

激光表面织构化对 GCr15 钢摩擦磨损性能的影响

胡天昌^{1,2}, 丁奇^{1,2}, 胡丽天^{1*}

(1. 中国科学院兰州化学物理研究所 固体润滑国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000,

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 本文利用 Nd:YAG 固体脉冲激光对 GCr15 钢样品表面进行了微坑织构化处理, 考察了激光表面织构参数对其摩擦性能的影响, 同时通过扫描电镜等对磨斑表面进行了分析. 结果表明: 与光滑面试样相比, 经织构化处理的样品表面在干摩擦条件下虽然摩擦系数较高, 但表现出了较好的抗磨性能; 在贫油润滑条件下, 织构面的摩擦系数与磨损均明显小于光滑面; 在低载低速下较小孔径织构面摩擦系数较小, 随着速度及载荷的增大, 较大孔径织构面表现出更好的摩擦学性能. 采用 Stribeck 曲线探讨了织构化表面与光滑面在贫油润滑下的润滑机理, 结果表明织构面在试验条件下均保持油膜流体润滑状态.

关键词: GCr15 钢; 激光织构化; Stribeck 曲线; 摩擦磨损

中图分类号: TH117.3

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2011)05-0447-05

The Effect of Laser Texturing of GCr15 Steel Surfaces on Their Tribological Properties

HU Tian - chang^{1,2}, DING Qi^{1,2}, HU Li - tian^{1*}

(1. State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics,

Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The surface textures on GCr15 steel were produced with a solid - state pulse Nd:YAG laser. The effects of laser texturing parameters on tribological performance were investigated. The wear scars were analyzed using scanning electron microscopy. The results show that laser - textured specimens exhibited higher friction coefficients but excellent antiwear properties compared with untextured specimens in dry friction. Under poor lubricated condition, the friction coefficients and wear of textured surfaces were lower than those of untextured surfaces. The friction coefficients of the surface with smaller dimples were lower than those of others under low load at low velocity. However, with the increasing of load the surfaces with larger dimples exhibited lower friction coefficients. Lubrication mechanism was investigated by stribeck curve. It was found that textured surfaces maintained in hydrodynamic regime for all applied loads under poor lubrication.

Key words: GCr15 steel, laser texturing, stribeck curve, friction and wear

机械系统的摩擦性能对其提高承载, 可靠运行及延长服役寿命起到了重要作用. 因此, 为了减小各种零部件滑动接触表面的摩擦磨损, 研究者致力于通过材料改性、润滑剂添加及表面工程技术等方法

提高材料的摩擦学性能. 近年来的研究表明^[1-3]: 固体表面形貌对其摩擦磨损性能影响很大, 同时摩擦学和仿生学相关研究和实践表明, 表面并非越光滑则越耐磨, 适当的织构化处理在表面制备具有一定

Received 4 March 2011, revised 30 May 2011, accepted 24 August 2011, available online 28 November 2011.

* Corresponding author. E - mail: lthu@licp.cas.cn, Tel: +86 - 18811036063.

The project was supported by the National Key Basic Research Program of China (973) (2011CB706603).

国家重点基础研究发展规划项目(973) (2011CB706603)资助.

规律的微凸体(或微凹体)形貌,能够发挥良好的润滑及抗磨作用.通过对金属^[4-5]、陶瓷^[6]、软材料^[7]等表面进行织构化处理,对于改善摩擦副的摩擦学性能起到了积极的作用.目前表面织构化也在机械密封^[8-9]以及汽缸系统^[10-11]中得到应用.常见的表面织构化方式有机械加工、等离子刻蚀、激光加工和化学法等.而激光微加工以其高效、织构尺寸精密可控、对环境无污染等优点广泛应用于表面织构.鉴于此,本文作者将激光织构技术用于轴承钢表面,探讨了不同工况条件下,不同微坑型织构对轴承钢表面摩擦学性能的影响,利用扫描电子显微镜等对磨斑表面进行了分析并提出了相关的摩擦磨损机理,以期轴承钢在高速重载及长寿命精密活动部件中的应用提供实验依据和数据积累.

1 实验部分

1.1 GCr15 钢表面激光织构化

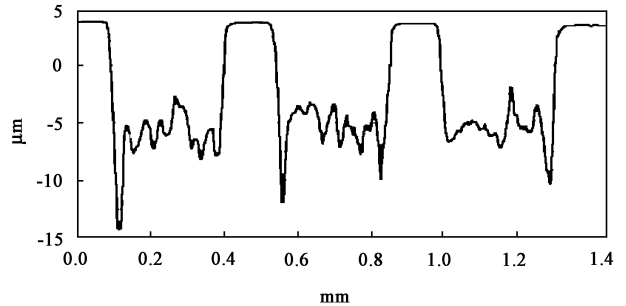
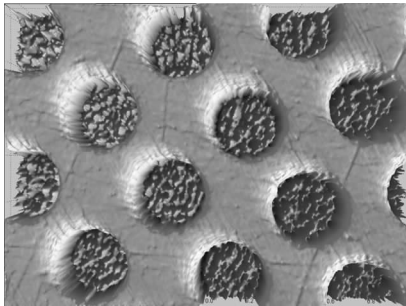
激光加工的基材为 GCr15 钢(下试样),其尺寸

为 $\phi 25 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$,试块经抛光机上抛光至表面粗糙度 R_a 约 $0.05 \text{ }\mu\text{m}$.在 MH-5-VM 型显微硬度仪上测试其表面硬度为 $\text{HV}_{100} 721$ 左右.经初步试验比较,我们选用不同大小的圆形凹坑形态作为研究对象,所加工凹坑呈环形矩阵排列.

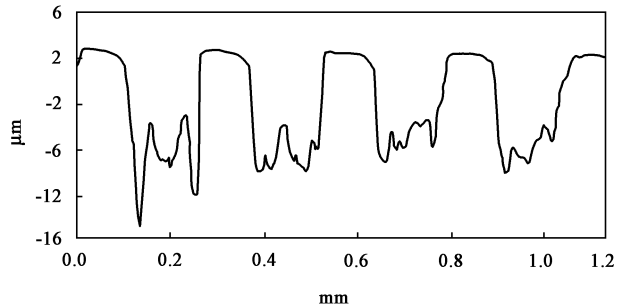
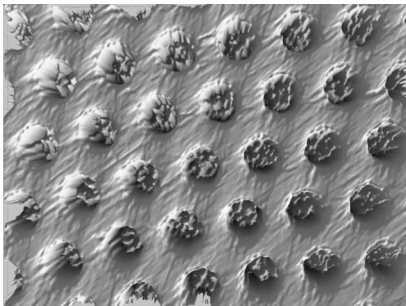
试验采用脉冲 Nd:YAG 激光器加工系统,激光器波长 $1\ 064 \text{ nm}$,平均功率 10 W ,脉宽 $5 \sim 25 \text{ ns}$.加工参数为脉冲频率 10 kHz ,扫描速度 5 mm/s .加工完成后对试样进行微抛光处理以去除激光加工过程中坑边缘所形成的毛刺.微坑间表面显微硬度值经测定为 $\text{HV}_{100} 725$ 左右,与未织构面相同,这表明激光织构化对表面硬度几乎没有影响.同时对表面织构尺寸及形貌进行了表征.如图 1 所示,制备了 35 、 160 和 $310 \text{ }\mu\text{m}$ 3 种不同孔径微坑,微坑间间距均保持在 $100 \text{ }\mu\text{m}$ 左右,坑深度约 $10 \text{ }\mu\text{m}$ 左右.

1.2 摩擦磨损试验

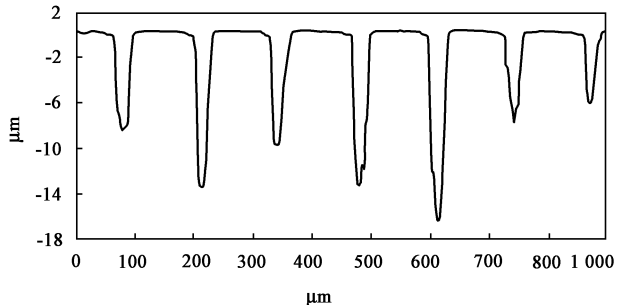
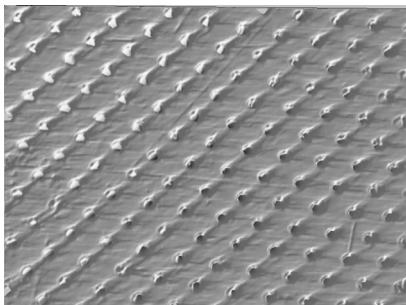
摩擦磨损试验是在瑞士 CSM 公司生产的摩擦磨损试验机上进行,采用栓-盘接触方式,GCr15 钢



(a) D: $310 \text{ }\mu\text{m}$



(b) D: $160 \text{ }\mu\text{m}$



(c) D: $35 \text{ }\mu\text{m}$

Fig. 1 Three - D photographs of laser textured steel sample surfaces

图 1 激光织构化钢表面的三维轮廓图

栓(上试样)的尺寸为 $\phi 5 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$,端面经研磨抛光后其表面粗糙度 R_a 约为 $0.05 \mu\text{m}$,织构化块与光滑面块为下试样. 试验前所有试样均在丙酮中超声清洗. 试验条件:① 室温下考察材料在干摩擦条件下的摩擦磨损,载荷为 1 N ,滑动速度 12 cm/s ; ② 将下试样在液体石蜡中进行超声浸油后用橡胶刀刮去表面多余的油以考察此贫油状态下样品的摩擦学性能,同时将载荷设定为 $2 \sim 10 \text{ N}$,速度设定为 $5 \sim 40 \text{ cm/s}$,滑动距离为 200 m . 采用 JSM - 5600LV 型扫描电子显微镜和 Micro - XAM 三维轮廓仪对试样表面磨斑形貌进行分析.

2 结果与讨论

2.1 织构面与未织构面在干摩擦下摩擦磨损性能

图2给出了在 1 N 载荷、干摩擦条件下织构面与光滑面的摩擦系数变化曲线. 由图2可以看出:所有样品的摩擦系数均比较高,且3种不同尺寸织构面平均摩擦系数均大于光滑面. 光滑面的摩擦系数在开始阶段迅速升高,之后逐渐降低,织构面摩擦系数逐渐增加并且表现出较小的波动. 这是由于织构单元的存在增加了样品的表面粗糙度,增加了摩擦阻力,从而提高了织构化样品的摩擦系数.

从图3所示三维轮廓图可看出光滑面磨斑呈较深的沟槽状,而织构面尤其是较大孔径微坑织构面仅有轻微的磨损. 从磨斑形貌看光滑面的磨损是由于犁沟和黏着所致,其中存在大量磨屑;而织构面磨损要小得多,有部分磨屑存留在微坑内,这表明微坑

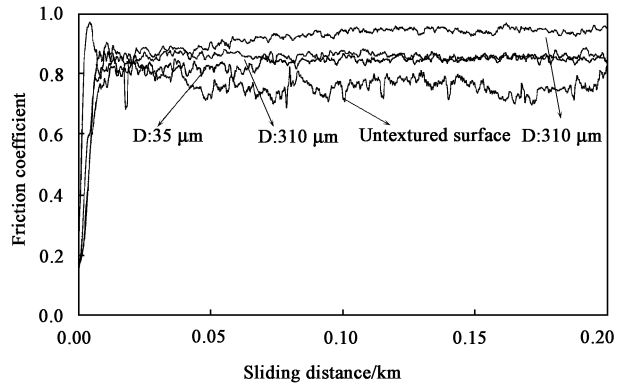


Fig. 2 Frictional traces of the textured and untextured surfaces (1 N , 12 cm/s)

图2 1 N , 12 cm/s

下 GCr15 钢织构面与光滑面摩擦系数变化曲线

在摩擦过程中起到了捕获磨屑的作用从而减少了磨粒磨损^[12].

2.2 织构面与未织构面在贫油条件下摩擦磨损性能

图4给出了 GCr15 钢在贫油润滑条件下的摩擦曲线. 由图4可以看出:在 2 N , 10 cm/s 条件下,织构面与未织构面摩擦系数均在 $0.1 \sim 0.2$ 之间,并且织构面摩擦系数均低于光滑面. 随着载荷及速度增加,未织构面摩擦系数迅速增加并伴随大幅波动,特别是在 10 N 载荷下摩擦力过大并伴随摩擦噪声. 而织构面摩擦系数均小得多且运行过程极为稳定,同时可以看出较大孔径的织构面的摩擦系数稍低一些.

图5给了出贫油润滑条件下的不同载荷和速度下的织构面与未织构面的Stribeck曲线,其中Stribeck

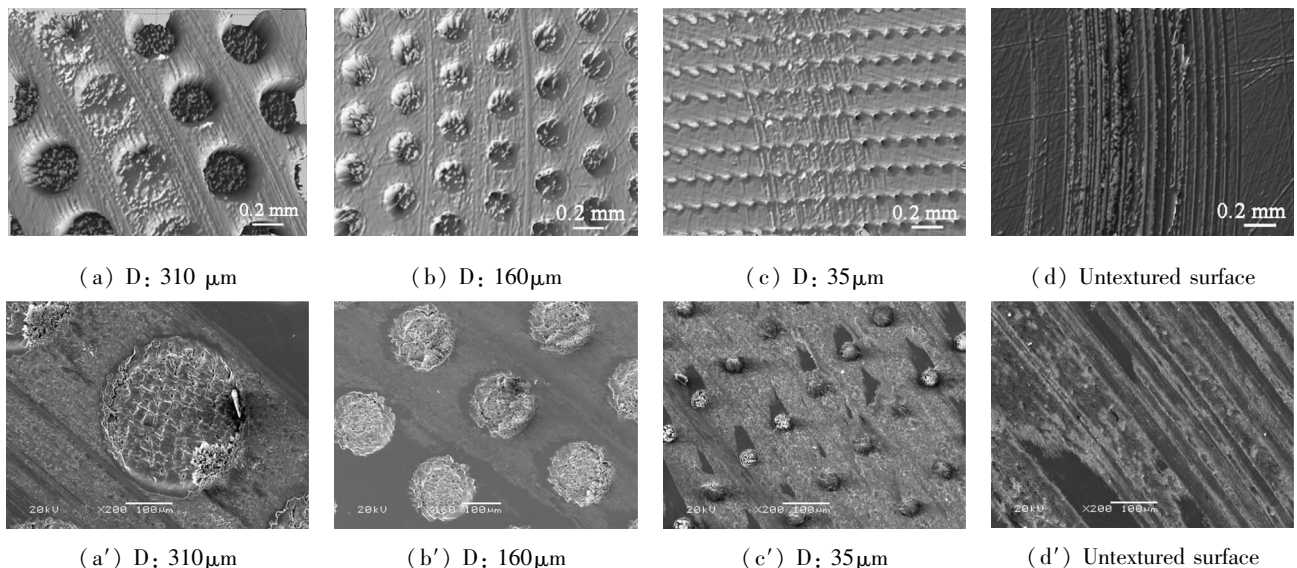
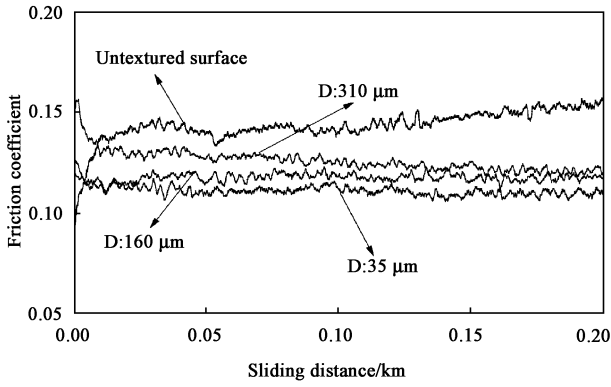
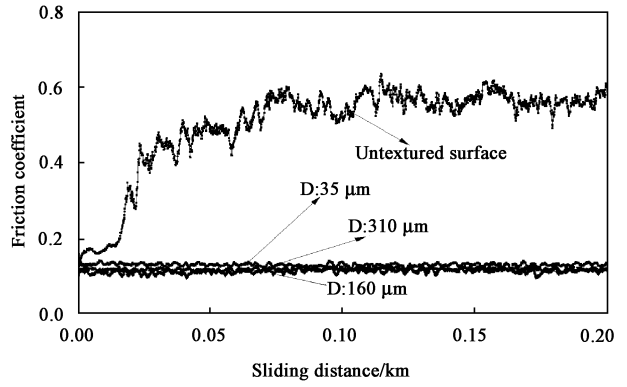


Fig. 3 Three - D photographs and SEM micrographs of the wear scars of the textured and untextured surfaces

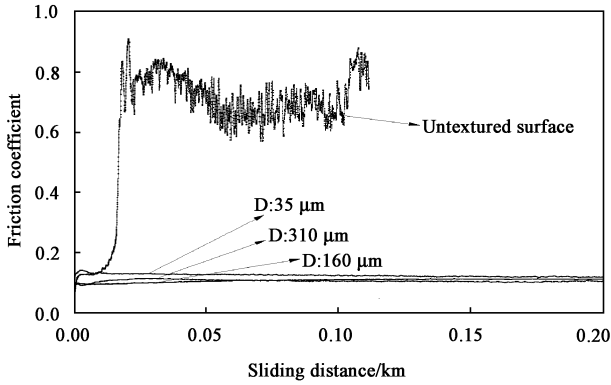
图3 干摩擦条件下织构面与未织构面磨痕的三维轮廓照片(a~d)及对应的SEM照片(a'~d')



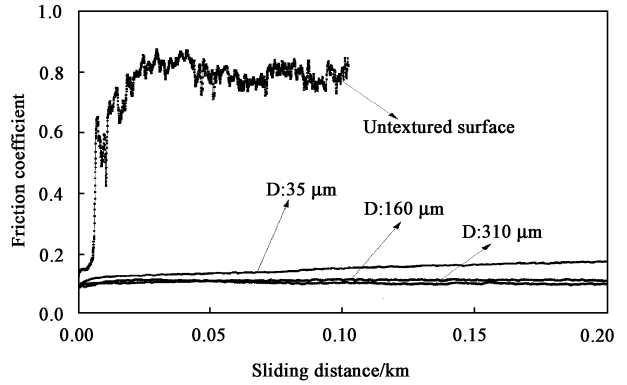
(a) 2 N, 10 cm/s



(b) 2 N, 40 cm/s



(c) 10 N, 10 cm/s



(d) 10 N, 40 cm/s

Fig. 4 Frictional traces of the textured and untextured surfaces under poor lubrication

图4 贫油润滑条件下 GCr15 钢织构面与光滑面摩擦系数变化曲线

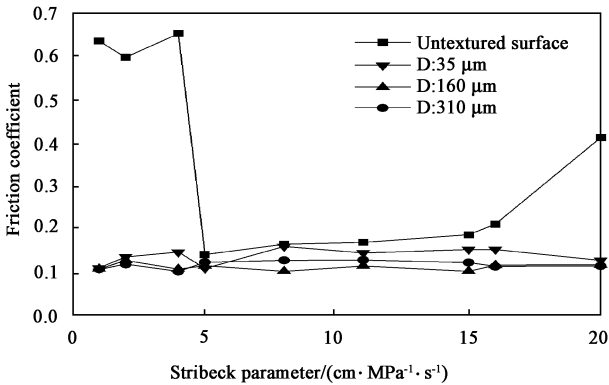


Fig. 5 Stribeck curves for untextured and textured surfaces

图5 织构面与未织构面的 Stribeck 曲线

参数中将润滑剂黏度作为恒定值. 从曲线中可以看出:未织构面在 $5 \text{ cm}/(\text{s} \cdot \text{MPa})$ 左右处于从流体润滑向混合润滑的过渡状态,其较大值在油膜流体润滑区域,较小值下处于混合或边界润滑状态;所有织构面在试验条件下与文献报道^[13]类似,在所应用试验条件下均处于流体润滑状态而无明显过渡,而其中孔径为 $160 \mu\text{m}$ 的微坑织构面相较于其他织构面表现出更好的效果,这说明微坑织构延伸了摩擦副油膜流体动

压润滑的发生范围. 微坑贮存的润滑剂,在摩擦运行过程中通过对偶的挤压提取到接触表面从而形成连续的油膜,产生了二次润滑效应. 同时试验证明,微坑过小则润滑介质较难浸入不利于油膜的产生,较大微坑能储存更多的润滑介质从而更有利于减摩抗磨.

试验后对样品的磨斑形貌分析如图 6 所示. 由图 6 中可以看出:未织构面在轻载及重载条件下均产生了较大磨斑,主要表现为犁沟及黏着磨损,其中分布有较多的磨屑. 这是因为在摩擦过程中,随着摩擦热的产生使部分润滑剂挥发而使油膜变薄,同时产生的磨屑聚集在摩擦副表面加剧了磨损. 而织构面在试验条件下的磨损明显较未织构面小得多,低载下仅存在极其轻微的磨损,同时较大的微坑织构面磨损更小一些. 这主要是由于对偶表面始终存在一定厚度的油膜从而避免了边界润滑甚至干摩擦的发生.

3 结论

a. 干摩擦条件, 1 N 载荷下, 织构面的摩擦系数均高于未织构面, 而其磨损率均小于未织构面. 由

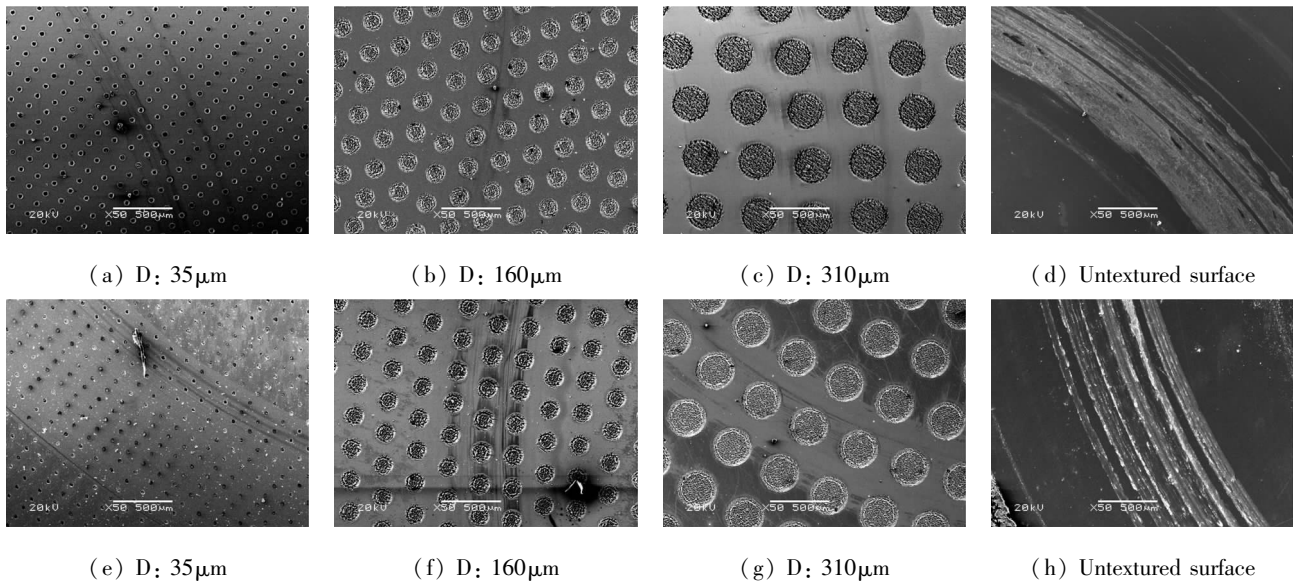


Fig. 6 SEM micrographs of worn surfaces at 2 N(a - d) and 10 N(e - h)

图6 织构面与未织构面分别在 2 N(a - d)及 10 N(e - h)下的磨损表面形貌 SEM 照片

于织构单元增加了样品的表面粗糙度,从而提高了摩擦系数,而微坑在摩擦过程中起到了捕获磨屑的作用从而减少了磨粒磨损。

b. 贫油润滑条件下,织构面的摩擦系数与磨损均低于未织构面,Stribeck 曲线表明织构面在试验条件下均处于油膜流体润滑状态,而未织构面则明显产生了向混合及边界润滑的过渡,说明表面微坑延伸了摩擦副动压润滑发生的范围;在运行过程中微坑内贮存的润滑剂通过二次润滑效应补充到对偶表面形成连续的油膜,实验证明较大微坑该效应更明显。

参考文献:

[1] A Erdemir. Review of engineered tribological interfaces for improved boundary lubrication [J]. *Tribology International*, 2005, 38: 249 - 256.

[2] Li J Q, Zhu H. Surface texture and its influence on tribological properties [J]. *Lubrication Engineering*, 2009, 34(2): 94 - 97 (in Chinese) [历建全, 朱华. 表面织构及其对摩擦学性能的影响 [J]. *润滑与密封*, 2009, 34(2): 94 - 97].

[3] Han Z L, Wang J D, Chen D R. Drag reduction by dimples on surfaces in plane - plane contact lubrication [J]. *Tribology*, 2009, 29(1): 10 - 16 (in Chinese) [韩中领, 汪家道, 陈大融. 凹坑表面形貌在面接触润滑状态下的减阻研究 [J]. *摩擦学学报*, 2009, 29(1): 10 - 16].

[4] G Dumitru, V Romano, H P Weber. Laser microstructuring of steel surfaces for tribological applications [J]. *Appl Phys A*, 2000, 70: 485 - 487.

[5] Miki Nakano, Atsuko Korenaga, Atsushi Korenaga, *et al.* Applying micro - texture to cast iron surfaces to reduce the friction coefficient under lubricated conditions [J]. *Tribol Lett*,

2007, 28: 131 - 137.

[6] M Geiger, S Roth, W Becker. Influence of laser - produced microstructures on the tribological behaviour of ceramics [J]. *Surface and Coatings Technology*, 1998, 100 - 101: 17 - 22.

[7] Jiang L, Ma G L, Wang X L. Lubrication properties of surface texture on PDMS [J]. *Tribology*, 2010, 30(3): 262 - 267 (in Chinese) [姜亮, 马国亮, 王晓雷. PDMS 表面织构润滑特性的研究 [J]. *摩擦学学报*, 2010, 30(3): 262 - 267].

[8] Peng X D, Du D B, Li J Y. Effect of different section profile micro - pores on seal performance of a laser surface textured mechanical seal [J]. *Tribology*, 2006, 26(4): 367 - 371 (in Chinese) [彭旭东, 杜东波, 李纪云. 不同型面微孔对激光加工多孔端面机械密封性能的影响 [J]. *摩擦学学报*, 2006, 26(4): 367 - 371].

[9] I Etsion. State of the art in laser surface texturing [J]. *Journal of Tribology*, 2005, 127: 248 - 253.

[10] Xu T, Zuo W J, Xu T S, *et al.* Numerical simulation of fluid - solid coupling for lubricating oil extrusion process between cylinder and piston with micro - pits [J]. *Tribology*, 2009, 29(4): 335 - 340 (in Chinese) [徐涛, 左文杰, 徐天爽, 葛长江. 凹坑表面活塞与缸套挤压润滑油的流固耦合数值模拟 [J]. *摩擦学学报*, 2009, 29(4): 335 - 340].

[11] I Etsion, E Sher. Improving fuel efficiency with laser surface textured piston rings [J]. *Tribology International*, 2009, 425: 542 - 547.

[12] M Varenberg, G Halperin, I Etsion. Different aspects of the role of wear debris in fretting wear [J]. *Wear*, 2002, 252: 902 - 910.

[13] A Kovalchenko, O Ajayi, A Erdemir, *et al.* The effect of lasersurface texturing on transitions in lubrication regimes during unidirectionalsliding contact [J]. *Tribol Int*, 2005, 38(3): 219 - 225.