

油性添加剂对限量供油润滑影响的实验研究

韩露娟, 郭峰

(青岛理工大学, 山东 青岛 266520)

摘 要: **目的** 探究在限量供油条件下, 润滑油中油性剂吸附对滑块-玻璃盘面接触润滑油膜的影响。**方法** 利用面接触润滑油膜测量系统, 测量了 PAG 基础油以及添加了 0.1%硬脂酸和 0.1%十八胺油性剂的同种基础油产生的润滑油膜厚度随速度的变化曲线, 并对油性剂在盘表面的吸附进行了表征。**结果** 在普通玻璃盘和紫外照射的玻璃盘两种条件下, 有硬脂酸添加的 PAG 与纯 PAG 相比, 润滑膜厚均降低, 其中紫外照射玻璃盘下硬脂酸作用对膜厚的降低程度更为明显。在玻璃盘运转的最低速度和最高速度下, 硬脂酸作用使普通玻璃盘膜厚降低量分别为 0.25 μm 和 0.64 μm , 降幅为 44.2%和 22.1%; 紫外照射玻璃盘下膜厚降低量分别为 0.38 μm 和 0.91 μm , 降幅为 61.5%和 41.7%。对于紫外照射玻璃盘, 硬脂酸吸附使润滑剂在润滑轨道上发生反润湿, 呈液滴状分布, 对应膜厚降低; 十八胺使润滑剂呈离散条状分布, 润滑油膜厚与 PAG 基础油相当, 最低和最高速度下膜厚降低量分别为 0.11 μm 和 0.17 μm , 降幅为 18.2%和 8.1%。**结论** 使用普通玻璃盘时, 润滑油膜与滑块表面硬脂酸吸附膜的弱亲和性是导致相应润滑膜厚低于纯 PAG 基础油的主要原因。玻璃盘紫外照射促进油性剂在盘面的润滑轨道内吸附, 润滑轨道内外形成张力梯度, 引发润滑油流失, 使润滑油膜厚度大幅降低。极性基团极性大小的差异, 使添加十八胺产生了远高于添加硬脂酸的膜厚, 影响了润滑轨道上润滑油的分布及供油。

关键词: 油性剂; 限量供油; 动压润滑; 紫外光照; 膜厚; 面接触

中图分类号: TH117.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)11-0204-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.11.023

Influence of Oily Additives on Lubrication under Limited Lubricant Supply

HAN Lu-juan, GUO Feng

(Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China)

ABSTRACT: The work aims to study the effect of oily additives on the lubrication films in a slider-on-disc conformal contact under conditions of limited lubricant supply. The conformal contact lubrication film measuring system was used to measure the base oil PAG and the same base oil with oily additives with stearic acid (0.1%) and octadecylamine (0.1%), to generate the variation curve of lubrication film thickness with speed and characterize the adsorption of oily additives on disc surface. Under

收稿日期: 2020-02-18; 修订日期: 2020-10-22

Received: 2020-02-18; Revised: 2020-10-22

基金项目: 国家自然科学基金 (51775286)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51775286)

作者简介: 韩露娟 (1995—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为油膜润滑界面效应。

Biography: HAN Lu-juan (1995—), Female, Master, Research focus: interface effect of oil film lubrication.

通讯作者: 郭峰 (1968—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向油膜润滑的光学测量和理论分析。邮箱: mefguo@qut.edu.cn

Corresponding author: GUO Feng (1968—), Male, Ph. D., Professor, Research focus: optical measurement and theoretical analysis of oil film lubrication. E-mail: mefguo@qut.edu.cn

引文格式: 韩露娟, 郭峰. 油性添加剂对限量供油润滑影响的实验研究[J]. 表面技术, 2020, 49(11): 204-211.

HAN Lu-juan, GUO Feng. Influence of oily additives on lubrication under limited lubricant supply[J]. Surface technology, 2020, 49(11): 204-211.

the conditions of ordinary disc and UV-irradiated disc, the film thickness of PAG with stearic acid was always lower than that of pure PAG. Under the UV-irradiated disc, stearic acid significantly reduced the film thickness. Under the ordinary disc at the lowest speed and the highest speed, the film thickness of PAG with stearic acid reduced by $0.25\ \mu\text{m}$ and $0.64\ \mu\text{m}$, with drop rate of 44.2% and 22.1%. However, under the UV-irradiated disc, the film thickness decreased by $0.38\ \mu\text{m}$ and $0.91\ \mu\text{m}$, with drop rate of 61.5% and 41.7%. Moreover, on the UV-irradiated disc, the PAG with stearic acid appeared in the form of droplet due to dewetting from the stearic acid adsorption on the lubrication track and consequently the film thickness decreased. While the PAG with octadecylamine presented less dewetting on the lubrication track and stayed in the form of discontinuous narrow strips. The generated lubrication oil film thickness was almost equal to that from PAG base oil, the decrease of film thickness at the lowest and highest speed was only $0.11\ \mu\text{m}$ and $0.17\ \mu\text{m}$, and the drop rate of film thickness was 18.2% and 8.1%. When an ordinary disc is used, the weak affinity between the oil film and the adsorption layer of stearic acid on the slider surface is the main cause for the corresponding lubrication oil film thickness being lower than that of pure PAG base oil. Moreover, the UV irradiation promotes the adsorption of oily additives on the lubrication track, and distinctive tension gradient is formed at the lubrication track boundary, which leads to lubricant escape, thus reducing the film thickness. The film thickness produced by octadecylamine is much higher than that of stearic acid due to the difference in polarity of the polar groups, which affects the distribution of lubricant, and the lubricant supply.

KEY WORDS: oily additives; limited lubricant supply; hydrodynamic lubrication; ultra-violet irradiation; film thickness; conformal contact

油膜润滑是减摩降磨最有效的手段之一。多年来, 研究人员进行了许多研究, 通过改变润滑副的表面能^[1], 来达到改善润滑的目的。Spikes^[2]提出了“半润湿性轴承”的概念, 在维持安全油膜厚度的条件下, 实现低摩擦力。Guo 和 Wong^[3]提出了通过定制非均匀的表面改性, 实现平行间隙和负间隙间有效的流体动压效应。Spikes 和 Granic^[4]讨论了固液界面发生滑移的模型, 并据此进行了流体润滑的理论分析。Voeltzel 等^[5]的分子动力学模拟表明, 离子液体润滑剂在石墨等碳物质表面表现出极低的摩擦力, 并将其归因于固液界面的滑移。Kalin 和 Polajnar^[6]通过不同的 DLC 镀层, 得到了不同的固液界面亲和强度, 研究了其对油膜滑移和摩擦力的影响。杨淑燕等^[7]的实验表明, 固液界面亲和性较差时, 对应的油膜厚度降低。值得注意的是, Spikes^[2]和 Guo 等人的计算表明, 油膜的承载力或油膜厚度并不一直随固液界面亲和性的减弱而减弱, 存在一个区间。应当指出, 上述研究都是在润滑油充分供给的条件下进行。另一方面, 高端装备对润滑的精确性要求越来越高^[8-9], 摩擦副需在有限量的润滑油供给条件下工作(此处称为限量供油润滑), 如用于高速轴承的连续油滴供油润滑(油气润滑)、小尺寸零件和微器件的定点定量液体润滑^[10]等。同时, 一些机械零部件一次供脂/油后, 长时间运转, 会自然地发生乏油, 被动处于限量供油润滑状态。限量供油润滑中, 界面效应同样存在, 但其存在形式及作用和充分供油润滑条件下的不同。在限量供油润滑中, 润滑油因接触区的机械分离作用而处于润滑轨道两侧, 在其再次进入接触区之前, 部分将向润滑轨道的中央区回流, 可称为表面的自集油(replenishment)。

自集油与润滑油的表面张力以及固体表面对润滑油的亲性和油膜分离压力(disjoining pressure)等相关, 如已有的关于乏油点接触弹流润滑的研究^[11-13]。因此, 限量供油润滑条件下, 界面效应对润滑的影响不仅仅存在于接触区内, 还存在于接触区外。最近臧淑燕等^[14]完成了面接触限量供油润滑实验, 发现润滑油在弱润湿性表面形成的离散油滴分布有利于润滑油膜承载。刘成龙等^[15]提出条状润湿表面可以改善润滑剂的补充, 从而降低混合润滑条件下钢球-钢块摩擦副的摩擦系数和磨损。可以看到, 在限量供油润滑中, 影响固液界面效应的因素都将对润滑有影响。

众所周知, 油性剂是润滑油常用的添加剂, 可显著降低摩擦副在边界润滑条件下的摩擦力。Jahanmir^[16]通过在基础油中依次添加 12~18 个碳原子的羧酸和醇类添加剂, 得出摩擦系数随添加剂链长增加而减小的结论。Spikes 等^[17]研究了几种油性添加剂分别在十六烷基基础油中的作用机理, 也发现^[18]将十八胺作为油性添加剂加入低黏度润滑油中, 能够显著降低摩擦力。油性剂通过表面吸附改变摩擦表面的表面能, 因此也有机会影响限量供油润滑。目前, 尚没有人对此问题进行系统地研究。因此本文在限量供油条件下, 对油性添加剂对润滑轨道上润滑剂的分布及其对油膜润滑的影响进行了研究。

1 实验

1.1 测量系统

实验采用面接触润滑油膜测量系统, 其原理如图 1 所示。经去散斑处理的激光平行光束依次经过玻璃

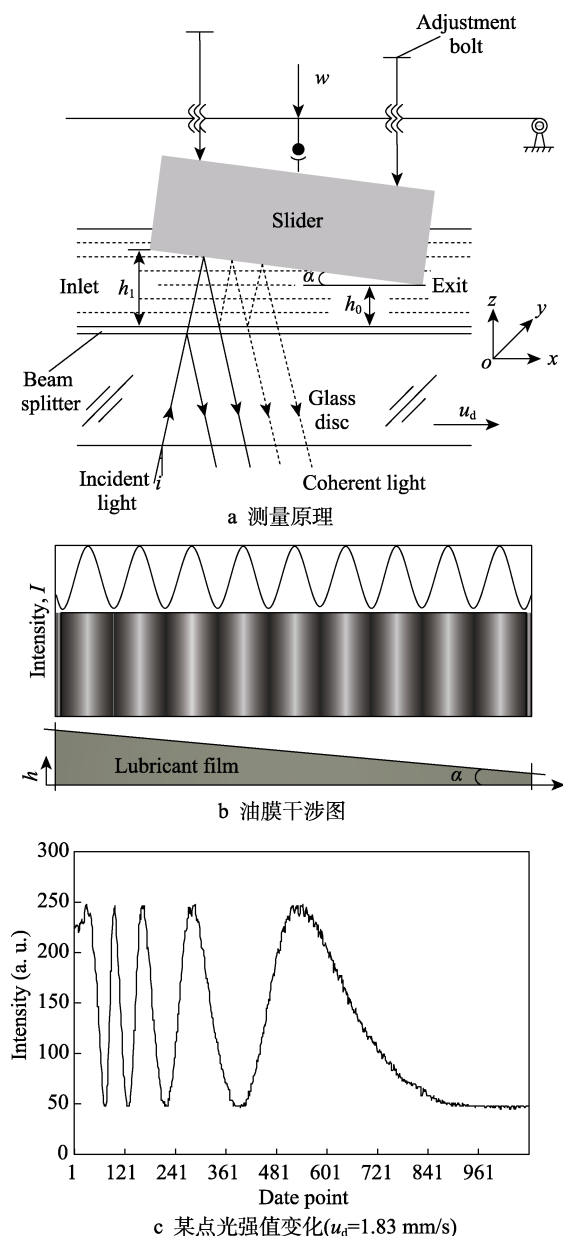


图1 面接触润滑油膜厚度测量原理图

Fig.1 Schematic illustration of the lubrication film thickness measurement in slider-on-disc contact: a) measuring principle; b) oil film interferencegram; c) change of light intensity at a certain point ($u_d=1.83$ mm/s)

圆盘、析光膜 ($\text{Cr}+\text{SiO}_2$)、润滑剂、滑块等组成的多层膜系统,并经过各个界面的反射和折射后产生相干光束,最终形成干涉条纹。调节滑块上方的调整螺栓,实现滑块与玻璃盘之间倾角大小的调节与固定。干涉条纹的数目反映了倾角大小。玻璃盘在一定速度下转动,带动润滑剂进入收敛间隙,形成动压效应,最小膜厚 h_0 位于出口侧,如图 1a 所示。通过记录启动或制动过程中干涉条纹级次与光强值的变化,可得到油膜厚度 h_0 。油膜干涉图和光强变化曲线如图 1b、c 所示。

1.2 实验材料及条件

实验用光学圆盘材料为 K9 玻璃,表面分别镀有铬膜和二氧化硅薄膜 ($\text{Cr}+\text{SiO}_2$),圆盘直径为 140 mm,表面粗糙度 Ra 值为 4 nm。另外,采用真空超紫外光 (UV, 中心波长为 172 nm) 装置对玻璃盘面进行光照处理,照射时间 3 h,使玻璃盘表面羟基化,增加油性剂吸附。实验用滑块材料为 GCr15 轴承钢,工作面大小为 5 mm×5 mm,表面粗糙度 Ra 值为 8 nm。

实验采用三种润滑剂,一种是 PAG (聚醚,中科润美) 基础油,另两种是分别加入了 0.1% 的硬脂酸 ($\text{C}_{18}\text{H}_{36}\text{O}_2$, 以下简称 PAGES) 和十八胺 ($\text{C}_{18}\text{H}_{39}\text{N}$, 以下简称 PAGO) 的 PAG,油品性质如表 1 所示,两种油性剂分子结构和基本性质如表 2 所示。可以得出,这两种油性剂不会影响基础油本身的黏度特性。

玻璃盘与滑块之间采用微量进样器实现限量供油,油量为 2 μL ,倾角固定为 $\alpha=4.35\times 10^{-4}$ 。实验台用亚克力罩密封,温度为 $(22\pm 0.5)^\circ\text{C}$,湿度为 $50\%\pm 5\%$ RH。

表 1 实验所用润滑油特性

Tab.1 Properties of lubricants used in the test

Lubricant	Dynamic viscosity $\eta/(\text{mPa}\cdot\text{s})$	Refractive index n
PAG	122.7	1.453
PAGES	121.7	1.452
PAGO	123.9	1.453

表 2 实验所用油性剂特性

Tab.2 Properties of oily additives used in the test

Oily additives	Structure formula	Molecular weight	Density/ $(\text{g}\cdot\text{mL}^{-1})$	Meltingpoint/ $^\circ\text{C}$	Boilingpoint/ $^\circ\text{C}$
Stearic acid		282.5	0.94	67~69	183.5
Octadecylamine		269.5	0.86	50~60	349

2 结果与讨论

2.1 油性剂对油膜建立的影响

在普通玻璃盘表面,PAG 和 PAGES 在不同速度下

(载荷为 4 N, 供油量为 2 μL) 的润滑油膜干涉图如图 2 所示。与充分供油不同,在限量供油时,PAG/PAGES 所对应的光干涉图在入口处出现一个带有两侧脊的半月型乏油区域。侧脊是在滑块的机械分离作用下,润滑油迁移到润滑轨道两侧形成的。在再

一次进入接触区之前,侧脊处润滑油向润滑中心区回流,回油量是影响膜厚大小的重要因素。入口处乏油区域为均匀的油气混合区,干涉条纹不连续。同时可以看出,PAGS与PAG二者的乏油状况差别并不明

显。图3为PAG和PAGS在润滑轨道上的铺展形态,铺展宽度都近似为滑块的宽度,说明在普通玻璃盘面,添加油性剂对限量供油条件下润滑轨道上润滑油的分布影响不大。

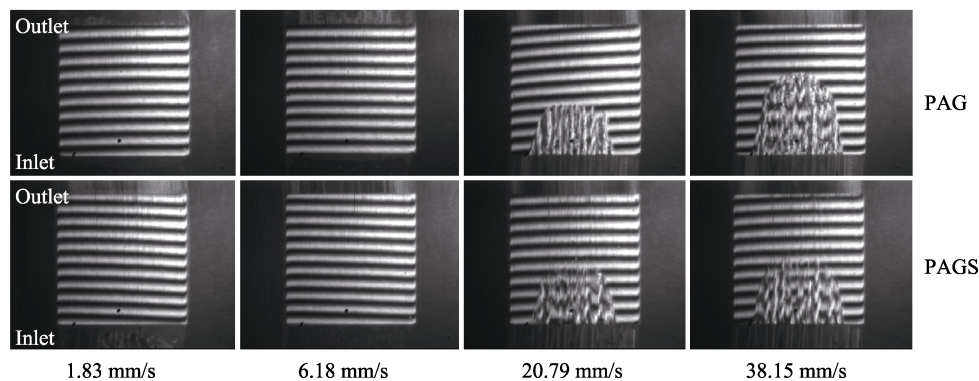


图2 限量供油下润滑油膜的干涉图

Fig.2 Interferograms with limited lubricant supply at different velocities

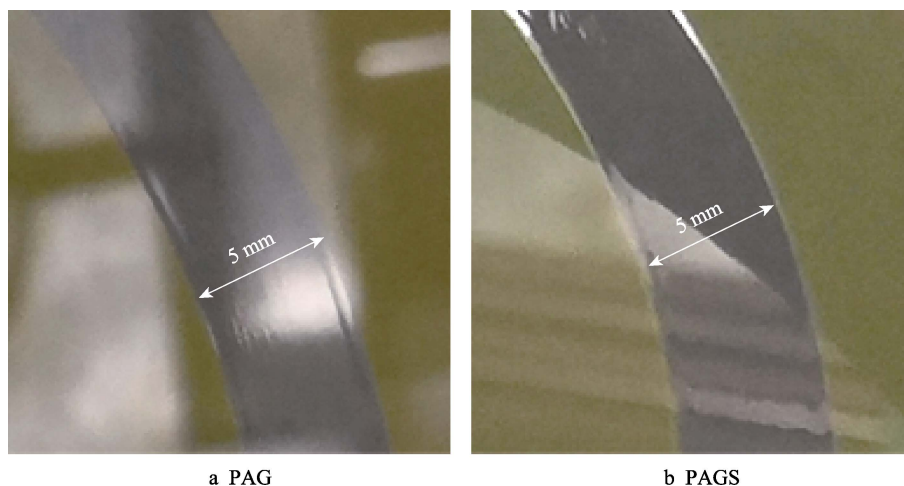


图3 玻璃盘润滑轨道表面油层分布

Fig.3 Lubricant layer on lubrication track of the disc surface

图4为对应图2限量供油润滑油膜厚度随速度变化的曲线。可以看到,PAG的油膜厚度大于PAGS。如图中两端圈中所示,随速度的增加,PAG与PAGS膜厚差由0.25 μm 增加到0.64 μm ,整体降幅在44.2%至22.1%之间。由表1可知,两者黏度差别不大,而且由图2可以看到,PAG与PAGS两者的乏油程度近似,说明膜厚改变另有原因。众所周知,油性剂改善润滑性的机理在于其烃链末端的极性基团在摩擦表面的吸附,形成了分子定向吸附膜,阻止固体接触,从而减少摩擦和磨损。吸附膜外层的烃链结构使吸附膜具有较低的表面能或低的润湿性,在流体动压润滑状态下诱发边界膜与流体膜之间的滑移,导致流体膜承载力下降和膜厚降低^[4,7,17-19]。此处,PAGS中的硬脂酸有机会在玻璃盘表面和钢滑块表面产生吸附膜。由图2和图3看到,在玻璃盘(Cr/SiO_2)表面,PAG和PAGS在润滑轨道上的分布并没有明显的差异,这也证明了硬脂酸在玻璃盘 Cr/SiO_2 表面并无很强的吸

附,对表面能的改变有限。金属滑块表面的吸附作用较强^[20],流体薄膜与滑块表面油性剂吸附层的弱亲和性是导致PAGS油膜厚度低的主要原因。

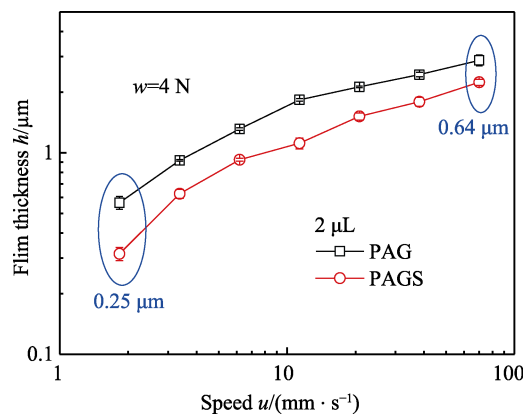


图4 限量供油下PAG及PAGS膜厚-速度曲线
Fig.4 Film thickness versus speed under limited lubricant supply

如果限量供油润滑条件下, PAGES 油膜厚度低于 PAG 油膜厚度源于硬脂酸吸附膜的低表面能的推测正确, 则在充分供油条件下, PAGES 的膜厚也将低于 PAG。作者在充分供油条件下对不同速度下 PAG 和 PAGES 的膜厚进行了测量, 结果见图 5, 可以看到, 随速度的增加, 二者膜厚之差由 $0.28\ \mu\text{m}$ 减小至 $0.19\ \mu\text{m}$, 膜厚相对降幅由 41% 到 4.6%, 证明了以上推测。

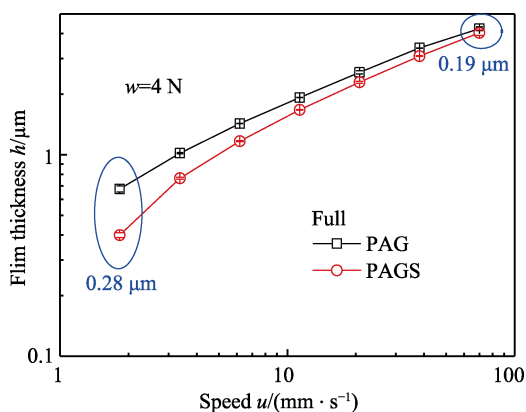


图 5 充分供油下 PAG 及 PAGES 膜厚-速度曲线

Fig.5 Film thickness velocity curves of PAG and PAGES under sufficient oil supply

为了促进玻璃盘表面对油性剂的有效吸附, 采用真空超紫外光刻处理装置, 对玻璃盘表面进行处理 (简称 UV 玻璃盘)。将硬脂酸和十八胺作为油性剂分别添加到基础油中, 并对得到的润滑剂 PAGES 和 PAGO (性质见表 1) 进行限量供油润滑实验, 载荷为 4 N, 供油量仍为 $2\ \mu\text{L}$ 。限量供油润滑条件下, PAGES 和 PAGO 在润滑轨道上的油层分布如图 6 所示, 与图 3 不同, 表面 UV 照射之后, 两者均呈现非连续分布。PAGES 在润滑轨道表现为微小的液滴, 且润滑轨道两侧液滴较大; 而 PAGO 呈现出条状。显然, 玻璃盘表面经过 UV 照射后, 添加剂吸附量增加, 润滑轨道表面能进一步降低, 出现反润湿现象, 导致润滑油非连

续分布。

图 7b 是限量供油条件下, PAGES 在普通玻璃盘和 UV 玻璃盘上形成的不同速度下的油膜厚度。很明显 UV 玻璃盘对应的油膜厚度明显低于普通玻璃盘。UV 玻璃盘表面对硬脂酸吸附能力强, 形成了低表面能润滑轨道, 可产生四种作用: 1) PAGES 在润滑轨道上的弱亲和性有利于润滑剂的回流, 对供油产生正面影响; 2) 反润湿产生的离散液滴会在接触副入口处较早地产生承载动压效应; 3) 润滑轨道表面与接触区之外的表面形成了张力梯度, 该表面能梯度会驱使润滑轨道两侧的润滑剂脱离润滑轨道, 从而对接触区入口的供油产生负面影响; 4) 润滑轨道对 PAGES 的弱亲和性一般会对其承载力产生负面效应, 降低其膜厚。图 7 中 UV 玻璃盘产生的低膜厚是这四种效应综合作用的结果。由图 7a 可以明显看到, 普通玻璃盘表面滑块入口乏油区为典型的油气混合区, 无完整油膜存在。而在 UV 玻璃盘表面滑块的入口乏油区, 显示出局部细条状完整油膜的存在, 这些完整的油膜来自于润滑轨道离散的液滴, 具有承载力。但 UV 玻璃盘表面滑块的入口乏油区大于普通玻璃盘表面滑块, 说明 UV 玻璃盘表面润滑轨道上润滑油量较少。图 7a 显示, UV 玻璃盘表面滑块两侧有明显的侧脊油带存在, 而普通玻璃盘表面并不存在。该侧脊油带来自上述作用 (3) 中的张力梯度。

由图 6 看到, 与 PAGO 中的十八胺比较, PAGES 中的硬脂酸形成的吸附膜对润滑油的反润湿性较强, 即硬脂酸膜对油的亲和性弱, 因此在限量供油条件下, 两者的成膜能力一定不同。图 8 给出了 PAG、PAGES 和 PAGO 三种润滑油在限量供油润滑条件下的油膜-速度关系。很明显, PAGO 的油膜形成能力与 PAG 相似, 而 PAGES 的油膜厚度明显减小。硬脂酸与十八胺均为含十八个碳原子的长链烷基加官能团的分子构成 (分子结构如表 2 中所示), 都会与 UV 处理后的玻璃盘表面羟基结合, 使玻璃盘表面达到一定

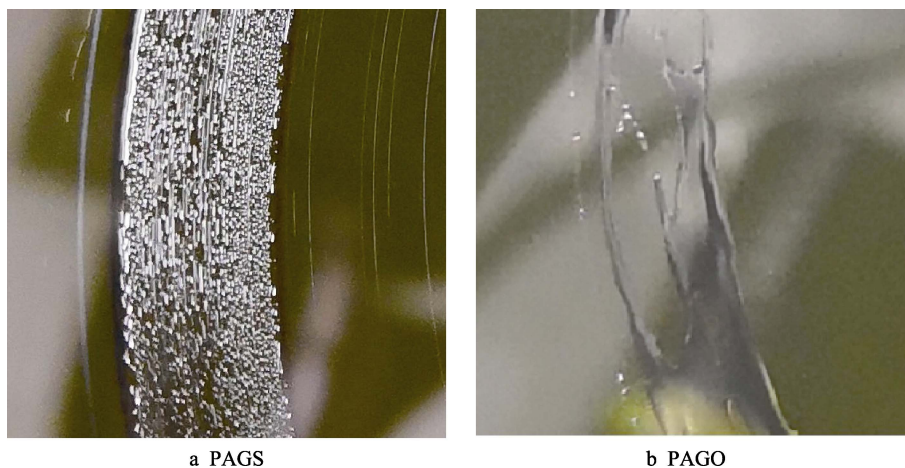


图 6 润滑油在盘面的铺展形态

Fig.6 Spread topography of lubricant on the disc surface

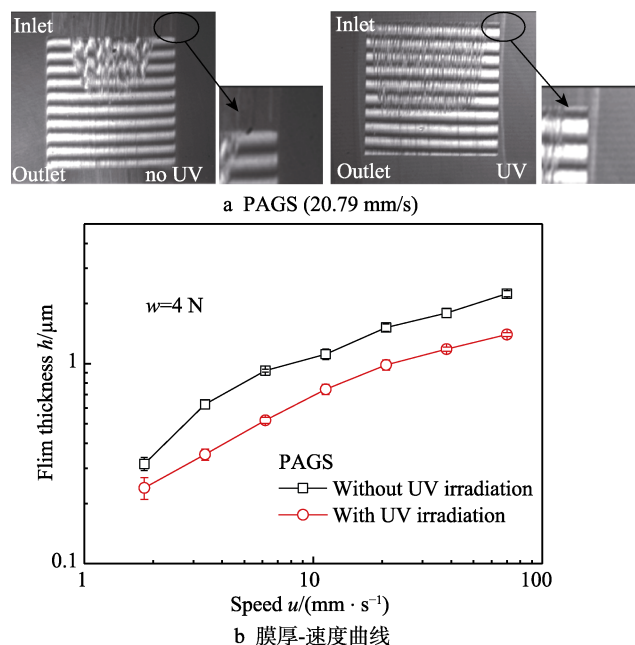


图 7 玻璃盘紫外照射与非照射条件下 PAPS 的膜厚随速度的变化曲线

Fig.7 Film thickness versus speed under disc with and without UV irradiation: b) film thickness velocity curve

的疏油态。十八胺的极性较硬脂酸的极性弱^[21], 吸附不均匀、持久, 接触区的润滑剂呈条状分布, 更接近于纯基础油润滑的膜厚, 有时还能促进接触区润滑油的聚集及回流, 增大膜厚。

由以上实验可知, 普通玻璃盘上 PAPS 润滑油膜厚低于 PAG 基础油, 紫外羟基化促进油性剂在玻璃

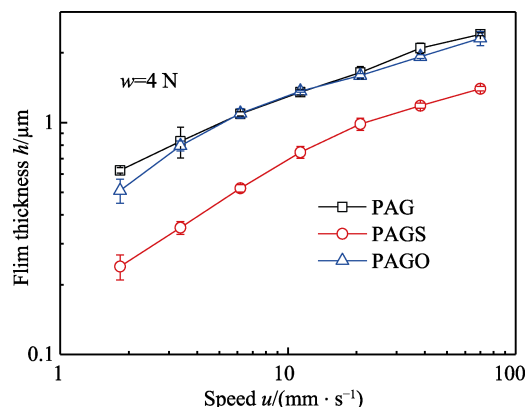


图 8 玻璃盘紫外照射条件下 PAG、PAPS 和 PAGO 的膜厚随速度变化曲线

Fig.8 Film thickness versus speed under UV-irradiated disc for PAG, PAPS and PAGO

盘表面的吸附使膜厚降幅加大, 而 PAGO 润滑油膜厚却与 PAG 基础油润滑膜厚相当。相同界面条件下, 不同种油性剂对流体动压膜厚影响不同, 这可能与油性剂极性大小有关。同时注意到, 载荷增大也会使膜厚降幅增加。以硬脂酸在 PAG 中作用为例, 同一载荷下, 限量供油膜厚降低程度远大于充分供油, 降幅随着速度增大而减小, 如图 9 所示。图 9a 中, 载荷为 2 N 时, 限量供油条件下膜厚降幅为 47.7%和 13.6%; 载荷增大到 4 N 时, 膜厚减小, 限量条件下的膜厚降幅变为 44.2%和 22.1%。图 9b 中, 载荷为 2 N 时, 限量供油条件下膜厚降幅在 39.5%和 9.8%; 载荷为 4 N 时, 膜厚降幅变为 61.5%和 41.7%。

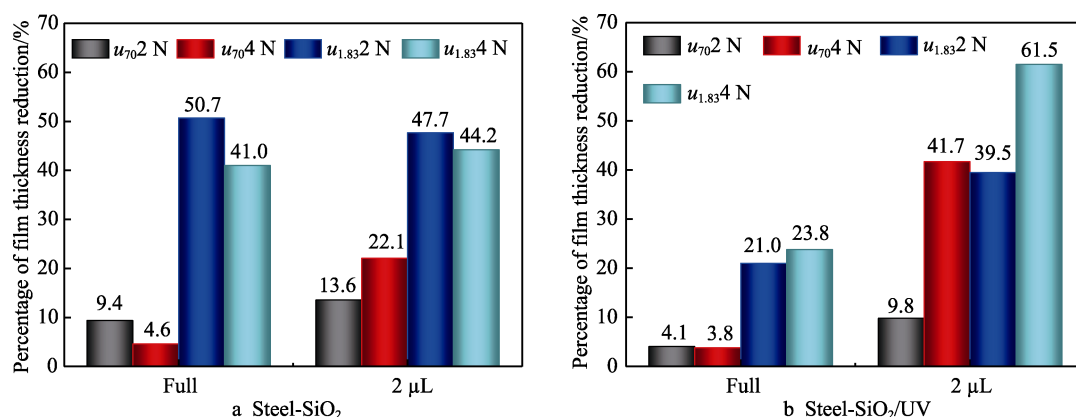


图 9 两种界面下硬脂酸对膜厚降低程度对比

Fig.9 Percentage of film thickness reduction due to stearic acid under two interface conditions

2.2 油性添加剂表面的吸附表征

为了表征油性剂极性分子基团对紫外羟基化处理后的玻璃盘的改性作用, 对实验后的玻璃盘 (SiO_2/UV) 进行表面清洁。先后用浸有石油醚的清洁棉和浸有无水乙醇的清洁棉擦拭, 再用氮气吹干。如图 10 所示, 玻璃盘上容易由滑块的划痕确定润滑轨道的边缘。用滴管在润滑轨道边界线中间位置滴一

滴去离子水, 水滴大小约为 $40 \mu\text{L}$, 玻璃盘表面保持水平, 观察水滴运动方向。取水滴运动过程中的四个瞬时。

图 10a 表明, 接触轨道区域由于吸附硬脂酸分子而出现疏水性, 证明了硬脂酸极性分子与玻璃盘表面羟基相互作用形成吸附膜, 对玻璃盘表面能起到了降低作用。这也说明了前述关于 UV 玻璃盘表面硬脂酸

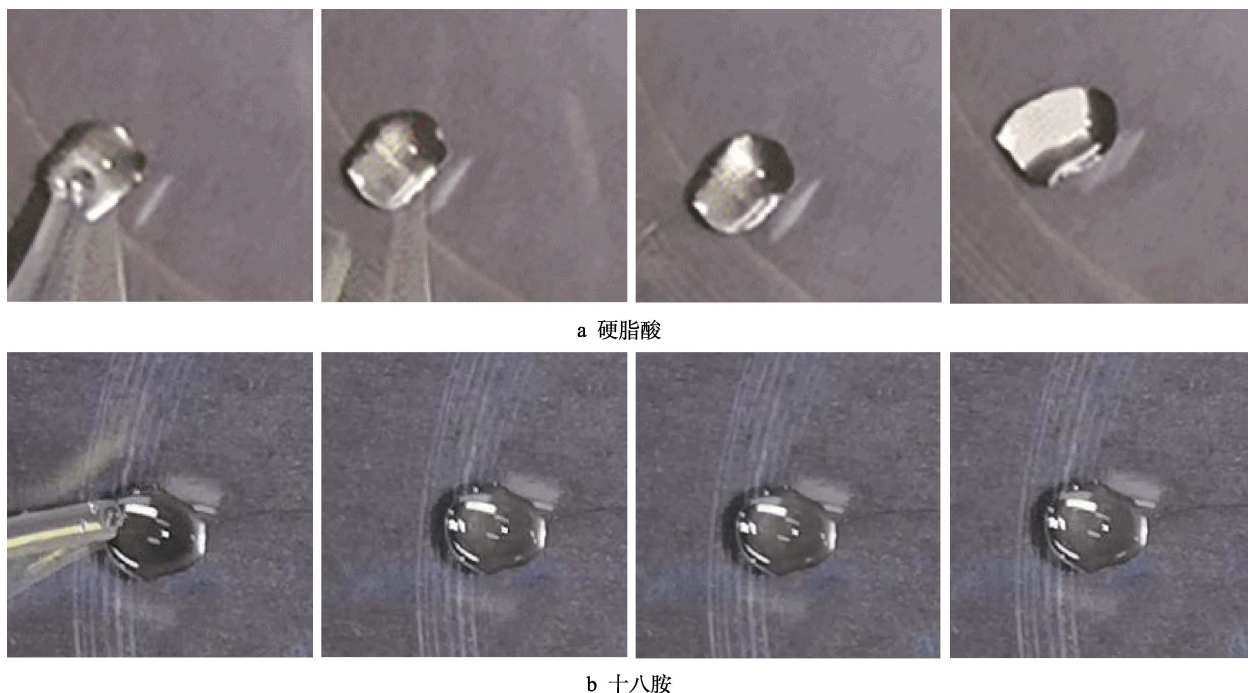


图 10 水滴迁移实验

Fig.10 Water droplet movement test: a) stearic acid; b) octadecylamine

吸附膜作用(3)的推测:在限量供油条件下,润滑油在润滑轨道边界张力梯度作用下向边界外部移动。而经过十八胺处理的玻璃盘表面润滑轨道润湿性虽然下降,但在边界处形成的张力梯度不足够推动液滴(图10b所示),表面性质表现与正常玻璃盘面没有明显区别。进一步说明了硬脂酸对玻璃盘表面的润滑油轨道的修饰作用更强,对润滑产生了负面作用。

综上所述,本文对限量供油条件下的油膜润滑中添加剂的作用机理进行了分析,限量供油条件下,油性剂产生的反润湿效果对微量润滑油的供失调起到关键作用。油性剂的吸附,使弱润湿性润滑剂更容易发生滑移,同时也容易发生乏油,导致膜厚降低。

3 结论

1) 正常玻璃盘表面润滑油膜与滑块表面油性剂吸附层的弱亲和性是导致PAGS膜厚低于纯PAG基础油润滑的主要原因,二者润滑轨道均为带有两侧脊的薄油层分布状态。

2) 同种油性剂在不同界面(SiO_2 和 SiO_2/UV)条件下的作用机理不同。与普通玻璃盘相比,紫外处理促进硬脂酸在玻璃盘面吸附,形成的低表面能润湿轨道对油膜润滑产生四种作用,其综合影响使润滑油膜厚度大幅降低。

3) 不同种油性剂在同种界面(SiO_2/UV)条件下,极性大小差异使润滑剂在润滑轨道上呈现不同分布形态,进而影响润滑效果。在极性较弱的十八胺作用下,润滑剂呈条状分布,润滑油膜厚度接近纯PAG基础油润滑,极性较强的硬脂酸作用下的润滑剂呈液

滴状的反润湿分布,膜厚大幅降低。

参考文献:

- [12] 李杨. 金属铝表面高疏水薄膜的制备及其摩擦学性能的研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2014.
LI Yang. Preparation and tribological properties of hydrophobic films on aluminum substrates[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2014.
- [13] SPIKES H A. The half-wetted bearing 1: Extended reynolds equation[J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers: Journal of engineering tribology, 2003, 217(1): 1-14.
- [14] GUO F, WONG P L. Theoretical prediction of hydrodynamic effect by tailored boundary slippage[J]. Proceedings of the Institution of mechanical engineers: Journal of engineering tribology, 2006, 220(1): 43-48.
- [15] SPIKES H, GRANICK S. Equation for slip of simple liquids at smooth solid surfaces[J]. Langmuir, 2003, 19(12): 5065-5071.
- [16] VOELTZEL N, FILLOT N, VERGNE P. Orders of magnitude changes in the friction of an ionic liquid on carbonaceous surfaces[J]. The journal of physical chemistry C, 2018, 122(4): 2145-2154.
- [17] 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): 185-194.
- [18] 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(2): 101-106.
- YANG Shu-yan, GUO Feng, MA Chong, et al. Influence of the liquid/solid wettability on thin hydrodynamic lubrication films[J]. Tribology, 2010(2): 101-106.
- [19] 鲍建辰. 基于润滑剂供给调节的弹流油膜实验研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2018.
- BAO Jian-chen. Experimental study on elastohydrodynamic lubrication behavior by lubricant supply regulation[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2018.
- [20] MANG T. Encyclopedia of lubricants and lubrication[M]. New York: Springer, 2014.
- [21] LEONG J Y, REDDYHOFF T, SINHA S K. Hydrodynamic friction reduction in a MAC-hexadecane lubricated MEMS contact[J]. Tribology letters, 2013, 49(1): 217-225.
- [22] CHIU Y P. An analysis and prediction of lubricant film starvation in rolling contact systems[J]. ASLE transactions, 1974, 17(1): 22-35.
- [23] CEN H, LUGT P M. Replenishment of the EHL contacts in a grease lubricated ball bearing[J]. Tribology international, 2019, 146: 106064.
- [24] GERSHUNI L, LARSON M G, LUGT P M. Lubricant replenishment in rolling bearing contacts[J]. Tribology transactions, 2008, 51(5): 643-651.
- [25] 臧淑燕, 郭峰, 李超, 等. 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, et al. Influence of surface wettability on lubrication by limited lubricant supply[J]. Tribology, 2017, 37(4): 429-434.
- [26] 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.
- [27] JAHANMIR S. Chain length effects in boundary lubrication[J]. Wear, 1985, 102(4): 331-349.
- [28] RATOI M, ANGHEL V, BOVINGTON C, et al. Mechanisms of oiliness additives[J]. Tribology international, 2000, 33(3): 241-247.
- [29] REDDYHOFF T, KU I S Y, HOLMES A S. Friction modifier behaviour in lubricated MEMS devices[J]. Tribology letters, 2011, 41(1): 239-246.
- [30] CHOO J H, FORREST A K, SPIKES H A. Influence of organic friction modifier on liquid slip: A new mechanism of organic friction modifier action[J]. Tribology letters, 2007, 27(2): 239-244.
- [31] JOHANSSON E, NYBORG L. XPS study of carboxylic acid layers on oxidized metals with reference to particulate materials[J]. Surface and interface analysis, 2003, 35(4): 375-381.
- [32] KUS M, KALIN M. Influence of additives and their molecular structure on the static and dynamic wetting of oil on steel at room temperature[J]. Applied surface science, 2019, 490: 420-429.

(上接第203页)

- [13] ZAKI A M, NASSAR S A, YANG X. Effect of thread and bearing friction coefficients on the self-loosening of preloaded countersunk-head bolts under periodic transverse excitation[J]. Journal of tribology, 2010, 132(3): 031601.
- [14] ZHOU J B, LIU J H, OUYANG H J, et al. Anti-loosening performance of coatings on fasteners subjected to dynamic shear load[J]. Friction, 2018, 6(1): 32-46.
- [15] LIU J H, OUYANG H J, PENG J F, et al. Experimental and numerical studies of bolted joints subjected to axial excitation[J]. Wear, 2016, 346-347: 66-77.
- [16] LIU J H, OUYANG H J, FENG Z Q, et al. Study on self-loosening of bolted joints excited by dynamic axial load[J]. Tribology international, 2017, 115: 432-451.
- [17] ZHANG Ming-yuan, ZENG Dong-fang, WANG Zhan-qiang. Loosening evaluation of bolted joints modified by fine particle bombardment under transverse cyclic loading[J]. Tribology transactions, 2018, 61(6): 1003-1012.
- [18] 张明远, 鲁连涛, 张远彬, 等. 振动条件下螺纹面磨损对紧固件抗松能力影响[J]. 西南交通大学学报, 2018, 53(3): 596-601.
- ZHANG Ming-yuan, LU Lian-tao, ZHANG Yuan-bin, et al. Effect of thread wear on anti-loosening ability of threaded fastener under vibration[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 53(3): 596-601.
- [19] 薛海峰, 张煜超, 宗艳, 等. 基于微粒子喷丸处理的螺栓防松能力改善研究[J]. 表面技术, 2018, 47(2): 20-24.
- XUE Hai-feng, ZHANG Yu-chao, ZONG Yan, et al. Improvement of anti-loosening performance of bolts treated by fine particle peening[J]. Surface technology, 2018, 47(2): 20-24.
- [20] SANCLEMENTE J A, HESS D P. Parametric study of threaded fastener loosening due to cyclic transverse loads[J]. Engineering failure analysis, 2007, 14(1): 239-249.
- [21] PAI N G, HESS D P. Three-dimensional finite element analysis of threaded fastener loosening due to dynamic shear load[J]. Engineering failure analysis, 2002, 9(4): 383-402.
- [22] PAI N G, HESS D P. Experimental study of loosening of threaded fasteners due to dynamic shear loads[J]. Journal of sound & vibration, 2002, 253(3): 585-602.