

DOI: [10.16078/j.tribology.2017.04.002](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2017.04.002)

表面亲润性对限量供油润滑影响的研究

臧淑燕, 郭峰*, 李超

(青岛理工大学 机械工程学院, 山东 青岛 266520)

摘 要: 利用面接触润滑油膜测量系统, 研究了固液界面亲和性对限量供油润滑的影响. 试验中以静止的微型钢滑块和旋转的光学透明圆盘形成流体动压润滑薄膜. 结果表明: 在表面能较高的圆盘面上润滑油均匀铺展, 润滑膜厚随供油体积的增加而增加. 当盘面表面能较低时润滑油因反润湿以离散油滴的形式分布, 供油体积较低时形成膜厚较高. 对于试验中采用的最低供油量, 表面能较低的盘面产生较高的膜厚. 试验观察到的现象与润滑剂在润滑表面的分布有关.

关键词: 面接触; 油膜厚度; 润湿性; 光干涉; 限量供油

中图分类号: TH117

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2017)04-0429-06

Influence of Surface Wettability on Lubrication by Limited Lubricant Supply

ZANG Shuyan, GUO Feng*, LI Chao

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

Abstract: The influence of surface wettability on the lubrication by limited lubricant supply (LLS) was studied with the test rig for measuring lubrication film thickness in flat-on-flat contact. In the tests, lubricating film was generated by a stationary steel slider and a rotating transparent disc with a fixed inclination angle. The results show that the lubricant spreaded well on the disc surface with high wettability, and film thickness increased with increasing lubricant supply quantities. When the disc surface energy/wettability was low, the lubricant stayed on the disc surface in the form of discrete droplets due to dewetting, and higher film thickness was obtained with smaller lubricant supply quantity. The experimental findings could be explained by the lubricant distribution on the lubricated tracks.

Key words: conformal contact; film thickness; wettability; interferometry; limited lubricant supply

为了避免机械零部件因磨损而发生失效, 在工程现场或润滑设计中对润滑油的用量多采取保守的策略, 即供给摩擦副过量的润滑油. 而基于节能环保的需求, 研究人员致力于在限量供油(Limited lubricant supply或LLS)条件下实现有效的润滑, 如用于轴承及机车轮缘的油气润滑技术和高速加工中的最小量润滑(MQL)等^[1]. 另一方面, 在微机构的润滑中, 目前基

于自组装单分子膜(SAMs)、硬膜镀层技术和气相润滑(VPL)的方案并不适用于高滑动和高载荷等工作条件, 因此人们开始探索基于液相润滑的解决方案, 其中润滑剂的选择和固液界面的设计不同于传统的流体润滑技术^[2-3]. 此类器件摩擦学设计要求局部供给润滑剂或限量供油润滑, 避免液体由于表面力或黏性力的作用对非摩擦部位工作的干扰.

Received 20 January 2017, revised 17 February 2017, accepted 15 March 2017, available online 28 July 2017.

*Corresponding author. E-mail: mefguo@163.com, Tel: +86-13863945503.

The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (51275252) and the Ph D Programs Foundation of Ministry of Education of China (20133721110002).

国家自然科学基金项目(51275252)和教育部博士点基金项目(20133721110002)资助.

研究人员从不同角度对限量供油条件下润滑特性进行了研究. 针对工业应用, 通过试验确定轴承和齿轮等油气润滑系统的最优工作参数, 如供气压力、管道长度及喷嘴角度等, 如Jiang等^[4]与Hohn等^[5]的工作. 关于限量供油润滑的机理, 现有研究大都集中于乏油条件下的弹性流体动压润滑(弹流润滑). 该类乏油为摩擦副运行过程自然发生的限量供油. 如Wedeven等^[6]采用光干涉技术对乏油润滑进行了研究, 建立起入口距离与膜厚下降之间的关系式. Cann等^[7]通过试验研究了乏油润滑发生的条件, 给出了判定参数. Chevalier等^[8]给出了能够自动确定乏油边界的弹流计算模型, 理论计算了基于入口油层厚度的乏油准则. Chiu^[9]、Jacod等^[10]及最近韩冰等^[11]研究了限量供油条件下表面张力、毛细力作用下的自集油对弹流油膜建立的贡献. 针对微机电系统的润滑, 研究人员对限量供油润滑也进行了研究, Hiratsuka等^[12]提出了通过界面的疏水/亲水组合, 利用微液滴实现微构件润滑的概念. 而Ma等^[13]则在其试验中显示了微水滴较充分供水可产生更小的摩擦力, 并归因于表面张力的作用. Ku等^[2]试验表明在硅材料微型推力轴承表面施加低黏度的液体润滑剂, 可以产生十分有效的流体动压润滑. 在此之前Mehregany等^[14]也进行了静电微马达液体润滑的测试, 证明液体润滑剂在一定条件下可以实现微机构的有效润滑. Leong等^[3]则研究了多烷基环戊烷(MAC)与全氟聚醚(PFPE)对硅材料摩擦副的润滑效果, 结果显示对硅表面弱铺展的MAC润滑作用优于对硅表面强铺展的PFPE, 试验过程MAC以微液滴形式停留在摩擦表面. 他们的试验显示, 表面润湿性会影响润滑液体在摩擦副表面的驻留状态, 但对润滑的影响有待探讨. Ma等^[15]和王莹等^[16]的研究均表明在自组装膜上面覆盖具有流动性的MAC薄膜可明显改善摩擦副的性能, 此处MAC薄膜的厚度仅在纳米尺度, 也可以看作另一种形式的限量供油, 但其流动性或许可以诱发移动的动压效应.

通过限量润滑的理论和试验研究, 最终可确定有效润滑条件下最小供油量. 达到该目的需要对限量润滑特性进行较为全面的研究, 但已有的知识大都来自过去乏油弹流润滑, 相对于其他接触形式的研究并不充分. 与充分供油不同, 在限量供油条件下润滑剂分布在固体自由表面或接触区附近形成油池, 尺度较小, 表面效应不可忽视, 之前研究已有涉及^[3, 9-11], 但仍需系统研究. 本文中使用面接触润滑油膜测量系统, 研究了限量供油条件下润滑膜厚度的变化规律, 讨论

了表面润湿特性对摩擦表面润滑剂分布及润滑特性的影响.

1 试验装置与试验条件

1.1 测量系统

油膜厚度测量在面接触润滑油膜测量系统上进行^[17]. 图1为测量系统的示意图. 静止的微型滑块平面和旋转的玻璃盘组成润滑副. 试验中, 微型滑块材料为GCr15钢, 工作面精密研抛, 尺寸为4 mm×4 mm, 表面粗糙度 R_a 为8 nm. 玻璃盘为K9玻璃制成, 其工作面先加镀铬膜再加镀二氧化硅膜($\text{Cr}+\text{SiO}_2$). 表面粗糙度 R_a 为4 nm. 试验中用到的光源波长为 $\lambda=660\text{ nm}$. 出口处的油膜厚度 h_0 为本文中的测量膜厚.

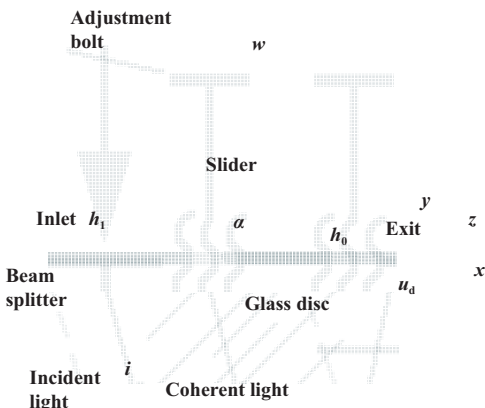


Fig. 1 Schematic illustration of the slider-bearing test rig
图 1 试验装置原理图

1.2 试验条件

试验中, 滑块和盘组成的润滑副为限量供油. 试验中采用微量进样器一次性供油, 供油量为1 μl 、2 μl 和3 μl . 试验的环境温度保持在24 $^{\circ}\text{C}$. 试验用润滑油为PAO4, 黏度为26.5 mPa·s, 折射率为1.45. 试验中为实现不同的固液界面, 玻璃盘表面增镀疏油薄膜AF. 为了判断固液界面的润湿性, 测量了润滑液体PAO4对两种材料(SiO_2 , AF)玻璃盘表面的接触角.

试验开始时, 首先将润滑液滴置于滑块中央, 然后在轻微加载的情况下($<0.1\text{ N}$)使玻璃盘低速旋转, 将润滑液体均匀铺展于玻璃盘面, 形成宽度和滑块尺寸大致相等的环状润滑油薄膜. 图2为所用润滑液滴在二氧化硅盘面形成的润滑油薄层.

表 1 试验用润滑液体对玻璃盘表面的接触角
Table 1 Contact angles of the lubricant on the glass disc surface

Lubricant/Glass disc	$\text{Cr}+\text{SiO}_2/(^{\circ})$	$\text{Cr}+\text{SiO}_2+\text{AF}/(^{\circ})$
PAO4	16	68

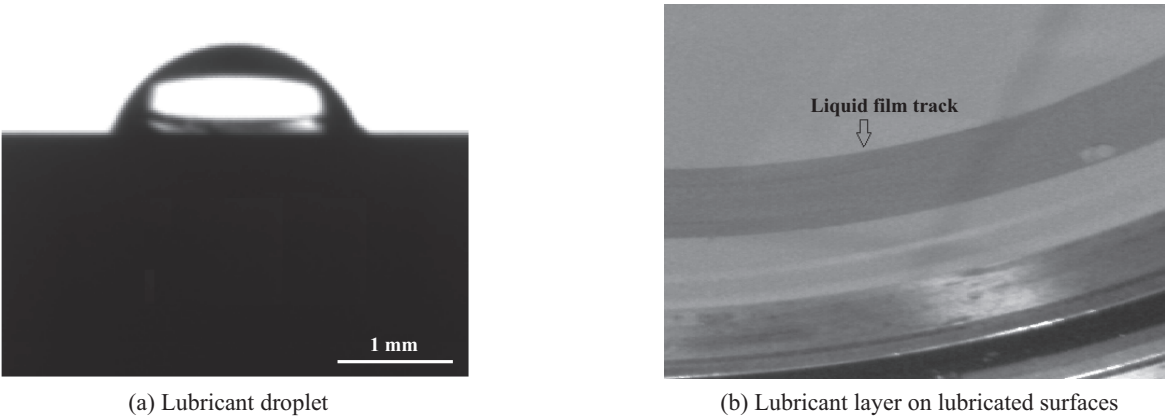


Fig. 2 Lubricant droplet and lubricant layer on lubricated surfaces
图 2 试验中的供油油滴与润滑表面的油层

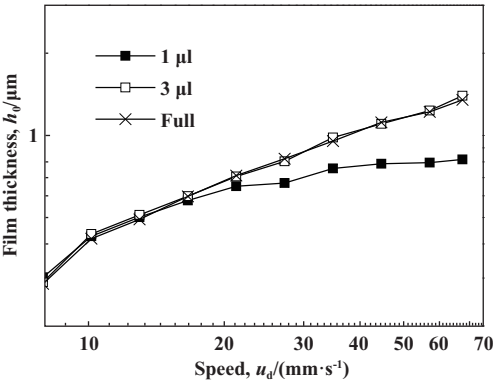


Fig. 3 Film thickness vs speed under interface of SiO₂-PAO4-steel, load=4 N, PAO4, $\alpha=5.89\times10^{-4}$
图 3 SiO₂-PAO4-steel界面下膜厚随速度变化曲线, 载荷为 4 N, PAO4, $\alpha=5.89\times10^{-4}$

2 结果与讨论

2.1 有限量供油条件下的膜厚-速度曲线

图3给出了玻璃盘面为SiO₂条件下测量得到的膜厚随速度的变化曲线. 供油量有三种: 1 μ l、3 μ l和充分供油. 可以看到, 油膜厚度随速度增加而增加. 当速度小于17 mm/s时, 三种供油并没有产生膜厚的差别. 而当速度进一步增加, 1 μ l供油的膜厚明显小于3 μ l及充分供油的膜厚. 而当速度大于40 mm/s, 1 μ l供油的膜厚不再增加, 基本保持不变. 而3 μ l供油及充分供油的膜厚继续增加. 可以看到, 乏油时面接触膜厚随速度的变化不同于点接触^[6-8]. 在点接触条件下, 当乏油发生时, 油膜厚度随速度达到最高值后呈现明显下降. 图4给出了供油量为1 μ l和3 μ l时不同速度下的干涉图. 可以看到, 供油量为1 μ l的条件下, 随速度和膜厚的增加, 入口区中央出现供油不足, 而且速度越高供油不足区域越大, 该供油不足为图3中对应的膜厚随速度不再明显变化的原因. 而对于供油量为3 μ l时, 由

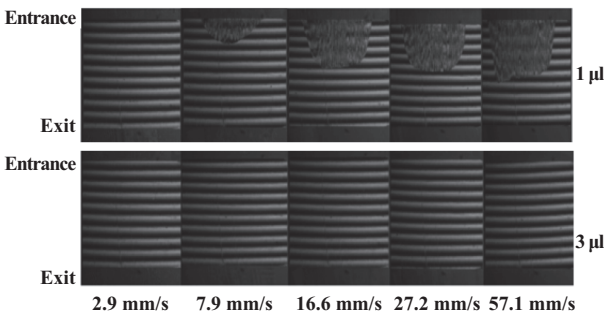


Fig. 4 Interferograms for lubricant volumes of 1 μ l and 3 μ l, SiO₂-PAO4-steel, load=4 N, PAO4, $\alpha=5.89\times10^{-4}$
图 4 不同供油体积下的膜厚-速度曲线, SiO₂-PAO4-steel界面, 载荷为4 N, PAO4, $\alpha=5.89\times10^{-4}$

图4可见在试验参数范围内入口区无乏油现象出现. 因此该条件下膜厚速度曲线与充分供油相同.

由图3可见, 在同样的速度下, 供油量为3 μ l和充分供油的情况下, 膜厚是等同的, 所以在该润滑条件下, 3 μ l的供油量可以作为最小供油量的参考值. 通过综合评价因素, 可以进一步对比分析供油量为3 μ l时与充分供油情况下的润滑效果, 从而确认最小供油量. 其最小供油量确定的理论方法和试验探索还需要进一步研究.

2.2 界面对有限量供油的膜厚-速度关系的影响

在有限量供油条件下, 润滑轨道上及接触副周边仅存在少量润滑油, 此时界面效应对润滑油在润滑轨道上的分布及接触副周边供油的影响显著, 从而影响润滑性能. 通过HUAWEI PE-TL00M型手机自带相机采集供油量为1 μ l时润滑油PAO4在玻璃盘面润滑轨道上的分布图像, 曝光时间1/20 s, 光圈值 f/2, 结果如图5所示. 可以看到, 玻璃盘面为SiO₂材料和AF材料时, 润滑剂的分布明显不同. 润滑油在SiO₂表面呈均匀薄层分布. 而AF表面对润滑油的亲润性较差, 润滑

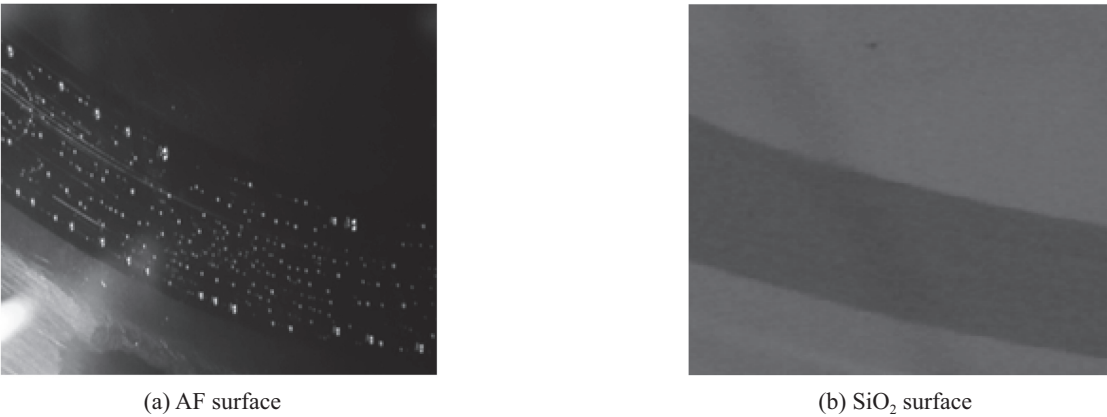


Fig. 5 Lubricant distribution on the lubricated track on the disc surface
图 5 盘表面润滑轨道上的润滑油分布

油薄层分布为非稳定状态, 出现反润湿^[18]导致了离散分布的液滴. 液滴在润滑轨道中区尺寸较小, 在润滑轨道边缘尺寸较大, 这是因为布油的过程中滑块对油的推挤作用导致边缘的液滴较大.

图6给出了玻璃盘工作面加镀AF膜后测量得到的油膜厚度-速度关系曲线. 可以看到, 膜厚-速度曲线的变化规律与玻璃盘工作面为SiO₂时类似, 表现为开始膜厚随速度的增加而增加, 达到稳定值后保持基本不变. 这里有趣的是1 μl 的供油在速度较高时(此处 $u_d > 10 \text{ mm/s}$)产生的油膜厚度大于2 μl 和3 μl 供油情况下的油膜厚度.

图7为对应图6的不同速度和供油量下的光干涉图. 乏油在入口中心区出现, 1 μl 的供油量产生最小程度的乏油, 这与图6的测量结果相对应, 即1 μl 的供油产生的油膜厚度大于2 μl 和3 μl 供油情况下的油膜厚度. 这种观察到的膜厚与供油量的关系与我们的常规认识相悖. 为了更充分认识该现象, 对相同速度下润滑轨道上的润滑油的分布进行了观察, 结果如图8

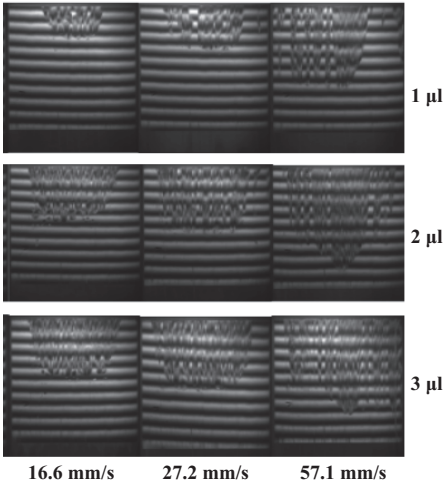


Fig. 7 Interferograms for lubricant volumes of 1, 2 and 3 μl , AF disc surface, load=4 N, PAO4, $\alpha=5.89 \times 10^{-4}$
图 7 不同供油体积下的干涉图像, AF盘面, 载荷为4 N, PAO4, $\alpha=5.89 \times 10^{-4}$

所示.

图8为3种供油量下润滑轨道上的润滑油分布. 在相同速度下, 可以看到, 1 μl 、2 μl 和3 μl 供油量下润滑轨道上的润滑剂的分布不同. 1 μl 供油条件下, 润滑轨道均匀分布密集微小的油滴, 而2 μl 和3 μl 供油量下润滑轨道中的油滴分布稀疏, 相反在润滑轨道的外侧出现了大的油滴聚集. 图8中润滑油的分布与试验布油相关. 零载荷低速布油时, 大的供油量对应较高的油层厚度, 在润滑轨道发生反润湿后形成的大尺寸液滴较多, 而小的供油形成的液滴尺寸较小. 当测量时润滑液滴随玻璃盘旋转, 由于离心力的作用, 液滴有脱离润滑轨道的趋势. 对于润滑轨道上的液滴, 玻璃盘旋转时受到圆盘表面的粘附力和离心力的作用. 假设液滴为一球缺, 与盘面的接触角为 θ , 其底圆半径 r , 假定固/液界面的单位面积粘附力为常数, 则液滴所受的

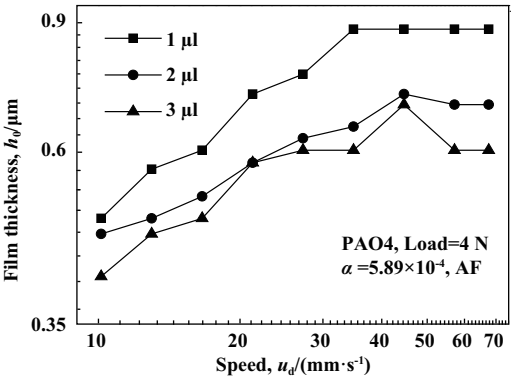


Fig. 6 Film thickness vs speed, AF disc surface, load=4 N, PAO4, $\alpha=5.89 \times 10^{-4}$
图 6 AF玻璃盘面的膜厚随速度变化曲线, 载荷为4 N, PAO4, $\alpha=5.89 \times 10^{-4}$

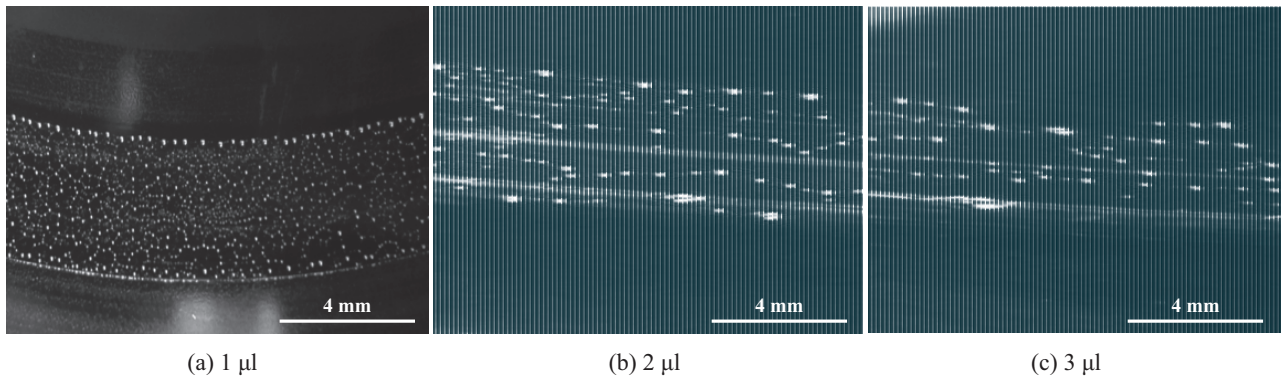


Fig. 8 Lubricant distribution for lubricant volumes of 1, 2 and 3 μl , AF disc surface, load=4 N, PAO4, $\alpha=5.89\times10^{-4}$, $u_d=34.8\text{ mm/s}$

图 8 不同供油体积下的润滑轨道液滴分布, AF盘面, 载荷为4 N, PAO4, $\alpha=5.89\times10^{-4}$, $u_d=34.8\text{ mm/s}$

粘附力 F_{adh} 与离心体积力 F_{centri} 的比值可按式(1~3)估算.

$$F_{adh} \propto r^2 \tag{1}$$
$$F_{centri} \propto r^3 f(\theta) \tag{2}$$
$$\frac{F_{adh}}{F_{centri}} = \frac{1}{r} f(\theta) \tag{3}$$

假定液滴与盘面的接触角 θ 为常数,由公式(3)可以看到,粘附力与离心体积力的比值随液滴尺寸的减小而增加,即在液滴单位体积离心力相同时,大的液滴会先于小液滴脱离润滑轨道.可以看出,由于这种尺度效应,1 μl 润滑油在前述试验中提供的实际供油要好于2 μl 和3 μl 体积的润滑剂.要指出的是,上述分析只是概念性的解释,要定量描述,还需做理论建模及数值分析方面的研究.

如前所示,当润滑轨道的表面能不同时,其上润滑油为薄层分布(SiO_2 盘面)或液滴分布(AF盘面),取决于反润湿的发生与否,此时入口乏油区不同,如图9所示.对于 SiO_2 表面,入口乏油区为油/气均匀混合相.对于AF表面,其入口的油/气混合相中夹杂沿速度

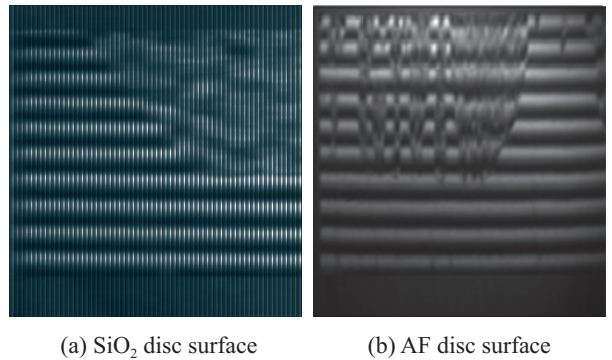


Fig. 9 The inlet starvation for SiO_2 disc surface and AF disc surface, load=4 N, PAO4, $\alpha=5.89\times10^{-4}$, $u_d=57.1\text{ mm/s}$

图 9 不同固体表面条件下入口乏油区, 载荷为4 N, PAO4, $\alpha=5.89\times10^{-4}$, $u_d=57.1\text{ mm/s}$

方向的完整条状油膜.这种乏油区的不同来自于润滑剂在表面上的分布不同.图10给出了入口区前 SiO_2 轨道表面和AF轨道表面上润滑剂的分布示意图.图10(a)中润滑剂的分布来自于滑块对润滑剂的推挤及润滑剂自侧面向中央区的回填.图10(b)中央区的微小油滴则来自润滑副出口区油膜的反润湿形成的微液滴,微液滴的形成也受出口空化的影响,是一个复杂的过程.整体上讲,图10(b)润滑轨道上的微油滴对润

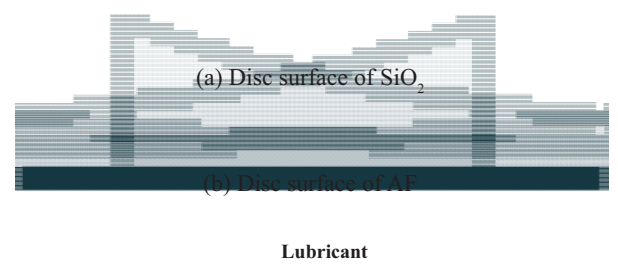


Fig. 10 Schematic illustration of lubricant distribution on different surfaces

图 10 不同固体表面的润滑剂分布示意图

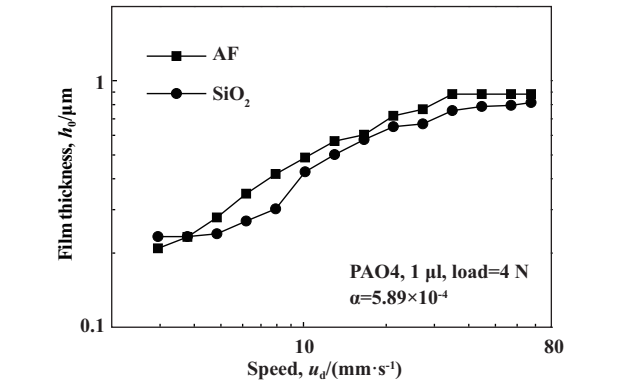


Fig. 11 Film thickness vs speed, load=4 N, 1 μl , PAO4, $\alpha=5.89\times10^{-4}$

图 11 SiO_2 与AF表面的膜厚随速度变化曲线, 载荷为4 N, PAO4, 1 μl , $\alpha=5.89\times10^{-4}$

滑油膜的形成起到正面的作用,这种推测与图11的油膜测量结果一致,即在供油量及工作条件一致的情况下,AF盘面产生的油膜厚度高于SiO₂表面产生的油膜厚度.

表面的亲疏油影响机制可能很复杂,包括对偶面的性质. 本文作者只考察了盘表面的疏水性对供油的影响. 滑块的表面能将会影响接触面周围油池的分布,从而影响油膜润滑,未来的研究中将其作为研究对象,进行系统研究.

3 结 论

a. 在限量供油条件下,润滑轨道的润滑剂分布根据界面亲和性不同可呈现连续薄膜分布或离散液滴分布.

b. 一定条件下,离散的液滴分布可改善摩擦副的供油,从而增强润滑效果.

c. 本项研究给出的初步结果证明可以通过界面涉及来调控限量供油润滑.

参 考 文 献

[1] Zhang Jian, Jin Yingli, Ma Xiangui. Modern lubrication technology[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2008 (in Chinese) [张剑, 金映丽, 马先贵. 现代润滑技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008].

[2] Ku I S Y, Reddyhoff T, Wayte R, et al. Lubrication of microelectromechanical devices using liquids of different viscosities[J]. Journal of Tribology, 2012, 134(1): 012002.

[3] Leong J Y, Satyanarayana N, Sinha S K. A tribological study of multiply-alkylated cyclopentanes and perfluoropolyether lubricants for application to Si-MEMS devices[J]. Tribology Letters, 2013, 50(2): 195–206.

[4] Jiang S, Mao H. Investigation of the high speed rolling bearing temperature rise with oil-air lubrication[J]. Journal of Tribology, 2011, 133(2): 021101.

[5] Hohn B R, Michaelis K, Otto H P. Minimised gear lubrication by a minimum oil/air flow rate[J]. Wear, 2009, 266(3-4): 461–467.

[6] Wedeven L D, Evans D, Cameron A. Optical analysis of ball bearing starvation[J]. Journal of Lubrication Technology, 1971, 93(3):

349–361.

[7] Cann P M E, Damiens B, Lubrecht A A. The transition between fully flooded and starved regimes in EHL[J]. Tribology International, 2004, 37(10): 859–864.

[8] Chevalier F, Lubrecht A A, Cann P M E, et al. Film thickness in starved EHL point contacts[J]. Journal of Tribology, 1998, 120(1): 126–133.

[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] Jacod B, Pubilier F, Cann P M E, et al. An analysis of track replenishment mechanisms in the starved regime[J]. Tribology Series, 1999, 36: 483–492.

[11] 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].

[12] Hiratsuka K, Bohno A, Endo H. Water droplet lubrication between hydrophilic and hydrophobic surfaces[C]//Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2007, 89(1): 012012.

[13] Ma Z Z, Zhang C H, Liu S H, et al. Study of lubrication behavior of pure water for hydrophobic friction pair[J]. Science in China, 2009, 52(11): 3128–3134.

[14] Mehregany M, Dhuler V R. Operation of electrostatic micromotors in liquid environments[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 1992, 2(1): 1.

[15] Ma J, Liu J, Mo Y, et al. Effect of multiply-alkylated cyclopentane (MAC) on durability and load-carrying capacity of self-assembled monolayers on silicon wafer[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2007, 301(1): 481–489.

[16] Wang Ying, Wang Liping, Xue Qunji. Preparation and tribological properties of multiply-alkylated cyclopentane/(3-aminopropyl) triethoxysilane double-layer film on silicon[J]. Tribology, 2010, 30(5): 437–442 (in Chinese) [王莹, 王立平, 薛群基. 多烷基环戊烷/有机硅烷双层膜的制备及摩擦学性能研究[J]. 摩擦学学报, 2010, 30(5): 437–442].

[17] Guo F, Wong P L, Fu Z, et al. Interferometry measurement of lubricating films in slider-on-disc contacts[J]. Tribology Letters, 2010, 39(1): 71–79.

[18] Gennes P G D, Brochard-Wyart F, Quéré D. Capillarity and wetting phenomena[M]. Springer, 2004.