

固液界面对流体动压润滑膜厚的影响

田鹏晖, 郭峰, 王志君, 刘长松

(青岛理工大学 机械工程学院, 山东 青岛 266520)

摘 要: **目的** 研究固液界面对流体动压润滑油膜厚度的影响。**方法** 在面接触润滑油膜光学测量装置中, 旋转的光学玻璃圆盘和静止的微型滑块平面构成面接触摩擦副。实验选取 PAO6 和 80%甘油水溶液作为润滑剂, 而滑块使用的表面材料为钢和二氧化硅两种。实验中分别利用同种润滑液体与不同滑块表面材料组合, 以及不同润滑液体与同种滑块表面材料组合成不同界面组。针对不同界面组进行不同条件下的膜厚-速度关系曲线的测量。各界面的亲和性通过液体对固体的接触角评价。**结果** PAO6/钢界面与 PAO6/SiO₂ 界面产生的膜厚-速度曲线无明显差别, 并与经典润滑理论计算值保持一致。而 PAO6 对钢表面和二氧化硅表面的接触角分别为 17.5°和 21.9°, 两界面的亲和性差别不大。当界面组内各界面亲和性差别较大时, 对应的膜厚表现出差别。亲和性较弱, 或对应液体在固体的接触角较大时, 膜厚相对较低。对于文中实验条件, 界面效应随载荷的增加表现明显。初步分析表明, 载荷的增加会加大摩擦副出口处油膜的剪切应变率, 诱发滑移, 从而使得界面效应明显。**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。

关键词: 面接触; 流体动压润滑; 光学测量; 接触角; 固液界面亲和性; 油膜厚度; 界面效应

中图分类号: TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)10-0077-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.10.012

Effects of the Liquid/Solid Interface on Thickness of Hydrodynamic Lubricating Films

TIAN Peng-hui, GUO Feng, WANG Zhi-jun, LIU Chang-song

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

ABSTRACT: The work aims to investigate the effects of liquid/solid interface on thickness of hydrodynamic lubricating film. In an optical surface-contact lubricating film thickness tester, the surface-contact friction pair was composed of a rotary optical glass disc and a stationary micro slider. PAO6 and 80% glycerol aqueous solution were used as lubricants while steel and SiO₂ were used as the surface materials of sliders. In the test, one lubricant was combined with different surface materials of sliders

收稿时间: 2016-03-26; 修订时间: 2016-06-09

Received: 2016-03-26; Revised: 2016-06-09

项目基金: 教育部博士学科点专项科研基金 (20133721120003); 国家自然科学基金 (51275252)

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

作者简介: 田鹏晖 (1991—), 男, 硕士研究生, 主要研究流体动压润滑界面效应。

Biography: TIAN Peng-hui(1991—), Male, 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.

and different lubricants were combined with one surface material of sliders to constitute different interface groups. For each interface group, film thickness-speed curves were measured under different conditions. The affinity of various interfaces was assessed by the liquid-solid contact angles. Results indicated that the PAO6/steel interface and the PAO6/SiO₂ interface showed negligible difference in film thickness-speed curves, and the curves agreed well with theoretical predictions. The contact angle of PAO6 on these two slider surfaces were 17.5° and 21.9° respectively, showing strong affinity but less difference between the two. However, in case of large affinity difference in the interface groups, the film thickness also showed difference. When the interface affinity was weak, or corresponding liquid-solid contact angle was large, the film thickness was relatively low. Under the present experimental conditions, interfacial effects varied significantly with the increase of load. Preliminary analysis indicated that load increase would induce slippage and therefore enhance interfacial effects since it would increase shear rate of oil film at the outlet of friction pair. Provided with hydrodynamic lubrication, the affinity of solid/liquid interface can have obvious influence on the film thickness.

KEY WORDS: surface contact; hydrodynamic lubrication; optical measurement; contact angle; affinity of solid/liquid interface; film thickness; interfacial effects

润滑是降低摩擦和减少磨损的重要技术方法。其中液体薄膜润滑已被证明是最有效的润滑技术之一,是一个极其重要的研究领域。20 世纪 80 年代后期,微机电系统(MEMS)逐渐兴起,在微尺度机械系统中接触表面的磨损是系统失效的主要原因之一。目前多采用基于固体薄膜的抗磨损方案,但在长时间滑动工作条件下,固体薄膜在抗磨损方面表现出局限性,而液体膜润滑有望解决这一问题^[1]。由于微尺度机械系统自身尺寸的减小,导致面积力要比体积力大若干个数量级,在研究其润滑特性时要考虑表面效应,如表面张力、粘着力和范德华力等,其中与表面能/表面张力相关的固液界面特性对流体润滑有着重要的影响^[2-3]。

研究表明,当固液界面亲和性低时,液体在固体表面上易发生滑移从而降低摩擦力,因此相关的基础理论和实验研究已成为润滑领域的重要课题。在理论方面,人们借助分子动力学模拟和数值分析进行了研究。通过改变液体与固体分子间作用势可得到不同的界面亲和性。当亲和性减弱,模拟结果显示界面附近出现固液相对滑动区域^[4-5]。在液体膜润滑条件下,基于界面亲和效应,研究人员提出了不同的模型来研究润滑特性。如基于有序分子层概念的模型^[6],对动压油膜润滑中壁面滑移发生和扩展的分析^[7],非均匀界面滑移效应等^[8]。在实验方面,利用表面力仪测量微型球挤压过程中的流体动压阻力从而得到滑移长度^[9]。测量了微球-平面接触亚微米间隙下液体膜的摩擦力^[10],从而得出了不同界面润湿性的影响。Choo 等^[11]测量了高速轻载条件下环块接触的摩擦系数,结果表明光滑的非润

湿表面能够产生较低的摩擦系数。研究人员还对润滑油的高压流变性进行了研究^[12-14],结果显示流体内部的剪应力达到极限值时,临近界面的流体因粘结失效而导致与固体的相对滑动。近年,栗心明等^[15]完成了高压条件下界面滑移长度的测定。在低压面接触条件下,郭峰等^[16]研究发现对同一种液体、不同固体表面可产生不同的油膜厚度,并推测这种膜厚的改变是由固液界面亲和性不同而产生的。郭亮等^[17]发现接触角滞后能更好地表征固液界面的亲和性。但是,以上实验均是利用同种润滑剂与不同固体表面构成润湿性相异的界面,仅考察了速度变化对界面效应的影响。如果以上的膜厚变化的确由界面亲和性引起,则在黏度相当的情况下,对同一固体,润湿性不同的润滑剂也可产生不同的膜厚,但尚未有工作对此进行验证,同时载荷对界面效应的影响也没有实验结果。本文利用面接触润滑油膜光学测量系统,在不同载荷条件下,测量了几种固液界面的油膜厚度-速度关系,对以上未知的问题进行了研究。

1 实验设备

图 1 为面接触润滑油膜光学测量装置的结构简图。旋转的玻璃圆盘 1 和静止的微型滑块 2 构成面接触摩擦副^[18]。通过调节螺钉 6 以固定滑块与玻璃圆盘间的倾角,倾角大小由条纹数确定^[19]。圆盘以给定速度转动,使得摩擦副间形成动压润滑油膜,其最小值 h_0 位于出口侧。当圆盘速度发生变化时,滑块上任意点的膜厚变化相同,故记录玻璃

圆盘启动或制动过程中干涉图像上一点的光强变化即可推算出 h_0 ^[20]。

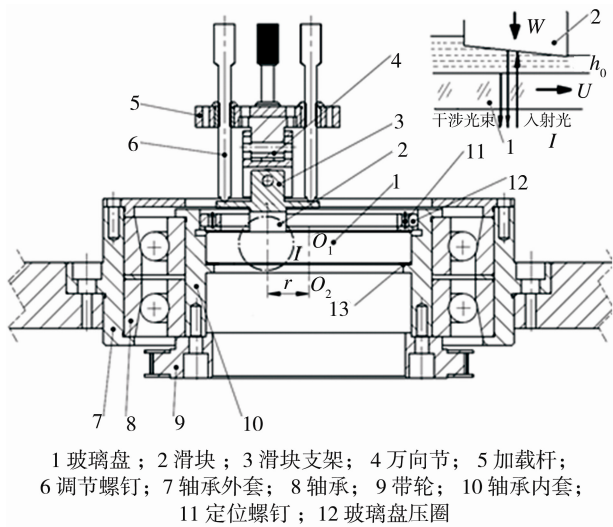


图 1 测量装置的结构简图
Fig.1 Schematic illustration of the tester

2 试样和润滑油

面接触摩擦副由玻璃圆盘表面和滑块表面构成。其中玻璃圆盘为 K9 玻璃，其工作面一侧先后镀上铬膜和二氧化硅薄膜，反射率在 20%左右，表面粗糙度 R_a 为 4 nm。

为得到不同的固液界面，实验使用了 2 种润滑液体和 2 种表面材料不同的滑块。滑块的基体分别为轴承钢和 K9 玻璃，工作面尺寸均为 4 mm×6 mm ($B \times L$)， B 为滑块宽度，与滑动方向相同。钢滑块工作表面为高反射率研抛表面，粗糙度 R_a 为 10 nm。K9 玻璃滑块工作表面先后镀上铬与二氧化硅

(K9+Cr+SiO₂)，表面为 SiO₂，粗糙度 R_a 为 4 nm。实验选用的润滑液体分别为 PAO6 和质量分数为 80%的甘油水溶液，性质如表 1 所示。

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	52.3	1.46
80%甘油水溶液	53.5	1.44

测量了润滑液体对滑块表面的接触角，以此判断固液界面的润湿性，如表 2 所示。一般来讲，大的接触角代表弱的润湿性。实验温度为(20±1)℃，相对湿度为(50±5)%，速度范围为 1~70 mm/s，对数坐标下等间距分布。

表 2 润滑剂对滑块表面的接触角
Tab.2 Contact angles of the lubricants on the slider surface (°)

Lubricants /Slider	Contact angles	
	Steel	SiO ₂
PAO6	17.5	21.9
80%Glycerol	85.8	66.4

3 结果及分析

实验中保持滑块倾角固定不变($\theta=(1/1845)^\circ$)，在不同速度下对同种润滑剂与不同固体表面组合的油膜厚度进行测量。图 2 是速度为 5.5 mm/s、载荷为 16 N 时的油膜干涉图。可知实验过程中，倾角保持稳定，干涉条纹均匀分布，无明显的弹性变形，显示润滑状态为流体动压润滑。

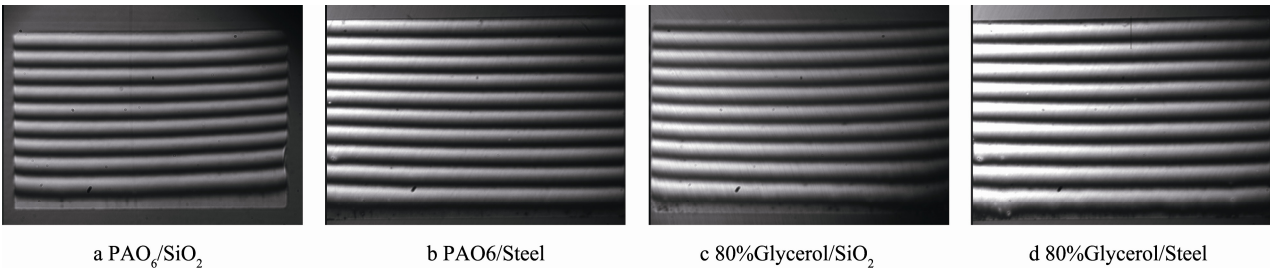


图 2 不同润滑剂与固体表面组合的干涉图像
Fig.2 Interference fringes of different liquid/solid interface

图 3 分别给出了两组油膜厚度-速度曲线。图 3a 中，载荷为 4 N，PAO6/Steel 界面和 PAO6/SiO₂ 界面的膜厚-速度曲线基本重合，并与经典润滑理论计算值保持一致。图 3b 是载荷为 16 N 时，80%

甘油水溶液对钢表面和 SiO₂ 表面的膜厚，发现两界面对应的油膜厚度明显不同，后者的油膜厚度较前者增加了 10%~40%。以上结果与[17—18]的结论一致。

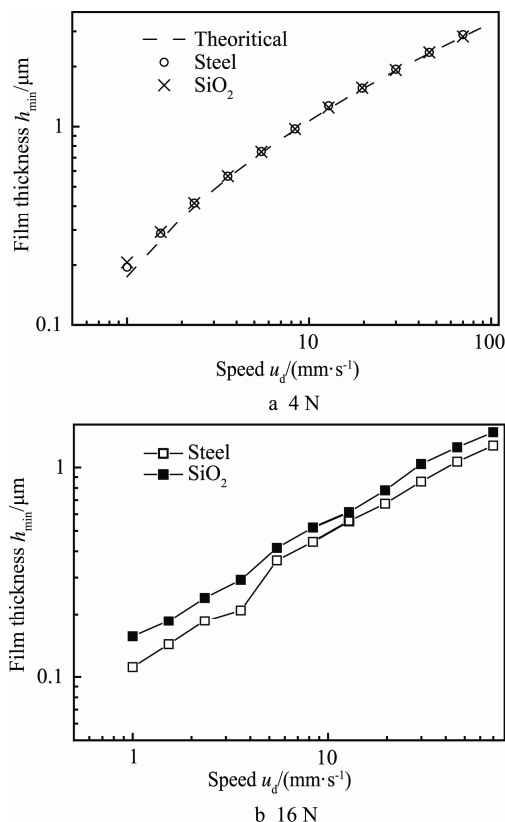


图3 SiO_2 和钢表面下的油膜厚度-速度关系
Fig.3 Film thickness versus speed with surface material of SiO_2 and steel

实验中进一步研究了不同载荷条件下各固液界面的油膜厚度,并给出了低速、中速、高速下的油膜厚度-载荷曲线。图4—5为80%甘油水溶液/Steel界面和80%甘油水溶液/ SiO_2 界面的相关曲线。由图5可以看到,随载荷的增加,油膜厚度下降,且下降速度变缓。甘油水溶液对两固体表面的接触角分别是 85.8° 和 66.4° ,有明显的差别。当载荷为4 N时,两界面各速度下的油膜厚度差别不明显,这与图3b的实验结果不同。进而观察图5发现,在相同速度下,随着载荷的增大,两界面的油膜厚度不尽相同,80%甘油水溶液/Steel界面的油膜厚度下降的速度明显高于80%甘油水溶液/ SiO_2 界面,最终导致80%甘油水溶液/ SiO_2 界面的油膜厚度大于80%甘油水溶液/Steel界面的油膜厚度。

以上实验均使用相同的润滑剂与不同材料的滑块表面构成不同的界面,即PAO6/Steel界面和PAO6/ SiO_2 界面,80%甘油水溶液/Steel界面和80%甘油水溶液/ SiO_2 界面。由润滑剂对不同材料界面接触角不同,推测各界面下的膜厚差异源自它们不同的固液界面亲和性。若以上膜厚变化的原因推测成立,则对同一固体使用亲和性不同的润滑剂也将

得到不同的膜厚。

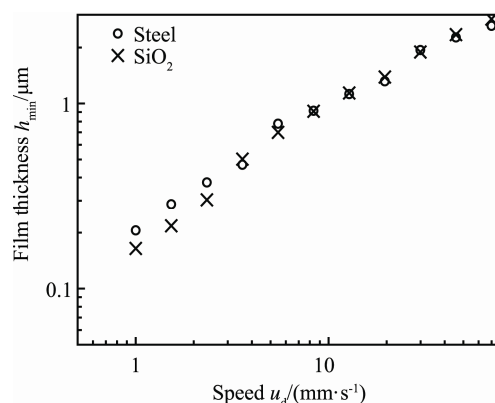


图4 SiO_2 和钢表面下的油膜厚度-速度关系
Fig.4 Film thickness versus speed with surface material of SiO_2 and Steel

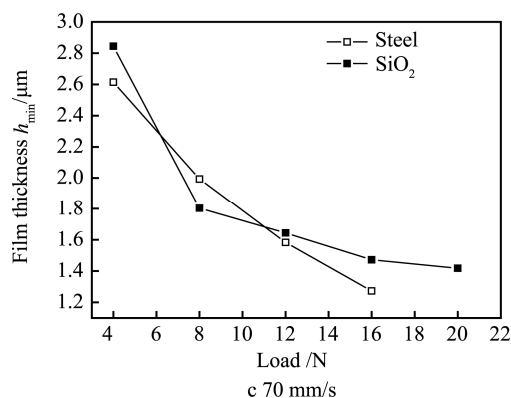
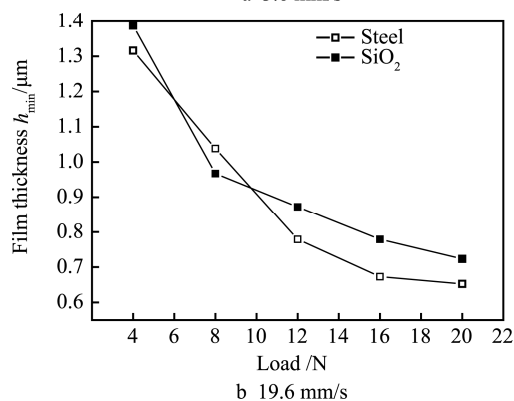
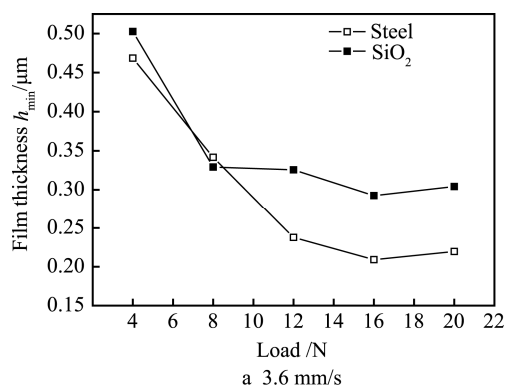


图5 SiO_2 和钢表面下的油膜厚度-载荷关系
Fig.5 Film thickness versus load with surface material of SiO_2 and steel

为验证上述推测,图 6 给出了在载荷为 4 N 和 16 N 条件下,PAO6/Steel 界面和 80%甘油水溶液/Steel 界面的油膜厚度-速度曲线。可见载荷为 4 N 时,两界面对应的膜厚差别不大,不能对两界面进行区分;当载荷增至 16 N 时,两界面的膜厚表现出明显的差别,PAO6/Steel 界面的油膜厚度明显高于 80%甘油水溶液/Steel 界面的油膜厚度,证实了以上推测,即对同一种固体,亲和性不同的润滑剂也将产生不同的膜厚。即图 3b、图 5、图 6 中膜厚的差异来自同一原因。同时,也表明图 5 中载荷增加时膜厚的不同与滑块弹性模量无关。

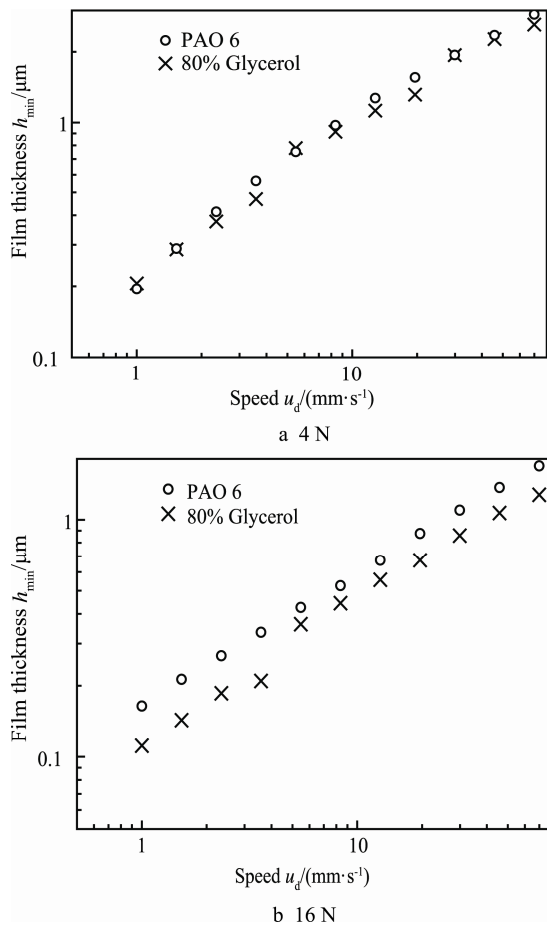


图 6 两种载荷下油膜厚度-速度关系
Fig.6 Film thickness versus speed for two loads

4 讨论

实验中各界面有不同的润湿性,一般用接触角评价。另一方面,润湿性与固液界面的粘附功相关联。粘附功定义^[21]为:

$$W_A = \gamma^{SG} + \gamma^{LG} - \gamma^{SL} \quad (1)$$

式中: γ^{SG} 为固体表面张力; γ^{LG} 为液体表面张

力; γ^{SL} 为固液界面张力。联合 Young 方程,粘附功 W_A 可写为:

$$W_A = \gamma^{LG}(1 + \cos \theta) \quad (2)$$

式中: θ 为接触角。一般条件下,接触角越小,粘附功越大,表示固液界面的结合越牢固,亲和性越好。对固液界面滑移问题与接触角 θ 或粘附功的研究表明,固液界面的极限剪应力随润湿性的增加而增加,极限剪应力越大,则界面滑移愈困难。

由表 2 和公式(2)可知,PAO6 对 Steel 和 SiO₂ 表面的接触角相近,且很小,表现出很强的润湿性,因此在图 3a 中,PAO6/Steel 界面和 PAO6/SiO₂ 界面的油膜厚度一致,并且与无滑移条件下的理论计算结果相吻合。

80%甘油水溶液对 Steel 表面和 SiO₂ 表面的接触角分别为 85.8°和 66.4°,因此 80%甘油水溶液/Steel 界面和 80%甘油水溶液/SiO₂ 界面的亲和性存在差异。对比图 3b 和图 4 可以发现,在载荷较低时(4 N),两界面的油膜厚度并无明显差别。但当载荷增至 16 N 时,80%甘油水溶液/SiO₂ 界面的油膜厚度明显高于 80%甘油水溶液/Steel 界面的油膜厚度。同样,由图 5 可得,随着载荷的增加,因界面润湿性差异带来的膜厚变化更加明显。由润滑理论得知,载荷的增加导致油膜厚度的降低。同时载荷增加提高了油膜压力水平,并且最高油膜压力向出口处移动,油膜压力分布更加集中。以上因素增加了出口区的压力流动,使得流体剪切应变率增大,容易达到固液界面的临界剪应力,从而在滑块出口发生滑移,导致油膜厚度的降低。

实验中采用一种固体表面和不同的润滑剂时,同样得到了上述结果,如图 6。滑块材料均为钢块,润滑剂分别为 PAO6 和 80%甘油水溶液,该两种润滑剂在实验温度下的黏度相似。PAO6 和 80%甘油水溶液对钢块的接触角分别为 17.5°和 85.8°,润湿性或亲和性差异明显,然而在图 6a 中观察到,载荷为 4 N 时,该两界面下的油膜厚度基本相同,界面的差异并未体现。但在载荷为 16 N 的条件下,由图 6b 可知,PAO6/Steel 界面的油膜厚度明显高于 80%甘油水溶液/Steel 界面的油膜厚度。另外,膜厚随载荷的测量也呈现了与图 5 相似的趋势。

5 结论

1) 高载荷条件下界面效应表现明显,该影响

来自于高载荷产生的油膜高剪切率。

2) 以同一固体和不同润滑剂形成不同的亲和性界面, 测量结果表明较强亲和性界面可形成较高的润滑油膜厚度。接触角测量结果与本文膜厚测量结果有较好的一致性。

3) 不同的界面条件证明了界面的亲和性对膜厚的影响。

参考文献

- [1] LEONG J Y, ZHANG J, SINHA S K, et al. Confining Liquids on Silicon Surfaces to Lubricate MEMS[J]. Tribology Letters, 2015, 59(1): 1—11.
- [2] PATTON S T, ZABINSKI J S. Failure Mechanisms of a MEMS Actuator in Very High Vacuum[J]. Tribology International, 2002, 35 (6): 373—379.
- [3] NOSONOVSKY M, BHUSHAN B. Multiscale Friction Mechanisms and Hierarchical Surfaces in Nano- and Bio-tribology[J]. Materials Science and Engineering: R: Reports, 2007, 58 (3—5): 162—193.
- [4] HU Y Z, WANG H, GUO Y, et al. Molecular Dynamics Simulation of Ultra-thin Lubricating Films[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 1998, 212(3): 165—170.
- [5] PRIEZJEV N V, and TROIAN S M. Molecular Origin and Dynamic Behavior of Slip in Sheared Polymer Films [J]. Physical Review Letters, 2004, 92(1): 018302.
- [6] ZHANG C H, WEN S Z, LUO J B. A New Postulation of Viscosity and Its Application in Computation of Film Thickness in TFL[J]. ASME Journal of Tribology, 2002 (124): 811—814.
- [7] HUANG P, LUO J, WEN S. Theoretical Study on the Lubrication Failure for the Lubricants with a Limiting Shear Stress[J]. Tribology International, 1999(32): 421—426.
- [8] 张勇斌. 界面滑移流体动压膜承载能力的形成[J]. 应用数学和力学, 2008, 29 (9): 1048—1056.
ZHANG Yong-bin. Boundary Slippage Used to Generate Hydrodynamic Load-carrying Capacity[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2008, 29(9): 1048—1056.
- [9] ZHU Y X, GRANICK S. Rate-dependent Slip of Newtonian Liquid at Smooth Surfaces[J]. Physical Review Letters, 2001, 87(9): 096105.
- [10] HILD W, OPITZ A, SCHAEFER J A, et al. The Effect of Wetting on the Microhydrodynamics of Surfaces Lubricated with Water and Oil[J]. Wear, 2003, 254(9): 871—875.
- [11] CHOO J H, GLOVNEA R P, FORRESTAK, et al. A Low Friction Bearing Based on Liquid Slip at the Wall[J]. Journal of Tribology, 2007, 129(3): 611—620.
- [12] BAIR S, WINER W O. Shear Strength Measurements of Lubricants at High Pressure[J]. ASME Journal of Lubrication Technology, 1979, 101: 251—257.
- [13] HÖGLUND E, JACOBSON B. Experimental Investigation of the Shear Strength of Lubricants Subjected to High Pressure and Temperature[J]. ASME Journal of Tribology, 1986, 108(4): 571—578.
- [14] EVANS C R, JOHNSON K L. The Rheological Properties of Elastohydrodynamic Lubricants[J]. Proc I Mech E, 1986, 200: 301—309.
- [15] 栗心明, 郭峰, 黄柏林. 高压条件下界面滑移长度的定量测量[J]. 摩擦学学报, 2012, 32(1): 34—39.
LI Xin-ming, GUO Feng, WONG Bai-lin. Quantitative Measurement of Slip Length under High Pressure Conditions[J]. Tribology, 2012, 32(1): 34—39.
- [16] 杨淑燕, 郭峰, 马冲, 等. 固液润湿性对流体动压润滑薄膜的影响[J]. 摩擦学学报, 2010, 30(2): 203—208.
YANG Shu-yan, GUO Feng, MA Chong, et al. Influences of the Liquid/Solid Wettability on Thin Hydrodynamic Lubricating films[J]. Tribology, 2010, 30(2): 203—208.
- [17] GUO L, WONG P L, GUO F. Correlation of Contact Angle Hysteresis and Hydrodynamic Lubrication[J]. Tribology Letters, 2015, 58(3): 19.
- [18] 马冲, 郭峰, 付忠学, 等. 微型滑块面接触润滑油膜测量系统[J]. 摩擦学学报, 2010, 30(4): 419—424.
MA Chong, GUO Feng, FU Zhong-xue, et al. Measurement of Lubricating Oil Film Thickness in Conformal Contacts [J]. Tribology, 2010, 30(4): 419—424.
- [19] 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): 126—130.
BAI Qing-hua, GUO Feng, LIU Hai-chao, et al. A Robust Approach to Determining the Slider Inclination in a Slider-on-Disc Conformal-Contact Lubricating Film Measurement System[J]. Tribology, 2015, 35(5): 126—130.
- [20] 王学锋, 郭峰, 杨沛然. 纳/微米弹流油膜厚度测量系统[J]. 摩擦学学报, 2006, 26 (2): 150—154.
WANG Xuefeng, GUO Feng, YANG Pei-ran. A Film Measuring System for Elastohydrodynamic Lubrication from Nano to Micro Thickness[J]. Tribology, 2006, 26(2): 150—154.
- [21] 吴树森, 章燕豪. 界面化学-原理与应用[M]. 上海: 华东化工学院出版社, 1989.
WU Shu-sen, ZHANG Yan-hao. Surface Chemistry-Principal and Application[M]. Shanghai: Chemical Engineering Institute of Eastern China Press, 1989.