatively delayed point of growth in the height coefficient of the liquid film center, and an extension of the complete reflux time.

KEY WORDS: wetting gradient; squeeze spreading; reflux; limited lubricating oil; numerical simulation; dynamic mesh

高速滚动轴承广泛应用于航空发动机、高速主轴等旋转机械领域。高转速常伴随振动、高温等挑战,轴承内部易出现润滑失效。需要对滚动轴承高速工作时的润滑性能提出更高的要求。在高速滚动轴承润滑条件中,过量供给润滑油会引起摩擦力增大、温升加剧^[1],降低轴承整体性能;而润滑油严重不足又无法形成有效润滑油油膜^[2],加速零件磨损。需在润滑油

过量与不足间找到平衡点,使运动副处于一定程度乏油,即限量供油^[3-4]。限量供油条件下,润滑油在穿过滚道接触区时大部分被滚动体挤出铺展到轨道两侧形成侧脊^[5]。而高速滚动轴承相邻滚动体连续挤压间隔时间短,两侧脊润滑油再次回流补充至润滑轨道的效果难以保证,回流效果决定了下一时刻运动副润滑油供给状态^[6],润滑油的铺展与回流又受到油-固表

面特性影响。因此,有必要对限量润滑中润湿性梯度表面润滑油挤压铺展和回流特性进行研究。

国内外学者已关注到接触副润滑油挤压铺展与回流对乏油润滑的影响。首先, Pemberton 等^[7]指出在球-盘接触副的球体挤压推动下,润滑油在接触点两侧铺展形成 2 个侧脊,从而为入口区补油; Gershuni 等^[8]同样注意到润滑油在外力作用下铺展到轨道两侧,可以为下一接触副补充供油。其次, Chiu 等^[9]指出润滑油回流不足是导致接触区乏油的重要因素; Ali 等^[10]发现润滑剂向接触区轨道聚拢使接触区内膜厚增加,摩擦因数显著降低; 梁鹤等^[11]研究表明乏油状态下,两侧油带回流是接触区入口润滑油补充的主要来源,润滑油快速回流到接触区轨道可有效改善润滑性能。可见,润滑油的挤压铺展和回流对接触区润滑性能有着重要影响。

表面润湿性会直接影响润滑油在轨道表面的流动性^[12-13],是增强表面自集油能力的重要因素。Greenspan^[14]首次提出润湿性梯度的概念。随后, Brochard^[15]指出液滴在润湿性梯度表面受不平衡力的作用,倾向于朝向润湿性较高的区域移动。Hiratsuka 等^[16]提出一种亲/疏水组合的界面,利用界面间的液滴达到润滑构件的目的。通过改变表面润湿性来增强自集油能力已成为提高接触副润滑效果的重要手段之一,本课题组已在表面润湿性方面进行了相关研究。Li 等^[17]提出由 2 个疏油区和中间亲油条纹组成的润湿性梯度表面,并证明表面亲/疏油搭配有助于润滑油回流。Liu 等^[18]进一步试验研究表明润湿性梯度表面可以改善润滑油回流效果,且亲油轨道宽度对润滑效果有重要作用。臧淑艳等^[19]通过表面改性降低表面润湿性,使润滑油形成微小油滴供油状态,油膜厚度相比普通表面有所增加。故合理的表面润湿性搭配能够起到改善限量润滑效果的作用,但对润湿梯度表面调控机制缺少直接理论依据,且梯度表面设计多来自于实验经验,缺乏理论数据指导。

数值模拟方法为表面润湿性研究提供了新途径。Huang 等^[20]利用格子玻尔兹曼方法模拟液滴在润湿性梯度表面运输,指出液滴黏度、润湿性梯度与接触角滞后是影响液滴运输速度的重要因素。Chowdhury 等^[21]利用水平集方法模拟甘油在润湿性梯度表面的定向运输,并证明了液滴输运机制。Yuan 等^[22]利用耦合水平集与 VOF (Volume of Fluid) 方法模拟液滴撞击润湿性分界线,指出液滴受三相接触线上不平衡力的作用,出现不对称铺展和定向缩回现象。Russo 等^[23]利用 VOF 方法模拟液滴在非均匀润湿性表面的铺展过程,并证明预测的准确性。Wang 等^[24]利用 VOF 方法模拟液滴撞击亲疏水分界线后铺展的行为,并指出由润湿性梯度引起的界面不平衡力是造成液滴在亲疏水两侧铺展差异行为的主要原因。Baghel 等^[25]使用 VOF 方法研究液滴在润湿性梯度表面的形状演

变,并提出可以忽略小液滴重力对移动速度的影响,液滴在疏水表面和较大润湿性梯度表面的移动速度更快。

目前,模拟研究集中在液滴自由铺展与定向迁移过程,对于受初始挤压下润滑油铺展与回流的研究并不多见。基于此,采用简化模型结合计算流体力学方法,模拟不同表面润湿性梯度、轨道宽度、润滑油黏度下微油滴挤压铺展与回流的过程,研究润湿性梯度表面润滑油铺展与回流特性并揭示其运行机制,为限量供油条件下润滑轨道自集油设计提供数据支撑。

1 数值模拟

1.1 控制方程

流体力学控制方程是计算流体力学问题的基础,包括连续性方程、动量方程和能量方程,分别对应质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律。基于等温条件,不考虑能量方程,不可压缩流动的连续性方程和动量方程如下:

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

式中: \vec{v} 是速度矢量; p 是压力; ρ 是密度; \vec{g} 是重力加速度; \vec{F} 是外部体积力; μ 是黏度。针对气液两相流动模拟,需考虑液体表面追踪问题。VOF 模型引入相体积分数 α , α 表示流体体积在网格单元内的占比, $\alpha=1$ 时表示计算网格单元内液体占比为 1, $\alpha=0$ 时表示计算网格单元内气体占比为 1, $0<\alpha<1$ 时表示计算网格单元内同时存在液体和气体^[26]。设液体为主相,次相为气体,则每个网格单元内的流体黏度与密度根据体积分数进行计算^[27]:

$$\mu = \alpha \mu_1 + (1 - \alpha) \mu_2 \quad (3)$$

$$\rho = \rho_1 \alpha + (1 - \alpha) \rho_2 \quad (4)$$

式中: μ_1 、 μ_2 分别为液体和气体的动力黏度; ρ_1 、 ρ_2 分别为液体和气体的密度。通过求解体积分数方程对相界面进行追踪:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \alpha = 0 \quad (5)$$

采用连续表面力 (CSF) 模型^[28],此模型把表面力通过散度定理表示为体积力,以源项形式在动量方程中参与计算,公式为:

$$f_\sigma = \sigma_{12} \frac{\rho k \nabla a_i}{0.5(\rho_1 + \rho_2)} \quad (6)$$

式中: σ_{12} 为表面张力系数; k 为表面曲率。 k 可以表示为:

$$k = \nabla \cdot \vec{n} \quad (7)$$

以上 CFS 模型在计算时需要给定表面接触角,用以调节壁面附近单元内表面法线方向,设壁面与相界面的夹角为 θ_b ,公式表示为^[27]:

$$\hat{n} = \hat{n}_b \cos \theta_b + \hat{t}_b \sin \theta_b \quad (8)$$

式中： \hat{n}_b 为壁面的单位法向量， \hat{t}_b 为壁面的单位切向量。

1.2 物理模型和边界条件

采用基于有限体积法的 ANSYS FLUENT 计算流体力学软件进行模拟计算，研究润滑油在润湿性梯度表面受挤压铺展与回流问题，其内部预设的用户自定义函数（UDF）可以满足模拟中的工况要求。其中，压力-速度耦合采用 PISO 算法，时间项离散格式默认为一阶，压力相采用 PRESTO! 插值格式，动量方程离散采用二阶迎风格式；流体域尺寸为 $3D_0 \times 3D_0 \times 0.9D_0$ ，内含一个 $1.4D_0 \times 2D_0 \times 0.3D_0$ 的刚性板，其中油滴直径 $D_0=0.5$ mm。为简化模拟计算，假设流体为层流流动，壁面无滑移且恒温，考虑重力作用，流体动力黏度、密度和表面张力系数均为常数。

图 1 为模型前处理及边界条件示意图。将模型分割为 3 个流体域，由于计算模型为对称结构，模型中部采用的对称边界条件可以最大程度减少计算量，侧面及上边界均采用压力出口，下边界与刚性板均采用壁面边界条件。初始状态半球状油滴与底部壁面相切，即初始接触角为 180° ，计算开始后润滑油在亲油轨道表面迅速铺展。假设刚性板壁面接触角为 150° ，下落速度 $v_0=0.23$ m/s，计算时长 1 ms 时去除刚性板，以保证润滑油最大程度铺展。其中，初始的润滑油黏度 $\mu=0.032$ Pa·s，表面张力 $\sigma=0.03$ N/m，密度 $\rho=$

817.9 kg/m³。图 1a 中几何模型底面中部的带状（初始宽度 $w=0.5$ mm）区域为亲油轨道，初始面积为 0.75 mm²。轨道两侧留有宽度为 0.5 mm 的疏油区，初始面积为 1.5 mm²。通过分区域调整式（8）中的底部壁面与润滑油相界面夹角 θ_b 值，底部壁面可由均一润湿性的普通表面转变为润湿性梯度表面。

采用 ICEM 软件对流体域进行结构化网格划分，如图 1b 所示，这种六面体网格可以有效降低网格数量和数值误差。为实现刚性板运动，采用动网格技术中的中间铺层（Layering）方法，分别在图 1b 中 2 个内部面（Interior）处增减网格，通过编译 UDF（User Defined Function）定义刚性板运动方向与速度，此方法可以最大程度减小刚体运动引起的网格畸变对计算精度的影响。

1.3 网格无关性验证与模型验证

为简化分析过程，引入衡量润滑油铺展与回流程度的无量纲参数，铺展系数 $\beta=D_p/D_0$ ，液膜中心高度系数 $h_n=2h/D_0$ ，无量纲的润湿面积 $A_n=A(t)/A_0$ ，无量纲轨道宽度 $w_n=w/D_0$ ，其中 D_p 为润滑油在 $y=0$ 截面的铺展距离， D_0 为油滴初始直径， h 为铺展过程中 O 点的液膜高度， $A(t)$ 为铺展过程中润滑油的润湿面积， $A_0=\pi D_0^2/4$ ， w 为亲油轨道宽度。

对于气、液两相流 VOF 模型，分别采用网格数量 15.1 万、53.9 万、86 万和 106 万进行计算，如图 2 所示。发现网格数量为 86 万和 106 万的润滑油铺展系数差值小于 5%，网格数量超过 86 万后对模型计算结果影响微小，但却十分占用计算资源，故模型计算网格数量采用 86 万。此外，计算过程采用自适应时间步长，步长范围为 1×10^{-9} s 至 6×10^{-7} s，库朗数不超过 0.2，最大迭代数 25，保证每一个计算时间步内均收敛。

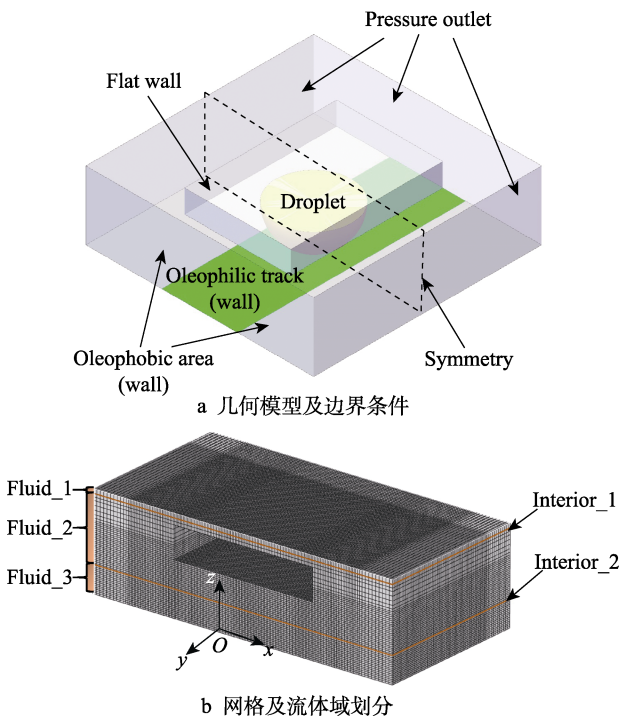


图 1 模型前处理及边界条件
Fig.1 Processed model and boundary conditions:
a) geometric model and boundary conditions;
b) mesh and fluid domain delineation

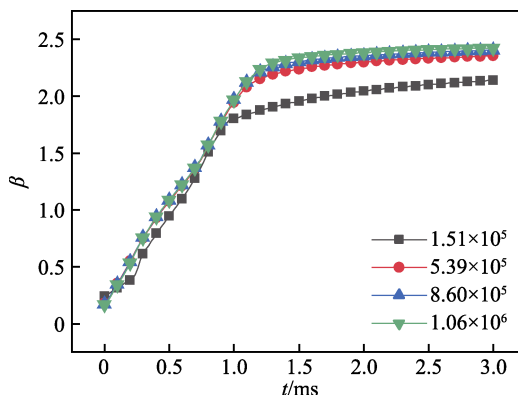


图 2 网格无关性验证
Fig.2 Grid independence verification

通过 Pachchigar 等^[29]记录的实验结果验证本模拟中数值模型的准确性，如图 3 所示，在实验中，半径 $R=2.7$ mm 的水滴以一定高度自由落体，接触壁面时的瞬时速度为 0.5 m/s，底部壁面具有均匀的润湿

性, 接触角 $\theta=105^\circ$ 。实验结果与模拟结果吻合较好, 表明数值模型具有较高的可靠性和适用性。但由于测量精度、表面质量等不可避免的因素存在, 模拟结果与实验结果仍存在微小差异, 而这些因素在模拟过程中并未被考虑。

此外, 通过与 Huang 等^[20]模拟得出的结果进行对比, 进一步验证数值模型的准确性, 如图 4a 所示, 假设初始状态下半径 $R=0.75$ mm 的球冠状油滴放置

在亲疏油分界线处, 球心位于壁面下方 $0.72R$ 处。当前模拟中的毛细管数 $C_a=\rho v V_A/\sigma$, 其中 ρ 为液体密度, v 为液体的运动黏度, V_A 为液滴的平均速度。壁面亲油区域接触角 $\theta_c=23^\circ$, 疏油区域接触角 θ_s 为 $30^\circ\sim 40^\circ$, 对球冠状油滴在壁面上单向迁移的过程进行模拟计算, 并求解油滴迁移过程中的毛细管数 C_a 。如图 4b 所示, 本数值模型的计算结果与文献[20]的模拟和理论计算结果总体误差不超过 5%。

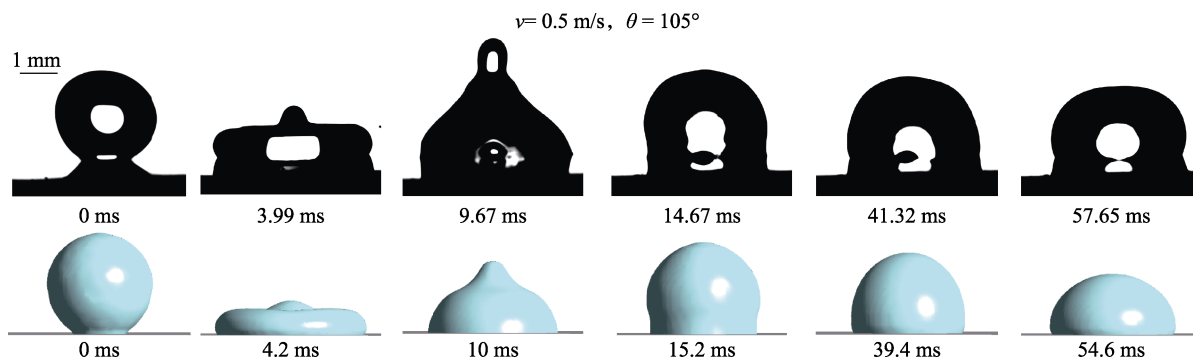


图 3 实验结果^[29]与模拟结果对比
Fig.3 Comparison of experimental results^[29] with simulation results

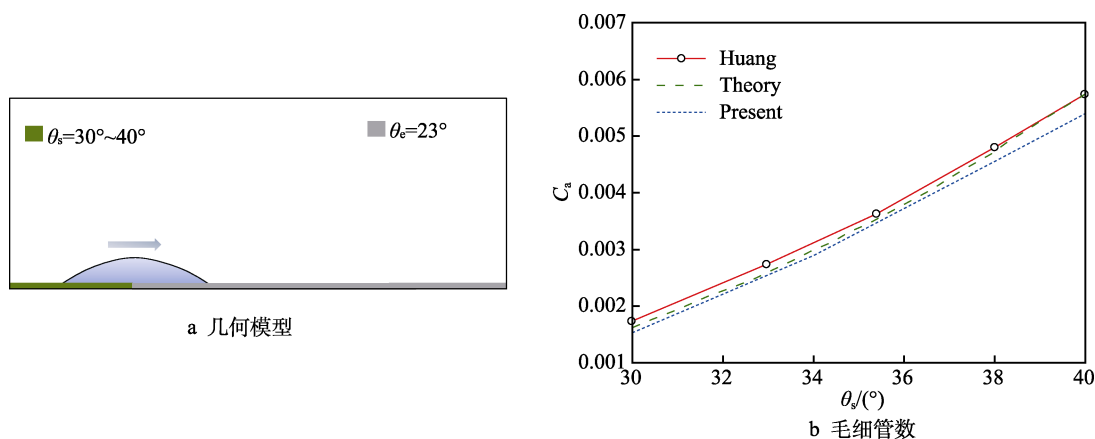


图 4 模型验证
Fig.4 Model validation: a) geometric model; b) capillary number

2 结果与讨论

2.1 润湿性梯度的影响

为探究润湿性梯度对润滑油挤压铺展和回流的影响, 分别对润湿性梯度与普通表面的油滴进行数值模拟。微量润滑油变化如图 5a 所示, 整个模拟过程分为快速铺展、自由铺展和回流 3 个阶段。0~1 ms 刚性板匀速下落挤压润滑油快速铺展, 润湿性梯度表面和普通表面的润滑油铺展状态差异不明显, 为快速铺展阶段。1 ms 时去除刚性板挤压作用, 由于油液流动惯性作用, 润湿性梯度表面润滑油在 1.38 ms 时达到最大铺展距离, 为自由铺展阶段。随后, 润湿性梯度表面油液开始回流, 直至完全回流至亲油轨道内,

为回流阶段。后 2 个阶段内, 润湿性梯度表面与普通表面润滑油流动状态存在明显区别, 后者未出现明显的回流情况。可见, 润湿性梯度表面确实对微量润滑油的铺展和回流产生影响。

为进一步说明两表面间差异情况, 给出图 5b 所示 $y=0$ 截面的润滑油轮廓线图。1.38 ms 时, 润湿性梯度表面和普通表面润滑油铺展距离分别为 0.53 mm 和 0.57 mm, 可见, 自由铺展阶段润湿性梯度对润滑油铺展存在抑制作用。3 ms 时, 两表面铺展距离分别为 0.44 mm 和 0.59 mm, 润湿性梯度表面三相接触点与原点距离逐渐减小, 而普通表面三相接触点与原点距离逐渐增大。6.5 ms 时润湿性梯度表面油液完全回流至亲油轨道内, 此时铺展距离为 0.25 mm, 而普通表面润滑油铺展距离为 0.61 mm。这进一步印证了

图 5a 中润湿性梯度表面润滑油出现的回流现象。1.38~4 ms 时, 由于早期回流的油液还未输送至液膜的中心(O 点)位置, 润湿性梯度表面液膜中心高度 h 稳定在 0.02 mm 左右, 润滑油轮廓线隆起位置在 4 ms 时即将到达液膜中心, 随后 h 开始增加, 5 ms 时, h 已经增长至 0.087 mm, 直到 6.5 ms 时, h 为 0.127 mm。由于没有明显的油液回流现象, 普通表面的 h 在 1.38 ms 后始终稳定在 0.02 mm 左右。因此, 润湿性梯度表面可以促进油液定向回流, 且效果十分明显。

为分析润湿性梯度表面的增强回流特性, 图 6 给出了润湿性梯度表面速度分布矢量图。1.1 ms 时, 自由铺展阶段润滑油在轨道外左侧速度矢量方向朝左下, 润滑油继续向疏油区域铺展, 右侧矢量方向逐渐指向亲油区域, 呈现初步向亲油轨道回流趋势。1.3 ms 时, 润滑油即将完全铺展, 三相接触线附近存在速度漩涡, 这种旋涡推动疏油区油液逐渐向亲油轨道方向移动^[24]。2.6 ms 时处于回流阶段, 此时速度矢量方向由原来的杂乱状态转为水平且朝向亲油轨道方向, 油液已出现比较明显的回流现象。

值得注意的是, 表面润湿性梯度对润滑油铺展的抑制起到一定效果, 但并不是十分明显。这归因于在快速铺展阶段, 接触副挤压力是润滑油铺展的主要作用力, 挤压力远大于表面润湿梯度作用力, 且挤压铺展时间短, 表面作用力还未体现阻碍润滑油向外流动的效果就进入下一阶段。在自由铺展阶段, 去除刚性板后, 润滑油惯性力作用不断减弱, 表面张力作用逐渐增大, 润滑油铺展速度逐渐减小至零。在回流阶段, 无外力作用时, 主要作用力为不平衡的表面张力, 油液会向润湿性较强的一侧移动。回流阶段润滑油的净驱动力^[21] $F_l = F_r - F_b$, 其中, F_r 为回流阶段驱动力, 主要包含润湿性梯度引起的不平衡表面张力等; F_b 为流动阻力, 主要包含黏附力、润滑油内部黏性力等。

2.2 轨道两侧疏油程度的影响

为研究轨道两侧疏油程度对润滑油铺展与回流的影响, 对轨道两侧疏油区接触角 $\theta_w = 20^\circ \sim 130^\circ$ 范围内的工况进行分析, 得到 $y=0$ 截面的铺展系数与润湿面积随时间的变化曲线, 如图 7 所示, 其中轨道内接触角 $\theta_n = 20^\circ$, 图例中 m 为回流曲线线性阶段斜率的

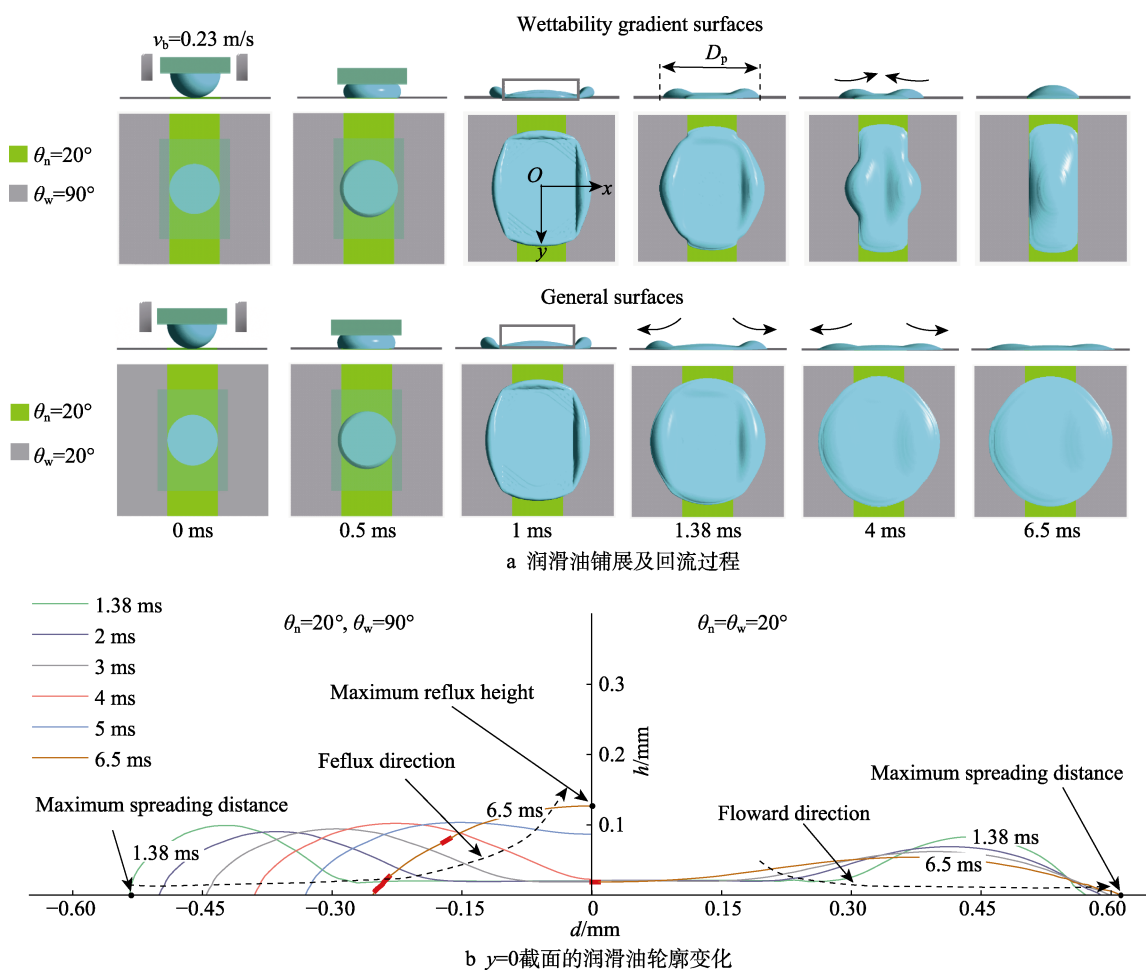


图 5 油滴在润湿性梯度与普通表面模拟结果

Fig.5 Simulation results of oil droplets on wetting gradient and common surfaces:
a) lubricant spreading and reflux process; b) change in lubricant profile for $y=0$ cross section

绝对值。由图可以看出, 在快速铺展阶段, 铺展系数 β 近似直线增长, 不同疏油区接触角下的铺展系数完全一致。但随后自由铺展和回流阶段则表现出不同, 润湿性表面 ($\theta_w > 20^\circ$), 铺展系数 β 在到达峰值后逐渐减小, 且润湿性梯度表面回流速度随 θ_w 增加而递增, 使得最大铺展系数下降更快, 完全回流时间减小, 而普通表面 ($\theta_w = 20^\circ$), 铺展系数 β 则缓慢增长, 直至最大值铺展距离, 其中 $\theta_w = 130^\circ$ 相对于 $\theta_w = 20^\circ$ 普通表面, 最大铺展系数与完全回流时间分别减小了 23.6% 和 76.9%。润湿面积 A_n 呈现出与铺展系数相同的规律, $\theta_w = 130^\circ$ 相对于 $\theta_w = 20^\circ$ 表面最大 A_n 减小了 14.3%。这是由于不同疏油区接触角 θ_w 下, 润滑油内部压力 (相对压力) 不同, 如图 8 所示, $t = 1.6$ ms 时 $y = 0$ 截面润滑油压力分布云图。回流阶段润滑油截面最大压力位于三相接触线附近, 压力值朝亲油轨道方向递减。在亲疏油分界线处, 压力降至零。同时, 随着 θ_w 增加, 在压力差值相近的情况下, 高、低压区域距离缩短, 即截面压力梯度增大。回流阶段的润滑油内部压力梯度转化为回流驱动力 F_f , 进一步被流动阻力 F_b 耗散。这种由润湿性梯度引起的压力梯度导致润滑油铺展和回流呈现出差异。

此外, 从挤压对偶副消失起追踪中心 (O 点) 膜厚变化, 如图 9 所示。可以看出, 在润湿性梯度表面 ($\theta_w > 20^\circ$), h_n 呈先稳定后增长的趋势, 这是由于 1 ms 后, 润滑油从自由铺展过渡至回流阶段, 最初回流的部分油液输送至液膜中心位置需要一定时间, 随着回流油液聚拢, 液膜中心高度才开始变化。但开始出现变化的时间点和增长速率各不同, 其中 $\theta_w = 130^\circ$ 表面的 h_n 最先 ($t = 2.3$ ms) 增长, 且增长速度最大, 而 $\theta_w = 20^\circ$ 表面的 h_n 始终保持在 0.08。相对于 $\theta_w = 67^\circ$ 表面, 当 $\theta_w = 130^\circ$ 时, h_n 增长时间点提前了 57.2%。这是缘于轨道两侧疏油程度更大的表面, 润滑油内部压力梯度更大, 使得油液回流速度加快, 油液率先到达液膜中心位置, 即液膜中心高度增长时间最早。因此, 轨道两侧疏油程度增大, 可以加强对润滑油铺展的抑制作用, 增大油液回流速度, 缩短完全回流时间, 进一步增强回流效果。

2.3 亲油轨道宽度的影响

亲油轨道宽度是润滑油铺展与回流的重要影响因素。对无量纲轨道宽度 $w_n = 0.8 \sim 1.4$ 范围内的工况进行分析, 得到 $y = 0$ 截面的润滑油铺展系数与润湿面

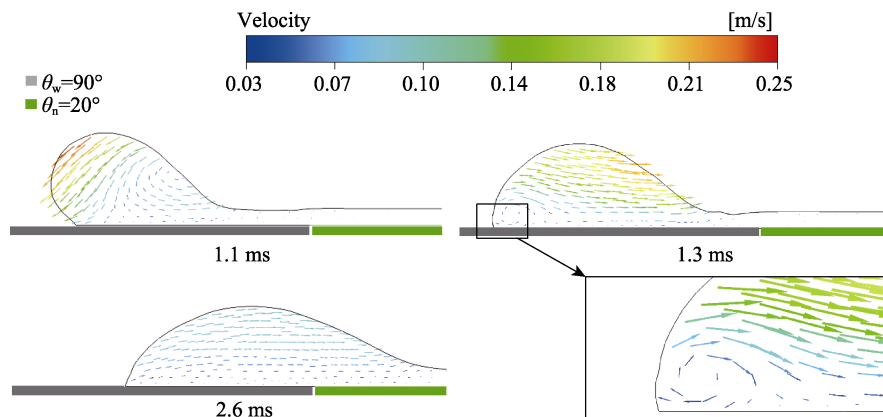


图 6 $y = 0$ 截面的润滑油速度分布矢量图

Fig.6 Vector diagram of lubricating oil velocity distribution on $y = 0$ cross section

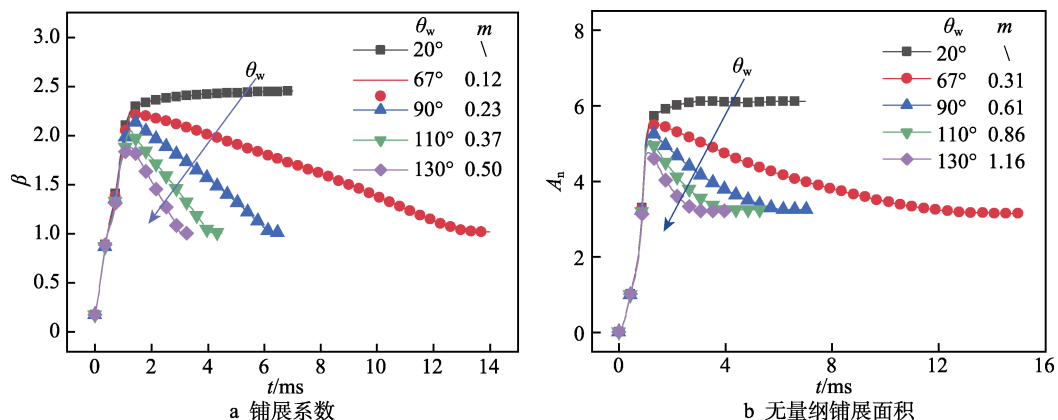


图 7 轨道两侧疏油区接触角 θ_w 对润滑油铺展与回流的影响

Fig.7 Effect of contact angle θ_w of oleophobic area on both sides of track on lubricant spreading and reflux: a) spreading factor; b) dimensionless wetted area

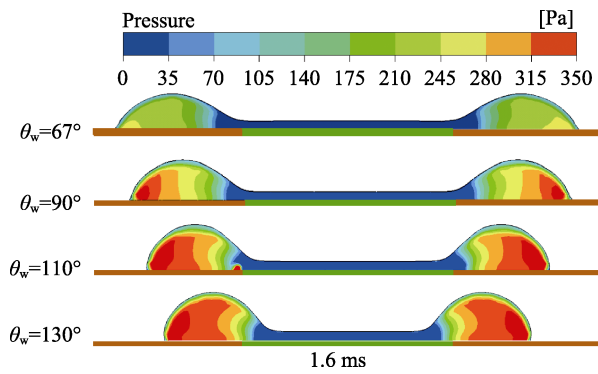


图 8 $y=0$ 截面润滑油压力分布云图
Fig.8 Lubricant pressure distribution contour for $y=0$ cross section

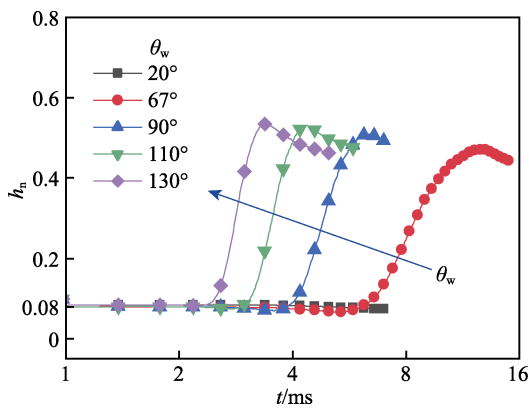
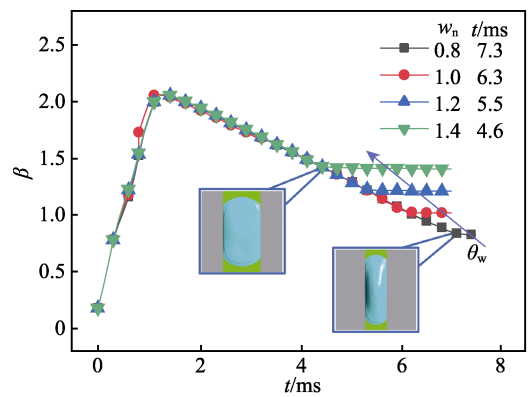


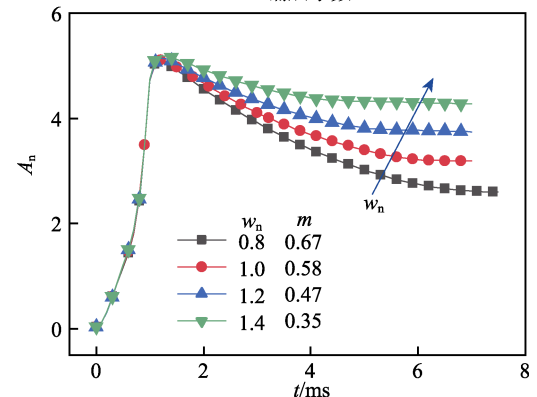
图 9 液膜中心高度系数随时间变化
Fig.9 Time-varying curve of coefficient of liquid film center height

积随时间的变化曲线，如图 10 所示，其中轨道两侧疏油区接触角 $\theta_w=90^\circ$ ，轨道内接触角 $\theta_n=20^\circ$ ，图例中 t 为完全回流时间点， m 为回流曲线线性阶段斜率的绝对值。由图可以看出，油液完全回流前，铺展系数曲线近似相同，随着轨道宽度增加，油液的回流速度相近，但完全回流时间递减，其中 $w_n=1.4$ 相对于 $w_n=0.8$ 表面完全回流时间减小了 39.4%。这是因为 w_n 的变化对润滑油最大铺展距离的影响较小，但 w_n 增加使润湿性分界线向两侧移动，这使得轨道两侧三相接触线与润湿性分界线的平均距离减小，从而缩短了回流距离，完全回流时间因此减小。润湿面积 A_n 与铺展系数的整体变化趋势相似，轨道宽度变化对最大润湿面积影响较小。由于亲油轨道宽度增加使表面亲油区域占比增加，回流的油液在亲油轨道内更易扩散，从而影响整体润湿面积变化，因此，随着 w_n 的增大， A_n 的下降趋势逐渐放缓，其中 $w_n=1.4$ 相对于 $w_n=0.8$ 表面，稳定后的润湿面积增大了 64.2%。

此外，挤压作用消失后，液膜中心高度系数 h_n 变化如图 11 所示。液膜中心高度增长时间点与开始回流时间点和回流速度密切相关，不同 w_n 下， h_n 开始增长的时间点接近，这与图 10 中的铺展系数曲线变化趋势对应，说明油液最先输送至液膜中心的时间点无明显差别。随着 w_n 的增大， h_n 增长速度与最大



a 铺展系数



b 无量纲铺展面积

图 10 无量纲轨道宽度 w_n 对润滑油铺展与回流的影响
Fig.10 Effect of dimensionless track width w_n on lubricant spreading and reflux: a) spreading factor; b) dimensionless wetted area

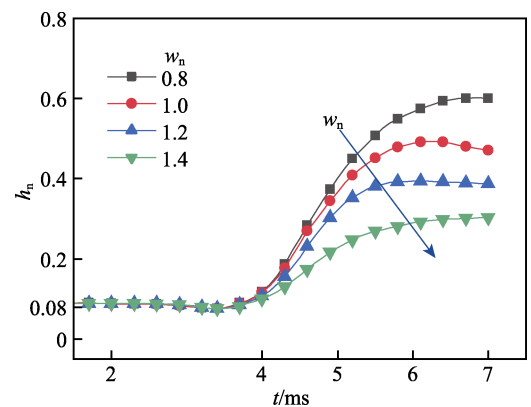


图 11 液膜中心高度系数随时间变化
Fig.11 Time-varying curve of coefficient of liquid film center height

液膜中心高度系数递减，其中 $w_n=1.4$ 相对于 $w_n=0.8$ 表面最大液膜中心高度系数减小了 39.4%。这是由于 w_n 较大的表面，回流油液分布范围增大，油液回流后聚拢于亲油轨道中心的效果减弱。相同油量下，增大亲油轨道宽度可以使稳定后的润湿面积增大，并缩短完全回流的时间。但轨道宽度过大会导致回流后油液分布过于分散，轨道宽度过小又会导致完全回流时间延长。因此，适宜的亲油轨道宽度选择可以提高表面对微量润滑油的集油能力。

2.4 润滑油黏度的影响

黏度是表征润滑油流动性的关键参数,有必要分析不同黏度对微量润滑油挤压铺展与回流的影响,采用黏度 $\mu=0.032\sim 0.108\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 范围内的模拟计算。如图 12 所示,得到 $y=0$ 截面润滑油的铺展系数与润湿面积变化曲线,其中轨道宽度 $w=0.5\text{ mm}$,相邻黏度值的增幅逐渐上升。由图可以看出,铺展系数 β 总体均呈现先增长后减小的趋势,润滑油黏度不会改变润湿性表面效应。但随着 μ 的增大,润滑油铺展系数与回流速度递减,且完全回流时间延长,其中 $\mu=0.108\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 相对于 $\mu=0.032\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 的润滑油,最大铺展系数减小了 13.5%,完全回流时间延长了 58.3%。润湿面积 A_n 与铺展系数的变化规律相同,随着 μ 的增大, A_n 下降趋势逐渐平缓。最大润湿面积随着 μ 的增大而减小, $\mu=0.108\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 相对于 $\mu=0.032\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 的润滑油,最大润湿面积减小了 12.9%。此外, $\mu=0.032\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 与 $\mu=0.046\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 之间的黏度值增幅最小,但在相邻黏度值中,油液回流速度与 A_n 减小速度降幅最大。这是由于黏度较高的润滑油内部分子间吸引力增大,流动阻力 F_b 增加,从而导致回流净驱动力 F_l 减小。可见,润滑梯度表面上润滑油挤压铺展和回流会受到黏度影响。

进一步分析挤压对偶副消失后液膜中心高度系数 h_n 的变化,如图 13 所示。可以看出, h_n 呈先稳定

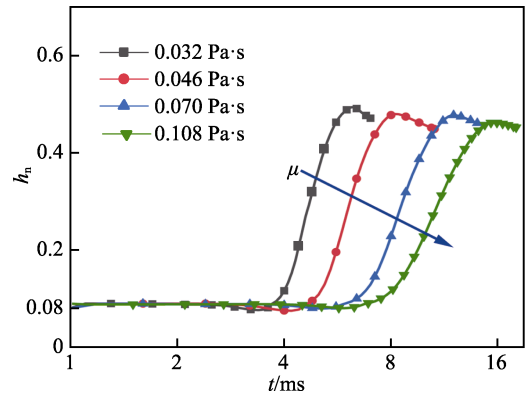


图 13 液膜高度系数随时间变化
Fig.13 Time-varying curve of coefficient of liquid film center height

后增长趋势。由于润滑油黏度 μ 增大时,内部黏性力相应增加,油液流动性变差,回流的油液运输至液膜中心位置的效率减弱,因此,在 $\mu=0.108\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 的情况下, h_n 增长速度最小,而且 h_n 增长时间点随着 μ 的增大而延迟,相对于 $\mu=0.032\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 的表面, $\mu=0.108\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 润滑油的 h_n 增长时间点延后 72.2%。因此,在低黏度区,润湿性梯度表面对油液回流效果影响更明显,而随着润滑油黏度增大,最大铺展系数和最大无量纲润湿面积均减小,液膜中心高度系数增长点延后,润滑油整体回流距离缩短,完全回流时间却相对延长。

3 结论

- 1) 润湿性梯度表面对润滑油向轨道两侧的挤压铺展具有一定的抑制效果,更为显著的是可以加速轨道两侧润滑油的回流。随着轨道两侧疏油程度增加,这种抑制和促进作用进一步增强,回流速度增大,完全回流所需的时间减少。
- 2) 在相同油量下,增大亲油轨道宽度可以使稳定后的润湿面积增大,完全回流的时间缩短。然而,轨道宽度过大会导致回流后油液分布过于分散,轨道宽度过小又会导致完全回流时间延长。
- 3) 在低黏度区间,润湿性梯度表面对润滑油回流效果影响较为显著,随着润滑油黏度增大,内部流动阻力增加,会导致最大铺展系数与最大无量纲铺展面积减小,回流距离缩短,液膜中心高度系数增长点却相对延后,导致完全回流时间延长。

参考文献:

[1] LIU C L, GUO F, WONG P L. Characterisation of Starved Hydrodynamic Lubricating Films[J]. Tribology International, 2019, 131: 694-701.
[2] LIANG H, GUO D, LUO J B. Experimental Investigation

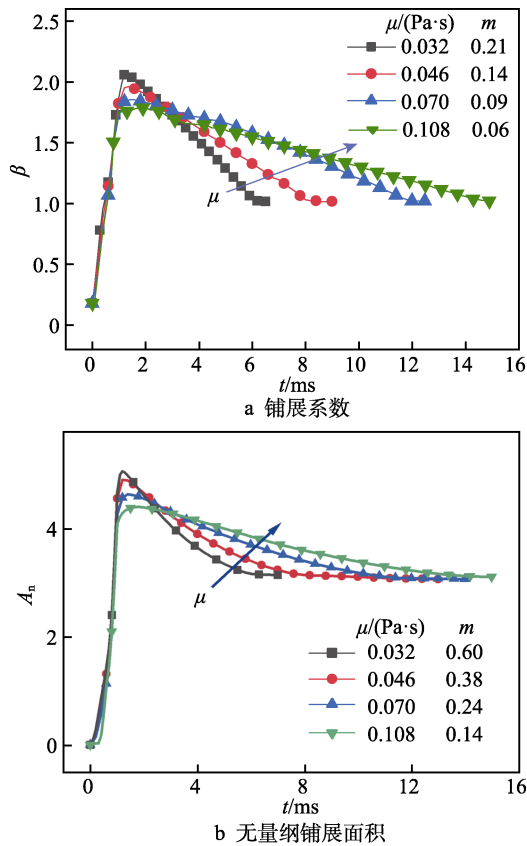


图 12 黏度 μ 对润滑油铺展与回流的影响
Fig.12 Effect of viscosity μ on lubricant spreading and reflux:
a) spreading factor; b) dimensionless wetted area

- of Lubrication Film Starvation of Polyalphaolefin Oil at High Speeds[J]. *Tribology Letters*, 2014, 56(3): 491-500.
- [3] GUO F, ZANG S Y, LI C, et al. Lubrication Film Generation in Slider-on-Disc Contact under Limited Lubricant Supply[J]. *Tribology International*, 2018, 125: 200-208.
- [4] LIU C L, GUO F, LI X M, et al. Enhancement of Lubricant Replenishment under Limited Lubricant Supply in Rolling Bearings[J]. *Tribology Letters*, 2023, 72(1): 6.
- [5] ALI F, KŘUPKA I, HARTL M. Mechanism for Controlling Oil Replenishment in Starved Elliptical EHL Contacts[J]. *Tribology Letters*, 2015, 60(3): 37.
- [6] 张登歌, 周润泽, 汪佳, 等. LPAF 添加剂对碳基固油复合润滑体系摩擦学性能的影响[J]. *表面技术*, 2024, 53(21): 44-54.
- ZHANG D G, ZHOU R Z, WANG J, et al. Effect of LPAF Additive on Tribological Properties of Carbon-based Solid-Oil Composite Lubrication System[J]. *Surface Technology*, 2024, 53(21): 44-54.
- [7] PEMBERTON J, CAMERON A. A Mechanism of Fluid Replenishment in Elastohydrodynamic Contacts[J]. *Wear*, 1976, 37(1): 185-190.
- [8] GERSHUNI L, LARSON M G, LUGT P M. Lubricant Replenishment in Rolling Bearing Contacts[J]. *Tribology Transactions*, 2008, 51(5): 643-651.
- [9] CHIU Y P. An Analysis and Prediction of Lubricant Film Starvation in Rolling Contact Systems[J]. *ASLE Transactions*, 1974, 17(1): 22-35.
- [10] ALI F, KŘUPKA I, HARTL M. Enhancing the Parameters of Starved EHL Point Conjunctions by Artificially Induced Replenishment[J]. *Tribology International*, 2013, 66: 134-142.
- [11] 梁鹤, 张宇, 王文中. 轴承内部润滑油分布及回流的试验观察与研究[J]. *摩擦学学报*, 2020, 40(4): 450-456.
- LIANG H, ZHANG Y, WANG W Z. Experimental Observation and Investigation of Oil Distribution and Replenishment in a Rolling Bearing Model[J]. *Tribology*, 2020, 40(4): 450-456.
- [12] 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 Z C, ZHENG J Y, YU Y S. Research Progress of Droplet Guided Motion on Wetting Surface[J]. *Surface Technology*, 2021, 50(1): 138-149.
- [13] 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 N N, CHAO S, ZHU G X, 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.
- [14] GREENSPAN H P. On the Motion of a Small Viscous Droplet that Wets a Surface[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1978, 84: 125-143.
- [15] BROCHARD F. Motions of Droplets on Solid Surfaces Induced by Chemical or Thermal Gradients[J]. *Langmuir*, 1989, 5(2): 432-438.
- [16] HIRATSUKA K, BOHNO A, ENDO H. Water Droplet Lubrication between Hydrophilic and Hydrophobic Surfaces[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2007, 89: 012012.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 臧淑燕, 郭峰, 李超. 表面亲润性对限量供油润滑影响的研究[J]. *摩擦学学报*, 2017, 37(4): 429-434.
- ZANG S Y, GUO F, LI C. Influence of Surface Wettability on Lubrication by Limited Lubricant Supply[J]. *Tribology*, 2017, 37(4): 429-434.
- [20] HUANG J J, HUANG H B, WANG X Z. Numerical Study of Drop Motion on a Surface with Stepwise Wettability Gradient and Contact Angle Hysteresis[J]. 2014, 26(6): 062101.
- [21] CHOWDHURY I U, SINHA MAHAPATRA P, SEN A K. Self-Driven Droplet Transport: Effect of Wettability Gradient and Confinement[J]. *Physics of Fluids*, 2019, 31(4): 042111.
- [22] YUAN Z C, MATSUMOTO M, KUROSE R. Directional Migration of an Impinging Droplet on a Surface with Wettability Difference[J]. *Physical Review Fluids*, 2020, 5(11): 113605.
- [23] RUSSO A, ICARDI M, ELSHARKAWY M, et al. Numerical Simulation of Droplet Impact on Wettability-Patterned Surfaces[J]. *Physical Review Fluids*, 2020, 5(7): 074002.
- [24] WANG T J, LIANG G T, LI L, et al. Droplet Wetting Propagation on a Hybrid-Wettability Surface[J]. *Langmuir*, 2021, 37(39): 11646-11656.
- [25] BAGHEL V, RANJAN M. Numerical Estimation of Droplet Motion on Linear Wettability Gradient Surface in Microgravity Environment[J]. *Materials Today Communications*, 2022, 32: 103916.
- [26] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries[J]. *Journal of Computational Physics*, 1981, 39(1): 201-225.
- [27] MALGARINOS I, NIKOLOPOULOS N, MARENGO M, et al. VOF Simulations of the Contact Angle Dynamics during the Drop Spreading: Standard Models and a New Wetting Force Model[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2014, 212: 1-20.
- [28] BRACKBILL J U, KOTHE D B, ZEMACH C. A Continuum Method for Modeling Surface Tension[J]. *Journal of Computational Physics*, 1992, 100(2): 335-354.
- [29] PACHCHIGAR V, RANJAN M, SOORAJ K P, et al. Self-Cleaning and Bouncing Behaviour of Ion Irradiation Produced Nanostructured Superhydrophobic PTFE Surfaces[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2021, 420: 127331.