

初始表面粗糙度对沟槽织构摩擦性能的影响

纪敬虎^{1,2}, 周加鹏¹, 王沫阳¹, 王伟², 符永宏¹

(1.江苏大学, 江苏 镇江 212013; 2.江苏华青流体科技有限公司, 江苏 苏州 215600)

摘要: **目的** 探究初始表面粗糙度大小对激光沟槽织构化表面摩擦性能的影响规律。**方法** 采用脉冲光纤激光器在不同粗糙度的45[#]钢试样表面制备具有不同深度、规则排列的沟槽织构, 利用摩擦磨损试验机进行销-盘式往复摩擦试验, 研究初始表面粗糙度对沟槽织构化表面摩擦系数的影响规律, 以及不同初始表面粗糙度条件下, 激光沟槽织构化表面的摩擦学行为。**结果** 沟槽织构能够有效降低表面的摩擦系数, 初始表面粗糙度、载荷和速度的大小对沟槽织构的润滑减摩性能有较大影响。在较低的载荷下, 沟槽织构能有效提高表面的流体动压润滑效应; 在较高的载荷下, 沟槽织构能够有效改善表面的边界润滑性能。存在最优初始表面粗糙度, 使得摩擦系数达到最小, 初始表面粗糙度最优值的大小应根据载荷和速度大小来确定。**结论** 根据摩擦副表面的载荷和速度工况条件, 合理优化初始表面粗糙度能使沟槽织构获得较为理想的润滑减摩效果。

关键词: 表面织构; 沟槽; 粗糙度; 摩擦学特性

中图分类号: TH117.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)02-0139-05

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.02.020

Effect of Initial Roughness on the Tribological Properties of Textured Surfaces with Micro-grooves

JI Jing-hu^{1,2}, ZHOU Jia-peng¹, WANG Mo-yang¹, WANG Wei², FU Yong-hong¹

(1.Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2.Jiangsu Huaqing Fluid Technology Co. Ltd, Suzhou 215600, China)

ABSTRACT: The work aims to investigate the influence laws of initial roughness on the tribological properties of laser micro-groove textured surfaces. The regularly arranged micro-grooves were fabricated on the surface of 45[#] steel specimens with different roughness by pulse fiber laser. The pin-to-disc reciprocating test was carried out by friction and wear tester to study the influence of initial roughness on the friction coefficient of micro-groove textured surface and the tribological behavior of laser micro-groove textured surface under different initial roughness. The friction coefficient could be significantly reduced by groove texture. The initial roughness, load and sliding velocity had significant effect on the tribological properties of groove texture. Hydrodynamic lubrication could be significantly improved by groove texture under the lower load, and boundary lubrication could be effectively improved by groove texture at higher load. There was the optimal initial roughness to minimize the friction coefficient. The optimal value of initial surface roughness could be determined according to load and sliding speed. The ideal performance of friction reduction of the textured surfaces can be obtained by optimizing the initial surface roughness according to the load and speed.

KEY WORDS: surface texture; groove; roughness; tribological property

收稿日期: 2018-08-03; 修订日期: 2018-10-07

Received: 2018-08-03; Revised: 2018-10-07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51305168, 51375211, 51775248)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51305168, 51375211, 51775248)

作者简介: 纪敬虎 (1982—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为表面织构摩擦学。邮箱: jijinghu@ujs.edu.cn

Biography: JI Jing-hu (1982—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: surface texturing tribology. E-mail: jijinghu@ujs.edu.cn

表面织构具有良好的润滑减摩性能,被广泛应用于机械零部件表面的摩擦学优化设计^[1]。沟槽织构作为表面织构的一种重要类型,由于自身结构特点,不仅具有提高流体动压承载能力和改善摩擦表面润滑状态的作用,而且能疏导润滑介质,为摩擦表面提供润滑剂以保障持续润滑,业已受到了摩擦学研究人员和工程技术人员广泛的关注^[2-3]。

早期的试验研究表明,在摩擦表面制备沟槽织构,不仅有利于提高摩擦副滑动稳态精度和降低摩擦磨损,而且不会发生任何润滑剂降解现象^[4]。为了充分揭示沟槽的润滑减摩机理,国内外学者开展了大量的研究工作。根据摩擦表面工况参数,通过优化沟槽几何参数可以获得最佳的流体动力润滑效应^[5-6]。在不同的接触方式下,沟槽与运动方向的夹角对表面摩擦性能影响是完全不同的^[7-8]。进一步的理论分析和试验研究结果还表明,沟槽的排布形式对表面摩擦学性能有重要的影响^[9]。以上研究结果不仅丰富了沟槽织构的润滑减摩机理,而且为表面织构摩擦学优化设计的工程应用提供了理论依据。关于沟槽织构化表面摩擦学性能的研究,主要集中于在特定的初始表面上制备沟槽来改善其摩擦学行为,重点关注沟槽的几何形貌参数对摩擦性能的影响^[10-13],而忽略了初始表面初始粗糙度大小对沟槽织构化表面摩擦学性能的影响。马国亮等通过试验研究了不同粗糙度条件下凹坑织构化表面的润滑特性,结果表明,初始表面粗糙度存在一个最优值范围,使得织构化表面具有最优的摩擦学性能^[14]。因此,有必要研究初始表面粗糙度对沟槽织构化表面摩擦学性能的影响。

为了深入揭示初始表面粗糙度对沟槽织构化表面摩擦学性能的影响,本文采用脉冲光纤激光器在不同初始粗糙度的 45[#]钢试样表面加工沟槽织构,采用

Rtec 多功能摩擦磨损试验机中的销-盘式往复运动模块进行摩擦学性能试验,研究初始粗糙度大小对沟槽织构化表面摩擦系数的影响,分析其润滑减摩机理,为沟槽织构摩擦学优化设计提供理论支撑。

1 试验

1.1 材料及制备

试样材料采用 45[#]钢,上试样为圆柱销,其直径为 6 mm,高度为 25 mm;下试样为 35 mm×25 mm×6 mm 的长方体。首先对上试样下表面依次采用 80、180、400、600、800、1000、1500 目的水磨砂纸进行打磨,然后利用 pg-2 抛光机抛光。为控制下试样上表面的粗糙度,依次采用上述不同目数的水磨石砂纸对其进行打磨,使其初始表面粗糙度 R_a 分别控制在(0.05±0.01)、(0.15±0.01)、(0.25±0.01)、(0.35±0.01) μm 范围内,获得不同初始表面粗糙度试样最后所采用的砂纸型号见表 1。

表 1 获取不同初始表面初始粗糙度最后采用的砂纸
Tab.1 Abrasive last adopted for obtaining various values of the initial surface roughness

No.	Roughness/ μm	Types of abrasive (mesh)
1	0.05±0.01	1500
2	0.15±0.01	800
3	0.25±0.01	600
4	0.35±0.01	400

试样表面经砂纸抛光处理后,置于超声波清洗机内清洗 20 min。经干燥处理后,采用 WKYO-NT1100 表面微观几何形貌三维测量仪进行初始表面粗糙度检测,结果如图 1 所示。

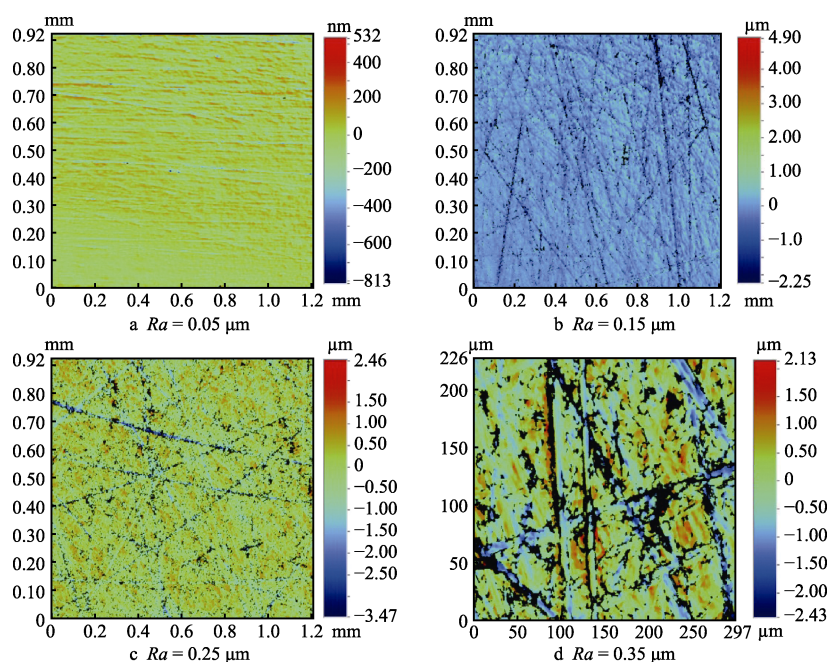


图 1 不同初始表面粗糙度试样表面形貌

Fig.1 Surface morphology of specimens with various surface roughness

采用脉冲光纤激光器,使用轮廓迂回法在试样表面加工出宽度和间距分别为 60、800 μm 且深度不同的沟槽织构。通过改变扫描速度和加工次数来控制沟槽深度,具体加工参数见表 2。

表 2 脉冲光纤激光加工参数
Tab.2 Processing parameters of pulse fiber laser

Power/W	Pulse width/ μs	Scanning speed/ $(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	Repetition	Groove depth/ μm
10	1000	8	1	9
10	1000	6	1	15
10	1000	6	2	22

加工完成后,采用此前加工粗糙表面时所用的最后一道砂纸再进行打磨处理,一是为了去除由激光热效应产生的熔渣,二是为了保证试样的初始表面粗糙度不变。然后,利用超声清洗机对沟槽织构试样表面进行清洗,晾干后,利用 Nano-Focus 光学轮廓仪对试样表面进行测量。图 2 为沟槽深度为 9 μm 时,织构化 45#钢试样照片与表面形貌 SEM 照片,图 3 为其三维几何形貌图和二维截面形貌图。

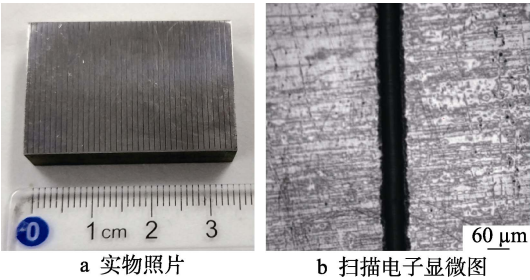


图 2 激光沟槽织构化表面试样照片
Fig.2 Topography of laser textured specimen with micro-grooves: a) physical photograph; b) scanning electron micrograph

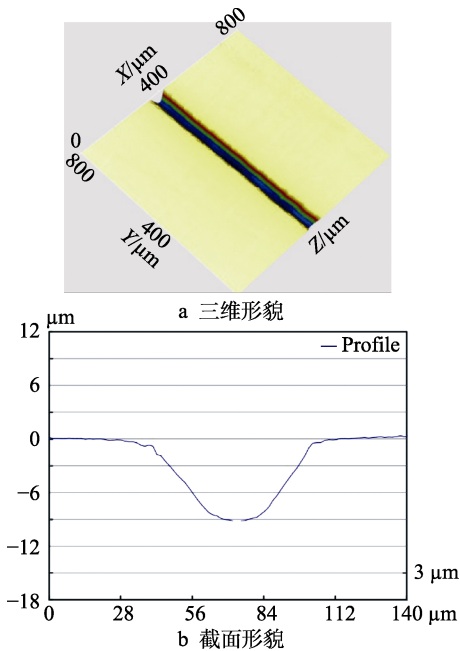


图 3 沟槽织构几何形貌
Fig.3 Topography of micro-groove texture: a) 3D profile; b) cross section

1.2 摩擦磨损试验

试验采用 Rtec 多功能摩擦磨损试验机中的销-盘式往复运动模块,下试样固定在工作台上,上试样做往复运动,行程为 15 mm,如图 4 所示。在每次试验前,将上试样与下试样均置于无水乙醇中进行 30 min 的超声清洗,然后进行干燥处理。试验在室内温度为 20 $^{\circ}\text{C}$ 的条件下进行,试验载荷采用 10 N 和 20 N 两种,对应接触压力分别为 0.35、0.7 MPa。上试样往复运动的平均滑动速度在 0.03~0.3 m/s 范围内。采用 30 号通用机械润滑油作为润滑剂,室温条件下动力黏度为 98 mPa·s。每组试验持续 5 min,且重复两次。每组试验供油一次,供油量每次控制在 0.4 mL。

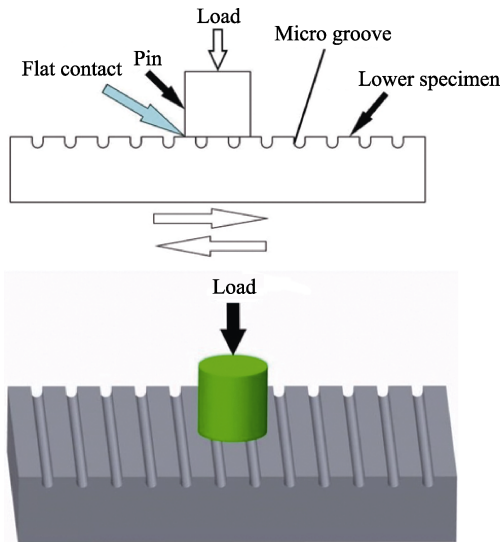


图 4 销-盘式摩擦副结构
Fig.4 Structure of pin-on-disk friction pair

2 结果与讨论

2.1 沟槽织构对摩擦系数的影响

为了研究沟槽织构对表面摩擦性能的影响,尽可能减小粗糙度的影响,在此将讨论初始表面粗糙度为 0.05 μm 时沟槽织构对表面摩擦系数的影响。图 5 给出了载荷分别为 0.35、0.7 MPa 条件下,具有不同沟槽深度的织构化表面的摩擦系数随平均滑动速度的变化曲线。由图 5a 可以看出,在 0.35 MPa 的载荷下,未织构化表面的摩擦系数基本随着速度的升高呈逐渐减小的趋势。这说明此时表面处于混合润滑状态,载荷由表面粗糙峰和润滑油膜所产生的流体动压力承担。对于沟槽深度为 9 μm 和 15 μm 的织构化表面,其摩擦系数基本随着速度的升高呈逐渐增大的趋势。这说明此时表面处于流体动压润滑状态,载荷由润滑油膜所产生的流体动压力承担。对于沟槽深度为 22 μm 的织构化表面,摩擦系数随着速度的升高而基本保持不变。这说明表面处于边界润滑状态,沟槽织

沟不仅没有起到提高表面流体动压润滑效应的作用,而且增大了表面粗糙度,从而使沟槽结构化表面的摩擦系数增大。由图 5b 可以看出,在 0.7 MPa 的载荷下,对于未织构化和织构化表面,摩擦系数随着速度的升高均基本保持不变,说明此时表面处于边界润滑状态。还可以看出,沟槽深度对表面边界润滑性能有较大影响。这主要是因为,在边界润滑状态下,沟槽织构可以起到储存润滑介质,为摩擦表面提供和补给润滑剂的作用。

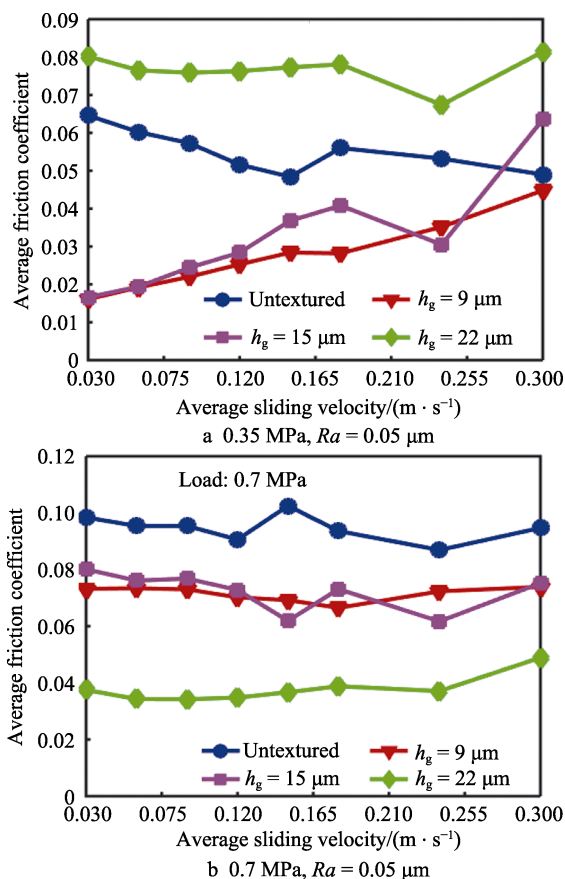


图 5 不同沟槽深度条件下摩擦系数随平均滑动速度的变化曲线

Fig.5 Change curve of friction coefficient along with average sliding velocity at various groove depths

由以上分析可以得出,在较低的载荷下,沟槽织构能有效提高表面的流体动压润滑效应,较小的沟槽深度有利于增强流体动压润滑性能。在较高的载荷下,沟槽织构能够有效改善表面的边界润滑性能,较大的沟槽深度有利于降低摩擦系数。

2.2 初始表面粗糙度对摩擦系数的影响

为了研究初始表面粗糙度的大小对沟槽结构化表面摩擦性能的影响,在此将讨论在给定载荷和沟槽深度条件下,初始表面粗糙度对表面摩擦系数的影响。图 6 给出了沟槽深度为 9 μm 时,在 0.35、0.7 MPa 两种载荷下,具有不同初始表面粗糙度的沟槽结构化表面的摩擦系数随平均滑动速度的变化曲线。由图 6

可以看出,初始表面粗糙度的大小对沟槽结构化表面的摩擦系数有较大影响,存在最优值使得表面的摩擦系数达到最小,且最优值大小受载荷和速度变化的影响。在 0.35 MPa 的载荷下,初始表面粗糙度的大小对沟槽结构化表面摩擦系数的影响随着速度的升高而减小,最佳粗糙度值随着速度的升高而增大。这主要是因为当粗糙度为 0.05 μm 时,沟槽织构的流体动压效应随着速度的增大而增强,载荷主要由油膜承载,而油液剪切力随着速度的增大而增大,导致了摩擦系数逐渐增大。随着初始表面粗糙度的增大,摩擦表面的承载能力由粗糙峰以及粗糙峰和沟槽织构所产生的流体动压效应共同承担,初始表面粗糙度削弱了沟槽织构的流体动压润滑效应。在 0.7 MPa 的载荷下,速度变化对摩擦系数影响不大,摩擦表面处于边界润滑状态,初始表面粗糙度的最优值不受速度变化的影响。综上所述,沟槽结构化的初始表面粗糙度并非越小越好,而是存在最优的初始值使得摩擦系数达到最小,其大小应根据载荷和速度大小来确定。

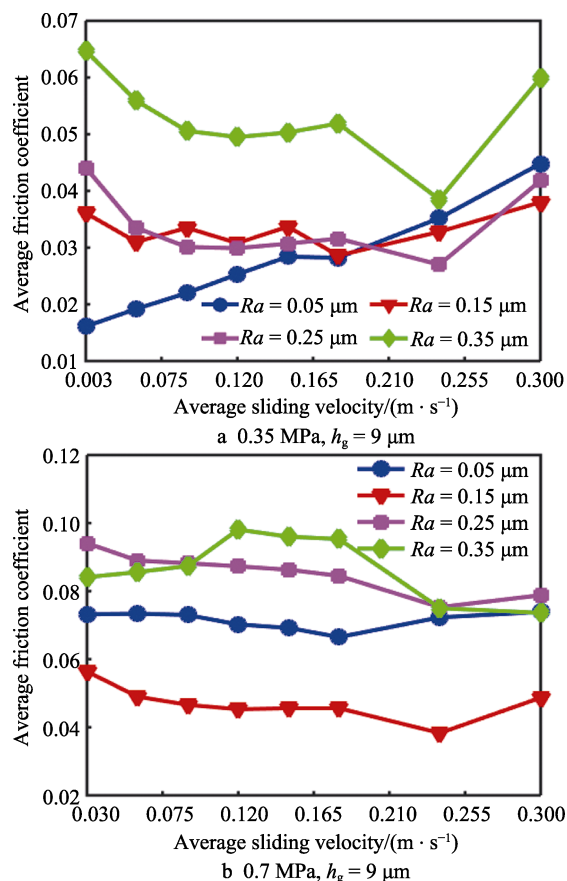


图 6 不同初始表面粗糙度条件下,摩擦系数随平均滑动速度的变化曲线

Fig.6 Change curve of friction coefficient along with average sliding velocity at various initial surface roughness

3 结论

1) 沟槽织构能够有效降低表面的摩擦系数,初

始表面粗糙度、载荷和速度的大小对沟槽织构的润滑减摩性能有较大影响。

2) 在初始表面粗糙度为 $0.05\ \mu\text{m}$ 的条件下, 当载荷为 $0.35\ \text{MPa}$ 时, 沟槽织构能有效提高表面的流体动压润滑效应, 较小的沟槽深度有利于增强流体动压润滑性能。当载荷为 $0.7\ \text{MPa}$ 时, 沟槽织构能够有效改善表面的边界润滑性能, 较大的沟槽深度有利于降低摩擦系数。

3) 在给定的工况条件下, 沟槽织构化表面的初始表面并非越光滑越好, 而是存在最优初始表面粗糙度值使得摩擦系数达到最小, 最优值的大小应根据载荷和速度大小来确定。

参考文献:

- [1] GROPPER D, WANG L, HARVEY T J. Hydrodynamic lubrication of textured surface: A review of modeling techniques and key findings[J]. *Tribology international*, 2016, 94: 509-529.
- [2] SUH M S, CHAE Y H, KIM S S, et al. Effect of geometrical parameters in micro-grooved crosshatch pattern under lubricated sliding friction[J]. *Tribology international*, 2010, 43: 1508-1517.
- [3] 于如飞, 陈渭. 表面织构化在工业摩擦学领域的研究现状与展望[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(3): 100-110.
YU Ru-fei, CHEN Wei. Research progress and prospect of surface texturing in industrial tribology[J]. *Journal of mechanical engineering*, 2017, 53(3): 100-110.
- [4] BLATTER A, MAILAT M, PIMENIV M, et al. Lubricated sliding performance of laser-pattered sapphire[J]. *Wear*, 1999, 232: 226-230.
- [5] SHI X, NI T. Effects of groove textures on fully lubricated sliding with cavitation[J]. *Tribology international*, 2011, 44: 2022-2028.
- [6] FU Yong-hong, JI Jing-hu, BI Qin-sheng. Hydrodynamic lubrication of conformal contacting surfaces with parabolic grooves[J]. *Journal of tribology*, 2012, 134: 11701-11709.
- [7] YUAN Si-huan, HUANG Wei, WANG Xiao-lei. Orientation effects of micro-grooves on sliding surfaces[J]. *Tribology international*, 2011, 44: 1047-1054.
- [8] KHALLADI A, ELLEUCH K. Effect of surface topography with different groove angles on tribological behavior of the wheel/rail contact using alternative machine[J]. *Friction*, 2016, 4(3): 238-248.
- [9] 陈平, 项欣, 李俊玲, 等. 沟槽型织构摩擦学性能的数值模拟与实验研究[J]. *材料工程*, 2016, 44(6): 31-37.
CHEN Ping, XIANG Xin, LI Jun-ling, et al. Experimental and numerical investigation on tribological performance of grooved texture[J]. *Journal of materials engineering*, 2016, 44(6): 31-37.
- [10] OGAWA H, SASAKI S, KORENAGA A, et al. Effects of surface texture size on the tribological properties of slideways[J]. *Proc IMechE Part J: Journal of engineering tribology*, 2010, 224: 885-890.
- [11] 徐鹏飞, 周飞, 王谦之, 等. 网纹型表面微结构对 Ti-6Al-4V 水润滑摩擦学特性的影响[J]. *摩擦学学报*, 2012, 32(4): 377-383.
XU Peng-fei, ZHOU Fei, WANG Qian-zhi, et al. Influence of meshwork pattern grooves on the tribological characteristics of Ti-6Al-4V alloy on water lubrication[J]. *Tribology*, 2012, 32(4): 377-383.
- [12] 阳江舟, 莫继良, 盖小红, 等. 制动盘材料表面织构化处理对摩擦噪声影响的试验分析[J]. *摩擦学学报*, 2015, 35(3): 322-327.
YANG Jiang-zhou, MO Ji-liang, GAI Xiao-hong, et al. Experimental study on the effects of groove-textured surface on the friction-induced noise of brake disc materials[J]. *Tribology*, 2015, 35(3): 322-327.
- [13] MOHAMAD S A, LU X Q, ZHENG Q. Effect of cylinder liner oil grooves shape on two-stroke marine diesel engine's piston ring friction force[J]. *Advances in mechanical engineering*, 2015, 7(2): 837960.
- [14] 马国亮, 姜亮, 黄巍, 等. 不同粗糙度条件下硅橡胶表面织构润滑特性的研究[J]. *西安交通大学学报*, 2010, 44(9): 87-92.
MA Guo-liang, JIANG Liang, HUANG W, et al. Lubrication properties of textured polydimethylsiloxane surfaces with different roughness[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2010, 44(9): 87-92.