

【特约稿】

非均匀亲和性界面对流体动压润滑油膜厚度的影响

王志君, 田鹏晖, 郭峰

(青岛理工大学 机械工程学院, 山东 青岛 266520)

摘 要: **目的** 研究非均匀亲和性界面对流体动压条件下润滑油膜厚度的影响。**方法** 通过对固体试样表面进行张力修饰以获得对润滑液体不同的亲和性, 其中包括表面的不同部分对液体的亲和性不同, 即非均匀亲和性表面。试验中利用防指纹油液 (AF) 对普通钢滑块进行张力修饰得到了均匀 AF 滑块和非均匀性 AF 滑块, 测量了钢滑块、入口 AF 滑块、出口 AF 滑块和全表面 AF 滑块的油膜厚度随倾角的变化, 同时利用防指纹油液对阶梯滑块进行张力修饰得到了 AF 阶梯滑块, 测量了阶梯滑块和 AF 阶梯滑块在倾角为 1:2231 和平行间隙两种条件下的油膜厚度随速度的变化。**结果** 四种滑块的油膜厚度随倾角的增大均呈现先增大后减小的趋势, 存在最佳倾角, 且普通钢滑块表面、非均匀亲和性 AF 表面、均匀 AF 表面的油膜厚度依次降低。对阶梯滑块和 AF 阶梯滑块的测量结果表明, AF 阶梯滑块产生的油膜厚度一直低于阶梯滑块。**结论** 在流体动压薄膜润滑条件下, 固液界面亲和性可以对膜厚产生明显的影响。通过选择性修饰试样表面, 使得表面润湿性具有区域性差异, 油膜厚度降低, 认为造成该现象的原因是润滑剂在固液界面亲和性低的部分发生较强的侧泄。

关键词: 流体动压润滑; 非均匀亲和性; 界面滑移; 油膜厚度; 表面改性; 润湿性

中图分类号: TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)06-0035-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.06.006

Effects of Non-heterogeneous Affinity Interface on Hydrodynamic Lubricant Films

WANG Zhi-jun, TIAN Peng-hui, GUO Feng

(School of Mechanical Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266520, China)

ABSTRACT: The work aims to investigate effects of heterogeneous affinity interface on hydrodynamic lubricant film thickness at hydrodynamic pressure. Tensional modification was performed to obtain interfaces of different affinities, including different parts on surfaces of different heterogeneous affinities, i.e., non-homogeneous affinity surface. Homogeneous AF slider and non-homogeneous AF slider were obtained by modifying plain steel slider with anti-finger-print oil (AF). Variation of film

收稿日期: 2017-01-05; 修订日期: 2017-03-10

Received: 2017-01-05; Revised: 2017-03-10

基金项目: 国家自然科学基金 (51275252); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金 (20133721120003)

Fund: the National Natural Science Foundation of China(51275252), the Ph.D. Programs Foundation of the Ministry of China(20133721120003)

作者简介: 王志君 (1992—), 女, 硕士研究生, 主要研究流体动压润滑界面效应。

Biography: WANG Zhi-jun(1992—), Female, Master student, Research focus: interface effect of hydrodynamic lubrication.

通讯作者: 郭峰 (1968—), 男, 博士, 教授, 主要从事边界滑移条件下润滑薄膜的机理研究, 微米/亚微米润滑油膜的光学测量和实验技术。

Corresponding author: GUO Feng(1968—), Male, Ph.D., Professor, Research focus: mechanism research of oil film lubrication under boundary slip, Optical measurement and experimental technique of lubricating oil film at micro/submicro scale.

thickness with inclination was measured for steel slider, inlet-AF slider, outlet-AF slider and whole-surface AF slider. Meanwhile, homogeneous AF stair slider was obtained by modifying stair slider with anti-finger-print oil (AF), and variation of film thickness with speed was measured for step-1.5 slider and AF step-1.5 slider under provided with $\theta = 0$ and $\theta = 1:2231$, respectively. Film thickness of four slider increased first and then decreased with the increase of inclination, optimum inclination existed. And film thickness of steel slider, heterogeneous affinity slider and AF slider decreased in sequence. Besides, film thickness of AF step-1.5 slider was always lower than that of step-1.5 slider. Provided with film lubrication at hydrodynamic pressure, affinity of the solid/liquid interface can obviously influence film thickness. Selective modification of sample surface can endow surface wettability with regional difference and induce low film thickness, which is attributed to the side leakage in parts of lower affinity despite of the slippage step effect.

KEY WORDS: fluid hydrodynamic lubrication; non-heterogeneous affinity; boundary slip; oil film thickness

随着界面科学的进步,在微型器件滑动接触的摩擦学设计中,研究人员在重新认识液体膜润滑。在此类润滑中,界面的亲和性起至关重要的作用,同时界面亲和性与界面滑移是紧密联系的^[1]。随着新的测量技术与测量手段的出现,学者们展开了更精确的实验研究。尽管某些实验表明液体在润湿的表面也能发生滑移^[2-4],但从更多的试验结果来看,边界滑移是克服固液界面作用力的结果,因此通常认为弱的界面亲和性有利于界面滑移的发生^[5-8]。表面改性技术的发展使改变固液界面亲和性更加容易实现,而固液界面亲和性不同会造成对液体流动的阻力不同,界面滑移的程度也不同。通过对摩擦副静止固体表面进行表面张力修饰,并选择恰当的润滑液体,可在润滑接触区构建特定的界面亲和性分布,使润滑剂在入口区域的滑动阻力小,在出口区域的滑动阻力大,实现润滑剂在入口区域的滑移量较出口区域大,从而实现有效油膜润滑,这里称之为“滑移台阶效应”。该效应引起了摩擦学研究人员的兴趣,人们针对不同形式的润滑对该效应的作用进行了理论研究。Salant 和 Fortier^[9]使用滑块轴承和修正的线性滑移模型进行了分析,并将该效应等效为“滑动凹槽”,研究结果表明,这种带凹槽的异构轴承表面相比于无凹槽的传统轴承能有效提高承载力和流体膜轴承性能。Guo 和 Wong^[10]在理论上提出了一种新颖的实现有效油膜润滑方式,通过固定边界表面改性的方式,使润滑液体在上游区域发生边界滑移,并使用临界剪切应力模型得到了平行间隙、正间隙和负间隙滑块轴承一维问题的解析。Wu 等人^[11]将这种能产生不同滑移的滑块表面称为“混合滑移面”,并通过计算指出该表面可以改变轴承的动力学稳定性。以上理论研究所使用的滑移模型及参数都不相同,分析方法也不相同,但结果都显示改变接触区入口侧和出口侧的界面滑移程度,可提高油膜的承载能力。此外,针对该滑移台阶效应,研究者还开展了其对径向滑动轴承性能影响的理论研究。Rao^[12]的研究表明,具有局部滑移的径向轴承与无滑

移的传统轴承相比,最大无量纲压力大幅增加。Fatu 等人^[13]和 Li 等人^[14]的工作结果也显示,在径向轴承中引入滑移台阶会增加承载力,减小摩擦力。

综上所述,目前关于滑移台阶效应的研究仅限于概念层面上的理论分析,相关的试验研究相当匮乏。本文通过对固体表面进行张力修饰获得对润滑液体不同的亲和性,其中包括表面的不同部分对液体的亲和性不同,即非匀质亲和性表面,并利用面接触润滑油膜光学测量系统进行油膜厚度测量。

1 实验设备

本试验在自主开发的面接触润滑油膜测量系统上完成,原理如图 1 所示。当平行的单色光入射到玻璃盘、润滑液体和微滑块组成的多层膜系统时,光束会在各层膜界面发生反射和折射,形成干涉条纹。干涉条纹的数目变化可以用来判断微滑块的倾角变化,干涉条纹的形态变化可以用来判断微滑块表面是否发生了弹性变形。在测量过程中,需要保持静止微滑块的倾角和载荷固定,电机带动玻璃盘以给定速度旋

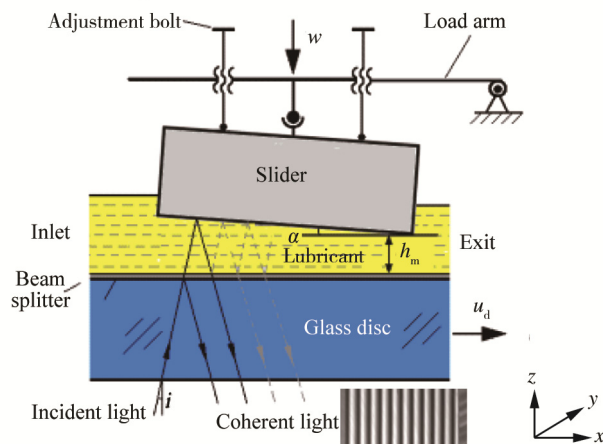


图 1 测量装置原理示意图

Fig.1 Schematic illustration of the tester

转形成润滑油膜, 其最小油膜厚度 h_m 位于出口位置。我们通过记录玻璃盘在启动或停止过程中干涉图像某一点的光强变化可推算出最小油膜厚度 h_m 。该测量系统可以完成不同滑块倾角、不同转速、不同载荷的油膜厚度测量^[15]。

2 非均匀 AF 单分子膜对滑块油膜厚度影响的试验测量

2.1 试验材料及条件

本次试验中, 要求润滑油与玻璃圆盘的工作面形成较强亲和性的界面, 而与滑块能形成不同亲和性的界面。试验中使用的玻璃盘镀有 $\text{Cr}+\text{SiO}_2$ 双层膜, SiO_2 具有较高的表面能, 可与润滑油形成亲和性较好的界面, 其表面粗糙度 R_a 为 4 nm。所使用的滑块表面分为钢滑块、匀质 AF 滑块和非均匀性 AF 滑块三类, 尺寸均为 4 mm(滑动方向)×6 mm。其中, 匀质 AF 薄膜滑块(以下简称 AF 滑块)是对滑块表面进行整体的张力修饰, 即在钢滑块工作表面整体涂一层 AF 薄膜, 这种 AF 薄膜具有活性硅烷基团和氟改性有机基团, 它能保持基材本身的光学特性且具有优越的附着力。非均匀性 AF 滑块是对滑块部分表面进行张力修饰, 即在钢滑块工作的部分表面(约为表面积的一半)均匀涂一层 AF 薄膜, 非均匀性 AF 滑块在试验中由于 AF 薄膜部分的位置不同, 又分为 inlet-AF (AF 区位于入口处)和 outlet-AF (AF 区位于出口处), 如图 2 所示。润滑油采用的是黏度为 57.6 mPa·s (温度为 20 °C 时)的 PAO 6。速度范围为 3.6~70.0 mm/s, 载荷为 4 N, 倾角范围为 1:3594~1:719。环境温度为 (20±1) °C, 相对湿度为(40±5)%。

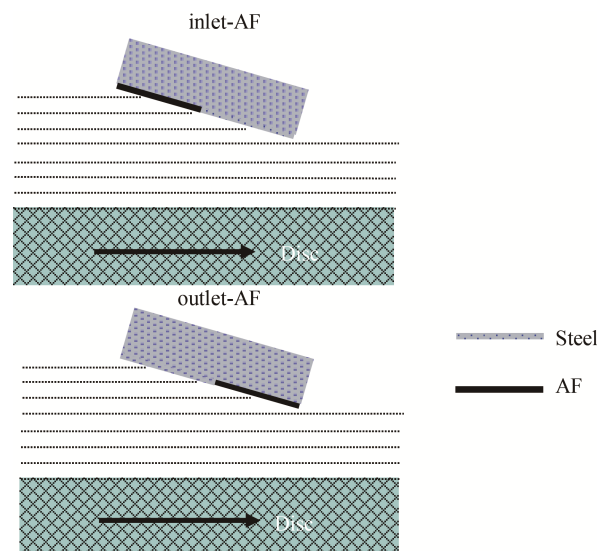


图 2 非均匀性 AF 滑块
Fig.2 Heterogenous AF slider

图 3 为 PAO 6 相对于制备的非均匀亲和性 AF 滑块的接触角图像, 可以明显看出, 润滑液体在滑块表面两侧的接触角有明显差别。图 4 则给出了一个动态的接触过程, 注射器位于非均匀性 AF 滑块表面强亲和性和弱亲和性交界处的正上方, 当 PAO 6 与非均匀性 AF 滑块表面接触的瞬间会自发向亲和性好的一侧流动。



图 3 PAO 6 相对于非均匀性 AF 滑块的接触角
Fig.3 Contact angles of the PAO 6 on the heterogenous AF slider

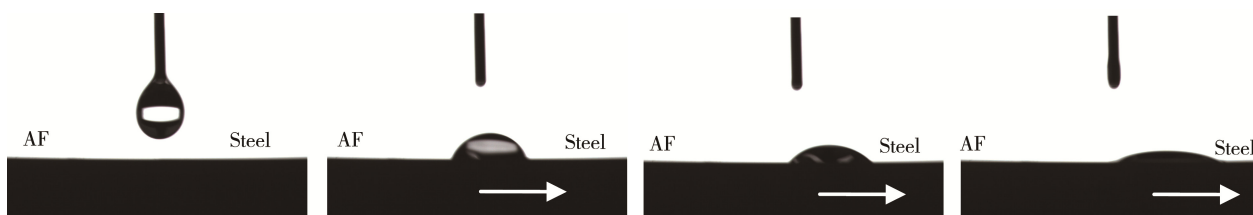


图 4 PAO 6 在非均匀性 AF 滑块上的流动
Fig.4 The flow of the PAO 6 on the heterogenous AF slider

2.2 试验结果与讨论

图 5 给出了 inlet-AF 滑块在不同倾角 θ 下的干涉图像, $w=4\text{ N}$ 、 $u=15\text{ mm/s}$ 。经过对比, inlet-AF 滑块的干涉图像与普通钢滑块相比并无明显差别, outlet-AF 滑块同样如此, 此处不再列举。

图 6 给出了载荷为 4 N 时, 四种滑块在低速、中

速和高速情况下油膜厚度随倾角的变化曲线, 为方便测量, 倾角变化通过直接改变条纹数目获得。整体来看, 在三种速度下, 四种滑块的油膜厚度随倾角的增大均呈现先增大后减小的趋势, 存在最佳倾角, 约在 1:1797 到 1:898 (10 条纹到 20 条纹) 之间。当速度为 5 mm/s 时, 钢滑块和 inlet-AF 滑块存在最佳倾角的现象并不明显, 倾角较小时, 油膜厚度基本保持不

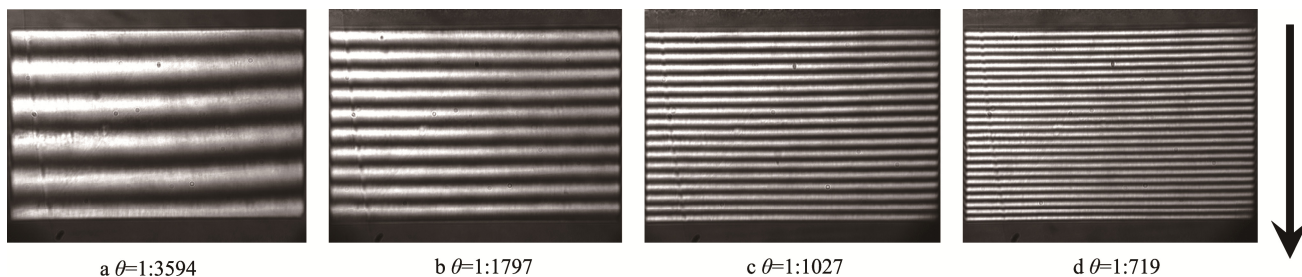


图5 不同倾角条件下的干涉图像

Fig. 5 Interference fringes under different inclinations

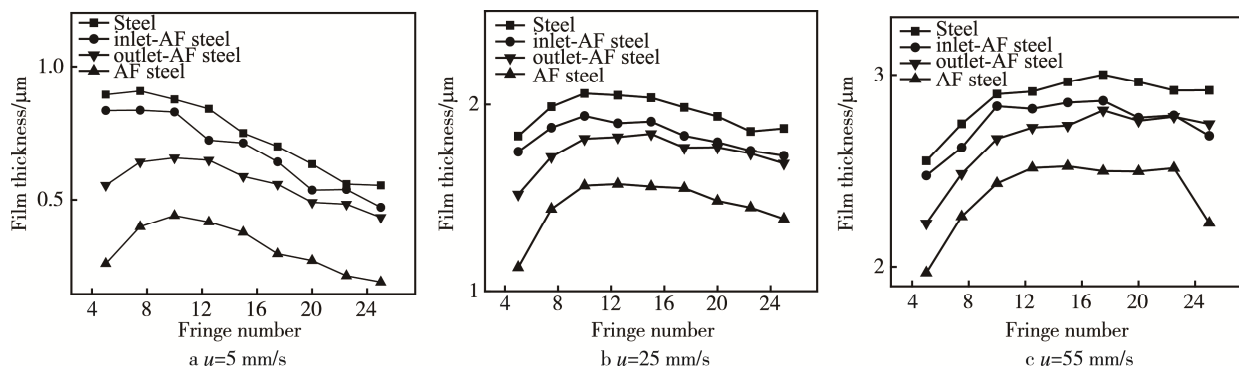


图6 油膜厚度-倾角曲线

Fig. 6 Film thickness versus inclination

变,随着倾角的增大,油膜厚度逐渐减小。当速度进一步升高时,最佳倾角现象明显存在。当速度为 55 mm/s 时,四种滑块在较宽的倾角范围内均存在较高的油膜厚度。

图 7 给出了两种倾角条件下的油膜厚度-速度曲线

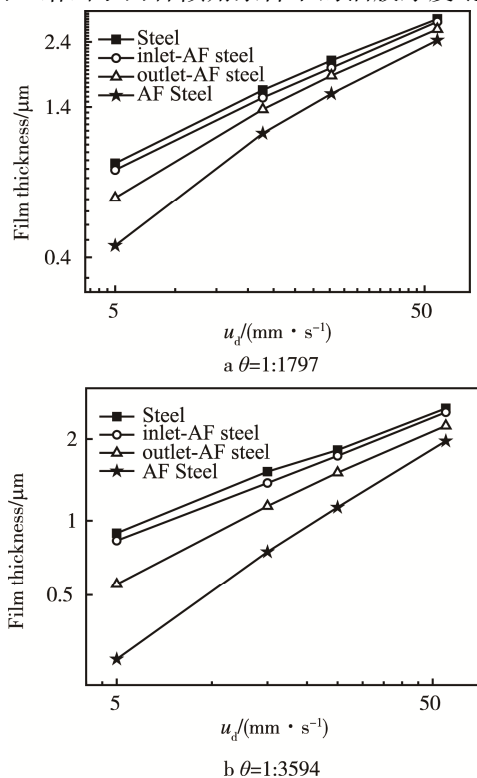


图7 不同倾角下的油膜厚度-速度曲线

Fig. 7 Film thickness versus speed at different inclinations

线。从图中可以看出,对于不同表面的滑块,钢滑块产生的油膜厚度最高,AF 滑块产生的油膜厚度最低,这是由于 PAO 6 相对于两种界面的亲和性差异较大。因为 PAO/AF 界面的弱亲和性可能导致 PAO 在滑块表面的滑移,根据现有的滑移润滑理论^[16,17],这种滑移导致等效卷吸速度的降低和侧泄的加剧,从而产生润滑油膜承载力的下降,即相同速度下油膜厚度的降低。从图中还可以看到,inlet-AF 和 outlet-AF 两者的膜厚处于钢滑块和 AF 全膜滑块的膜厚之间,总体是合理的,因为弱亲和性界面只存在于部分滑移区域。对于 inlet-AF 滑块,如果滑移在入口低亲和力界面处出现,则会诱发滑移台阶效应,即引进了一个附加的等效收敛几何楔,产生附加的动压效应。这样的话,inlet-AF 滑块应该比钢滑块(steel)有更高的承载力。但测量结果并不如此,这是因为入口处局部的低亲和力界面加剧了该位置的润滑剂侧泄,会导致参与润滑的润滑剂总量减少,削弱了润滑膜的承载力。对于 outlet-AF 滑块,滑移台阶效应与 inlet-AF 滑块的相反,等于引进了一个发散的附加间隙,同时出口处局部的低亲和力界面加剧了该位置的润滑剂侧泄,这两个因素必然导致 outlet-AF 滑块的承载力下降,油膜厚度降低,outlet-AF 滑块的膜厚低于 inlet-AF 滑块的膜厚。

3 阶梯滑块油膜厚度试验测量

3.1 试验材料及条件

试验中所使用的滑块有阶梯滑块(记做 Step-1.5)

和 AF 阶梯滑块（记做 AF Step-1.5），外形尺寸均为 4 mm（滑动方向）×6 mm。润滑油采用的是 PAO 6 和 PAO 40，二者黏度差异很大，性质如表 1 所示。试验测量了倾角为 1:2231 和平行间隙两种条件下的油膜厚度，如图 8 所示。速度范围为 3.6~70.0 mm/s，载荷范围为 2~12 N，环境温度为(20±1)℃，相对湿度为(40±5)%。使用粗糙度轮廓仪(Form Talysurf PGI 800 型)对试验中使用的阶梯滑块表面形貌进行测量，如图 9 所示。从图中可以看出，阶梯滑块的阶梯深度约为 5 μm，此时阶梯滑块表面形貌对润滑性能产生的影响不可以被忽略。

表 1 实验所用润滑液体的性质
Tab.1 Properties of lubricants used in the test

Lubricants	Dynamic viscosity/(MPa·s)	Refractive index
PAO 6	57.6	1.46
PAO 40	1050	1.47

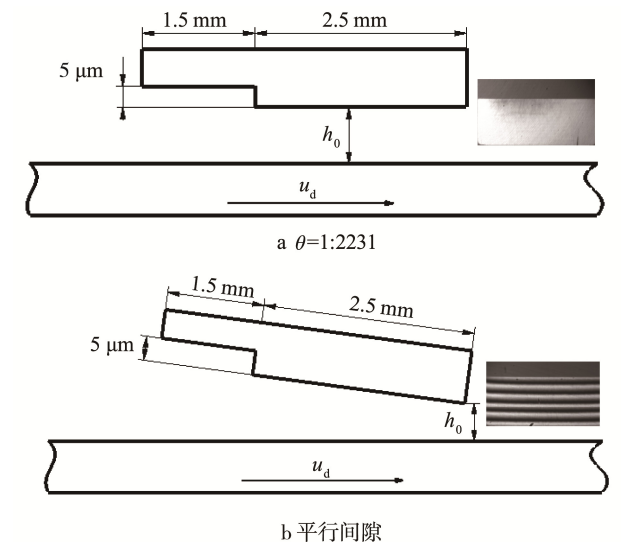


图 8 阶梯块示意图及干涉图像
Fig.8 Schematic illustration of the step slider and interference fringes

3.2 试验结果与讨论

图 10 给出了倾角为 1:2231、载荷为 4 N 时，不同润滑油下阶梯滑块和 AF 阶梯滑块的油膜厚度-速度曲线。从图 10a 中可以看出，润滑油为 PAO 6 时，由于界面亲和性差，AF 阶梯滑块产生的油膜厚度远远低于阶梯滑块，且当速度低于 10 mm/s 时，AF 阶梯滑块甚至无法产生稳定的润滑油膜。从图 10b 中可以看出，润滑油为 PAO 40 时，AF 阶梯滑块产生的油膜厚度仍低于阶梯滑块，但厚度下降量相对于 PAO 6 的小，均在 700 nm 左右。图 11 给出了润滑油为 PAO 40、平行间隙条件下，不同速度下阶梯滑块和 AF 阶梯滑块的油膜厚度-载荷曲线。当速度为 15 mm/s 和 55 mm/s 时，两种阶梯滑块的油膜厚度随载荷的增加

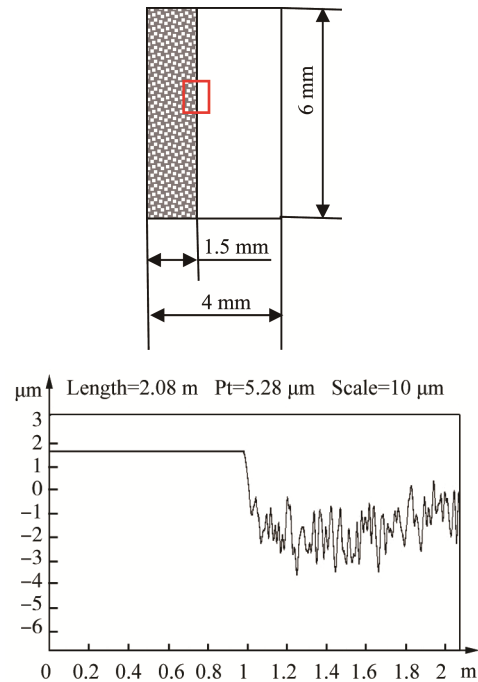


图 9 阶梯块表面形貌示意图
Fig.9 Surface feature of step slider

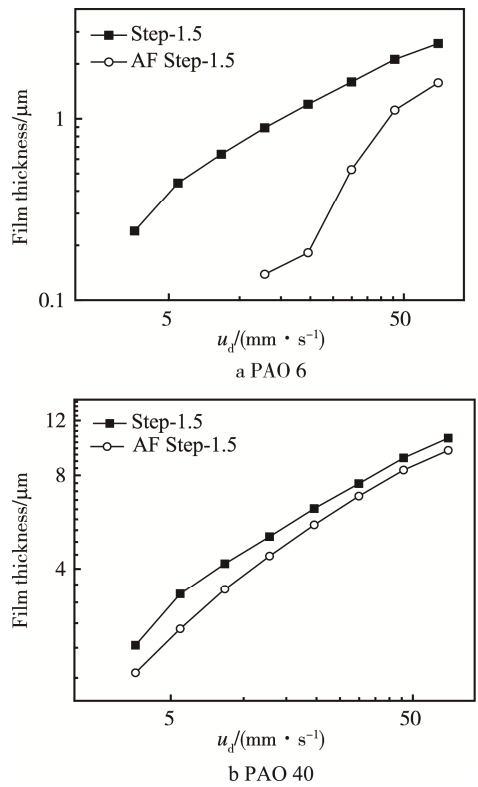


图 10 油膜厚度-速度曲线
Fig.10 Film thickness versus speed

均显著降低，且 AF 阶梯滑块产生的油膜厚度一直低于阶梯滑块。
图 12 给出了润滑油为 PAO 40、平行间隙条件下，不同载荷下阶梯滑块和 AF 阶梯滑块的油膜厚度-速度曲线。两种载荷条件下 AF 阶梯滑块产生的油膜厚

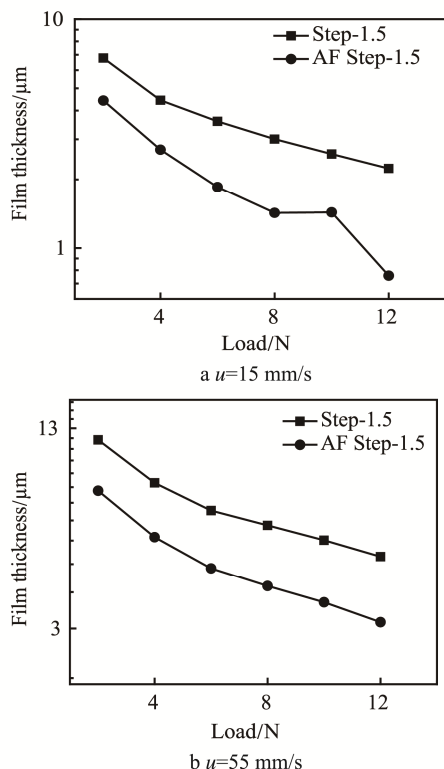


图 11 油膜厚度-载荷曲线
Fig.11 Film thickness versus load

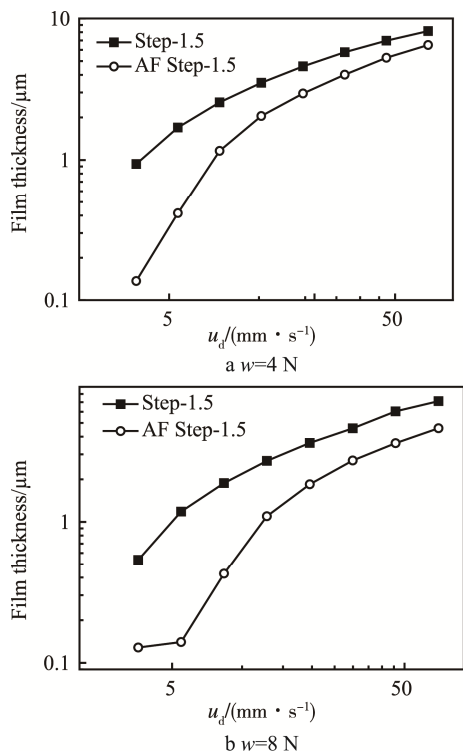


图 12 油膜厚度-速度曲线
Fig.12 Film thickness versus speed

度均低于阶梯滑块,当载荷为8 N时,AF阶梯滑块较阶梯滑块油膜厚度下降的程度要高于4 N载荷,可以看出载荷对油膜厚度下降有明显影响。对比图10的试验结果,当载荷为4 N时,平行间隙条件与倾角为

1:2231时的油膜厚度相比,油膜厚度下降率明显变大,平行间隙条件下油膜厚度下降20%~85%,倾角为1:2231时油膜厚度下降8.5%~23%,且高速时油膜厚度的下降率要低于低速状态。

4 结论

对非均匀性 AF 滑块在不同倾角条件下的油膜厚度进行了测量,得到以下结论:

1) 试验表明,在全膜润滑下,润滑油膜厚度随倾角的增大呈现先增大后减小的趋势,存在最佳倾角,且当速度较高时,最佳倾角的范围会有所变宽。

2) 通过选择性修饰试样表面,使得表面润湿性具有区域性差异,油膜厚度降低,认为造成该现象的原因是润滑剂在固液界面亲和性低的部分发生较强的侧泄。

对阶梯滑块和 AF 阶梯滑块在不同载荷条件下的油膜厚度进行了测量,得到以下结论:

1) 试验表明,倾角为 1:2231 时,相对于 PAO 6 和 PAO 40 两种润滑液体,AF 阶梯滑块油膜厚度的平均下降量相似,约为 700 nm。

2) 平行间隙条件下油膜厚度下降率要高于倾角为 1:2231 时的油膜厚度下降率,且高速时油膜厚度的下降率要低于低速状态。

3) 平行间隙条件下载荷对油膜厚度的下降程度有一定影响,推测认为载荷的增加会加大界面滑移的发生,进而导致油膜厚度的进一步降低。

参考文献:

- [1] 吴承伟, 马国军, 周平. 流体流动的边界滑移问题研究进展[J]. 力学进展, 2008, 38(3): 265—282.
WU Cheng-wei, MA Guo-jun, ZHOU Ping. A Review of the Study on the Boundary Slip Problems of Fluid Flow[J]. Advances in Mechanics, 2008, 38(3): 265—282.
- [2] BONACCURSO E, KAPPL M, BUTT H J. Hydrodynamic Force Measurements: Boundary Slip of Hydrophilic Surfaces and Electrokinetic Effects[J]. Physical Review Letters, 2002, 88(7): 076103.
- [3] JOSEPH P, TABELING P. Direct Measurement of the Apparent Slip Length[J]. Physical Review E Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics, 2005, 71(3 Pt 2A): 035303.
- [4] CHO J H J, LAW B M, RIEUTORD F. Dipole-dependent Slip of Newtonian Liquids at Smooth Solid Hydrophobic Surfaces[J]. Physical Review Letters, 2004, 92(16): 166—102.
- [5] BARRAT J L, BOCQENT L. Large Slip Effect at a Non-wetting Fluid-Solid Interface[J]. Physical Review Letters,

- 1999, 82(23): 4671—4674.
- [6] HUANG D M, SENDNER C, HORINEK D, et al. Water Slippage Versus Contact Angle: A Quasiuniversal Relationship[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101(22): 226—101.
- [7] COTTIN-BIZONNE C, STEINBERGER A, CROSS B, et al. Nanohydrodynamics: The Intrinsic Flow Boundary Condition on Smooth Surfaces[J]. *Langmuir*, 2008, 24(4): 1165—1172.
- [8] ZHU Y, GRANICK S. Rate-dependent Slip of Newtonian Liquid at Smooth Surfaces[J]. *Physical Review Letters*, 2001, 87(9): 096105.
- [9] FORTIER A E. Numerical Analysis of a Slider Bearing with a Heterogeneous Slip/No-Slip Surface[J]. *Tribology Transactions*, 2004, 47(3): 328—334.
- [10] GUO F, WONG P L. Theoretical Prediction of Hydrodynamic Effect by Tailored Boundary Slippage[J]. *ARCHIVE Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2006, 220(1): 43—48.
- [11] WU C W, MA G J, ZHOU P, et al. Low Friction and High Load Support Capacity of Slider Bearing with a Mixed Slip Surface[J]. *Journal of Tribology*, 2006, 128(4): 904—907.
- [12] RAO T V V L N. Analysis of Single-grooved Slider and Journal Bearing with Partial Slip Surface[J]. *Journal of Tribology*, 2010, 132(1): 014501.
- [13] AURELIAN F, PATRICK M, MOHAMED H. Wall Slip Effects in (Elasto) Hydrodynamic Journal Bearings[J]. *Tribology International*, 2011, 44(7—8): 868—877.
- [14] WANG L L, LU C H, WANG M, et al. The Numerical Analysis of the Radial Sleeve Bearing with Combined Surface Slip[J]. *Tribology International*, 2012, 47: 100—104.
- [15] 白清华, 郭峰, 刘海超, 等. 面接触润滑油膜测量系统滑块倾角的快速计算[J]. *摩擦学学报*, 2015, 35(5): 517—524.
- BAI Qing-hua, GUO Feng, LIU Hai-chao, et al. A Robust Approach to Determining the Slider Inclination in a Slider-on-Disk Conformal-contact Lubricating Film Measurement System[J]. *Tribology Letters*, 2015, 35(5): 517—524.
- [16] H A. The Half-wetted Bearing. Part 1: Extended Reynolds Equation[J]. *ARCHIVE Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2003, 217(1): 1—14.
- [17] MA G J, WU C W, ZHOU P. Multi-linearity Algorithm for Wall Slip in Two-dimensional Gap Flow[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2007, 69(12): 2469—2484.