

DOI: 10.16078/j.tribology.2018072

不同润滑状态下表面润湿性的 摩擦学特性研究

王权岱*, 李志龙, 郭兵兵, 蔡兴兴, 李鹏阳*, 李言
(西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 本文中以锡青铜为基底, 采用纳秒紫外激光制备了具有微观粗糙结构的超疏水表面和亲水表面, 利用扫描电子显微镜和接触角测量仪对所制备的微观结构和表面润湿性进行了表征, 并通过XPS测试对所制备的样片表面润湿性转变的机理进行了分析, 通过UMT-2型摩擦磨损试验机测试了在边界润滑及流体动压润滑状态下的摩擦系数, 研究表面润湿性对摩擦学特性的影响. 研究表明: 材料表面润湿性在不同润滑状态下对摩擦学特性有显著的影响; 在边界润滑状态下, 亲水表面的摩擦学特性优于疏水表面, 平均摩擦系数相对减少6.79%; 在流体动压润滑状态下, 疏水表面的摩擦学特性优于亲水表面, 摩擦系数相对减少了10%.

关键词: 润湿性; 锡青铜; 纳秒激光; 超疏水; 摩擦学特性; 润滑状态
中图分类号: TH117.1

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2018)06-0665-08

Tribological Properties of Surface Wettability under Different Lubrication Regimes

WANG Quandai*, LI Zhilong, GUO Bingbing, CAI Xingxing, LI Pengyang*, LI Yan

(School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology,
Shaanxi Xi'an 710048, China)

Abstract: In this study, the superhydrophobic surface and hydrophilic surface with micro-rough structure were prepared by using nanosecond ultraviolet laser with tin-bronze as substrate. The microstructure and surface wettability were characterized by scanning electron microscope and contact angle measuring instrument. The mechanism of variation of surface wettability of the prepared sample was analyzed by X-ray phototelectron spectrometer. The influence of the surface wettability on tribological properties under boundary and hydrodynamic lubrication regimes were investigated by measuring the friction coefficients on a UMT-2 friction and wear tester. The results show that the wettability of the material surface had a significant effect on the tribological properties under different lubrication regimes. Under boundary lubrication, the tribological properties of the hydrophilic surface were better than those of the hydrophobic surface, and the average coefficient of friction was reduced by 6.79%. Under hydrodynamic lubrication, the tribological properties of the hydrophobic surface were better than those of the hydrophilic surface, and the average coefficient of friction was reduced by 10%.

Key words: wettability; tin-bronze; nanosecond laser; superhydrophobic; tribological property; lubrication state

润湿特性是固体表面的重要性质之一, 润湿性主要与固体表面自由能和表面微观几何结构两个因素有关, 具有特殊润湿性的表面在流动减阻、微流体输

运、粘附性能调控和防腐蚀等众多领域都有着广泛的应用前景^[1-3]. 润湿性影响流体在固体表面的浸润性以及固液界面的滑移特性, 因而对流体流动系统的润滑

Received 30 June 2018, revised 18 August 2018, accepted 26 September 2018, available online 28 November 2018.

*Corresponding author. E-mail: quandaiw@163.com, lipengyang@xaut.edu.cn, Tel: +86-13201720973, 13992866355.

The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (51775431, 51675422 and 51375381).

国家自然科学基金项目(51775431, 51675422和51375381)资助.

性质和润滑失效具有重要影响^[4-5]。

目前在润湿性影响流体流动系统的润滑性质的研究,主要集中在利用非润湿表面的流体滑移效应减小流体阻力方面^[6-10]。然而,近年来,随着试验手段的进步,润湿性对摩擦润滑特性的影响引起了摩擦学研究人员的重视。周峰等^[11]认为,虽然润湿与润滑分别属于不同的研究范畴,但是两者之间又存在必然因果关系,对于固-固接触摩擦为润而滑,而对于固-液接触摩擦为润而黏、去润而滑。通过测量薄膜润滑状态下具有不同润湿性样片表面的润滑膜厚,Luo等^[12]认为,润湿性对摩擦润滑性能的影响机理可以从表面能的角度进行解释:表面能越大,则有更多的润滑流体分子被London力吸附到表面并在力场的作用下形成有序膜,因而润滑膜越厚。Leong等^[13]研究了多烷基环戊烷与全氟聚醚(PFPE)对硅材料摩擦副的润滑效果,表明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。连峰等^[14]研究了双硫铝合金表面的摩擦学性能,得到了水润滑状态下表面疏水性使摩擦系数减小的结论。臧淑燕等^[15]研究了固液界面亲和性对限量供油润滑的影响,认为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,表面能较低的盘面产生较高的膜厚。Bongaert等^[16]用本征疏水的PDMS材料作为接触面研究了特殊润湿表面的摩擦特性,结果表明:在流体动压润滑状态下表面润湿性对摩擦系数没有影响,但是在边界润滑状态下疏水性使摩擦系数显著增大,然而需要指出的是,该研究中所采用的柔顺接触面与高杨氏模量的金属摩擦副有较大差别。表面润湿性既影响润滑流体的在接触界面的形态^[17-18],又影响固液界面滑移效应^[19-20],构筑特殊润湿表面所要求的微观粗糙组织还会影响润滑流体流动动力学行为^[21-22]。由于润湿性影响摩擦润滑特性的复杂性,究竟如何设计构造表面润湿性以改善特定工况下系统的摩擦润滑性能,目前的研究并未形成统一的结论,其原因是根据文献^[11]的理论,在不同润滑状态下润湿性对润滑特性的影响是不同的,而目前的研究结论并未分不同工况进行系统研究,试验研究不充分的原因之一是制备满足试验研究要求的具有足够表面机械稳定性和耐磨性超疏水表面在工艺上存在困难。

为此,本文作者在锡青铜基底本体通过纳秒激光加工改变金属表面形貌及化学特性,直接制备出超疏水金属表面,由于不需要任何化学涂层,疏水层机械稳定性较好。对所制备的表面微观结构和疏水性进行

了表征,并通过XPS测试分析了润湿性转变的机理。在此基础上,通过摩擦磨损试验机测量了具有不同表面润湿性的样片在边界润滑状态和流动动压润滑状态下的摩擦系数,并对不同润滑状态下摩擦润滑特性随润湿性变化的机理进行了分析。论文旨在通过具有机械稳定性的超疏水表面的制备及其影响润滑特性的试验研究,为不同润滑状态下润湿性影响润滑特性的理论提供直接的试验证据,为不同工况下摩擦副表面润湿性的设计构造提供依据。

1 试验部分

1.1 试验材料及试样制备

试验中所用到的材料为QSn6.5-0.1的锡青铜,其化学组成成分如表1所示。同时纯铜(99.7%)也用作基底材料以便与锡青铜作对比。适应测试表征仪器设备对试验样片尺寸的要求,扫描电子显微镜和XPS测量中矩形样片尺寸均为10 mm×10 mm×3 mm,UMT-2型摩擦磨损试验机测试中圆形样片直径69.85 mm、厚度6.60 mm。

表1 锡青铜材料组成成分(%)
Table 1 Tin bronze composition(%)

Cu	Sn	P	Pb	Al
Remaining	6~7	0.1~0.25	≤0.02	≤0.002
Fe	Si	Sb	Bi	Impurities
≤0.05	≤0.002	≤0.002	≤0.002	≤0.1

试样制备工艺流程如图1所示,包括如下步骤:(1)基底表面抛光处理:经过600目、1 000目普通砂纸粗抛光和金相砂纸研磨后,表面粗糙度 R_a 不大于0.076 μm (TIME3200粗糙度仪测量);(2)抛光后样片的清洗:利用超声波清洗机在无水乙醇溶液中超声清洗10 min并用去离子水冲洗30 s,对清洗后的样片表面经过 N_2 吹干,将样品置于烘干台上在70 $^\circ\text{C}$ 下烘干(10 min);(3)纳秒紫外激光加工表面微结构:激光最大平均功率7 W,激光波长355 nm,激光光束质量 $M^2 < 1.3$,激光斑点直

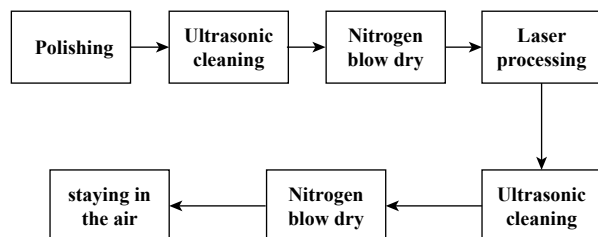


Fig. 1 Sample surface laser texture process

图1 样片表面激光织构化工艺流程图

径 $50\ \mu\text{m}$,激光脉宽小于 $25\ \text{ns}$,激光扫描速度 $400\ \text{mm/s}$,扫描线间距 $d=50\ \mu\text{m}$,激光重复率 $20\ \text{kHz}$,激光能量密度 $5.61\ \text{J/cm}^2$; (4)后处理:将激光微织构化的样片在无水乙醇中超声清洗 $8\ \text{min}$,清除激光处理过程中烧蚀后迸溅到样品表面的微细颗粒物,采用步骤(2)同样的处理方式,将样品进行烘干处理;(5)表面润湿性演化:将样片放置到通风干燥的空气环境中静置 $12\ \text{d}$ 以上,样片由最初的超亲水转变为超疏水。

1.2 表面微观结构及疏水性表征

采用冷场发射扫描电子显微镜(Hitachi SU8010, 日本)对激光织构化的样片进行表面微观结构的表征.利用接触角测量仪(JC2000D4, 国产)测量记录激光加工后的表面接触角随时间的变化.测量接触角所用去离子水量为 $3\ \mu\text{L}$,每个样品表面均取3个不同测量区域,所得测量结果均为3次测量接触角的平均值,接触角测量方法及典型接触角测量结果如图2所示.为了分析激光织构化表面润湿性随时间变化的机理,采用电子/俄歇能谱仪(AXISULTRA, Kratos, 英国)对样品表面不同阶段的化学成分进行测量分析。

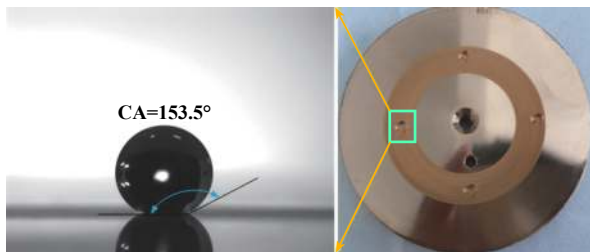


Fig. 2 Contact angle measurement

图2 接触角测量方法及结果

1.3 不同润湿性试样的摩擦学性能试验

纳秒紫外激光刚加工后的样片表现出超亲水性,而放置于空气中 $14\ \text{d}$ 后的样片显示出超疏水.利用UMT-2型摩擦磨损试验机旋转模块,采用销对盘形

式,以去离子水作为润滑液,在室温环境下模拟边界润滑状态和流体动压润滑状态,分别在两种润滑状态下测试超疏水样片和亲水样片的摩擦系数,研究润湿性对不同润滑状态下摩擦特性的影响规律.需要说明的是,尽管本研究制备的疏水表面不需要疏水涂层,从而使疏水表面耐磨性提高,但是试验发现如果试验时间太长,过度的磨损仍然会破坏表面疏水性从而使试验结果重复性变差.因此,首先试验确定不同润滑状态对应的转速,然后分别在边界润滑和流体动压润滑状态下进行试验,以缩短试验中疏水层的磨损时间。

上试件采用直径为 $5\ \text{mm}$ 的416不锈钢,下试件为锡青铜QSn6.5-0.1盘样片,超疏水结构制备于下试件表面半径为 $15\sim 21\ \text{mm}$ 环形范围内.设置四组试验,每组试验中摩擦圆半径均设置为 $18\ \text{mm}$,载荷设置为 $1\ \text{N}$,每秒采集100个数据.第一组为亲水表面,转速设置为 $50, 100, 200, 400, 600, 800, 1\ 000, 1\ 200, 1\ 400, 1\ 600, 1\ 800$ 和 $2\ 000\ \text{r/min}$,对应线速度分别为 $0.094, 0.188, 0.377, 0.755, 1.130, 1.507, 1.884, 2.261, 2.638, 3.014, 3.391$ 和 $3.768\ \text{m/s}$,每种转速下持续时间为 $120\ \text{s}$,目的是通过转速的梯次设置,找到Stribeck曲线中润滑状态的转折点,从而区分三种润滑状态对应的转速.第二组为超疏水表面,转速设置为 $50, 100, 200, 400$ 和 $600\ \text{r/min}$,转速范围覆盖从边界润滑状态到混合润滑状态.第三组为亲水表面,转速设置为 $1\ 400\ \text{r/min}$,持续时间为 $360\ \text{s}$,此转速下处于流体动压润滑状态.第四组为超疏水表面,转速设置为 $1\ 400\ \text{r/min}$,持续时间为 $360\ \text{s}$,此转速下也处于流体动压润滑状态。

2 结果与讨论

2.1 表面微观形貌及疏水性

紫外纳秒激光织构化的表面形貌如图3所示.从图3(a)中可观察到明显的激光辐照所产生的规则凹槽

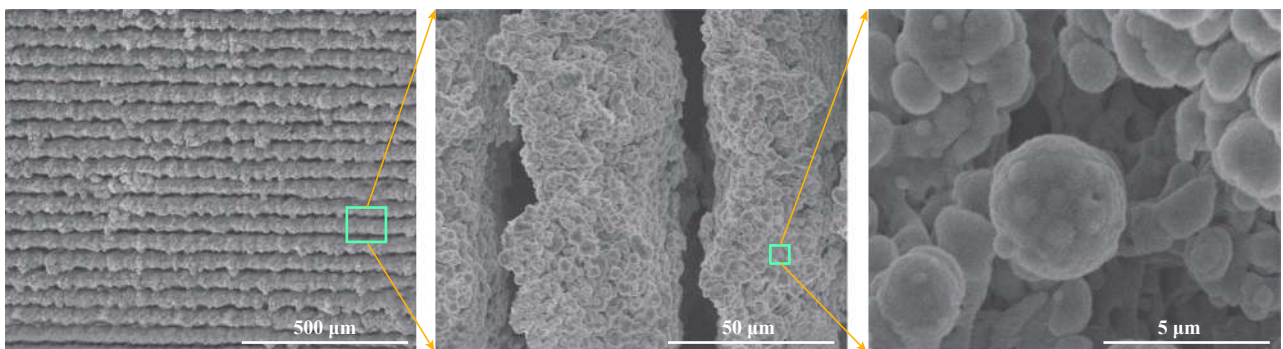


Fig. 3 Surface morphology of laser textured tin-bronze sample

图3 激光织构化的锡青铜样片表面形貌

状结构, 凹槽间距为50 μm , 与激光参数一致; 从图3(b)中可知单个凹槽表面覆盖大量致密的微米级颗粒, 这些微颗粒无序团簇在凹槽上; 从图3(c)中观察到微颗粒周围团簇了大量的纳米级颗粒, 从而构成微纳复合结构。

图4是锡青铜和纯铜样片在激光处理后表面接触角随时间变化趋势。从图4中可以看出, 刚经过激光处理(对应横坐标等于0处)的样片表面接触角均接近于 0° , 即经过激光处理后的样片表面最初表现为超亲水, 而未经过激光加工的基底表面接触角约为 $70^\circ\sim 80^\circ$, 可见激光加工在基底形成的表面微观粗糙结构增强了亲水性, 这与表面润湿性基本理论相符。但是不论是锡青铜还是纯铜基底, 其表面润湿性随时间会发生由亲水到疏水的变化。从锡青铜基底变化趋势可以看出, 接触角在8 d内增长速度很快, 8~12 d内接触角还在增长但是增长速度明显减慢, 12 d之后接触角达到 153° 且较为稳定。作为对比, 相同参数下纯铜表面接触角的演变趋势与锡青铜相同, 即接触角在14 d内呈上升趋势, 但是最终达到的最大稳态接触角只有 122° 。可见, 锡青铜和纯铜基底均能被纳秒激光改性为疏水表面, 但是锡青铜基底表面处理后疏水性更好。

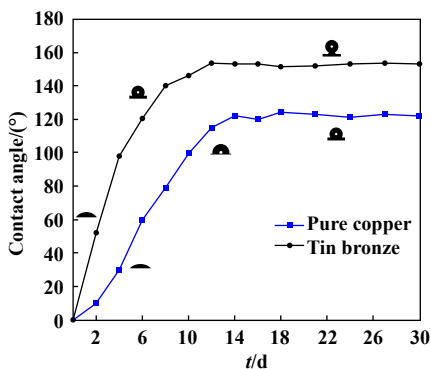


Fig. 4 Contact angle as a function of time
图4 接触角随时间变化趋势

2.2 表面润湿性转变机理分析

在本文研究工作中, 激光刚加工后的表面表现为超亲水。当放置于大气环境中, 激光加工的表面润湿性随着时间而改变。由于表面形貌不会随时间而变化, 所以润湿性的转变应归因于表面化学成分的改变。为了验证并进一步明确表面化学成分如何变化, 利用X射线光电子能谱仪(XPS)分别测试了锡青铜样片基底、激光加工后1 h和放置于空气环境中30 d后的样片。测试中使用单色化Al靶, 分辨率 0.48 eV , 能量校准使

用C1s 284.8 eV。

图5(a)是样片基底全谱图, 分别在Cu2p双峰(932.4 eV的Cu2p_{3/2}峰位和950.6 eV的Cu2p_{1/2}峰位)、531.7 eV(O1s峰位)、284.8 eV(C1s峰位)和131.7 eV(P2p峰位)出现了特征峰, 其中P2p峰来源于样片表面的P相。图5(b)是激光处理后1 h显示出超亲水行为的样片XPS全谱图, 其在Cu2p双峰(934.1 eV的Cu2p_{3/2}峰位和952.5 eV的Cu2p_{1/2}峰位)、531.4 eV(O1s峰位)、284.8 eV(C1s峰位)和133.3 eV(P2p峰位)出现了特征峰。图5(c)是激光处理后放置于空气中30 d后的XPS全谱图, 其中Cu2p双峰(932.4 eV的Cu2p_{3/2}峰位和950.6 eV的Cu2p_{1/2}峰位)、530.8 eV(O1s峰位)、284.8 eV(C1s峰位)和132.9 eV(P2p峰位)出现了特征峰。

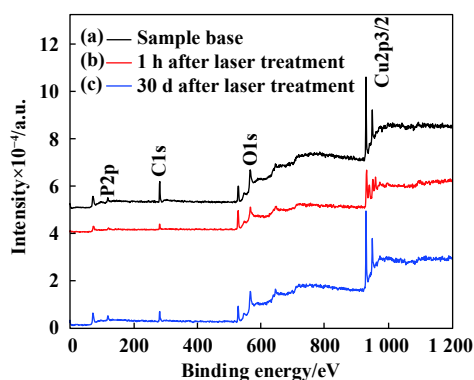


Fig. 5 XPS full spectra of three different processed samples
图5 三种不同处理样片XPS全谱图

表2是对应于图5中三种样片表面元素质量百分比。纵向对比氧元素可以发现, 在激光处理2 h后氧质量分数达到25.20%, 这是由于Cu单质被氧化为CuO ($2\text{Cu} + \text{O}_2 = 2\text{CuO}$)从而使其表面氧含量较基底升高了6.71%; 而放置于空气中30 d后样品表面的氧元素含量下降至19.68%, 本文作者认为脱氧过程($2\text{CuO} = \text{Cu}_2\text{O} + 1/2\text{O}_2$)是由于磷(P)元素的催化作用。相较于热还原法的高能垒过程, 以P元素为脱氧剂则是一种缓慢的不均匀的脱氧过程, 从润湿性随时间变化的过程来看, 也进一步印证了这种缓慢不均匀的脱氧过程, 与纯铜(不含P)对比发现其最终的稳态接触角均大于同参数

表2 样片表面元素质量百分比

Table 2 Elemental mass fraction of sample surface

Sample	Mass fraction/%				
	Cu	O	C	P	Sn
Sample base	41.27	18.49	39.46	0.78	0
1 h after laser treatment	56.74	25.20	14.94	3.11	0
30 d after laser treatment	55.85	19.68	23.97	0.29	0.21

下的纯铜. 另外, 从碳元素含量对比可以发现存放置于空气中 30 d 后碳元素含量从 14.94% 上升到 23.97%, 这与文献 [23] 所得到的结论一致, 因此吸附有机物也是润湿性转变的原因之一.

为进一步了解 Cu 的化学状态, 采集了 Cu2p 的高分辨 XPS 谱图并进行拟合, 如图 6 所示. 激光处理后高润湿性样片在 934.1 eV 的 Cu2p3/2 峰位位置对应的化学状态为 CuO^[24], 因为激光处理过程的局部高温使 Cu 基底发生烧蚀从而被氧化生成 CuO. 激光处理后置于空气中 30 d 后的疏水样片在 932.4 eV 的 Cu2p3/2 峰位位置对应的化学状态为 Cu₂O^[25], 此峰峰位位置可能是 Cu 单质或 Cu₂O, 而结合试验过程可知激光加工后表面被氧化, 因而认为是 Cu₂O 而不是 Cu 单质更合理. 根据 Chang 等^[26]提出的脱氧机理, 本文作者认为 CuO 部分还原成具有良好的疏水性的 Cu₂O (2CuO=Cu₂O+1/2O₂) 以及激光加工后表面粗糙结构对疏水性的放大作用是样片表现出超疏水的原因, 而锡青铜中存在的 P 元素是一种很好的脱氧剂, 有利于促进 CuO 的还原.

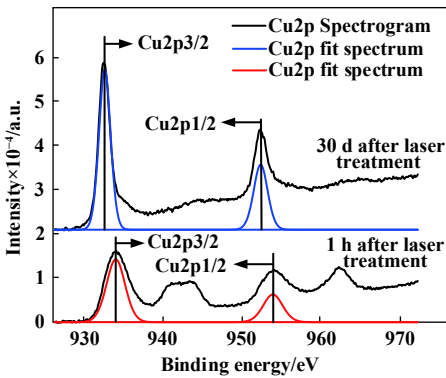


Fig. 6 High-resolution XPS spectra of Cu
图 6 Cu 元素高分辨 XPS 谱图

因此, 通过激光加工的表面结构化锡青铜样片表现的超亲水性是由于激光加工过程中样片表面被氧化成 CuO, 激光加工的表面微观粗糙结构增强了 CuO 的亲水性从而导致表面高润湿性. 激光加工后的样片表面润湿性随时间变化的原因是由于锡青铜中 P 元素的脱氧作用, 使得表面生成的亲水性的 CuO 转变为疏水的 Cu₂O. 另外, 表面对有机物的吸附也是润湿性转变的原因之一.

2.3 在不同润滑状态下润湿性的摩擦特性

2.3.1 边界润滑状态下亲/疏水表面的摩擦特性

采用激光加工后 2 d 表面呈超亲水状态和激光加工后 30 d 呈超疏水状态两种样片, 利用 UMT-2 型摩擦磨损试验机并采用销对盘旋转模块进行试验, 摩擦系数和平均摩擦系数 (每种转速下 12 000 个数据的平均值) 的测量结果如图 7 所示. 根据 Stribeck 理论曲线分析^[27], 图 7 摩擦系数随速度变化趋势符合 Stribeck 曲线, 随着转速从 50 r/min 连续梯次增加至 2 000 r/min, 润滑状态依据摩擦系数变化趋势划分为: 边界润滑 (50~200 r/min); 混合润滑 (200~1 200 r/min); 流体动压润滑 (1 200~2 000 r/min).

图 8 是边界润滑状态下, 采用亲水和激光加工后 30 d 呈超疏水状态两种样片的试验结果. 由于边界润滑状态的持续时间取决于摩擦表面生成的与润滑介质性质相关的润滑膜建立时间, 因此依据 Stribeck 理论曲线, 本文作者认为转速小于 200 r/min 时为边界润滑状态. 从图 8 可知处于边界润滑状态时, 亲水表面的摩擦系数 (0.473 7) 小于疏水表面 (0.508 2), 亲水表面摩擦系数比疏水表面减少了 6.79%.

为了分析边界润滑状态下表面润湿性影响摩擦性能的机理, 通过 VHX-5000 型超景深显微镜采集盘

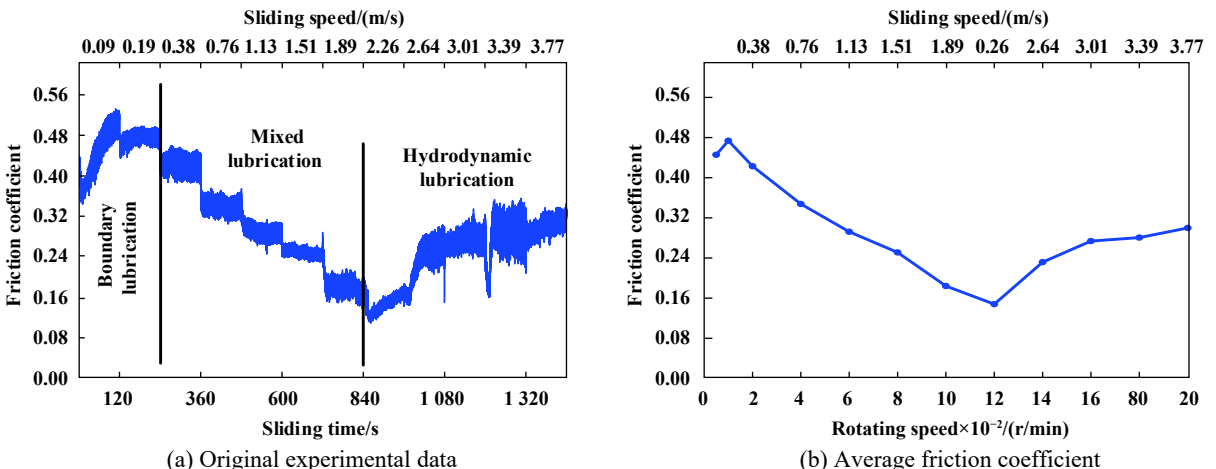


Fig. 7 Friction coefficient of hydrophilic surface with sliding speeds

图 7 亲水表面摩擦系数随转速变化趋势

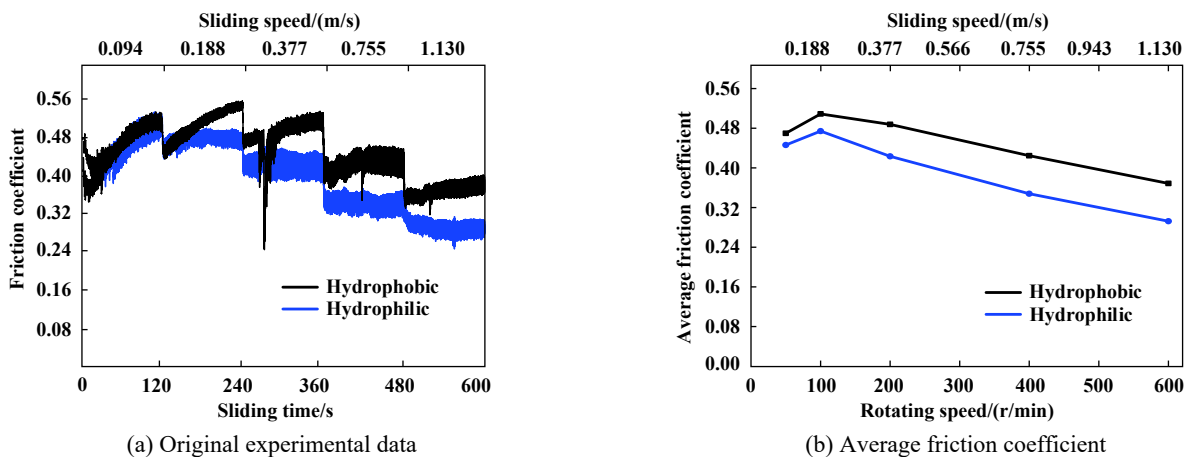


Fig. 8 Friction coefficient with sliding speeds of hydrophilic vs. hydrophobic surface under boundary lubrication

图8 边界润滑状态下亲/疏水表面摩擦系数随速度变化比较

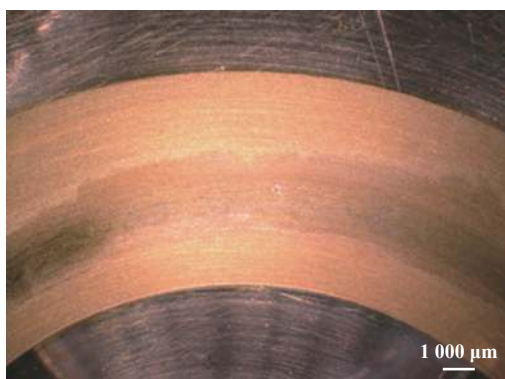
表面测试轨道上作为润滑剂的水滴分布形态,结果如图9所示.可以看到亲水表面和疏水表面存在明显差异,对于亲水表面,润滑轨道上润滑液呈现一层连续的水膜,而在疏水表面润滑液则以大小不一的液滴形态出现.润湿性对摩擦润滑性能的影响机理可以用表面能理论进行解释:亲水表面表面能高,作为润滑液的去离子水被完全吸附在粗糙结构中并在力场的作用下铺展形成润滑膜;而疏水表面因其较低的表面能对润滑液的亲和力较差,在剪切作用下形成离散状分布的大小不一的液滴,表现出润滑膜的连续性和稳定性减弱,由此可以推测,在边界润滑状态下,会造成摩擦副部分接触表面不存在液膜.因此,在边界润滑状态下,疏水表面不利于形成连续完整的润滑膜导致摩擦系数增大.

2.3.2 流体动压润滑状态下亲/疏水表面的摩擦特性

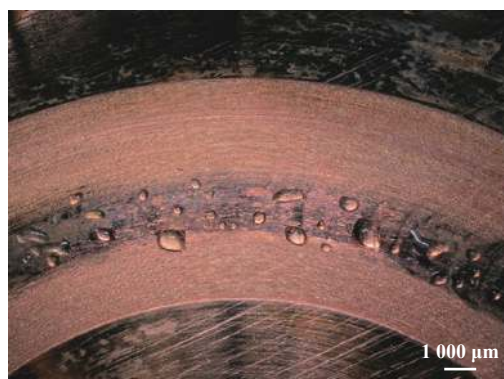
根据图7的试验结果,以1 400 r/min的转速构造流体动压润滑条件,研究摩擦副表面润湿性对流体动压

润滑条件下摩擦特性的影响,结果如图10所示.

从图10中可以看出,当转速瞬间增加至1 400 r/min时,亲/疏水界面摩擦系数均突变至0.5~0.6,摩擦系数突变的原因是由于此时两摩擦表面之间还未形成流体动压润滑膜.当亲/疏水表面测试时间分别在10~30 s和10~50 s时,摩擦系数逐渐趋于稳定在 0.3 ± 0.05 和 0.27 ± 0.05 ,疏水表面比亲水表面摩擦系数相对减少10%,此时两摩擦表面之间形成流体动压水润滑膜.疏水表面相对于亲水表面摩擦系数减小原因,可以由疏水表面滑移理论来解释^[6,19]:疏水表面润湿性差,意味着固液界面相互作用较弱,固体表面分子与液体分子间的吸引力很容易被润滑液流体流动所带来的剪切力平衡掉,从而更容易在固体表面形成速度滑移,固液界面滑移的存在减小了润滑膜厚度方向的速度梯度,从而减小了润滑液流动内摩擦阻力,因而摩擦系数减小.随着测试时间推移,亲/疏水表面摩擦系数均出现大幅上升趋势,此时虽然亲疏水表面摩擦系数



(a) Hydrophilic surface



(b) Hydrophobic surface

Fig. 9 Lubricant distribution on the test track with different wettability of the disc surface

图9 盘表面具有不同润湿性的测试轨道上润滑液分布形态

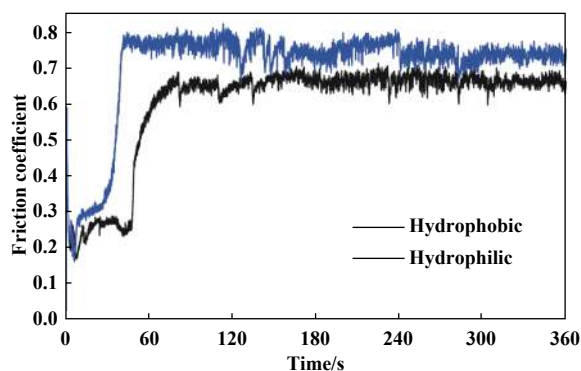


Fig. 10 Experimental results for friction test using samples with different wettability under hydrodynamic lubrication

图10 流体动压润滑条件下具有不同润湿性的表面摩擦性能试验结果

均出现大幅度上升,但是疏水表面摩擦系数仍然小于亲水表面.结合润湿状态转变的相关理论^[18],疏水表面出现这种现象可能的原因是由于产生所谓的“玫瑰花瓣”固液接触状态:一方面,随着润滑流体在足够大压力下的不断冲刷,疏水表面微米级结构间的气液界面遭到破坏,润滑流体填充进了微米级结构中,流体流动受到了微米级粗糙结构的阻力作用,因而摩擦系数显著增大(比一般流体动压润滑状态下的摩擦系数大很多);另一方面,微米结构表面的二级纳米结构间的气液界面仍然存在,即流体在微米结构的谷底和谷峰处仍有局部滑移,因而疏水表面仍然比亲水表面摩擦系数小.此外,从图10可以看出,相对于疏水表面,亲水表面出现转变的时间更短,突变性更显著.对于亲水表面也出现这种现象可能的原因是亲水表面并非理想的亲水表面,因为经过激光处理后微纳复合结构的纳米结构表面也会有少量疏水的 Cu_2O 存在,只是疏水性比处理30 d后的样片要弱得多.因此,测试初始阶段亲水样片表面也会出现短时间的部分Cassie接触状态,但是随着流体动压润滑状态下润滑流体在足够大压力下的不断冲刷,疏水性被破坏,从而出现摩擦系数增大现象.

试验结果表明,流体动压润滑状态下,疏水表面由于流固界面滑移效应,相对于亲水表面摩擦系数减小,然而,构造疏水表面所需要的微观粗糙结构也会影响润滑流体的流动,为了使润滑流体不填充入微观粗糙结构从而增加流体阻力,需要研究制备能够承受试验环境或者使用工况的流体压力的疏水结构.这也正是下一步将要开展的研究,即通过飞秒激光等手段制备纳米粗糙结构的疏水表面,以提高流体压力环境的疏水稳定性,以压力环境下稳定超疏水表面为基

础,研究流体动压润滑状态下,表面润湿性对摩擦性能的影响.

3 结论

a. 激光加工后的锡青铜样片表面润湿性随时间的变化归因于激光加工过程中生成的 CuO 在磷元素的催化脱氧作用下生成了本征疏水的 Cu_2O 以及表面微纳复合粗糙结构对疏水性的增强作用.

b. 边界润滑状态下,疏水表面不利于形成连续完整的润滑薄膜,导致摩擦系数增大,而亲水表面由于较高的表面能易于形成连续完整的润滑膜,使得摩擦系数小于疏水表面.

c. 流体动压润滑状态下,疏水结构的的存在使得固液界面发生滑移,从而导致摩擦系数小于亲水表面,但是流体压力大到足以破坏气液界面时,超疏水表面将不能减阻,反而有可能增大相对运动阻力.

参考文献

- [1] Wang S T, Liu K S, Yao X, et al. Bioinspired surfaces with superwettability: new insight on theory, design, and applications[J]. *Chemical Reviews*, 2015, 115(16): 8230–8293. doi: 10.1021/cr400083y.
- [2] Zhang Y B, Chen Y, Shi L, et al. Recent progress of double-structural and functional materials with special wettability[J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2011, 22(3): 799–815.
- [3] Liu K S, Jiang L. Metallic surfaces with special wettability[J]. *Nanoscale*, 2011, 3(3): 825–838. doi: 10.1039/c0nr00642d.
- [4] Aurelian F, Patrick M, Mohamed H. Wall slip effects in (elasto) hydrodynamic journal bearings[J]. *Tribology International*, 2011, 44(7): 868–877.
- [5] Luo J B, Qian L M, Wen S, et al. The failure of fluid film at nanoscale[J]. *Tribology Transactions*, 1999, 42(4): 912–916. doi: 10.1080/10402009908982301.
- [6] Wu Chengwei, Ma Guojun, Zhou Ping. A review of the study on the boundary slip problems of fluid flow[J]. *Advances in Mechanics*, 2008, 38(3): 265–282 (in Chinese) [吴承伟, 马国军, 周平. 流体流动的边界滑移问题研究进展[J]. *力学进展*, 2008, 38(3): 265–282]. doi: 10.3321/j.issn:1000-0992.2008.03.001.
- [7] Jung Y C, Bhushan B. Biomimetic structures for fluid drag reduction in laminar and turbulent flows[J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2010, 22(3): 035104-1–9.
- [8] Brian R S, Karim S K, Kripa K V. Drag reduction using lubricant-impregnated surfaces in viscous laminar flow[J]. *Langmuir*, 2014, 30(36): 10970–10976. doi: 10.1021/la5021143.
- [9] Srinivasan S, Kleingartner J A, Gilbert J B, et al. Sustainable drag reduction in turbulent Taylor-Couette flows by depositing sprayable superhydrophobic surfaces[J]. *Physical Review Letters*, 2015,

- 114(1): 014501-1-5.
- [10] Dean B, Bhushan B. Shark-skin surfaces for fluid-drag reduction in turbulent flow: a review[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 2010, 368: 4775-4806. doi: [10.1098/rsta.2010.0201](https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0201).
- [11] Zhou Feng, Wu Yang. A novel insight into "Lubrication"[J]. *Tribology*, 2016, 36(1): 132-136 (in Chinese) [周峰, 吴杨. "润滑"之新解[J]. *摩擦学学报*, 2016, 36(1): 132-136]. doi: [10.16078/j.tribology.2016.01.019](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2016.01.019).
- [12] Luo J B, Wen S Z, Sheng X Y, et al. Substrate surface energy effects on a liquid lubricant film at nanometer scale[J]. *Lubrication Science*, 1998, (11): 23-36.
- [13] 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. doi: [10.1007/s11249-013-0112-3](https://doi.org/10.1007/s11249-013-0112-3).
- [14] Lian Feng, Wang Zengyong, Zhang Huichen. Tribological performance of amphiphobic aluminum alloy surface under water/oil lubrication[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(11): 115-120 (in Chinese) [连峰, 王增勇, 张会臣. 双疏铝合金表面的水/油润滑摩擦学性能[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(11): 115-120].
- [15] Zang Shuyan, Guo Feng, Li Chao. Influence of surface wettability on lubrication by limited lubricant supply[J]. *Tribology*, 2017, 37(4): 429-434 (in Chinese) [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]. doi: [10.16078/j.tribology.2017.04.002](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2017.04.002).
- [16] Bongaerts J H H, Fourtouni K, Stokes J R. Soft-tribology: lubrication in a compliant PDMS-PDMS contact[J]. *Tribology International*, 2007, 40(10-12): 1531-1542. doi: [10.1016/j.triboint.2007.01.007](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2007.01.007).
- [17] Smith J D, Dhiman R, Anand S, et al. Droplet mobility on lubricant-impregnated surfaces[J]. *Soft Matter*, 2013, 9(6): 1772-1780. doi: [10.1039/C2SM27032C](https://doi.org/10.1039/C2SM27032C).
- [18] Bhushan B, Nosonovsky M. The rose petal effect and the modes of superhydrophobicity[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 2010, 368: 4713-4728. doi: [10.1098/rsta.2010.0203](https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0203).
- [19] Sochi T. Slip at fluid-solid interface[J]. *Polymer Reviews*, 2011, 51(4): 309-340. doi: [10.1080/15583724.2011.615961](https://doi.org/10.1080/15583724.2011.615961).
- [20] Rothstein J P. Slip on superhydrophobic surfaces[J]. *The Annual Review of Fluid Mechanics*, 2010, 42(1): 89-109. doi: [10.1146/annurev-fluid-121108-145558](https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-121108-145558).
- [21] Park H, Sun G Y, Kim C J. Superhydrophobic turbulent drag reduction as a function of surface grating parameters[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2014, 747(3): 722-734.
- [22] Ma Mingming, Lian Feng, Zang Luping, et al. Effect of dimple depth on friction properties of aluminum alloy under different lubrication conditions[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2017, 53(4): 406-414 (in Chinese) [马明明, 连峰, 臧路平, 等. 凹坑深度对铝合金表面在不同润滑介质中摩擦学性能的影响[J]. *金属学报*, 2017, 53(4): 406-414].
- [23] Yong J, Chen F, Yang Q, et al. Femtosecond laser induced hierarchical ZnO superhydrophobic surfaces with switchable wettability[J]. *Chemical Communications*, 2015, 51(48): 9813-9816. doi: [10.1039/C5CC02939B](https://doi.org/10.1039/C5CC02939B).
- [24] Nefedov V I, Firsov M N, Shaplygin I S. Electronic structures of MRhO₂, MRh₂O₄, RhMO₄, and Rh₂MO₆ on the basis of X-ray spectroscopy and ESCA data[J]. *Journal of Electron Spectroscopy & Related Phenomena*, 1982, 26(1): 65-78.
- [25] Capece F M, Castro V D, Furlani C, et al. "Copper chromite" catalysts: XPS structure elucidation and correlation with catalytic activity[J]. *Journal of Electron Spectroscopy & Related Phenomena*, 1982, 27(2): 119-128.
- [26] Chang F M, Cheng S L, Hong S J, et al. Superhydrophilicity to superhydrophobicity transition of CuO nanowire films[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(11): 114101-1-3.
- [27] Wen Shizhu, Huang Ping. *Principles of Tribology*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008(in Chinese) [温诗铸, 黄平. *摩擦学原理*[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008].