

不同粗糙度条件下硅橡胶表面织构润滑特性的研究

马国亮, 姜亮, 黄巍, 王晓雷
(南京航空航天大学江苏省精密与微细制造技术重点实验室, 210016, 南京)

摘要: 为了研究表面织构在不同粗糙度条件下的润滑特性,使用球-盘式摩擦实验机,以具有不同粗糙度和表面织构的硅橡胶(PDMS)试样盘为下试样、GCr15 轴承钢球为上试样进行摩擦实验,润滑液采用体积分数为 60% 的甘油-水溶液. 实验结果表明,在较低的滑行速度下,表面织构会增大光滑 PDMS 试样的摩擦因数,但却降低粗糙 PDMS 试样的摩擦因数. 当摩擦副处于混合润滑状态时,试样表面粗糙度有一个最优值范围,在该范围内织构化的试样具有最优的摩擦性能,如在滑行速度为 1 mm/s、织构面积率为 10.4 % 的情况下,粗糙度为 230 nm 的试样比粗糙度为 20、280 和 360 nm 的试样具有更低的摩擦因数.

关键词: 硅橡胶;粗糙度;表面织构;润滑特性

中图分类号: TH117.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)09-0087-06

Lubrication Properties of Textured Polydimethylsiloxane Surfaces with Different Roughness

MA Guoliang, JIANG Liang, HUANG Wei, WANG Xiaolei
(Jiangsu Key Laboratory of Precision & Micro-Manufacturing Technology,
Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: To investigate the frictional properties of textured polydimethylsiloxane (PDMS) surfaces with different roughness, the textures are created on PDMS surfaces with different roughness, and friction tests are performed on a ball-on-disk tribometer, which consists of a rotating PDMS disk sliding under a stationary GCr15 bearing steel ball, and the lubricant is made of glycerol (volume fraction 60%) and deionized water. The results show that at low speed, surface texture enables to increase the friction coefficient of smooth PDMS disk while decrease that of rough one. Moreover, there is an optimal roughness value range of the textured PDMS species under the mixed lubrication, and the best frictional property appears in this range. For example, when the sliding speed is 1 mm/s and the dimple ratio is 10.4 %, the sample with roughness amplitude 230 nm achieves a lower friction coefficient than those with roughness amplitude 20, 280 or 360 nm.

Keywords: polydimethylsiloxane; roughness; surface texture; lubrication property

由于表面形貌可直接影响到摩擦学系统的状态^[1],粗糙度又是其中很重要的因素之一,因此降低表面粗糙度,可以改善摩擦性能,但在某些条件下,当表面粗糙度降低到一定程度,达到超光洁状态时,摩擦副的摩擦性能反而下降^[2]. 哈尔滨工业大学的代汉达等人^[3]通过对具有不同表面粗糙度的 45 # 钢和 MoS₂/聚四氟乙烯 (PTFE) 复合材料摩擦副在水润滑条件下摩擦性能的研究发现,对偶件的

粗糙度存在一个最佳范围,使摩擦副处于最佳摩擦状态.由此可见,并非材料表面越光滑,摩擦性能就越好,而是具有特定表面形貌的摩擦副,往往具有更优的摩擦性能.

表面织构技术^[4],即在摩擦面上加工出具有一定尺寸和排列规则的凹坑或微小沟槽的阵列,具有优异的降低摩擦、减小磨损和提高承载能力等特性.学者们深入研究了表面织构在不同材料上的作用机理,包括各种硬质材料^[5-6]和弹性模量较低的软材料^[7-8].对于表面粗糙度和织构对硅橡胶摩擦性能的影响,许多学者也进行了研究,Cassin、Vicente 和 Bongaerts 等人^[9-11]研究了液体润滑条件下刚性钢球和软质的硅橡胶(PDMS)球分别与 PDMS 盘之间的摩擦,认为表面粗糙度对完全流体动压润滑状态下的摩擦因数没有明显影响,但会改变混合润滑状态所处的速度范围,使摩擦副进入流体动压润滑的临界速度发生改变. He 等人^[7]研究了干摩擦条件下表面织构对 PDMS 摩擦性能的影响,结果表明,在与直径为 1.6 mm 的轴承钢球对磨时,柱形织构表面能够显著降低摩擦因数.李劲峰等人^[8]通过在 PDMS 试样表面加工织构,并在水润滑条件下进行实验发现:当滑行速度大于等于 60 mm/s 时,织构表面的摩擦因数都高于无织构表面;当滑行速度小于 60 mm/s 时,表面织构具有良好的减小摩擦力的作用.

综上所述,表面粗糙度是摩擦表面的固有属性,而织构是一种新的表面改性技术,两者都能改变摩擦副的润滑特性,从而影响摩擦性能.因此,本文研究了在液体润滑状态下,具有不同粗糙度和表面织构的 PDMS 试样与 GCr15 钢球间的摩擦润滑特性.

1 实验设计

1.1 试样制备

选择直径为 12.7 mm 的 GCr15 滚动轴承钢球作为上试样,实验前将其分别在石油醚和酒精中超声清洗 10 min,以去除表面的保护油层,再用去离子水冲洗,并用滤纸擦干,得到洁净钢球后再进行实验.清洗后的钢球表面粗糙度 $R_a=(20\pm10)$ nm.

本文采用光刻-复模工艺制作具有不同表面粗糙度和织构的 PDMS 试样盘作为下试样,其过程如图 1 所示.通过光刻工艺在玻璃基片表面得到加工织构所需的光刻胶圆柱凸起阵列,将内径为 50 mm、厚度为 5 mm 的铝制圆环固定在该玻璃基片的光刻胶阵列表面,制成 PDMS 模具.将 PDMS 本体/固化剂按 10 : 1 的质量配比充分搅拌混合后放入真

空箱内,抽真空直至完全脱气,再将其浇注于所制得的 PDMS 模具内,并水平放置于电热恒温箱内加热固化,设定温度为 70 ℃,保温 12 h.待 PDMS 完全固化后,将其脱离模具,即可得到直径为 50 mm、厚度为 5 mm 的 PDMS 试样,其邵氏硬度 $HA=50\pm1$.

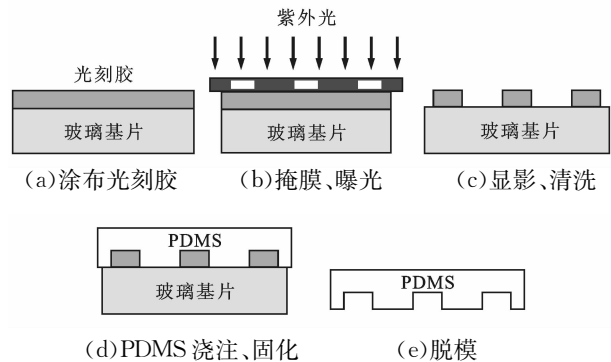


图 1 PDMS 试样的制作过程

为了得到具有不同粗糙度的 PDMS 试样,选用 4 种不同粗糙度的玻璃基片进行光刻阳模的制作,它们分别经过氧化铈(CeO_2)抛光,以及采用编号为 W7、W14 和 W28 的 SiC_2 磨料进行打磨处理.将以上几种玻璃基片制得的 PDMS 试样分别称为 W0、W7、W14、W28 试样,使用光干涉表面形貌仪观察其表面(见图 2),测得其表面粗糙度分别为 (20 ± 10) 、 (230 ± 20) 、 (280 ± 20) 和 (360 ± 20) nm.由于 W0 试样的表面粗糙度较小,因此将其视为光滑试样,将其他 3 种试样视为具有不同粗糙度的粗糙试样.对每种粗糙度试样分别加工 4 种不同织构,织构采用圆柱形凹坑阵列,直径 d 为 50 μm ,面积率 ρ 分别为 0%(无织构)、4.9%(织构 1#)、10.4%(织构 2#)和 15.5%(织构 3#),凹坑深度约为 5 μm .

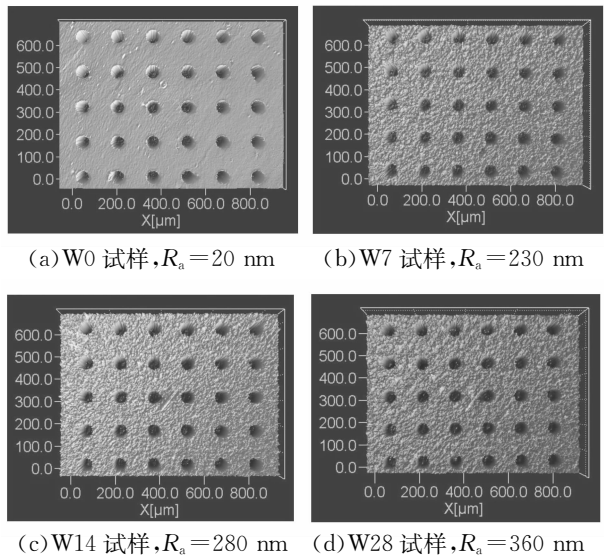


图 2 PDMS 试样的表面形貌($d=50\ \mu m,\rho=10.4\%$)

1.2 实验及测试方法

实验在球-盘式摩擦实验机(见图 3)上进行,选择半径为 20 mm 的轨道作为滑行轨道,外加载荷为 1 N. 在该载荷下,干接触时的赫兹接触半径为 1.52 mm,当 $\rho=4.9\%$ 时,接触区内存在的凹坑数约为 46 个. 实验选择的润滑剂为甘油和水的混合溶液,甘油的体积分数为 60%,在室温下其动力黏度为 6.95 mPa·s. 通过实验可知,该溶液在实验条件下暴露 3 h(实际实验时间约为 1 h)后,吸收的水分质量仅占总质量的 0.23%,由此引起的黏度变化较小,因此对实验结果的影响可以忽略不计. 实验滑行速度 v 为 1~200 mm/s,使用不同钢球进行两轮重复实验,取其平均值作为最终的实验结果.

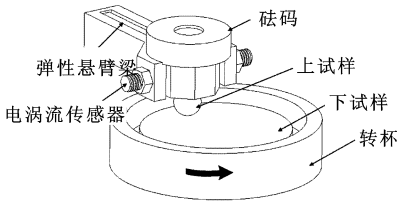


图 3 球-盘式摩擦实验机

由于两轮重复实验都在同一轨道上进行,且实验速度的跨度较大,摩擦表面接触状态变化复杂,因此轨道变形对摩擦实验结果会产生影响. 一般情况下,高速易产生流体动压效应,轨道变形较小,因此实验滑行速度按照从高速到低速的顺序进行. 在兼顾数据可靠性的情况下,采用以下取值方法:①当 $v=200\sim80$ mm/s 时,跑合 3 m,取第 3 m 内的摩擦因数 c 的平均值作为实验结果;②当 $v=60\sim10$ mm/s 时,跑合 2 m,取第 2 m 内 c 的平均值作为实验结果;③当 $v=5\sim1$ mm/s 时,跑合 3 min,取第 3 min 内 c 的平均值作为实验结果.

实验机的采样间隔为 100 ms,试样的摩擦曲线如图 4 所示,在大部分实验条件下,摩擦副的摩擦因数均处于稳定阶段.

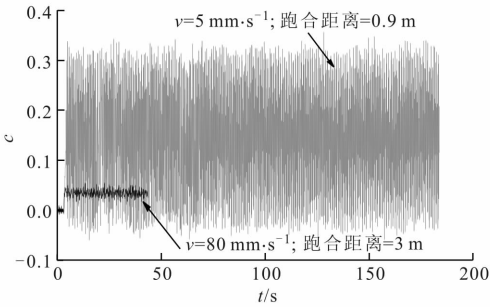


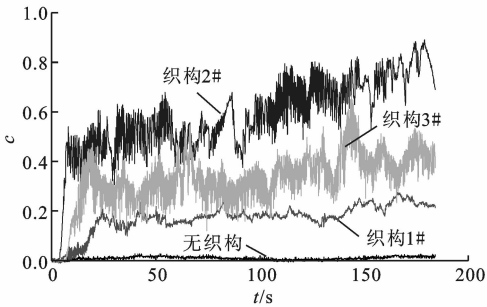
图 4 W7 试样-织构 1# 的摩擦因数曲线

2 实验结果与讨论

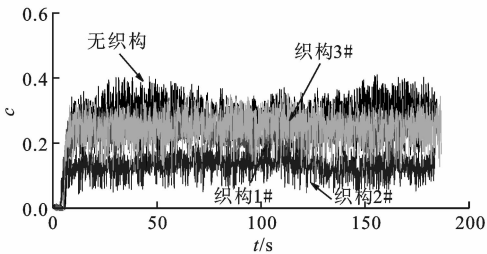
2.1 表面织构对摩擦因数的影响

由图 5 可知,当 W0 试样表面无织构时,摩擦因数较低(约为 0.01),摩擦曲线振幅很小且稳定,据此推断此时摩擦副处于流体动压润滑状态,该结果已经经过多次实验证实. 具有织构的 W0 试样的摩擦因数都高于无织构的试样. 当 $\rho=4.9\%$ 时,摩擦曲线有所波动但振幅较小,未出现明显的黏滑现象,而当 $\rho=10.4\%$ 和 15.5% 时,摩擦曲线振动幅度远远大于无织构表面,出现了黏滑现象. 此时, c 的大小取决于摩擦副的实际接触面积,由于 $\rho=15.5\%$ 的试样与钢球的实际接触面积小于 $\rho=10.4\%$ 的试样,因此前者的摩擦因数明显小于后者.

由图 5b 可知,无论试样表面是否存在织构,摩擦曲线都较为稳定,振幅较大,黏滑现象明显,黏附摩擦主要存在于钢球与 PDMS 试样的粗糙峰之间,因此其摩擦因数均较低. 具有织构的 W7 试样的摩擦因数都小于无织构试样,而 $\rho=10.4\%$ 的试样具有最低的摩擦因数,并小于 $\rho=15.5\%$ 的试样,这与黏附摩擦力与实际接触面积间的规律不相符,可能是由于表面织构在摩擦过程中受挤压变形较大,润滑液从凹坑中被挤出,产生了“二次润滑”效应,使表面织构改善润滑状况的特性起到了主要作用. 在图 5a 中,由于 PDMS 试样表面较光滑,滑行速度低,局部可能出现干摩擦,而黏附摩擦力较大易使 PDMS



(a) W0 试样



(b) W7 试样

图 5 2 种试样在不同织构上的摩擦因数曲线($v=1$ mm/s)

试样发生变化(如转移膜现象),从而引起摩擦因数不稳定.同时,光滑试样表面对外界干扰较为敏感,也可能是导致摩擦因数不稳定的因素之一,但图中摩擦曲线的上升趋势是否为必然现象,还有待于进一步实验考证.图 5b 中的 PDMS 试样表面较粗糙,摩擦仅出现在钢球与 PDMS 试样的粗糙峰之间,而在粗糙峰之间的谷底内储存有润滑液,致使摩擦副之间不易形成干摩擦,因此摩擦因数较为稳定.

在滑行速度较高(80 mm/s)的情况下,所有试样的摩擦曲线的振幅都很小且稳定,摩擦因数也较低,如图 6 所示,此时摩擦副处于流体动压润滑状态.图 7a 是 W0 试样摩擦因数随速度的变化趋势,在从 1 mm/s 到 200 mm/s 的整个速度范围内,无织构的 W0 试样的摩擦因数都较低.根据 c 随速度的变化趋势,结合图 5a、图 6a 中的原始摩擦曲线可知,摩擦副处于流体动压润滑状态.具有织构的 W0 试样在低速条件下处于混合润滑状态,摩擦因数远远高于无织构表面.在高速条件下,摩擦副进入完全流体动压润滑状态,且织构面积率越大,由混合润滑状态进入流体动压润滑状态的转变速度也越大,这种趋势与已有结论^[9-11]相一致,说明此时织构的作用主要体现在改变试样的表面粗糙度方面.

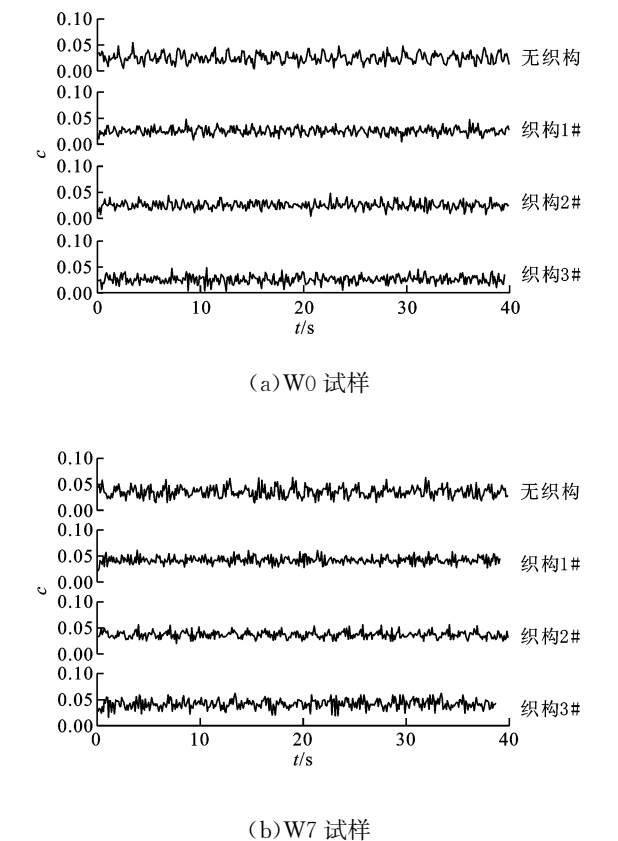


图6 2种试样在不同织构上的摩擦因数曲线($v=80\text{ mm/s}$)

图 7b~图 7d 是表面较粗糙的 W7、W14、W28 试样的摩擦因数随速度的变化趋势,与无织构试样相比,表面织构的存在不会改变粗糙试样的润滑状态.当滑行速度较低时,摩擦副处于混合润滑状态,具有织构试样的摩擦因数小于无织构试样,且不同粗糙度试样具有不同的最优面积率.当 $v=1\text{ mm/s}$ 时,在 W7 试样中, $\rho=10.4\%$ 的织构具有最优的降

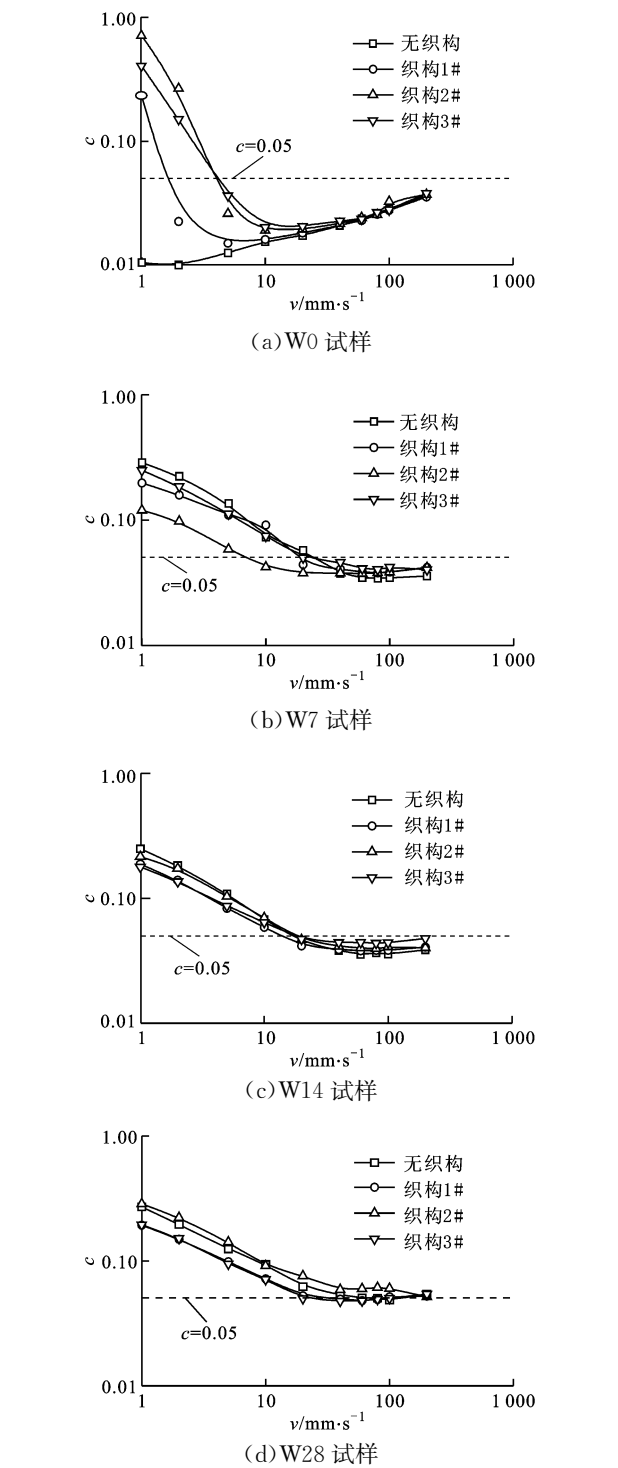
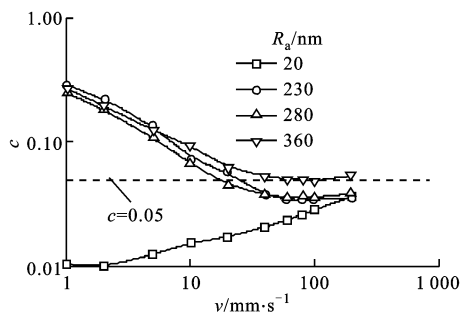


图7 不同表面粗糙度试样的摩擦因数曲线对比

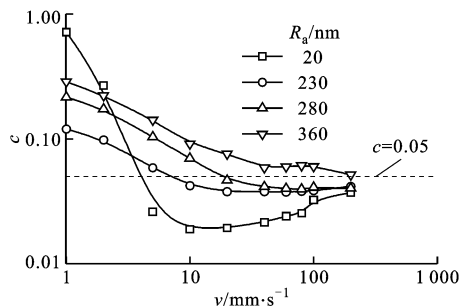
低摩擦因数的作用,其 $c=0.12$,与无织构的 c 相比, c 降低了58.3%。在W14和W28试样中,最优 $\rho=15.5\%$, c 分别降低了28.5%和28.3%。当滑行速度较高时,摩擦副处于流体动压润滑状态,各种织构试样摩擦因数也与无织构试样基本保持一致。

2.2 表面粗糙度对摩擦因数的影响

如图8所示,在无织构和有织构的条件下,通过对不同粗糙度试样的摩擦因数随速度变化趋势的对比,探讨了表面粗糙度对摩擦性能的影响。



(a) 无织构试样



(b) 有织构试样($d=50\ \mu\text{m}$, $\rho=10.4\%$)

图8 无织构和有织构试样的摩擦因数曲线的对比

当试样表面为无织构时,W0试样在1~200 mm/s的整个速度范围内都处于完全流体动压润滑状态,而表面较粗糙的W7、W14、W28试样则处于混合润滑状态并向流体动压润滑状态转变,即粗糙试样处于混合润滑状态时的速度高于光滑试样,该结果与已有的结论^[9-11]基本一致。

当试样表面具有相同面积率($\rho=10.4\%$)的织构时,在滑行速度较高的情况下,W0试样比W7、W14、W28试样的摩擦因数小。随着滑行速度的降低,摩擦副进入混合润滑状态,W0试样的 c 开始大幅升高,当 $v=1\ \text{mm/s}$ 时,其 c 高于其他3个试样,这种趋势在 $\rho=4.9\%$ 、 15.5% 的有织构试样中同样存在。与相同面积率的粗糙表面相比,光滑的W0试样与钢球之间的黏附摩擦力较大,因此摩擦因数较

大。由此可知,在混合润滑状态下,摩擦表面并非越光滑越好,而是应具有一个最优粗糙度值的范围,在该范围内,织构才能够体现出最优的摩擦性能。

3 结 论

本文通过光刻-复模的方法,加工了具有不同表面粗糙度和均匀排列的凹坑型表面织构的PDMS试样,将甘油和水的混合溶液作为润滑剂,通过与钢球的摩擦实验,得到以下结论。

(1)对于较为光滑的W0试样($R_a=20\ \text{nm}$),表面织构的作用主要体现在增大表面粗糙度方面,在速度为1~40 mm/s的范围内,摩擦因数增大,使得摩擦副由混合润滑状态进入流体动压润滑状态的转变速度增大。

(2)对于表面较粗糙的PDMS试样,表面织构可以显著降低低速条件下的摩擦因数,如当滑行速度为1 mm/s时,在W7试样($R_a=230\ \text{nm}$)中,面积率为10.4%的表面织构相对于无织构试样能降低摩擦因数达58.3%。

(3)对于具有相同面积率织构的PDMS试样,当摩擦副处于混合润滑状态时,粗糙度并非越小越好,而是具有一个最优粗糙度的范围,在该范围内,织构可体现出最优的摩擦性能。

参考文献:

- [1] 刘峰璧,李续娥,谢友柏. 三体磨粒磨损中摩擦副表面粗糙度预测研究[J]. 西安交通大学学报,1999,33(12):35-39.
LIU Fengbi, LI Xu'e, XIE Youbai. Roughnesses prediction of interacting surface for three-body abrasive wear[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1999, 33(12):35-39.
- [2] 周银生,全永昕. 表面粗糙度对边界摩擦与磨损性能的影响[J]. 润滑与密封,1994(1):25-26.
ZHOU Yinsheng, QUAN Yongxin. Effects of surface roughness in boundary lubrication[J]. Lubrication Engineering, 1994(1):25-26.
- [3] 代汉达,曲建俊. 水润滑下偶件表面粗糙度对PTFE复合材料摩擦学性能的影响[J]. 润滑与密封,2009,34(2):8-10.
DAI Handa, QU Jianjun. Effect of the surface roughness of matching material on tribological properties of PTFE composites under water lubrication[J]. Lubrication Engineering, 2009,34(2):8-10.
- [4] 王晓雷,王静秋,韩文非. 边界润滑条件下表面微细织构减摩特性的研究[J]. 润滑与密封,2007,32(12):

- 36-39.
- WANG Xiaolei, WANG Jingqiu, HAN Wenfei. Effect of surface texture on friction reduction under boundary lubrication [J]. *Lubrication Engineering*, 2007, 32(12):36-39.
- [5] PETTERSSON U, JACOBSON S. Influence of surface texture on boundary lubricated sliding contacts [J]. *Tribology International*, 2003, 36(11):857-864.
- [6] WANG Xiaolei, KATO Koji. Improving the anti-seizure ability of SiC seal in water with RIE texturing [J]. *Tribology Letters*, 2003, 14(4):275-280.
- [7] HE Bo, CHEN Wei, WANG Q J. Surface texture effect on friction of a microtextured poly(dimethylsiloxane) (PDMS) [J]. *Tribology Letters*, 2008, 31(3):187-197.
- [8] 李劲峰, 张永辉, 王晓雷. 聚合物表面织构制作及其摩擦学特性的实验研究 [C]//2008 全国青年摩擦学与表面保护学术会议论文集. 武汉:2008;212-216.
- [9] CASSIN G, HEINRICH E, SPIKES H A. The influence of surface roughness on the lubrication properties of adsorbing and non-absorbing biopolymers [J]. *Tribology Letters*, 2001, 11(2):95-102.
- [10] DE VICENTE J, STOKES J R, SPIKES H A. The friction properties of Newtonian fluids in rolling-sliding soft-EHL contact [J]. *Tribology Letters*, 2005, 20(3/4):273-286.
- [11] 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.

(编辑 管咏梅)

(上接第 63 页)

- [5] RANJIT S, LOW L N, HO S, et al. A silicon piezoresistive pressure sensor[C]//The First IEEE International Workshop on Electronic Design. New York, USA: Test and Applications(DELTA'02), 2002:1-4.
- [6] BAO Minhang. Micro mechanical transducers: pressure sensors, accelerometers and gyroscopes [M]. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 2000:257-262.
- [7] 李科杰. 新编传感器技术手册 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002:77-93, 145-177, 118-166.
- [8] 刘君华. 智能传感器系统 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999:35.
- [9] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2009:340-409, 499-518.
- [10] ZHAO Yulong, ZHAO Libo, JIANG Zhuangde. A novel high temperature pressure sensor on the basis of SOI layers[J]. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 2003(108):108-111.
- [11] LI C, MEHREGANY M. A silicon carbide capacitive pressure sensor for in-cylinder pressure measurement [J]. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 2008(145/146):2-8.
- [12] WU C, ZORMAN C A, MEHREGANY M. Fabrication and testing of bulk micromachined silicon carbide piezoresistive pressure sensors for high temperature applications [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2006(6):316-324.
- [13] GUO Shuwen, ERIKSEN H, CHILDRESS K, et al. High temperature smart-cut SOI pressure sensor [J]. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 2009(154):255-260.
- [14] 刘波, 徐秋玲, 于振毅. 中华人民共和国机械行业标准:压力传感器(JB/T 6170-2006) [S]. 北京: 机械工业出版社, 2007:4.

(编辑 管咏梅)