

固/液界面润湿性对线接触油膜润滑的影响

金微, 李书义, 荆兆刚, 郭峰

(青岛理工大学 机械与汽车工程学院, 山东 青岛 266520)

摘要: **目的** 优化表征固/液界面的表征参数。**方法** 应用 AF 和 FAS 修饰柱面滑块以获得不同润湿性的表面, 并测量 PEG200、150N 和 PAO6 三种润滑油在 AF、FAS 和 SiO_2 表面上的接触角、接触角滞后以及三种表面的表面自由能。通过对线接触润滑油膜厚的测量, 评价固/液界面润湿性与油膜厚度的关联性。**结果** 润滑油为 PEG200 或 150N 时, 在 $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$ 接触副产生的油膜厚度高于 SiO_2/FAS 接触副, 而且接触角越小, 油膜厚度越大; 接触角滞后越大, 油膜厚度越大。PEG200、150N 和 PAO6 润滑油分别在 $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$ 和 SiO_2/AF 同一接触副时, 呈现出几乎相同的油膜厚度。此时, 接触角滞后与油膜厚度的关联性优于接触角。此外, 润滑油在 AF 表面测得的接触角最大且接触角滞后最小, 但产生的油膜厚度最大, 该现象可以归因于油膜承载力/厚度与界面强度的非单调性。**结论** 在线接触流体动压润滑条件下, 固/液界面的润湿性能够影响油膜厚度。界面表征参数接触角和接触角滞后, 与油膜厚度的关联性都存在一定的局限性, 但相对而言, 接触角滞后的范围更大。AF 界面特性与油膜厚度的关系, 证明了疏油表面可以具有较好的成膜能力。

关键词: 润湿性; 流体动压润滑; 线接触; 接触角; 接触角滞后; 滑移

中图分类号: TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)09-0252-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.09.028

Effect of Wettability of Solid/Liquid Interface on Film Lubrication in Line Contact

JIN Wei, LI Shu-yi, JING Zhao-gang, GUO Feng

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

ABSTRACT: The work aims to optimize the characterization parameters of solid/liquid interface. AF and FAS were used to modify the cylinder slider to obtain the surface with different wettability and contact angle, contact angle hysteresis and surface free energy were measured between engineering surfaces (AF, FAS and SiO_2) and lubricating oil (PEG200, 150N and PAO6). The correlation between the wettability of the solid/liquid interface and the lubricant film thickness was evaluated by measuring the film thickness of line contact. With lubricating oil of PEG200 or 150N, the film thickness produced by $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$ contacts was higher than that of SiO_2/FAS contacts. In this situation, the film thickness increased with the decrease of contact angle and the increase of contact angle hysteresis. The lubricating oil PEG200, 150N and PAO6 showed almost the same film thickness in

收稿日期: 2019-12-12; 修订日期: 2020-01-20

Received: 2019-12-12; Revised: 2020-01-20

作者简介: 金微 (1986—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为线接触流体动压润滑及界面效应。

Biography: JIN Wei (1986—), Female, Doctor, Research focus: hydrodynamic lubrication of line contact and interface effect.

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。邮箱: mefguo@163.com

Corresponding author: GUO Feng (1968—), Male, Doctor, 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. E-mail: mefguo@163.com

引文格式: 金微, 李书义, 荆兆刚, 等. 固/液界面润湿性对线接触油膜润滑的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(9): 252-257.

JIN Wei, LI Shu-yi, JING Zhao-gang, et al. Effect of wettability of solid/liquid interface on film lubrication in line contact[J]. Surface technology, 2020, 49(9): 252-257.

the same contact pair $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$ or SiO_2/AF , respectively. The correlation between contact angle hysteresis and film thickness was better than that between contact angle and film thickness. For AF coating, contact angle was the maximum, contact angle hysteresis was the minimum, but the lubricant film thickness was the maximum. This phenomenon could be attributed to the non-monotony of the bearing capacity/thickness of the lubricant film and the interface strength. Under the condition of line contact hydrodynamic lubrication, the wettability of solid/liquid interface can affect the thickness of oil film. The correlation between interface characterization parameters such as contact angle and contact angle hysteresis and film thickness is limited to some extent, but the range of contact angle hysteresis is relatively wide. The relationship between AF interface characteristics and film thickness proves that the oleophobic surface also has a good film-forming ability.

KEY WORDS: wettability; fluid hydrodynamic lubrication; line contact; contact angle; contact angle hysteresis; slip

由于尺寸小、质量轻、响应快、高精度、高效率、高集成度等优良特性，微/纳机电系统（Micro/Nano electromechanical system, MEMS/NEMS）已经成为一系列先进产品的关键部件，广泛应用于如微传感器、喷墨打印机和可穿戴智能设备等众多领域。大多数的 MEMS 设备都包含运动部件，在设计中最具挑战性的一方面就是解决相对运动部件中接触部分的摩擦问题。如多晶硅静电微电机由 12 个定子和一个 4 极转子组成，转子-定子界面的间断接触和转子-轮毂法兰界面的物理接触会导致磨损问题，而接触面之间的高黏稠度限制了操作的重复性，甚至可能完全阻止操作。又如汽车感应系统中的集成电容式硅加速度计，通过中央光束的运动引起中心悬梁和固定极板之间电容的变化来测量加速度。这里的梁结构与底层基材之间的粘附以及相邻板（指）之间的粘附不利于传感器的工作^[1]。MEMS 中因受尺寸效应的影响，使得表面粘着力和润滑薄膜粘滞力等，成了影响微机械发展的主要因素。微/纳米级润滑油膜厚和表面涂层的重要作用，使得摩擦学研究向着表界面科学的方向发展^[2]。

研究表明，牛顿流体在低润湿性或其他特殊设计的固体表面发生界面滑移时，可减小流体剪切力的作用。例如，微流体力学领域利用液体滑移来降低黏性阻力^[3]。Spikes^[4]提出了一种低摩擦力的液体润滑轴承，一个轴承表面疏油，另一个表面亲油，使液体在剪切作用下与前者发生滑移而粘附在后者。Choo 等人^[5-6]通过亲/亲、亲/疏和疏/疏等不同润湿性配副的摩擦系数对比，表明有疏油表面的接触副的摩擦系数较低，并归因于在疏油表面上出现的界面滑移。同时，也证明了 Spikes 提出的轴承形式的可行性。Kalin 等人^[7-9]利用不同的 DLC 涂层改变界面疏油性，得出钢/DLC 和 DLC/DLC 接触副具有较低的摩擦系数，还得到铺展系数和极性相自由能同摩擦系数有较好的关联性。近年来，本课题组在界面效应对油膜厚度的影响方面做了大量相关的实验研究。杨淑燕等^[9]发现固液界面的润湿性会影响油膜厚度，并且部分滑移能够导致油膜厚度降低。田鹏晖等^[11]的研究结果表明，高载荷条件下界面效应更加明显。王志君等^[12]认为黏度相似的液体与接触副形成的不同固/液界面，粘附功高的更

容易产生较高的膜厚。王茜等^[13]研究了界面润湿性对油池的影响。臧淑燕等^[14]研究了固/液润湿性对限量供油的影响。此外，郭亮等^[15]发现界面参数接触角滞后与流体动压润滑具有密切的关联性。以上研究主要讨论面接触条件下界面效应对流体动压润滑油膜的影响，但对线接触摩擦副少有关注。

由于线接触摩擦副中更容易发生磨损，因此本文将针对界面效应，对线接触油膜厚度调控作用展开研究。升级改造了实验室润滑油膜测量试验系统，测量了不同界面下的线接触油膜厚度与速度的关系，用以分析界面效应对线接触流体动压润滑的影响。

1 试验

1.1 试验材料和试验条件

由玻璃圆盘和柱面滑块构成线接触副，其中圆盘采用 K9 玻璃，在其工作面上镀有铬膜和二氧化硅膜，镀膜后，表面粗糙度 Ra 为 4 nm，控制玻璃圆盘的反射率在 20% 左右。柱面滑块基体为石英，柱面上镀有铬膜和二氧化硅膜，透光率为 0，工作面尺寸为 $4 \times 6 \times 20$ ($B \times L \times R$, mm)，其中 B 、 L 、 R 分别为柱面滑块的宽度、长度和曲率半径，柱面滑块的表面粗糙度 Ra 为 4 nm。

为了获得不同的固/液界面，实验采用黏度相近的 150N、PAO6 和 PEG200 三种润滑油和表面材料不同的三种柱面（ SiO_2 、AF、FAS）。润滑油的性质如表 1 所示。其中，AF 镀层是在柱面滑块上采用涂覆法制备一层氟硅烷基团的防指纹油，FAS 镀层是采用气相沉积法制备一层全氟癸基三甲氧基硅烷单分子自组装膜。

表 1 润滑油的性质（20 ℃）
Tab.1 Properties of lubricating oil (20 ℃)

Lubricants	Dynamic viscosity/(mPa·s)	Refractive index
150N	59.96	1.467
PEG200	62.11	1.456
PAO6	56.29	1.458

试验所选载荷为 4 N, 速度范围为 10~73 mm/s, 采用对数坐标系等间距进行取值。试验环境的温度保持在 $(22 \pm 2)^\circ\text{C}$, 相对湿度为 $(26 \pm 5)\%$ 。

1.2 测量系统结构与油膜干涉图

图 1 是线接触副油膜厚度光学测量原理图。油膜厚度测量系统由悬臂梁、玻璃盘回转单元、图像采集单元组成。其中, 悬臂梁上可固定柱面滑块和施加载荷, 玻璃盘回转单元控制玻璃圆盘的旋转速度和旋转方向, 图像采集单元是利用高速摄像机监测柱面滑块和玻璃圆盘接触间油膜形成的干涉条纹图像。

试验过程中, 柱面滑块静止, 玻璃圆盘顺时针或逆时针旋转, 将一定黏度的润滑油带入到收缩间隙中, 产生的流体动压会将柱面滑块抬起一定高度 (如图 2a 中实线位置)。玻璃盘静止时, 柱面滑块最低点与玻璃盘接触, 即膜厚 $h=0$ (如图 2a 中虚线位置)。一定载荷下, 玻璃盘的速度从零到 U (启动) 的过程中, 柱面滑块上升, 接触区内的油膜从薄到厚, 相应的干涉条纹增加级次并向接触区内移动 (如图 2b)。相反地, 制动过程中柱面滑块下降, 接触区内的油膜从厚到薄, 干涉条纹减少级次并向接触区外扩散 (如图 2c)。

记录启动或制动过程中干涉图像上某一点的光强变化, 即可推算出最小膜厚 h_{\min} 。

试验中保持柱面滑块的母线与滑动速度垂直且与玻璃圆盘表面平行, 并保证处于充分供油状态。图 3 为 PEG200 在 SiO_2 (玻璃盘)/FAS (柱面滑块) 接触面上的干涉条纹, 采用载荷为 4 N。从图 3 中可看到: 干涉条纹相互平行, 表明试验过程中柱面滑块的母线与玻璃圆盘相互平行; 接触区颜色均匀, 表明试验过程中的润滑状态为流体动压润滑。

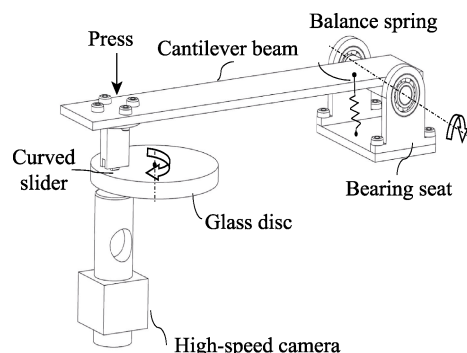


图 1 测量系统结构

Fig.1 Structure of measurement system

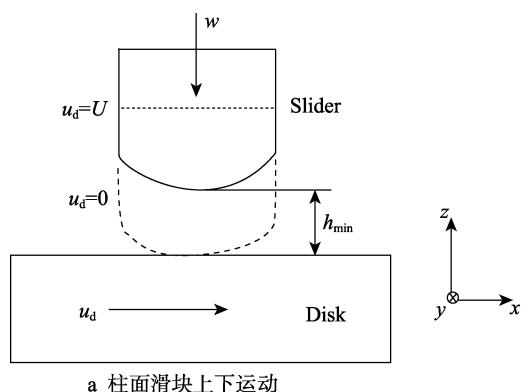


图 2 最小油膜厚度的测量

Fig.2 Measurement of minimum film thickness measurement: (a) cylindrical slider go up and down, (b) start up, (c) shut down

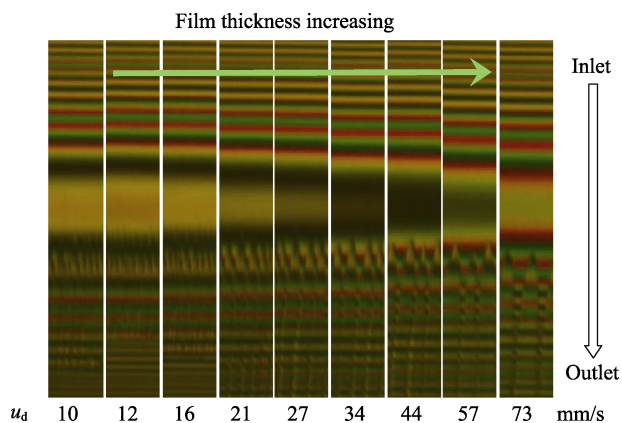


图 3 不同速度下的干涉图像

Fig.3 Interference image at different velocities

1.3 接触角、接触角滞后以及固体表面能的测量

采用接触角测量仪测得 150N、PAO6 和 PEG200 分别在 SiO_2 、AF、FAS 三种表面上的接触角, 测量所用的液滴量为 2~3 μL , 每组测量 5 次数据后取平均值。接触角滞后采用加液/减液法, 同样是每组测量 5 次数据后取平均值。固体表面能的测量方法采用 Owens 二液法, 测试液体中, 极性液体选用水, 非极性液体选用正十六烷。测得的接触角、接触角滞后以及粘附功结果如表 2 所示。从表 2 中接触角的结果可以看出, 三种润滑油在 SiO_2 、AF、FAS 三种界面上接触角大小的排序为 $\text{CA}(\text{SiO}_2) < \text{CA}(\text{FAS}) < \text{CA}(\text{AF})$ 。

因此，通过 AF 和 FAS 对柱面滑块表面进行修饰，改变了界面的润湿性，并与 SiO₂ 表面相比有很大的差别。AF、FAS 和 SiO₂ 的表面自由能结果如图 4 所示。

表 2 三种润滑油在三种滑块表面的接触角及接触角滞后
Tab.2 Contact angle and contact angle hysteresis on three slider surfaces by three lubricating oil

Lubricants/Slider	Contact angle CA/(°)	Contact angle hysteresis CAH/(°)
150N/SiO ₂	27.97±2.44	22.92±2.04
PAO6/SiO ₂	28.8±2.04	25.62±2.53
PEG200/SiO ₂	39.25±1.86	28.26±1.21
150N/AF	65.61±1.08	10.9±1.07
PAO6/AF	68±0.72	9.97±2.57
PEG200/AF	85.75±2.74	15.01±1.68
150N/FAS	52.17±2.35	14.81±0.84
PAO6/FAS	63.71±2.25	27.04±1.08
PEG200/FAS	83±0.7	10.53±2.6

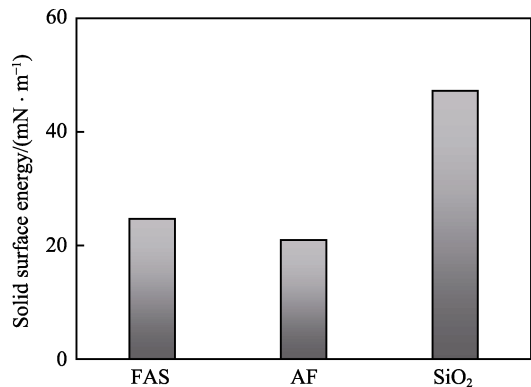


图 4 AF、FAS 和 SiO₂ 镀层的表面能
Fig.4 Surface energies of AF, FAS and SiO₂ coatings

2 结果及分析

图 5a 为采用 SiO₂ 柱面滑块和 FAS 柱面滑块时的油膜厚度测量结果。润滑油为 PEG200，载荷为 4 N。从图 5 中可以看出：随着速度的增加，油膜厚度逐渐增加，基本呈线性关系，符合经典润滑理论；柱面滑块表面材料为 SiO₂ 时，测量到的油膜厚度高于柱面滑块表面材料为 FAS 时的油膜厚度，固/液界面的润湿性能够影响油膜厚度。从接触角角度分析，润滑油 PEG200 在 SiO₂ 表面和 FAS 表面上的接触角分别约为 39.25°和 83°，两者相差很大。当液体表面张力相同时（同一润滑油），接触角越大，粘附功越小，即固/液界面的结合越薄弱，产生的油膜厚度越低。因此，接触角越大，油膜厚度越低。从接触角滞后角度分析，PEG200 在 SiO₂ 表面和 FAS 表面上的接触角滞后分别约为 28.26°和 10.53°，在 SiO₂ 表面上的滞后角大于 FAS 表面上的。接触角滞后产生的原因是在液滴前沿存在能垒，其大小可反映出气-固-液三相线

跨越能垒时所需要的能量大小。因此，接触角滞后越大，跨越能垒时所需的能量越大，液体分子在固体表面产生相对运动越困难，油膜厚度也就越大。

此外，本文使用了 150N 矿物质油重复上述试验过程，结果如图 5b 所示，同样观察到 SiO₂ 柱面滑块的油膜厚度高于 FAS 柱面滑块的油膜厚度。根据表 2 可知，150N 在 SiO₂ 表面和 FAS 表面上的接触角分别约为 27.97°和 52.17°，接触角滞后分别约为 22.92°和 14.81°。两者与油膜厚度的关系与采用润滑油 PEG200 时的润滑规律相同。

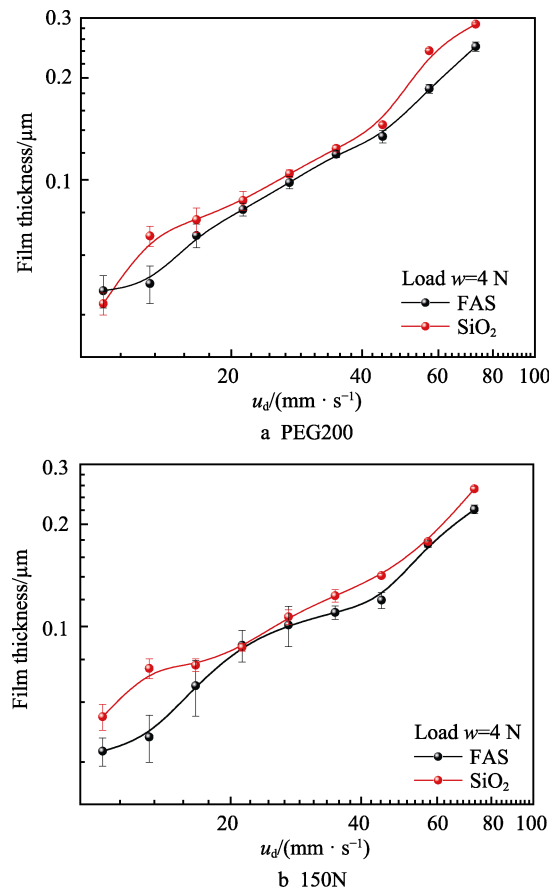


图 5 线接触润滑条件下 SiO₂ 和 FAS 柱面滑块表面对应的油膜厚度-速度曲线
Fig.5 Film thickness vs. speed for SiO₂ and FAS cylinder surfaces under the lubrication conditions of line contact

图 6 为 150N、PAO6 和 PEG200 三种润滑油分别在 SiO₂/SiO₂（图 6a）和 SiO₂/AF（图 6b）线接触时油膜厚度的比较。从图 6 中能观察到：三种油的膜厚-速度曲线几乎重叠在一起，没有明显的区别。从表 1 中得知三种润滑油的动力黏度相差不多，因此排除了黏度造成的影响。从表 2 可知，150N、PAO6 和 PEG200 三种润滑油在 SiO₂ 表面上的接触角分别为 27.97°、28.8°和 39.25°，接触角滞后分别为 22.92°、25.62°和 28.26°。从接触角方面分析，PEG200 的接触角稍大，但其膜厚，除了两个较高速度时，其他速度下的膜厚并没有与其他两种润滑油有明显区别。从接触角滞后

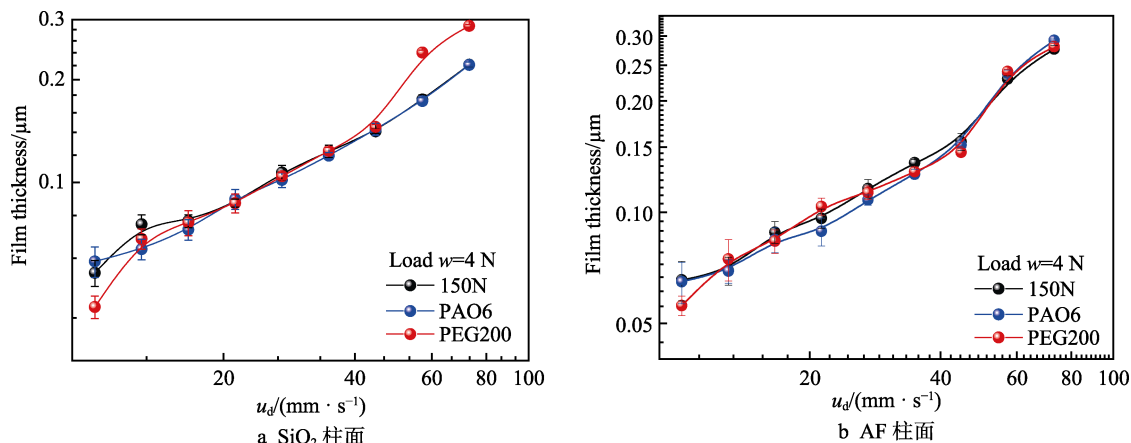


图6 同一接触副三种润滑油油膜厚度的比较

Fig.6 Comparison of the film thickness of three lubricating oil in the same contact: (a) SiO₂ cylinder surface, (b) AF cylinder surface

的角度分析, 三者在 SiO₂ 表面上的接触角滞后相差不多, 所以油膜厚度相差不大。在此情况下, 根据接触角的大小不能完全反映出油膜厚度的大小。然而, 接触角滞后与油膜厚度的关系依然一致。

对比表 2 中 150N、PAO6 和 PEG200 三种润滑油在 AF 表面上的接触角和接触角滞后, 能够得出相同的结论, 并且通过接触角之间的较大差值 (最大相差约 20°) 和几乎重叠的油膜厚度曲线 (图 6b), 更加清晰地验证了接触角大小不能完全反映出油膜厚度的大小。经过上述结果的对比与分析, 接触角与接触角滞后作为表征固/液界面润湿性的两个参数, 都可以与油膜厚度取得一定的联系。但就其关联性上, 在本试验范围内, 接触角滞后能够更好地反映出界面润湿性对流体动压润滑的影响。

众多研究人员研究过接触角和流体动压润滑的关系。其中, Whyman 等^[16]推导出接触角、接触角滞后与势能垒的关系式如下:

$$E = \frac{\gamma R}{2^{7/3}} (\text{CAH})^2 f(\theta) \quad (1)$$

$$f(\theta) = \frac{(1 + \cos \theta)^{1/2}}{(1 - \cos \theta)^{1/6} (2 + \cos \theta)^{4/3}} \quad (2)$$

式(1)中, 势能垒 E 与 CAH 的平方成正比, 与 $f(\theta)$ 的一次方成正比。再如图 7 所示, 接触角在 30°~130° 范围内, $f(\theta)$ 的变化量仅为 0.37~0.47。因此, 势能垒 E 受 CAH 的变化影响更大。另外, 接触角通常指的是静态接触角, 简单直观, 但是它不能反映出润湿过程的能量变化。而线接触流体动压润滑是一个运动的过程, 此时的接触角是一个与时间有关的、可重复出现的非平衡接触角, 即为动态接触角。无论是静态接触角, 还是动态接触角, 都是处在前进角和后退角之间的值。所以, 用接触角滞后判别油膜厚度更加贴切。

图 8 是润滑油 PAO6 在三种圆柱材料 (SiO₂、AF、FAS) 条件下的油膜厚度比较, 对比后得出圆柱材料为 AF 时的油膜厚度值最大。根据表 2 中的测量值, 在 AF 界面接触角是最大值, 接触角滞后是最小

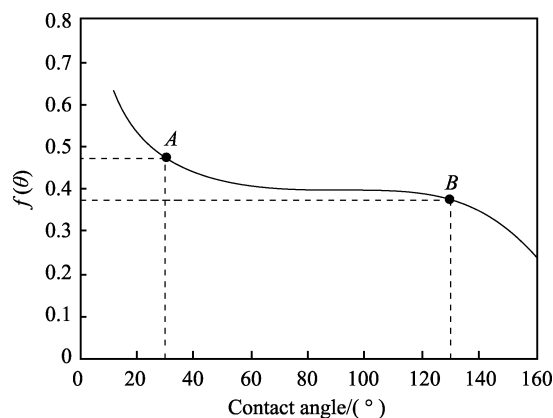
图7 接触角函数 $f(\theta)$

Fig.7 Function $f(\theta)$ of the contact angle

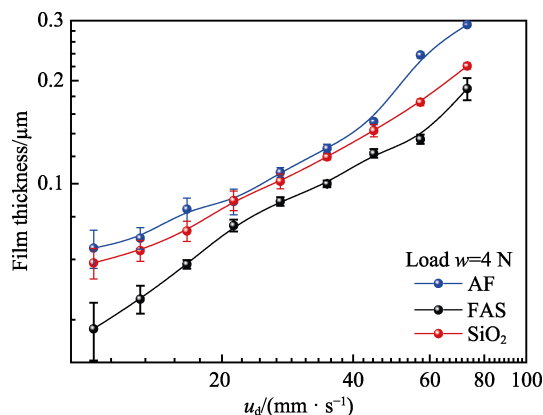


图8 润滑油 PAO6 在三种圆柱材料上的油膜厚度

Fig.8 Film thickness on three cylinder materials by lubricating oil PAO6

值。按照前述规律判断, 此时的油膜厚度应该最小, 但是实验测得的结果却与常规理论相悖, 反而是油膜厚度最大。

由式(1)可得出 AF 镀层上的势能垒最小, 而在 SiO₂ 和 FAS 表面上的接触角滞后仅差 2°, 将其视作加/减液法造成的可允许误差, 因此需考虑其他参数的影响。首先, PAO6 在 SiO₂ 表面上的 $f(\theta)$ 值 (图 7 中 A 点) 略高于 FAS 表面 (图 7 中 B 点); 其次,

相同体积的油滴在 SiO_2 表面上平衡时形成的球冠的直径 R 大于 FAS 表面上的球冠半径。综合两者的影响, PAO6 脱离 SiO_2 表面所需的能垒要大于 FAS 表面的能垒。

此外, 郭亮等^[17]通过数值计算得到面接触流体动压油膜厚度和极限剪应力的关系为一非单调性曲线且存在最小值, 如图 9 所示。作者猜测图 8 中三种界面产生的油膜厚度可能存在图 9 中符号标示的位置关系, 但 FAS 点所处的位置在极限剪应力最小值的左边还是右边尚不能确定。可以肯定的是: 润滑油在 AF 界面上的极限剪应力小于 FAS 界面和 SiO_2 界面, 这种差异是由于表面自由能不同造成的。对于同种液体, 表面自由能低的表面产生的较小的粘附力, 进而导致极限剪应力较小; 反之, 表面自由能高的表面产生较大的粘附力和较大的极限剪应力。

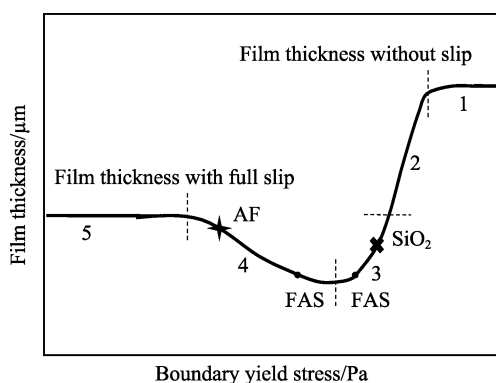


图 9 极限剪应力和油膜厚度的关系

Fig.9 Correlation between lubricant film thickness and boundary yield stress

为了验证猜想的合理性, 设计如下试验: 将分别镀有 AF 和 FAS 镀层的两个滑块拼接到一起, 在中间滴上一滴润滑油, 润滑油向 FAS 一侧流动。同样的做法, FAS 和 SiO_2 镀层拼接在一起时, 会发现润滑油向 SiO_2 一侧流动 (如图 10)。试验结果表明, AF、FAS 和 SiO_2 三种镀层的表面自由能依次增大, 这与 Owens 二液法所测得 AF、FAS 和 SiO_2 三种镀层的表面自由能结果一致 (如图 4)。

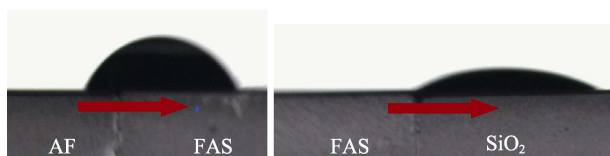


图 10 表面能的验证

Fig.10 Verification of surface energy

经上述分析得, AF 镀层的表面自由能最低, 所以产生的粘附力最小, 在固/液界面发生滑移现象时所需的边界剪应力最小, 产生滑移的程度最大, 甚至在接触区的入口处也可能会发生滑移。而 SiO_2 镀层的表面自由能最高, 固/液间的分子力较大, 固/液界

面不易发生滑移, 或者说产生滑移的程度小, 有可能只是在接触区的出口处发生小范围的滑移。FAS 镀层的表面自由能介于两者之间, 固/液界面发生滑移的程度介于两者之间, 有可能在接触区出口处发生较大范围的滑移 (与 SiO_2 镀层发生滑移的程度相比较, 此时落在极限剪应力最小值的右边); 还有可能在接触区入口处发生较小的滑移 (与 AF 镀层发生滑移的程度相比较, 此时落在极限剪应力最小值的左边)。

3 结论

1) 接触角和接触角滞后都是表征界面亲/疏油性的参数, 二者均与油膜厚度存在关联性。

2) 在本实验范围内, 与接触角相比, 接触角滞后能更好地反映出界面润湿性对流体动压润滑的影响。

3) 由于存在边界滑移差异, 疏油表面 (AF) 既具有较低的势能垒, 同时具有较高的承载力。

参考文献:

- [1] SUNDARARAJAN S, BHUSHAN B. Micro/nanoscale tribology of MEMS materials, lubricants and devices[M]. Dordrecht: Springer, 2001: 821-850.
- [2] 雒建斌, 温诗铸, Li K Y, 等. 纳米摩擦学研究进展与存在问题[J]. 科学通报, 1997(13): 1345-1355.
LUO Jian-bin, WEN Shi-zhu, LI K Y, et al. Research progress and existing problems of nanotribology[J]. chinese science bulletin, 1997(13): 1345-1355.
- [3] YANG Jian-bin, WEN Shi-zhu, KWOK D Y. Effect of liquid slip in electrokinetic parallel-plate microchannel flow[J]. Journal colloid interface science, 2003, 260: 225-233.
- [4] SPIKES H A. The half-wetted bearing, part 2—Potential application in low load contacts[J]. Journal of engineering tribology, 2003, 217(1): 15-26.
- [5] CHOO J H, SPIKES H A, RATOI M, et al. Friction reduction in low-load hydrodynamic lubrication with a hydrophobic surface[J]. Tribology international, 2005, 40(2): 154-157.
- [6] CHOO J H, GLOVNEA R P, FORREST A K, et al. A low friction bearing based on liquid slip at the wall[J]. Journal of tribology, 2007, 129(3): 611-620.
- [7] KALIN M, POLAJNAR M. The correlation between the surface energy, the contact angle and the spreading parameter, and their relevance for the wetting behaviour of DLC with lubricating oils[J]. Tribology international, 2013, 66: 587.
- [8] KALIN M, POLAJNAR M. The effect of wetting and surface energy on the friction and slip in oil-lubricated contacts[J]. Tribology letters, 2013, 52(2): 225-233.

(下转第 280 页)

参考文献:

- [1] FINNIE I. The mechanism of erosion of ductile metals[C]// 3rd US national congress of applied mechanics. Rhode Island: Brown University, 1958.
 - [2] FINNIE I. Erosion of surfaces by solid particles[J]. *Wear*, 1960, 3(2): 87-103.
 - [3] BITTER J G A. A study of erosion phenomena: Part I[J]. *Wear*, 1963, 6(1): 5-21.
 - [4] BITTER J G A. A study of erosion phenomena: Part II[J]. *Wear*, 1963, 6(3): 169-190.
 - [5] NEILSON J H, GILCHRIST A. Erosion by a stream of solid particles[J]. *Wear*, 1968, 11(2): 111-122.
 - [6] HUTCHINGS I M. A model for the erosion of metals by spherical particles at normal incidence[J]. *Wear*, 1980, 70(3): 269-281.
 - [7] ZHANG Y, REUTERFORS E P, MCLAURY B S, et al. Comparison of computed and measured particle velocities and erosion in water and air flows[J]. *Wear*, 2007, 263(1): 330-338.
 - [8] OKA Y I, OKAMURA K, YOSHIDA T. Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact—Part I: Effects of impact parameters on a predictive equation[J]. *Wear*, 2005, 259(1): 95-101.
 - [9] HAUGEN K, KVERNOLD O, RONOLD A, et al. Sand erosion of wear-resistant materials: Erosion in choke valves[J]. *Wear*, 1995, 186-187: 179-188.
 - [10] CHEN X, MCLAURY B S, SHIRAZI S A. Application and experimental validation of a computational fluid dynamics (CFD)-based erosion prediction model in elbows and plugged tees[J]. *Computers & fluids*, 2004, 33(10): 1251-1272.
 - [11] DUARTE C A R, DE S, FRANCISCO J, et al. Numerical investigation of mass loading effects on elbow erosion[J]. *Powder technology*, 2015, 283: 593-606.
 - [12] PENG W, CAO X. Numerical simulation of solid particle erosion in pipe bends for liquid-solid flow[J]. *Powder technology*, 2016, 294: 266-279.
 - [13] ZAMANI M, SEDDIGHI S, NAZIF H R. Erosion of natural gas elbows due to rotating particles in turbulent gas-solid flow[J]. *Journal of natural gas science and engineering*, 2017, 40: 91-113.
 - [14] ZENG D, ZHANG E, DING Y, et al. Investigation of erosion behaviors of sulfur-particle-laden gas flow in an elbow via a CFD-DEM coupling method[J]. *Powder technology*, 2018, 329: 115-128.
 - [15] PAWAR S K, PADDING J T, DEEN N G, et al. Lagrangian modelling of dilute granular flow—Modified stochastic DSMC versus deterministic DPM[J]. *Chemical engineering science*, 2014, 105: 132-142.
 - [16] VIEIRA R E, MANSOURI A, MCLAURY B S, et al. Experimental and computational study of erosion in elbows due to sand particles in air flow[J]. *Powder technology*, 2016, 288: 339-353.
 - [17] GRANT G, TABAKOFF W. Erosion prediction in turbomachinery resulting from environmental solid particles[J]. *Journal of aircraft*, 1975, 12(5): 471-478.
-
- (上接第 257 页)
- [9] KALIN M, POLAJNAR M. The wetting of steel, DLC coatings, ceramics and polymers with oils and water: The importance and correlations of surface energy, surface tension, contact angle and spreading[J]. *Applied surface science*, 2014, 293: 97-108.
 - [10] 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 lubrication films[J]. *Tribology*, 2010, 30(2): 203-208.
 - [11] 田鹏晖, 郭峰, 王志君, 等. 固液界面对流体动压润滑膜厚的影响[J]. *表面技术*, 2016, 45(10): 77-82.
TIAN Peng-hui, GUO Feng, WANG Zhi-jun, et al. Effects of the liquid/solid interface on thickness of hydrodynamic lubricating films[J]. *Surface technology*, 2016, 45(10): 77-82.
 - [12] 王志君, 郭峰, 田鹏晖. 界面黏附功与润滑油膜厚度的相关性研究[J]. *润滑与密封*, 2016, 41(12): 52-56.
WANG Zhi-jun, GUO Feng, TIAN Peng-hui. Correlation of interface adhesion work and hydrodynamic lubrication[J]. *Lubrication engineering*, 2016, 41(12): 52-56.
 - [13] 王茜, 郭峰, 韩素立. 固体表面润湿性对滑块-盘接触润滑供油的影响[J]. *摩擦学学报*, 2019, 39(1): 73-81.
WANG Qian, GUO Feng, HAN Su-li. Influence of surface wettability on the lubricating oil supply in a slider-on-disk contact[J]. *Tribology*, 2019, 39(1): 73-81.
 - [14] 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 Shu-yan, GUO Feng, LI Chao. Influence of surface wettability on lubrication by limited lubricant supply[J]. *Tribology*, 2017, 37(4): 429-434.
 - [15] GUO L, WONG P L, GUO F. Correlation of contact angle hysteresis and hydrodynamic lubrication[J]. *Tribology letters*, 2015, 58(3): 45.
 - [16] WHYMAN G, BORMASHENKO E, STEIN T. The rigorous derivation of Young, Cassie-Baxter and Wenzel equations and the analysis of the contact angle hysteresis phenomenon[J]. *Chemical physics letters*, 2008, 450(4-6): 355-359.
 - [17] GUO L. Research on boundary slippage in thin film hydrodynamic lubrication[D]. Hongkong: City University of Hongkong, 2015.