

微凹坑相对位置变化对表面减摩性能的影响

于海武, 邓海顺, 黄 巍, 王晓雷

(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 为探讨微凹坑相对位置变化对织构化表面减摩性能的影响, 在试件表面分别加工变换微凹坑列与速度方向角度、增大微凹坑横向间距减小纵向间距、以及减小微凹坑横向间距增大纵向间距等三种微凹坑相对位置变化系列的表面织构, 利用理论方法分析了表面织构在产生流体动压力时微凹坑之间的相互影响, 并利用往复式摩擦试验法进行研究. 研究表明: 在固定的微凹坑直径、深度和面积率下, 微凹坑相对位置变化对表面织构的减摩性能具有很大的影响; 与微凹坑正方形网格分布的织构化表面相比, 微凹坑横向间距与纵向间距比值为 $r=1/3$ 的织构化表面具有最优的减摩提高效果, 在试验载荷 200 N、曲柄转速 400 r/min 时, 可进一步降低摩擦 22.14%.

关键词: 表面织构; 微凹坑相对位置; 摩擦系数; 减摩提高率

中图分类号: TH 117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1964(2011)06-0943-06

Effects of micro-dimple arrangements on tribological performance of sliding surfaces

YU Hai-wu, DENG Hai-shun, HUANG Wei, WANG Xiao-lei

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

Abstract: In order to investigate the effects of micro-dimple arrangements on antifriction performance, the patterns of surface texture were designed on specimens as follows: changing of angles between the direction of dimple row and speed; transverse space enlargement between the two dimples and longitudinal space diminution; transverse space diminution between the two dimples and the longitudinal space enlargement. The interaction of the dimples were theoretically analysed when the hydrodynamic pressure was generated. And the frictional experiments were carried out using a reciprocating testing machine. The results show that at the condition of fixed dimple diameter, dimple depth and dimple area ratio, the antifriction performance of the textured samples were strongly influenced by micro-dimple arrangements. Compared with the dimple textured surfaces which were located at the four corners of a square, the textured surface with $r = 1/3$ held the best effects on further friction reduction as the increasing rate of friction reduction reached 22.14% when the test load was 200 N at a crank rotational speed of 400 r/min.

Key words: surface texture; micro-dimple arrangements; friction coefficient; increasing rate of friction reduction

为减小相对运动表面间的摩擦磨损, 科学家们在表面处理方面做了大量的研究工作, 并已取得巨

收稿日期: 2011-02-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(50675101); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CX10B_093Z)

作者简介: 于海武(1982-), 男, 内蒙古赤峰市人, 博士研究生, 从事微纳米摩擦学方面的研究.

E-mail: yuhaiwu126@tom.com Tel: 025-84893599

大进展. 近年来, 表面织构技术作为一种降低摩擦、减小磨损和提高承载力特性的有效手段, 受到了国内外摩擦学工作者的广泛关注^[1-4]. 同时该技术在计算机硬盘^[5]、推力轴承^[6]、机械密封^[7]、发动机系统^[8]等诸多方面也得到了成功的应用.

表面织构, 就是人为地在摩擦表面加工出的按一定规则分布的微几何特征, 如微坑、微沟槽等. 就表面织构如何改善表面摩擦学特性的机理而言, 研究者们普遍认为: 在富油润滑条件或混合润滑条件下, 微坑或微沟槽可以充当微小流体动压润滑轴承, 从而产生附加流体动压力^[9]; 在贫油润滑条件下, 微坑或微沟槽作为微储油池向摩擦副表面提供润滑油^[10]; 同时, 微坑或微沟槽可以容纳磨粒, 从而降低由于磨粒产生的高磨损^[11]. 在这些机理中, 人们研究较为充分的是表面织构的流体动压润滑性能. 组成表面织构的微凹坑几何参数是影响其流体动压润滑性能的主要因素. 文献^[12]利用数值模型指出微凹坑面积率和深径比是影响表面织构流体动压润滑性能的重要因素, 通过选择合适的微凹坑面积率和深径比可以使织构化表面发挥最优的摩擦学性能. 同时, 文献^[13]利用理论及实验的方法研究了微凹坑形状对表面织构流体动压润滑性能的影响, 研究表明, 不同的微凹坑形状对织构化表面摩擦学性能具有不同的影响, 在文中所研究的几种微凹坑形状中, 椭圆形微凹坑体现了最优的润滑性能.

然而, 微凹坑相对位置变化是否对表面织构流体动压润滑性能也存在影响, 尚不明确. 基于此, 本文首先利用数值模拟方法分析了表面织构在产生流体动压力时微凹坑之间的相互影响, 然后设计了三种微凹坑相对位置变化系列的织构化试件, 利用往复摩擦试验方法进行对比试验, 以期获得微凹坑相对位置变化对表面织构润滑性能的影响规律, 为后续在研究及工程应用中表面织构的设计提供思路.

1 表面织构流体动压润滑性能分析

本部分采用与作者以前研究^[14]同样的理论模型分析表面织构在产生流体动压力时微凹坑之间的相互影响, 所用压力控制方程为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 6v \frac{\partial h}{\partial x}, \quad (1)$$

式中: h 为润滑膜厚度; η 为润滑油动力黏度, v 为两表面间相对运动速度; p 为产生的润滑膜压力. 如图 1 所示, 微凹坑为圆柱形, 因此润滑膜厚度可

表示为

$$h(x, y) = \begin{cases} h_0 & (x, y) \notin \Omega, \\ h_0 + h_p & (x, y) \in \Omega, \end{cases} \quad (2)$$

式中: h_0 为最小油膜厚度; h_p 为微凹坑深度; Ω 为微凹坑区域. 利用上述两式进行流体动压力数值计算, 计算方法及过程详见^[14]. 选择 3×3 微凹坑单元作为计算域, 计算域的边缘取大气压值. 考虑到气穴作用, 在计算过程中采用雷诺边界条件约束迭代过程, 并尽量选择与后续试验相似的参数作为计算参数, 取: 微凹坑直径 $200 \mu\text{m}$, 深度 $15 \mu\text{m}$, 面积率 10.4% , 环境压力 0.101325 MPa , 润滑油黏度 $0.09733 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 最小油膜厚度 $2 \mu\text{m}$, 两摩擦面间的相对运动速度 v 为 0.22 m/s .

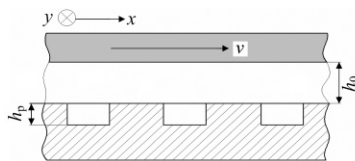


图 1 润滑膜厚度示意图

Fig. 1 Sketch map of fluid film thickness

计算后, 3×3 微凹坑单元产生的无量纲流体动压力分布情况如图 2 所示. 图 2 中 v 表示两摩擦面相对运动方向, 三曲线分别代表平行速度方向和垂直速度方向上截面的压力分布, P 为微凹坑产生的无量纲流体动压力.

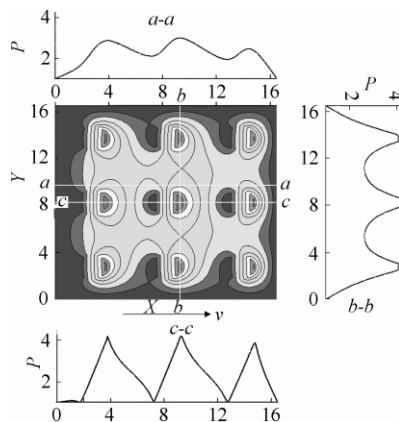


图 2 计算域内无量纲流体动压力分布

Fig. 2 Dimensionless hydrodynamic pressure distribution in the computational domain

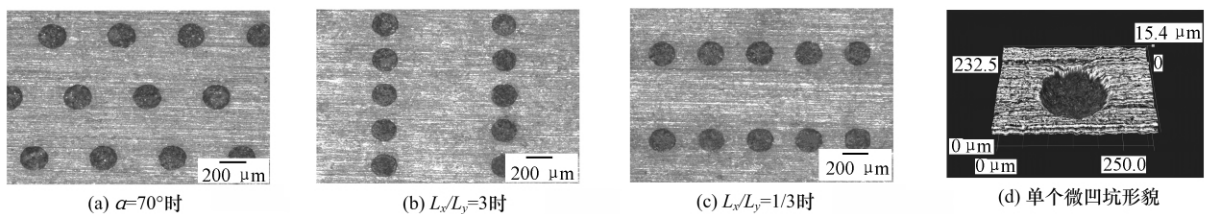
从图 2 中可以看出, 在平行于速度方向上, 微凹坑中心线所在界面的压力分布呈周期变化, 而在微凹坑中心线以外的界面以及垂直速度方向所在界面上每个微凹坑产生的动压力在下降过程中并没有降到最低值, 这说明在两个方向上每个微凹坑在产生流体动压力时都受到周围微凹坑的影响. 根据文献^[15], 这可能是由于负压区的泵吸作用而使微凹坑之间的润滑油相互流动而造成的. 由此可以

推断,改变微凹坑之间的相对位置可能会影响每个微凹坑的流体动压力产生,即微凹坑相对位置的变化会导致计算域内产生不同的流体动压承载力的大小.在实际工况下,由于摩擦副多处于混合润滑状态,当摩擦副承受的载荷一定时,表面织构产生的流体动压承载力越大,越能有效避免摩擦副粗糙峰的直接接触,从而降低其摩擦系数.此推断即为本文后续利用实验方法研究微凹坑相对位置变化对表面织构减摩性能影响的思想来源.

2 实验部分

2.1 微凹坑相对位置变化形式的设计与试件制备

源于上述思想,本文设计了3种微凹坑相对位置变化系列的织构化试件进行实验研究.如图3a所示,第1种微凹坑相对位置变化系列的设计是固定最底部一行凹坑,其它的凹坑行相对最底部凹坑行向左错动,以使原凹坑列与速度方向呈一定角度 α ,通过改变角度 α 来获得不同的微凹坑相对位置变化形式.在此系列中分别设计了角度 α 为 60° 、 70° 和 80° 这3种情况的微凹坑相对位置变化形式.如图3b所示,每个微凹坑相当于处于一个以 L_x 和 L_y 为边长的矩形单元内,在单元面积不变的情况下通过改变 L_x 和 L_y 的长度可以调整微凹坑横向及纵向之间的距离,从而得到不同的微凹坑相对位置变化形式.所以第2种微凹坑相对位置变化系列的设计是增大微凹坑横向间距减小纵向间距,即使 L_x 与 L_y 的比值大于1,这里分别选择了比值为1.5,2,3和4这4种变化形式.第3种微凹坑相对位置变化系列的设计为减小微凹坑横向间距增大纵向间距,即使 L_x 与 L_y 的比值小于1,文中选择了比值为 $1/1.5$, $1/2$, $1/3$ 和 $1/4$ 这4种变化形式.



(a) $\alpha=70^\circ$ 时

(b) $L_x/L_y=3$ 时

(c) $L_x/L_y=1/3$ 时

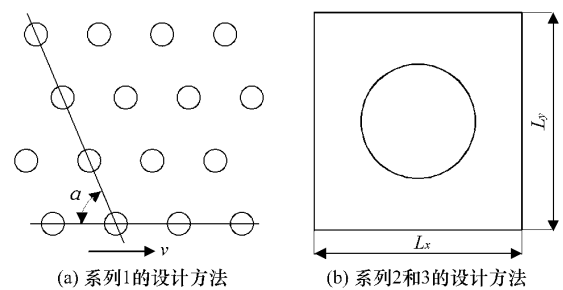
(d) 单个微凹坑形貌

图4 三种微凹坑相对位置变化系列的表面织构显微图像

Fig. 4 Microscopic image of surface texture from three series of micro-dimple arrangement patterns

2.2 试验方法

试验在往复摩擦磨损试验机上进行,下试件在曲柄作用下往复运动,行程为80 mm.试验载荷选择200和400 N,每种微凹坑相对位置形式下的上试件对应6种曲柄转速,分别为50,100,200,



(a) 系列1的设计方法

(b) 系列2和3的设计方法

图3 微凹坑相对位置变化形式设计方法

Fig. 3 Designing methods of micro-dimple arrangement patterns

表面织构微凹坑相对位置变化形式的优化试验是在微凹坑正方形网格分布形式(相邻四个微凹坑处于正方形四个角点)设计的基础上进行的,所以这里取微凹坑正方形网格分布形式的织构化试件作为参照,用以对比研究.此试件具有微凹坑面积率10.4%,微凹坑直径 $200\ \mu\text{m}$ 和微凹坑深度 $14\sim 18\ \mu\text{m}$,已在作者过去的研究^[16]中被证明相对无织构化试件具有较好的减摩性能.

摩擦试验采用面-面接触摩擦副.上下试件均采用硼铜合金铸铁材料,利用线切割方法取自于真实发动机缸套,其材料的硬度为240~290 HBS.经磨平与抛光处理后,上试件摩擦面大小为 $20\ \text{mm}\times 20\ \text{mm}$,下试件摩擦面大小为 $30\ \text{mm}\times 140\ \text{mm}$,其表面粗糙度 R_a 均为 $0.4\sim 0.5\ \mu\text{m}$.在上试件摩擦面上采用微细光刻电解方法(详见文献^[16])加工具有不同微凹坑相对位置变化形式的表面织构.图4所示为试件加工后表面织构的光学显微照片,图4a为第1种微凹坑相对位置变化系列中 α 为 70° 时的情况,图4b为第2种微凹坑相对位置变化系列中 L_x 与 L_y 的比值为3时的情况,图4c为第3种微凹坑相对位置变化系列中 L_x 与 L_y 的比值为 $1/3$ 时的情况,图4d为单个微凹坑的深度显微照片.

300,400和500 r/min.所有试验的润滑条件均采用富油润滑,所选润滑剂为长城牌柴油机油,其牌号为CD15W-40.实验步骤如下:1)在上下试件间滴入充分的润滑油;2)利用砝码在上试件上施加试验载荷;3)在相应曲柄转速下跑合10 min后开

始记录摩擦系数值,取整个记录过程平均值(计算方法为首先取记录时间内所有摩擦系数值的绝对值,然后对这些数值进行平均化处理)作为该速度所对应的摩擦系数.为确保不同曲柄转速下的摩擦系数具有可比性,应使不同曲柄转速下一个往复运动周期内的采样点数尽量相同,所以选择上述 6 种转速所对应的采样间隔分别为 24,12,6,4,3 和 1 ms;4) 每种速度下重复试验两次,结果取平均值.

3 实验结果与分析

图 5 所示为第一种微凹坑相对位置变化系列下的结构化表面摩擦系数随曲柄转速的变化曲线.从图 5 中可见,几条曲线之间存在一定的交叉现

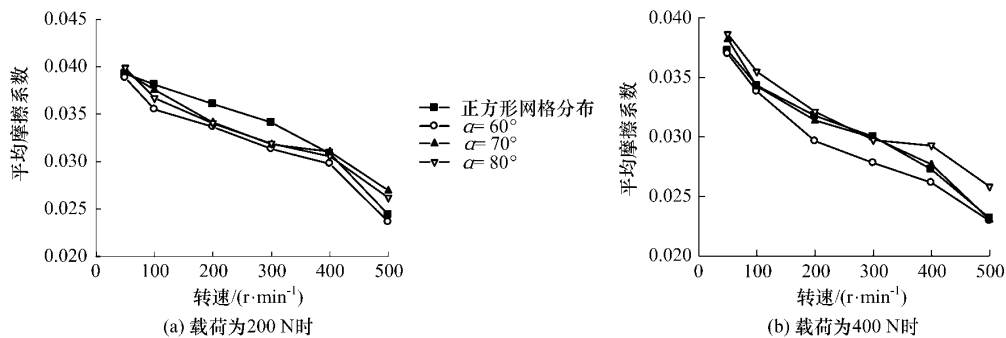


图 5 第 1 种微凹坑相对位置变化系列的摩擦特性曲线
Fig. 5 Friction curves from first series of micro-dimple arrangement patterns

图 6 所示为第 2 种微凹坑相对位置变化系列下的结构化表面摩擦系数随曲柄转速的变化曲线,其中 r 表示 L_x 与 L_y 的比值.从图 6 中可以看出,当载荷为 200 N 时,与微凹坑正方形网格分布形式的结构化表面相比, r 为 1.5,2 和 3 的工业化表面在所有曲柄转速条件下都具有较小的摩擦系数,而以

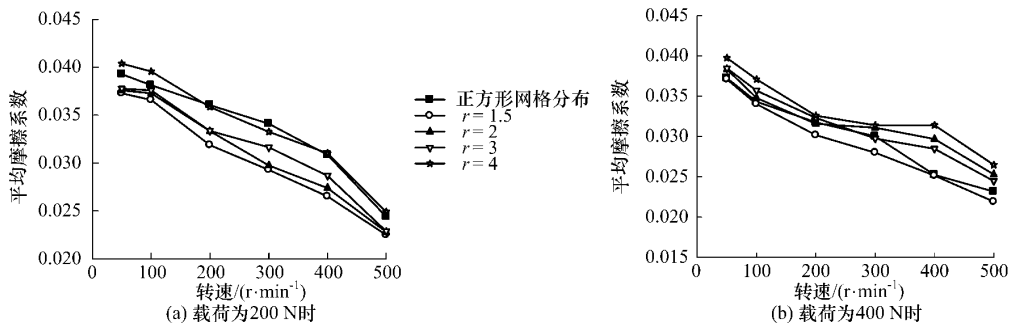


图 6 第 2 种微凹坑相对位置变化系列的摩擦特性曲线
Fig. 6 Friction curves from second series of micro-dimple arrangement patterns

图 7 所示为第 3 种微凹坑相对位置变化系列下的结构化表面摩擦系数随曲柄转速的变化曲线.从图 7 中可以看出,在两种载荷条件下, r 为 1/3 的工业化表面与微凹坑正方形网格分布形式结构化表面相比都体现了进一步的减摩效果,但是随着载荷的增大,这种效果有所减弱.

象,这是由于在往复运动试验中试验机的波动造成误差所引起,但这些误差并不影响摩擦系数曲线的总体变化规律.当载荷为 200 N 时,3 种微凹坑相对位置变化形式的结构化表面在曲柄转速为 100~400 r/min 时,与微凹坑正方形网格分布形式的结构化表面相比都具有较小的摩擦系数,其中 α 为 60° 时的结构化表面摩擦系数最小.当载荷增大到 400 N, α 为 70° 和 80° 时结构化表面的摩擦系数接近甚至超过了微凹坑正方形网格分布形式的结构化表面的摩擦系数,而 α 为 60° 时的结构化表面仍然具有最小的摩擦系数.这说明在两种载荷条件下, α 为 60° 时的结构化表面与微凹坑正方形网格分布形式结构化表面相比进一步提高了减摩效果.

r 为 1.5 时为最小.当载荷增大到 400 N, r 为 1.5 的工业化表面仍然具有最小的摩擦系数,与微凹坑正方形网格分布形式的结构化表面相比体现了进一步的减摩效果,但这种效果相比载荷为 200 N 时有所减弱.

综合图 5~7 可以得出:在 3 种微凹坑相对位置变化系列下的结构化表面中,都存在一种微凹坑相对位置形式可以进一步提高表面织构的减摩效果,且在两种载荷条件下,这种微凹坑相对位置形式保持不变.

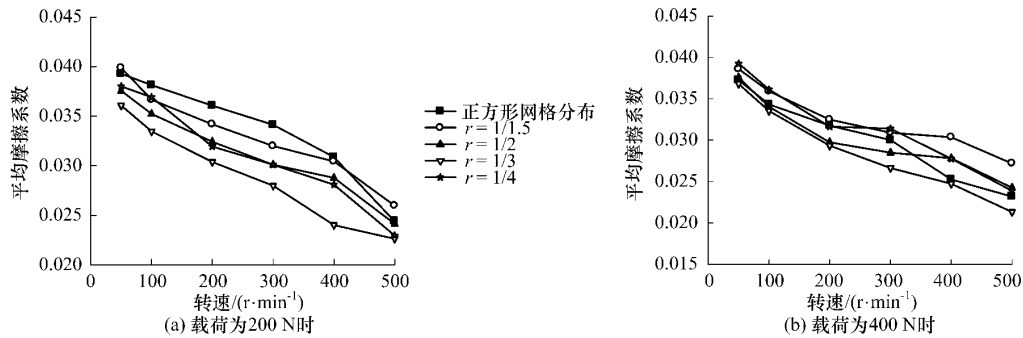


图 7 第 3 种微凹坑相对位置变化系列的摩擦特性曲线

Fig. 7 Friction curves from third series of micro-dimple arrangement patterns

为进一步探讨微凹坑相对位置变化对表面织构减摩性能的影响,选择上述 3 种微凹坑相对位置变化系列中具有最优减摩提高效果的变化形式作对比.如图 8 所示,纵坐标的减摩提高率 ϵ 计算方法为:在相应速度下微凹坑正方形网格分布形式织构化表面的摩擦系数 f_s 减去具有微凹坑相对位置变化形式的织构化表面的摩擦系数 f_p ,再与微凹坑正方形网格分布形式织构化表面摩擦系数 f_s 的比值.其表达式为

$$\epsilon = \frac{f_s - f_p}{f_s} \times 100\% \quad (3)$$

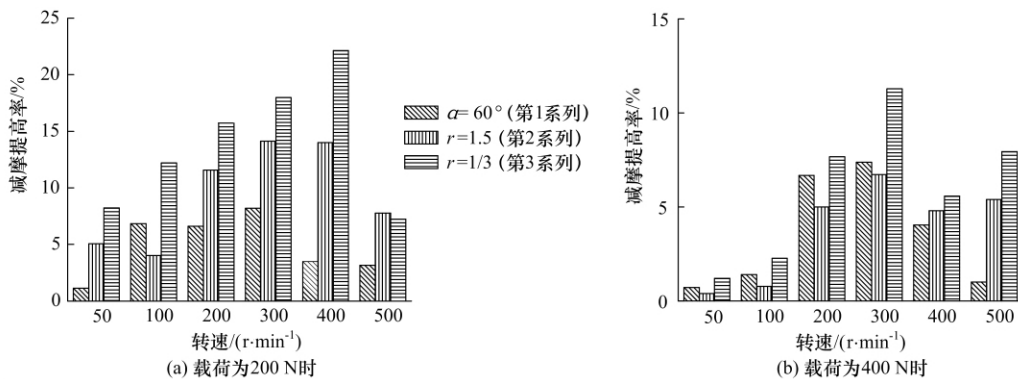


图 8 3 种微凹坑相对位置变化系列最优减摩提高率比较

Fig. 8 Comparison of optimum increasing rate of friction reduction in three series of micro-dimple arrangement patterns

4 结 论

1) 理论分析进一步验证了在流体动压润滑区域,由于负压区的泵吸作用,组成表面织构的微凹坑在产生流体动压力时会受到周围微凹坑的影响,即每个微凹坑的压力产生都不是孤立的.

2) 微凹坑相对位置变化对表面织构的减摩性能具有很大的影响,选择合适的微凹坑相对位置形式可以进一步提高表面织构的减摩性能.

3) 在本文研究的 3 种微凹坑相对位置变化系列中,微凹坑横向间距与纵向间距的比值为 $r=1/3$ 时的织构化表面,与微凹坑正方形网格分布形式的织构化表面相比,表现出了最佳的减摩提高效

果,在试验载荷 200 N、曲柄转速 400 r/min 时,可进一步降低摩擦 22.14%.

从图 8 中可以看出,第 3 种微凹坑相对位置变化系列中 $r=1/3$ 的织构化表面,在两种载荷条件下都表现了最优的减摩提高效果.当载荷为 200 N 时,第 2 种微凹坑相对位置变化系列中 $r=1.5$ 的织构化表面的减摩提高效果优于第 1 种微凹坑相对位置变化系列中 $\alpha=60^\circ$ 的织构化表面,但是当载荷增大到 400 N 时这种情况有所转变.综上所述,微凹坑相对位置变化对表面织构的减摩性能具有一定的影响,选择合适的微凹坑相对位置形式可以进一步提高表面织构的减摩性能.

果,在试验载荷 200 N、曲柄转速 400 r/min 时,可进一步降低摩擦 22.14%.

参考文献:

[1] YAN D S, QU N S, LI H S, et al. Significance of dimple parameters on the friction of sliding surfaces investigated by orthogonal experiments [J]. Tribology Transactions, 2010, 53(5): 703-712.

[2] 马晨波, 朱 华, 历建全. 摩擦副不同表面织构化的润滑减摩性能试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(2): 244-248.

MA Chen-bo, ZHU Hua, LI Jian-quan. Experimental study of tribological properties of texture on different surfaces of frictional pairs [J]. Journal of Chi-

- na University of Mining & Technology, 2010, 39 (2): 244-248.
- [3] LI J L, XIONG D S, DAI J H, et al. Effect of surface laser texture on friction properties of nickel-based composite [J]. Tribology International, 2010, 43(5-6): 1193-1199.
- [4] 刘一静, 袁明超, 王晓雷. 表面织构对发动机活塞/缸套摩擦性能的影响[J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38(6): 866-871.
LIU Yi-jing, YUANG Ming-chao, WANG Xiao-lei. Influence of the surface texture on the tribological performances of piston skirt/liner [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2009, 38 (6): 866-871.
- [5] RANJIAN R, LAMBETH D N, TROMEL M, et al. Laser texturing for low-flying-height media [J]. Journal of Applied Physics, 1991, 69 (8): 5745-5747.
- [6] WANG X L, KATO K, ADACHI K, et al. Loads carrying capacity map for the surface texture design of SiC thrust bearing sliding in water [J]. Tribology International, 2003, 36(3): 189-197.
- [7] ETSION I. Improving tribological performance of mechanical components by laser surface texturing [J]. Tribology Letters, 2004, 17(4): 733-737.
- [8] OGIHARA H, KIDO T, YAMADA H, et al. Technology for reducing engine rubbing resistance by means of surface improvement [J]. HONDA R&D Technical Review, 2000, 12(2): 93-98.
- [9] HAMILTON D B, WALOWIT J A, ALLEN C M. A theory of lubrication by micro-irregularities [J]. Journal of Basic Engineering, 1966, 88(1): 177-185.
- [10] PETTERSSON U, JACOBSON S. Influence of surface texture on boundary lubricated sliding contacts [J]. Tribology International, 2003, 36: 857-864.
- [11] SUH N P, MOSLEH M, HOWARD P S. Control of friction [J]. Wear, 1994, 175(1/2): 151-158.
- [12] ETSION I, KLIGERMAN Y, HALPERIN G. Analytical and experimental investigation of laser-textured mechanical seal faces [J]. Tribology Transactions, 1999, 42(3): 511-516.
- [13] YU H W, WANG X L, ZHOU F. Geometric shape effects of surface texture on the generation of hydrodynamic pressure between conformal contacting surfaces [J]. Tribology Letters, 2010, 37: 123-130.
- [14] 于海武, 王晓雷, 孙 造, 等. 圆柱形微凹坑表面织构对流体动压润滑性能的影响[J]. 南京航空航天大学学报, 2010, 42(2): 209-213.
YU Hai-wu, WANG Xiao-lei, SUN Zao, et al. Theoretical analysis on hydrodynamic lubrication of cylinder micro-dimple surface texture [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2010, 42(2): 209-213.
- [15] FOWELL M, OLVER A V, GOSMAN A D, et al. Entrainment and inlet suction; two mechanisms of hydrodynamic lubrication in textured bearings [J]. Journal of Tribology-Transactions of the ASME, 2007, 129(2): 336-347.
- [16] 于海武, 袁思欢, 孙 造, 等. 微凹坑形状对试件表面摩擦特性的影响[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2011, 39(1): 106-111.
YU Hai-wu, YUAN Si-huan, SUN Zao, et al. Effect of micro-dimple shapes on tribological properties of specimen surfaces [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2011, 39(1): 106-111.

(责任编辑 姚志昌)