

基于梳齿沟槽阵列的集油表面润滑特性

刘成龙^{1,2}, 郭峰¹, 黄柏林¹, 周易¹, 栗心明¹

(1. 青岛理工大学 机械与汽车工程学院, 青岛 266300; 2. 香港城市大学 机械工程系, 香港 999077)

摘要: 对限量供油条件下梳齿沟槽阵列表面的润滑特性及其集油性能进行了研究。利用飞秒激光在摩擦表面制备了梳齿状沟槽阵列, 形成了条状亲油区。采用摩擦力及膜厚测量仪的往复运动模块对该条状自亲油区在限量供油条件下的润滑成膜特性和减摩降磨特性进行了研究。同时, 采用高速摄像机对梳齿沟槽阵列表面油滴的输运特性进行了观察。结果表明, 以梳齿状沟槽阵列为边界的润滑轨道对置于其上的润滑油有明显约束作用, 限制其向润滑轨道之外的铺展。在有限供油条件下, 该类条状自集油表面具有较好的润滑能力、较小的摩擦因数和磨损。相对于普通润滑表面, 集油表面摩擦因数减小了30%左右, 而往复运动行程中心位置最小膜厚增大了20 nm。油滴在梳齿沟槽阵列表面的输运产生明显差异, 朝向润滑轨道的输运距离为远离润滑轨道输运距离的1.5倍。

关键词: 梳齿沟槽; 条状亲油区; 限量供油; 摩擦因数; 油膜厚度

中图分类号: TH117.2

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2020)05-0040-07

Lubrication Characteristics of Oil Replenishment Surface with Comb-tooth-shaped Grooves

LIU Chenglong^{1,2}, GUO Feng¹, HUANG Bolin², ZHOU Yi¹, LI Xinming¹

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266300, China; 2. Department of Mechanical Engineering, City University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China)

Abstract: Lubrication characteristics of surface with comb-tooth-shaped grooves under limited lubricant supply were studied. A comb-tooth-shaped grooves was made by femtosecond laser, and a strip like oleophilic region was formed. Film formation and friction reduction under limited lubricant supply were studied by using reciprocating motion module of friction testing machine and film thickness measuring instrument. And the transportation characteristics of oil droplet on the surface with comb-tooth-shaped grooves were observed by high-speed camera. Test results show that the comb-tooth-shaped surface on both sides has obvious restriction on the oil droplet, which limits the spread of lubricating oil out of the lubricating track. Under limited lubricant supply, the surface with oleophilic strip zone increases film formation and reduces friction coefficient and wear. The geometric gradient of the comb like surface enhances the ability of oil self-replenishment and the oil film thickness of the lubrication track. Compared to the normal lubricating surface, the bearing friction was reduced as 30%, and the lubricating film thickness at the center of reciprocating stroke increased as 20 nm. The transportation of oil droplets on the surface of the comb-tooth-shaped grooves was obviously varied, and the transport distance towards the lubrication track was 1.5 times as that away from the lubrication track.

Keywords: comb-tooth-shaped grooves; strip like oleophilic region; limited lubricant supply; oil replenishment; coefficient of friction; film thickness

收稿日期: 2020-03-23; 修回日期: 2020-07-22

通信作者: 郭峰(1968—), 男(汉), 教授, 博士; 研究方向: 摩擦学及新型润滑技术与理论; E-mail: mefguo@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(51775286, 51875299)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51775286, 51875299)

引用格式: 刘成龙, 郭峰, 黄柏林, 等. 基于梳齿沟槽阵列的集油表面润滑特性[J]. 中国表面工程, 2020, 33(5): 40-46.

LIU C L, GUO F, HUANG B L, et al. Lubrication characteristics of oil replenishment surface with comb-tooth-shaped grooves [J]. China Surface Engineering, 2020, 33(5): 40-46.

0 引言

良好的润滑性能对提高机械系统的承载能力、延长使用寿命极其重要,同时也成为节能和环保的迫切需求^[1-2]。实际工程中,抵抗乏油能力不足会导致额外的机械损伤。例如,发动机的凸轮挺杆机构工作状况复杂恶劣,常常发生润滑油供给不足,导致工作面摩擦磨损严重,从而影响发动机的运行质量^[3]。另一方面,少油量润滑策略避免了过度供油带来的额外搅油温升和污染等问题,得到越来越多的关注。例如,高速主轴系统应用油气润滑或油雾润滑,持续高效地将微油滴供给到润滑点,大大延长了高速主轴轴承的服役寿命^[4]。因此,在限量供油条件下,如何实现摩擦副的高效润滑,成为摩擦学领域关注的热点。

润滑设计的一个关键问题是如何实现润滑油的有效利用,通过不同的策略使润滑剂尽可能停留在润滑点参与润滑,即实现润滑中的自集油增强效应。WEDEVEN等^[5]的光弹流实验证明有限供给的润滑油会因接触区的机械分离作用而逐渐远离润滑点,接触区入口将产生乏油,润滑油膜减薄。而KINGSBURY^[6]、GUANGTEN等^[7]的研究表明,在一定乏油条件下,油膜厚度不会随着速度的提高而无限减小,即存在几十纳米厚的有效润滑油膜。KINGSBURY^[6]指出,这种介于混合润滑与乏油润滑之间的干涸润滑机制是由接触区外润滑剂无法回流导致的。长期工作于干涸润滑状态下的轴承等零部件需要促进润滑剂的横向回流,以保证润滑剂的补充。为防止润滑剂的流失,研究者们提出了众多策略。通过表面织构化,实现润滑副的储油及减摩的研究已经取得了显著进展^[8-10]。DUNN等^[11]设计了具有润湿梯度和粗糙度梯度的表面,研究了该表面对润滑油接触角时空分布的影响,为润滑油的定向分布控制提供了可能手段。ALI等^[12]采用机械强制回流的方式,使润滑轨道两侧的润滑剂参与润滑膜建立。HIRAYAMA等^[13]利用激光加工技术在摩擦副表面进行沟槽设计,增加了润滑油的供给,但机理尚不明晰。Li等^[14]研究了界面张力梯度作用下,弹流接触区周围油池分布的调控

以及对膜厚的影响。Liu等^[15]通过设计不同的条状亲油轨道,研究了润滑滚道宽度等因素对其减摩性能的影响。臧淑燕等^[16]发现适当的表面改性可形成反润湿表面,限量供油时,润滑剂在改性表面形成微小润滑油滴供油状态,改性表面比普通表面能够形成更厚的油膜。HOLMBERG等^[17]指出非定型类金刚石薄膜在微量润滑条件下,黏度很低的润滑油甚至水也能起到较好的润滑效果。

研究者大多通过化学/物理等表面修饰方法促进接触区入口润滑油的回流,或者通过织构化表面处理达到在接触区储油的目的,但物理/化学涂层以及织构化表面容易磨损进而失去储油和回油功能。在摩擦过程中,利用接触区两侧织构化表面进行润滑剂自收集的研究尚不多见。因此,文中从限量供油条件出发,通过飞秒加工技术在润滑轨道两侧制备了梳齿状的沟槽阵列,研究了该制备表面对限量润滑剂在接触区入口处的供给、流失的调节作用,以及对限量供油润滑特性的影响。

1 试验准备

1.1 样品制备

选用轴承钢(GCr15)圆盘($\Phi 20\text{ mm} \times 5\text{ mm}$, $Ra=0.015\text{ }\mu\text{m}$)试样,利用飞秒激光(波长 1040 nm ,输出功率大于 8 W ,加工精度为 $0.1\text{ }\mu\text{m}$)在圆盘表面润滑轨道两侧各加工了一列密排的三角梳齿状沟槽(Comb-tooth-shaped groove)织构,记此表面为CSC表面,如图1所示。

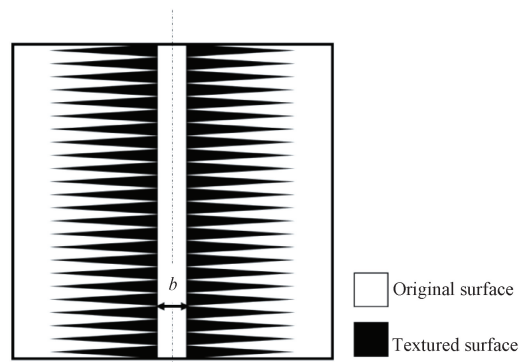


图1 两侧有梳齿状沟槽的润滑轨道

Fig. 1 Lubrication track bounded by comb-tooth-shaped grooves

利用白光干涉仪对加工的梳齿状微沟槽进行测量,如图 2 所示,沟槽深度沿齿的方向由齿根到齿尖递减,沟槽在齿根处的深度约为 $2.5\text{ }\mu\text{m}$,齿根槽的宽度为 $150\text{ }\mu\text{m}$,齿的长度为 $1000\text{ }\mu\text{m}$ 。

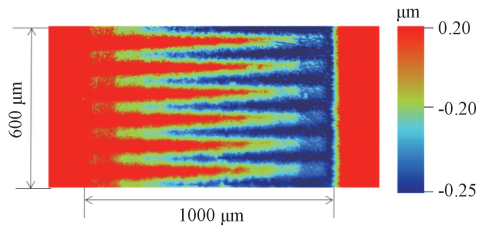


图 2 梳齿状沟槽的形貌图
Fig. 2 Surface topography of comb-tooth grooves

试验中用到 3 种润滑轨道宽度 b 分别为 0.5 、 1.0 和 2.0 mm ,对应的 3 种样品表面记为 CSC-0.5、CSC-1.0、CSC-2.0。另外,在表面镀有铬 (20 nm) 和氧化铝 (200 nm) 双层膜系统的玻璃试样表面加工同样的微织构表面,并利用光弹流试验机的往复运动模块测试其润滑成膜效果。

润滑油在轴承钢表面呈现为亲油的铺展状态,表 1 为试验所用润滑油 PAO4 的相关特性和在不同表面的润湿性。 $CA_{\perp}$ 为油滴在垂直于润滑轨道的方向的接触角, $CA_{\parallel}$ 为油滴在平行于润滑轨道的方向的接触角。

表 1 试验用润滑油 PAO4 的特性及其表面润湿性
Table 1 Property of lubricant PAO4 and wettability on surface in experiment

Viscosity ($\text{mPa}\cdot\text{s}@22\text{ }^{\circ}\text{C}$)		CA (CSC-0.5)	CA (Steel)
30	$CA_{\perp}$	30°	$<10^{\circ}$
30	$CA_{\parallel}$	15°	$<10^{\circ}$

1.2 表征与分析

为表征制备的 CSC 表面对润滑油的约束能力,将 $0.2\text{ }\mu\text{L}$ 的 PAO4 润滑油滴置于普通表面和 CSC 表面,观察其铺展行为。结果表明,轴承钢原始表面呈现为亲油的铺展状态,而在 CSC 样品表面,润滑轨道两侧的梳齿形凹槽织构能有效地阻止润滑油脱离润滑轨道的侧向流动,因此 CSC 表面有较好的自集油功能。图 3 给出了测量实例。

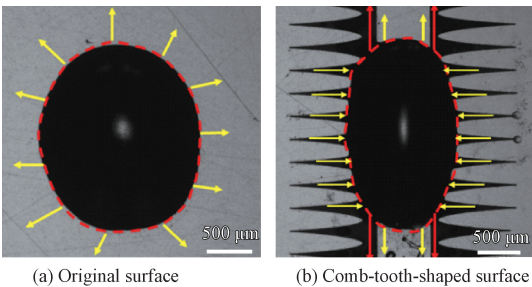


图 3 油滴在普通表面和梳齿状集油表面的铺展
Fig. 3 Oil droplet spread of normal surface and comb-tooth-shaped surface

轴承钢原始表面油滴铺展如图 3 (a) 所示,润滑油滴的铺展不受任何约束,油滴快速扩展成圆形油池。而在 CSC 表面,当润滑油滴在润滑轨道中央时,在梳齿状微槽表面受到非平衡力作用,润滑油沿梳齿顶部方向的铺展流动受阻,润滑油最终表现为沿着润滑轨道的方向铺展,如图 3(b) 所示。由图 2 可知,位于两侧的梳齿状沟槽织构在靠近润滑轨道处具有较大的槽深和槽宽,对润滑剂的流动有较强的毛细作用。梳齿状沟槽织构有效促进了润滑过程中的自集油作用。

使用实验室自制的光弹流试验机往复运动模块,对带有梳齿形织构 CSC-0.5 的玻璃盘和普通玻璃盘进行膜厚测量,观察梳齿形表面对润滑油池及膜厚的影响。实验时,驱动玻璃盘做行程 10 mm 的往复运动,玻璃盘带动钢球滚动,利用双色光强调制技术^[18]对膜厚进行精确测量(测量精度为 8 nm),并观察自集油轨道的自集油效果。图 4 为玻璃盘上织构示意图,玻璃盘直径为 150 mm ,织构制备在润滑轨道两侧,润滑轨道半径为 60 mm ,实验用钢球直径为 25.4 mm , $Ra = 0.015\text{ }\mu\text{m}$ 。实验前,调整钢球位置,保证钢球在往复运动过程中位于润滑轨道中心线($R = 60\text{ mm}$),并保证润滑剂始终位于轨道中心,实验开始前的油滴分布如图 4 所示。

采用摩擦磨损试验机 UMT-III 的往复运动模块测量 CSC 面与普通表面的摩擦因数,保持钢球($d = 6\text{ mm}$, $Ra = 0.015\text{ }\mu\text{m}$)静止,钢球与轴承钢圆盘试样对磨。钢盘做行程 6 mm 的往复运动,图 5 为摩擦磨损实验开始前钢球和油池相对位置的示意图。

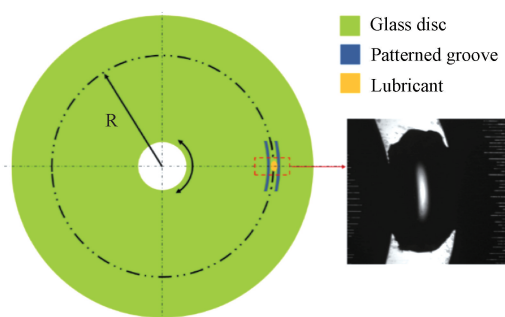


图4 玻璃盘表面梳齿沟槽阵列分布和润滑油收集示意图 (CSC-0.5, $b=0.5$ mm)

Fig. 4 Comb-tooth-shaped groove texture on disc surface and lubricant pinning (CSC-0.5, $b=0.5$ mm)

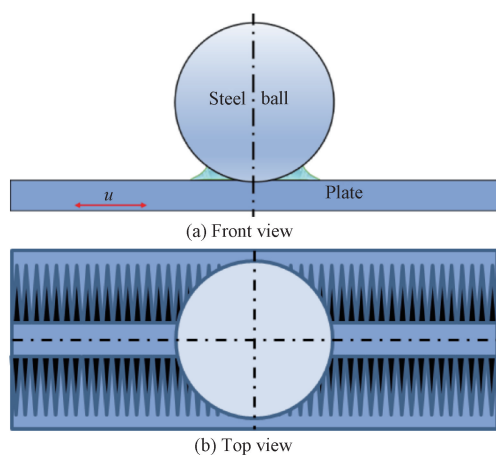


图5 钢球与圆盘试样相对位置示意图

Fig. 5 Set up of relative location of steel ball and steel block

2 试验结果与讨论

2.1 润滑特性测量

利用光弹流实验机的往复运动模块测量润滑膜厚,润滑油用量为 $0.1 \mu\text{L}$,载荷为 30 N ,往复频率为 4 Hz ,往复行程为 10 mm ,样品为 CSC-0.5 (亲油区宽度为 0.5 mm),记录整个行程过程中的膜厚干涉图和油池形貌。图 6 (a) 为润滑油在不同表面的行程中点形成的油池,可以看出,相对于普通表面,CSC-0.5 表面在入口区的供油充分,受到两侧梳齿状结构影响,限量的润滑油形成了较大的蝶翅形油池。润滑油向润滑轨道内部集中,而入口弯月形油池完整,乏油较轻。普通表面两侧的蝶翅形油池较小,入口油池已经破裂,乏油边界接近接触区,处于严重乏油状态。图 6 (b) 为 PAO4 润滑油在两表面沿着卷吸速度方向在接触

区形成的膜厚曲线,CSC-0.5 表面形成的油膜较普通表面的油膜高出 20 nm 左右,该结果得益于两侧微沟槽的储油功能以及其对入口供油的改善。

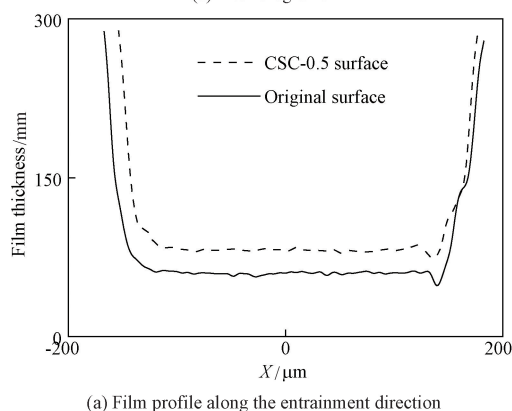
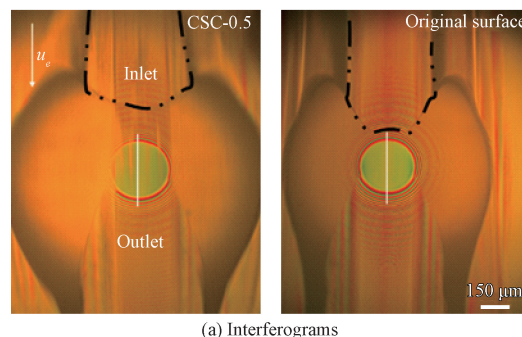


图6 行程中心位置处光干涉图和膜厚结果 (CSC-0.5, PAO 4, $0.1 \mu\text{L}$, 4 Hz , 30 N)

Fig. 6 Interferograms and film thickness at the middle of a stroke (CSC-0.5, PAO 4, $0.1 \mu\text{L}$, 4 Hz , 30 N)

球-盘接触往复运动稳定后,测量一个周期不同位置的最小膜厚。如图 7 所示,对于普通表面,接触副在冲程中点能形成较大膜厚,该位置具有较高的卷吸速度;而在冲程的两个末端,速度瞬态变化剧烈,接触区容易出现干涸乏油状态,膜厚仅仅维持在几个纳米。相同工况条件下,CSC 表面

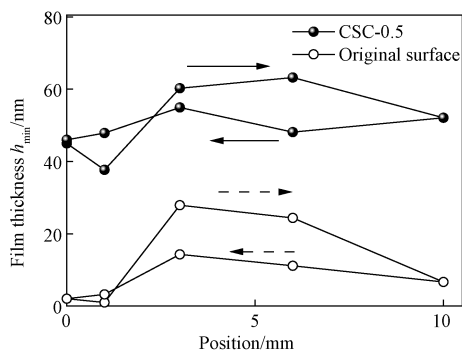


图7 不同位置膜厚结果

Fig. 7 Film thickness of different points of a stroke

能够形成有效的润滑油膜,润滑状态得到改善,膜厚大于普通表面。图 6、图 7 的结果说明,两侧梳齿状织构的集油增强效果对润滑有促进作用,润滑油膜的维持得益于润滑油的自收集效果。

2.2 摩擦特性测量润滑轨道集油机理

采用 UMT-III 的往复运动模块测试 CSC 表面的摩擦因数(COF),限量供给 PAO4 润滑油,供油量为 $0.5\ \mu\text{L}$,往复频率为 2 Hz、4 Hz,往复行程为 6 mm,载荷为 1 N,钢球直径为 6 mm,测试时长 1 h。图 8 (a) 的试验结果显示 CSC 表面有更小的摩擦因数,而未处理的表面摩擦因数较大,两表面的摩擦因数差别明显;2 Hz 条件下,普

通表面的平均摩擦因数为 0.02,比 CSC-1.0 表面在稳定阶段(2700~3 600 s)的摩擦因数要小 30%左右。图 8 (b) 为 4 Hz 条件下摩擦因数的测量结果,随着测试进行,普通表面摩擦因数逐渐增大,CSC-1.0 表面表现出良好的减摩效果,摩擦因数较小;CSC-0.5 表面摩擦因数维持稳定或者略有减小;CSC-2.0 表面的摩擦因数接近普通表面的摩擦因数。图 8 的结果表明,CSC 表面可以有效减小摩擦因数,在相同供油量条件下,中心轨道宽度对润滑影响较大(CSC-0.5 的摩擦因数大于 CSC-1.0 的摩擦因数)。这是由于 CSC-0.5 的中心轨道宽度小,部分润滑油容易因钢球的机械分离作用突破两侧沟槽织构的约束,分布到沟槽之外,能够回流到润滑轨道参与润滑的供油量减小,加剧润滑接触区的乏油,摩擦因数增大。由图 8 (b) 可见,亲油轨道宽度为 2 mm 时,摩擦因数与普通表面摩擦因数接近,该 CSC 表面的集油效果较差,说明 CSC 表面润滑轨道宽度过大对提高限量润滑油的集油效果减弱。图 8 (c) 的磨损结果显示 CSC 表面能够显著降低摩擦副表面的磨损,即润滑滚道的磨损深度和磨损宽度减小,润滑油膜可以有效保护表面,减少磨损,而两侧梳齿状织构的自集油作用增大了接触区入口供油量,有效维持了润滑膜厚。

2.3 润滑轨道集油机理

如前所述,在限量供油条件下,接触区润滑油的供给来自两个机制的竞争:润滑轨道的自集油(replenishment)与接触区对润滑油的机械分离,其中,自集油作用的增强对润滑和减摩的影响显著。1.2 节的试验表明,梳齿状沟槽对润滑油的迁移铺展起到引导作用,该作用来源于梳齿沟槽对其中润滑油施加毛细力的不平衡。

基于 WASHBURN^[19] 提出的模型,研究人员对微尺度沟槽毛细力驱动的流体流动进行了广泛的实验和理论研究^[20-21],结果显示影响此运动的因素包括沟槽的几何参数、流体的表面张力、流体对沟槽表面的接触角/润湿性及液体的黏度等。图 2 所示的梳齿状沟槽可近似看成 V 形开口槽,临近齿根的沟槽深度较大($2.5\ \mu\text{m}$),沿齿尖方向沟槽深度变浅。由齿根(齿底)到齿尖槽的宽度由 $150\ \mu\text{m}$ 变为 0。

润滑剂在沟槽中受到毛细力驱动的输运^[21]

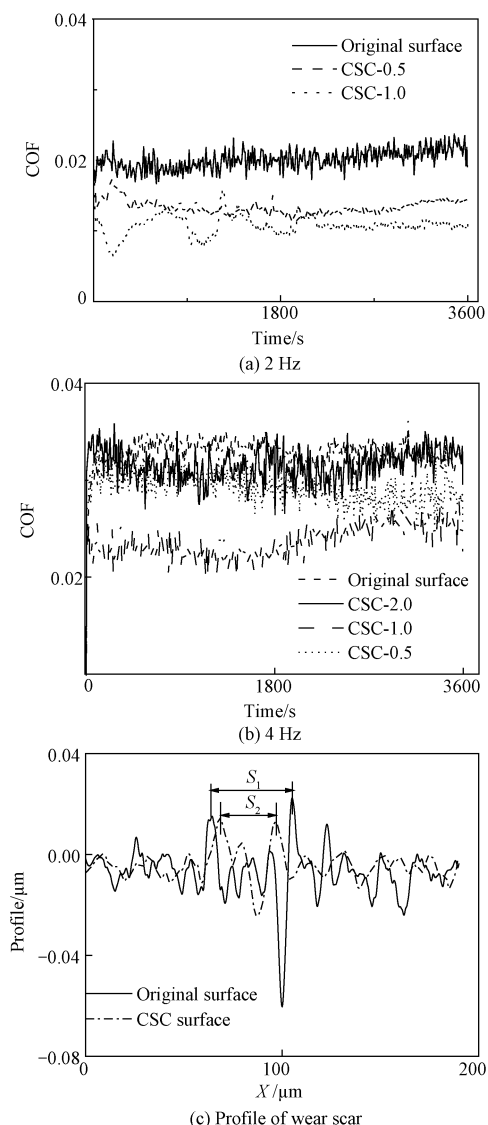


图 8 摩擦因数随时间变化曲线以及磨损状况 (CSC-0.5, $d=6\ \text{mm}$, 1 N)

Fig. 8 Curves of COF with time and wear scar (CSC-0.5, $d=6\ \text{mm}$, 1 N)

可由 Washburn 公式描述:

$$S_y^2 = \gamma h_y t f(\alpha, \theta) / \eta \quad (1)$$

式中: γ 表示润滑剂的表面张力系数; h_y 表示沟槽的深度; t 表示时间; $f(\alpha, \theta)$ 表示沟槽的几何形貌参数, 对于 V 形槽, $f(\alpha, \theta)$ 与沟槽侧面倾角 α 和接触角 θ 有关, 为一常数; η 表示润滑剂的黏度。由公式(1)可知, V 形槽的深度越大, 润滑油的毛细力越大, 也就是说, 对文中的梳齿型沟槽, 润滑油充满时, 齿根处提供的润滑油流动毛细力大于齿尖处的。因此, 梳齿型沟槽会引导其中的润滑油向齿根处流动。

与传统的 Washburn 模型不同, 该梳齿形沟槽系统不仅包括槽内液体, 还包括槽外液体, 但梳齿型沟槽表面润滑油的铺展受沟槽内毛细力的控制。图 9 展示油滴在结构化表面的输运情况。

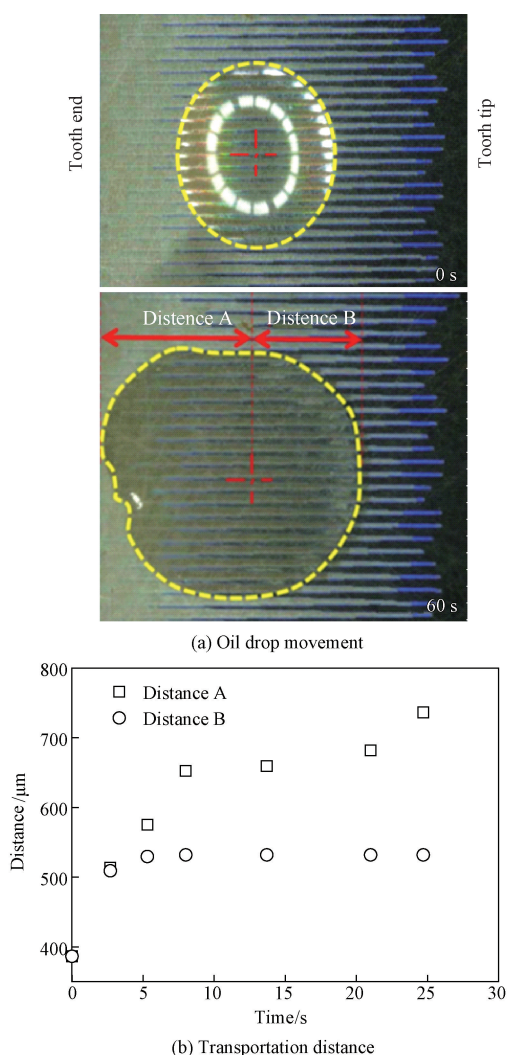


图9 油滴在结构化表面的输运

Fig. 9 Movement of oil droplet on the patterned surface

为了进一步验证此推断, 将 $0.5 \mu\text{L}$ 的润滑油 PAO 4 置于梳齿状织构表面, 观察其铺展状况。如图 9 (a) 所示, 润滑油主要向靠近润滑轨道的齿根部位流动; 油滴的三相接触线的扩展距离如图 9 (b) 所示, 表明该梳齿状织构表面对油滴的输运具有导向性。

综上所述, 通过飞秒激光加工得到的梳齿状织构表面可以有效驱动油滴回流, 并起到存储润滑油的作用, 为改善限量供油条件下的供油提供帮助。进一步研究该技术对润滑的减摩作用, 将有助于凸轮挺柱和齿轮轴承等机构的减摩设计, 延长服役寿命。

3 结 论

(1) 借助飞秒激光加工技术制备了一种具有润滑轨道自集油能力的 CSC 表面, 该类表面对油膜润滑具有增强作用。

(2) CSC 表面可有效约束润滑油在垂直润滑轨道方向的铺展, 提高润滑表面的自集油能力。

(3) 在限量供油条件下, 与普通表面相比, CSC 条状亲油表面在混合润滑区域表现出较好的减摩效应。条状亲油表面的减摩效应与条状亲油区的宽度及油量的大小相关。

(4) 光弹流油膜测量证明了条状亲油表面的自集油增强功能。

参考文献

- [1] 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
WEN S Z, HUANG P. Principle of tribology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012 (in Chinese).
- [2] BARTZ W J. Ecotribology, environmentally acceptable tribological practices[J]. Tribology International, 2006, 39(8): 728-733.
- [3] HOLMBERG K, ANDERSSON P, ERDEMIR A. Global energy consumption due to friction in passenger cars[J]. Tribology International, 2012, 47: 221-234.
- [4] JIANG S Y, MAO H B. Investigation of the high speed rolling bearing temperature rise with oil-air lubrication[J]. Journal of Tribology, 2011, 133(2): 021101.
- [5] WEDEVEN L D, EVANS D, CAMERON A. Optical analysis of ball bearing starvation[J]. Journal of Lubrication Technology, 1971, 93(3): 349-361.
- [6] KINGSBURY E. Parched elastohydrodynamic lubrication[J]. Journal of tribology, 1985, 107(2): 229-232.
- [7] GUANGTENG G, CANN P M, SPIKES H A. A study of

- parched lubrication[J]. *Wear*, 1992, 153(1): 91–105.
- [8] XU Y, ZHENG Q, ABUFLAHA R, et al. Influence of dimple shape on tribofilm formation and tribological properties of textured surfaces under full and starved lubrication[J]. *Tribology International*, 2019, 136: 267–275.
- [9] PIMENOV S M, JAEGGI B, NEUENSCHWANDER B, et al. Femtosecond laser surface texturing of diamond-like nanocomposite films to improve tribological properties in lubricated sliding[J]. *Diamond and Related Materials*, 2019, 93: 42–49.
- [10] 柏林清, 白少先, 彭旭东, 等. 倾斜微孔端面气体密封的动压特性研究[J]. *摩擦学学报*, 2011, 31(2): 97–103.
- BAI L Q, BAI S X, PENG X D, et al. Hydrodynamic performance of inclination-dimpled face gas seal[J]. *Tribology*, 2011, 31(2): 97–103 (in Chinese).
- [11] DUNN A, WASLEY T J, LI J, et al. Laser textured surface gradients[J]. *Applied Surface Science*, 2016, 371: 583–589.
- [12] ALI F, KŘUPKA I, HARTL M. Enhancing the parameters of starved EHL point conjunctions by artificially induced replenishment[J]. *Tribology International*, 2013, 66: 134–142.
- [13] HIRAYAMA T, IKEDA M, SUZUKI T, et al. Effect of nanotexturing on increase in elastohydrodynamic lubrication oil film thickness[J]. *Journal of Tribology*, 2014, 136(3): 031501.
- [14] LI X M, GUO F, WONG P L, et al. Regulation of lubricant supply by wettability gradient in rolling EHL contacts[J]. *Tribology International*, 2018, 120: 565–574.
- [15] 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.
- [16] 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 S Y, GUO F, LI C. Influence of Surface wettability on lubrication by limited lubricant supply[J]. *Tribology*, 2017, 37(4): 429–434 (in Chinese).
- [17] HOLMBERG K, RONKAINEN H, MATTHEWS A. Tribology of thin coatings[J]. *Ceramics International*, 2000, 26(7): 787–795.
- [18] 刘海超, 郭峰, 赵国磊. 润滑膜厚测量的双色光干涉强度调制方法[J]. *摩擦学学报*, 2015, 35(3): 282–287.
- LIU H C, GUO F, ZHAO G L. A dichromatic interference intensity modulation approach to lubricating film thickness measurement[J]. *Tribology*, 2015, 35(3): 282–287 (in Chinese).
- [19] WASHBURN E W. The dynamics of capillary flow[J]. *Physical review*, 1921, 17(3): 273.
- [20] RYE R R, MANN J A, YOST F G. The flow of liquids in surface grooves[J]. *Langmuir*, 1996, 12(2): 555–565.
- [21] ROSENKRANZ A, GRUETZMACHER P G, SZUDAK A, et al. Synergetic effect of laser patterning and micro coining for controlled lubricant propagation[J]. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 2016, 4: 034008.