

文章编号:1000-8055(2014)07-1591-07

doi:10.13224/j.cnki.jasp.2014.07.011

## 织构化配流副摩擦磨损性能试验

李 阳<sup>1</sup>, 邓海顺<sup>1,2</sup>, 王晓雷<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学 机电学院 江苏省精密与微细制造技术重点实验室, 南京 210016;

2. 安徽理工大学 机械工程学院, 安徽 淮南 232001)

**摘 要:** 为改善轴向柱塞泵配流副的摩擦磨损性能,采用光刻-电解工艺,对配流副进行织构化,在配流副摩擦磨损试验机上进行试验研究.结果表明:织构化配流副能够有效减小摩擦因数,平均磨损截面面积和表面粗糙度的变化值都小于无织构配流副,不同于无织构配流副形成了比较严重的黏着磨损,微凹坑直径为 100~300  $\mu\text{m}$  时磨损相对更小,配流副只产生磨粒磨损,此时平均磨损截面面积为无织构配流副试件的 4.54%~7.14%.摩擦因数和平均磨损截面面积间有着良好的相关性.

**关 键 词:** 摩擦因数; 磨损; 表面粗糙度; 配流副; 表面织构

中图分类号: V228; TH117

文献标志码: A

## Experiment on friction and wear performance of textured port plate pair

LI Yang<sup>1</sup>, DENG Hai-shun<sup>1,2</sup>, WANG Xiao-lei<sup>1</sup>

(1. Jiangsu Key Laboratory of Precision and Micro-Manufacturing Technology,

College of Mechanical and Electrical Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. College of Mechanical Engineering,

Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China)

**Abstract:** To improve the friction and wear performance of port plate pair of axial piston pump, textured port plate pair were obtained by lithography and electrolysis technique, and the tests were carried out on the port plate pair's friction and wear tester. The results show that the textured port plate pairs can effectively reduce the friction coefficient, and their average wear sectional area and surface roughness are much less than the untextured ones. More severe adhesive wear is formed on the untextured port plate pair and only more serious abrasive wear on the textured ones with diameter of micro-dimples ranging from 100  $\mu\text{m}$  to 300  $\mu\text{m}$ , whose average wear sectional area was 4.54%—7.14% of untextured ones. There exists a good correlation between friction coefficient and average wear surface sectional area.

**Key words:** friction coefficient; wear; surface roughness; port plate pair; surface texture

液压泵是液压传动的核心,也是液压传动系统的动力源.轴向柱塞泵作为最为重要的液压泵之一,在航空领域中,普遍用于飞机液压系统、操纵系统和航空发动机燃油系统中,是必不可少的

液压能源元件.随着液压泵向着高速、高压的方向发展,其摩擦副的黏着磨损和烧伤的现象也日渐严重,对液压泵的性能和质量提出了更高的要求;合理设计轴向柱塞泵的各种摩擦副,对于提高轴

收稿日期:2013-04-11

基金项目:国家自然科学基金(U1134003, 51175246)

作者简介:李阳(1989—),男,江苏苏州人,硕士,主要从事微纳米表面工程的研究.

向柱塞泵的寿命具有重要的意义。

轴向柱塞泵的工作原理如图 1 所示,工作时传动轴带动缸体旋转,与固定的配流盘形成了配流副。配流副是轴向柱塞泵中最容易磨损和失效的部件之一,它在运动过程中起着密封和配流的作用,同时承受着较大的载荷和一定的不平衡力矩,是决定轴向柱塞泵寿命的关键摩擦副<sup>[1]</sup>,因此,配流副的润滑特性和摩擦磨损性能一直都是国内外的研究热点。学者们通过对配流副材料表面的处理,如采用离子注入<sup>[2]</sup>和涂层<sup>[3-4]</sup>等技术来改善其摩擦学性能。此外也通过理论分析得到配流副的油膜厚度<sup>[5]</sup>、泄漏量<sup>[6]</sup>等变化规律及摩擦润滑特性<sup>[7]</sup>,从而进行结构参数优化。

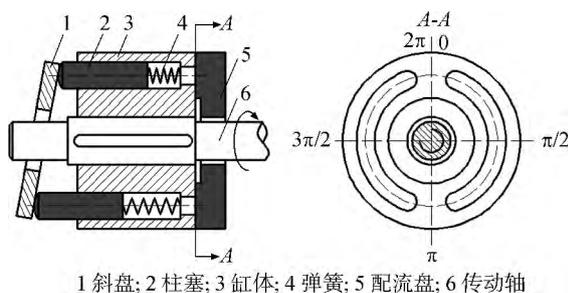


图 1 轴向柱塞泵工作原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of working principle of axial piston pump

近年来,表面织构技术以其优异的降低摩擦和提高承载力等特性<sup>[8-11]</sup>,已被证明是改善摩擦副表面摩擦学性能的一种有效手段,得到了广泛的关注和研究,并成功应用于发动机活塞环、缸套<sup>[12-13]</sup>、轴承<sup>[14-15]</sup>和机械密封<sup>[16]</sup>的相关摩擦副上。因此,将表面织构技术引入配流副是改善其摩擦学性能的新的技术手段。邓海顺等<sup>[17-18]</sup>对配流盘低压区织构化进行了数值分析和试验研究,研究表明:载荷较大时,织构减小摩擦的效果较为明显,最大减摩率为 29.11%,并且由于低压区流体动压效应的平衡作用,各个位置的磨损体积较为均匀。但是对织构化试件磨损的研究还不充分,有必要进行深入研究。

因此,本文将对配流盘整个表面进行织构化处理,采用试验的方法研究不同参数的表面织构对配流副摩擦磨损性能的影响。

## 1 试验方法

### 1.1 试验设备及试件制备

由于轴向柱塞泵配流副的工作原理区别于普通的摩擦副,本试验采用自制的配流副摩擦磨损

试验机来模拟配流副的实际工况,工作原理如图 2 所示。试验过程中,在配流副试件(下文简称试件)一侧通入高压液压油提供偏载力模拟实际工况条件,本试验中高压偏载压力固定为 0.6 MPa,加载力通过液压缸实现无级加载,上、下试件分别模拟缸体和配流盘,如图 3 所示。试验时在高压和载荷的共同作用下,上试件经由电动机带动旋转,下试件固定在转杯上,上、下试件相互运动产生的摩擦力矩通过与转杯相连的档杆传递至压力传感器,同时将摩擦力矩转换成摩擦因数进行实时采集。

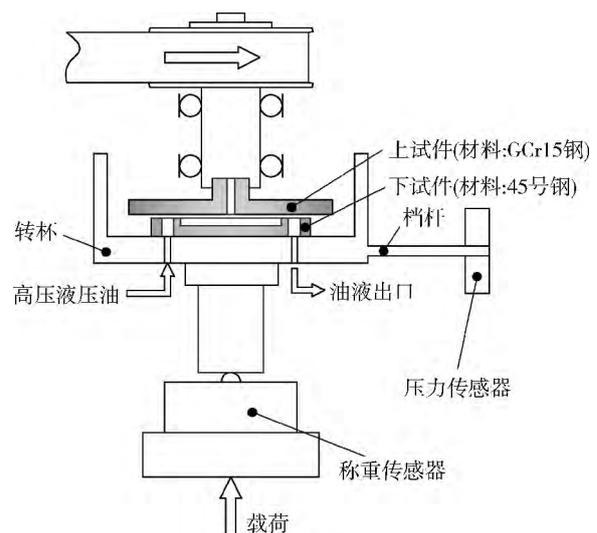


图 2 试验装置原理示意图

Fig. 2 Schematic of test apparatus

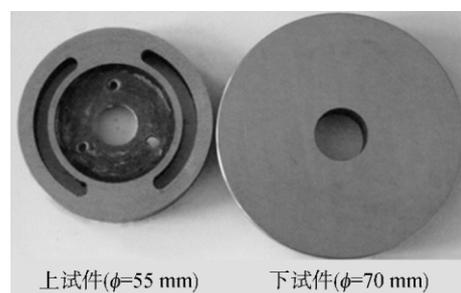


图 3 试件实物图

Fig. 3 Photograph of specimens

配流副一般采用软硬配合,以达到缓和冲击及获得可靠密封的目的,本试验分别选用 GCr15 钢及 45 号钢作为上、下试件的材料,下试件经过高温(800℃)淬火 15 min 后低温(200℃)回火 2 h,热处理后的洛氏硬度为 50 HRC。试验前试件经过相同工艺的研磨抛光处理后,表面粗糙度  $R_a = 60 \sim 70 \text{ nm}$ 。

试验中采用光刻-电解工艺在下试件表面加

工出不同参数的表面织构, 图 4 所示为加工织构的工艺流程及所加工织构的表面形貌.

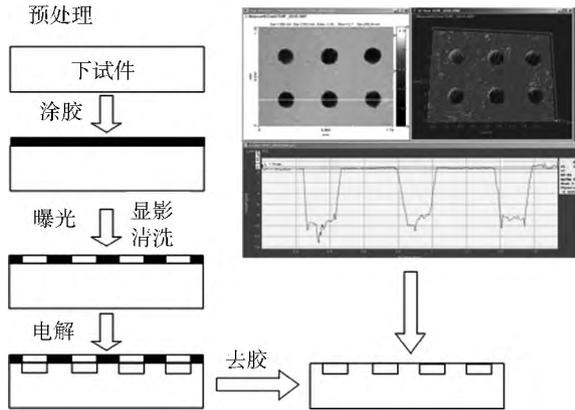


图 4 表面织构加工工艺流程及三维图

Fig. 4 Process of surface texture fabrication and three-dimensional profile

试验设计的表面织构参数如表 1 所示, 在相同的织构深度  $h$  下分别选取 4 种不同的微凹坑直径  $d$ , 每个微凹坑直径对应 4 个面积率  $r$ , 即 16 组组件.

表 1 表面织构的参数设计

Table 1 Parameters design of surface texture

$h/\mu\text{m}$	$d/\mu\text{m}$	$r/\%$
9~12	50, 100, 200, 300	5, 10, 15, 20

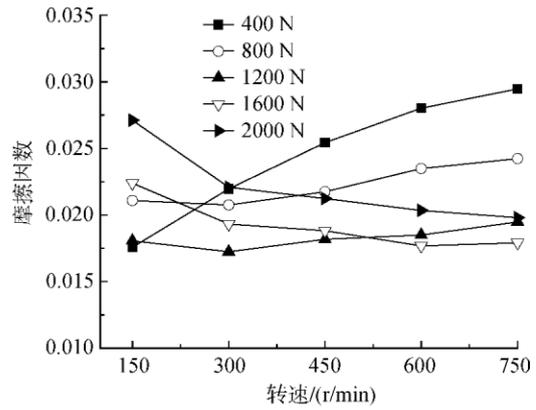
### 1.2 试验设计

试验前上、下试件均在丙酮中超声清洗 10 min, 并用氮气吹干. 试验均在室温下完成, 试验条件为: ①为了获得稳定的摩擦因数, 试件首先在低速轻载 (300 r/min, 600 N) 的条件下进行跑合, 时间为 30 min, 然后在不同的载荷及转速下进行试验, 上试件的转速选取为 150~750 r/min 之间的 5 种转速, 加载力从 400~2000 N 连续调节, 相对应的接触压力为 0.3624~1.812 MPa; 每组试验均重复 3 次, 试验结果取平均值作为该载荷及速度下的摩擦因数; ②为了研究表面织构对配流副摩擦磨损的影响, 在相同的低速轻载条件下跑合后, 固定载荷为 2000 N, 转速为 600 r/min, 试验时间为 14 h. 试验采用 NI(National Instruments) 公司的数据采集卡实时采集摩擦因数, 并分别采用型号为 NanoMap 500Ls 的三维接触式形貌仪和型号为 Hitachi S-3400NII 的扫描电子显微镜 (SEM) 分析磨损后的表面形貌.

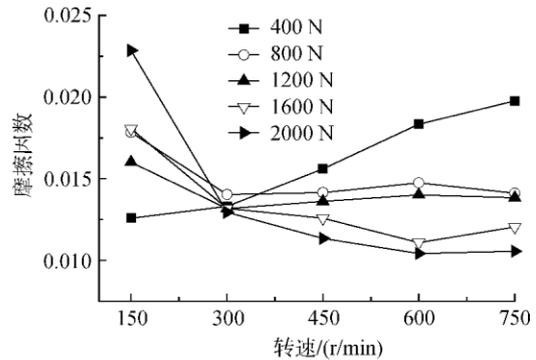
## 2 试验结果与分析

### 2.1 摩擦因数分析

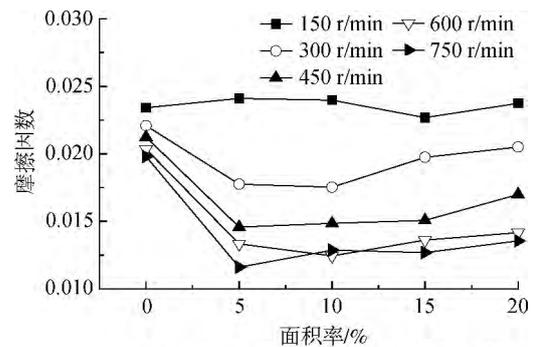
图 5 为结构化化和无织构试件在不同载荷和转速下摩擦因数的变化规律. 从图 5(a) 中无织构试件的变化规律可以看出: 载荷为 400 N 时, 无织构试件的摩擦因数随转速的增大而增大, 这是由于载荷较小时, 存在较为严重的端泄现象, 使试件间的油膜不稳定, 并且此时的油膜楔形角度较大, 使低压区的粗糙峰产生更多的直接接触. 当载荷为 800 N 和 1200 N 时, 无织构试件的端泄依然是影



(a) 无织构试件



(b)  $d=100\ \mu\text{m}$ ,  $r=10\%$  的结构化试件



(c)  $d=300\ \mu\text{m}$ , 载荷为 2000 N 的结构化试件

图 5 摩擦因数的变化规律

Fig. 5 Variation law of friction coefficient

响摩擦因数的主要因素. 图 5(b) 为  $d=100\ \mu\text{m}$ ,  $r=10\%$  的织构化试件摩擦因数的变化规律. 可以看出: 载荷为 800 N 和 1 200 N 时, 除低速 150 r/min 外, 摩擦因数整体呈现出比较平稳的趋势, 这是因为表面织构的存在, 形成了阻碍油液径向流动的“坝”, 从而减小了泄漏量.

图 5(c) 所示为载荷为 2000 N,  $d=300\ \mu\text{m}$  时, 摩擦因数随面积率和转速的变化规律, 可以看出, 转速为低速 150 r/min 时, 织构的减摩效果并不明显, 甚至出现了增大摩擦的情况. 随着转速的提高, 摩擦因数进一步减小, 此时的最小摩擦因数出现在转速为 750 r/min,  $d=300\ \mu\text{m}$ ,  $r=5\%$  时, 最大减摩率为 41.37%. 这是由于在试验中随着转速的增大, 更有利于形成连续的润滑油膜, 从而减小了上、下试件表面间粗糙峰的直接接触.

## 2.2 磨损分析

由于试验中磨损主要发生在上试件上, 为了定量分析上试件的磨损情况, 对上试件的磨损情况进行测量. 测量方法为: 在磨损区域均匀选取 4 个测量位置, 如图 6(a) 所示, 采用三维接触式形貌仪测量所选位置的截面轮廓, 通过计算 4 个区域的平均磨损截面面积来评价试件整体的磨损情况, 图 6(b) 为测得的单个区域磨损形貌图, 其中将未磨损表面作为基准, 通过三维接触式形貌仪配套的软件计算出基准平面下方截面轮廓的面积, 作为该区域的磨损量. 试验中将两组试验测得

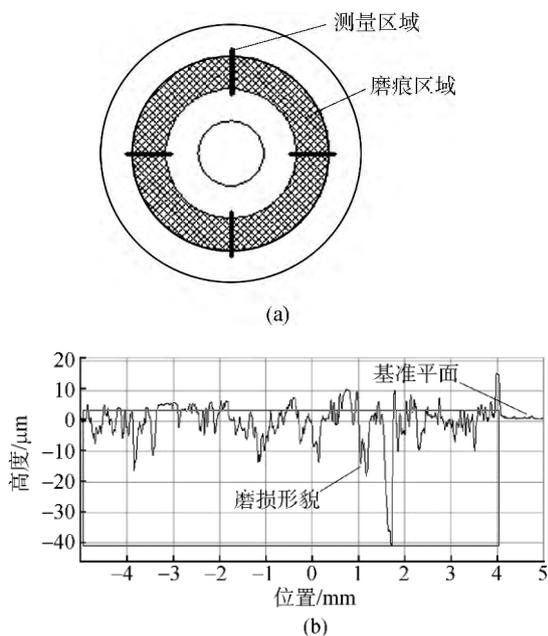


图 6 磨损测量区域及磨损形貌图

Fig. 6 Measure region and image of wear

的磨损量取平均值作为最终的评价指标.

图 7 所示为载荷为 2000 N, 转速为 600 r/min 时, 不同微凹坑直径和面积率的上试件的平均磨损截面面积. 图中虚线和点线图分别表示无织构和织构化试件的磨损量. 从图中可以看出, 织构化试件的平均磨损截面面积均小于无织构试件, 这表明表面织构的存在能减小上试件的磨损; 并且可以发现平均磨损截面面积受微凹坑直径的影响较大, 当  $d$  为 100~300  $\mu\text{m}$ , 试件表现出更好更稳定的减小磨损的效果, 此时的平均磨损截面面积仅约无织构试件的 4.54%~7.14%. 当  $d=300\ \mu\text{m}$ ,  $r=10\%$  时, 试验得到最小的平均磨损截面面积.

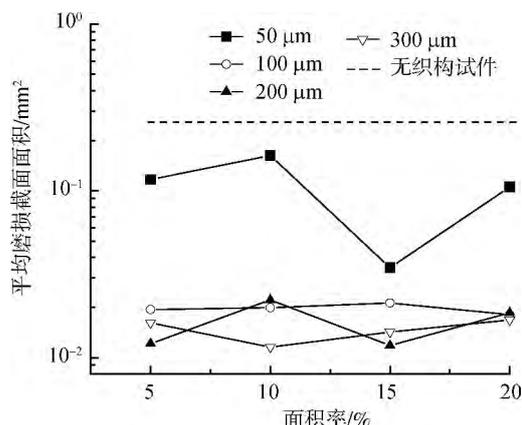
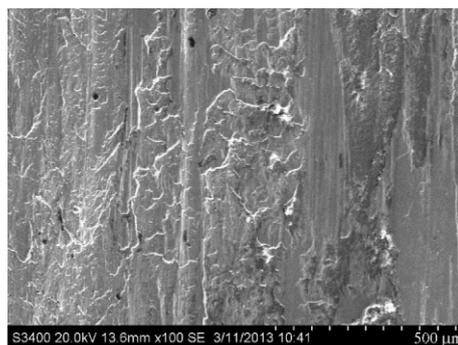


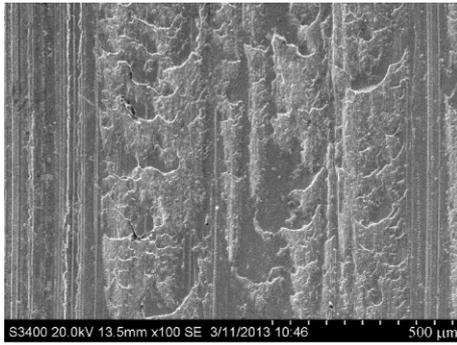
图 7 上试件平均磨损截面面积

Fig. 7 Average wear sectional area of upper specimens

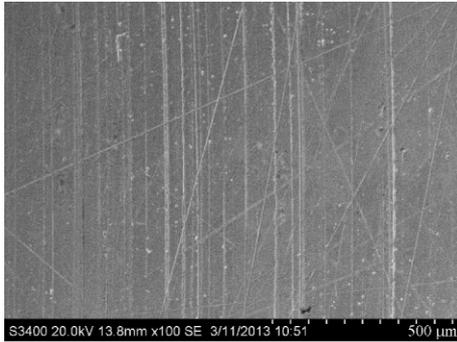
图 8 中给出了部分经过磨损试验的上试件磨损形貌的 SEM 照片. 从图中可以看出无织构上试件的磨损区域均表现为较为严重的黏着磨损, 这是由于试验过程中, 摩擦力做功所产生的高温及同时产生的磨屑聚集在配流副表面所引起的. 而  $d=50\ \mu\text{m}$ ,  $r=10\%$  的上试件表现为磨粒磨损和轻微的黏着磨损, 在相同面积率下,  $d=300\ \mu\text{m}$  时上试件只表现为由于犁沟作用所引



(a) 无织构上试件



(b)  $d=50\ \mu\text{m}$ ,  $r=10\%$  的结构化上试件



(c)  $d=300\ \mu\text{m}$ ,  $r=10\%$  的结构化上试件

图 8 上试件磨痕的 SEM 照片

Fig. 8 SEM micrographs of wear scars of upper specimens

起的磨粒磨损。

上试件的磨损分析表明: 表面织物的存在有效地减小了上试件的磨损, 并且磨损对微凹坑直径较为敏感. 从磨损形貌来说, 结构化试件避免了部分甚至全部黏着磨损, 在较大直径下只表现为轻微的磨粒磨损.

图 9 为上试件的摩擦系数和平均磨损截面面积间的关系. 其中柱状图和点线图分别表示平均磨损截面面积和摩擦系数与不同微凹坑直径或面积率的关系. 从图中可以看出在本试验条件下, 不同微凹坑直径或面积率下, 结构化试件均表现出明显地减小摩擦和磨损的效果, 并且可以发现, 摩擦和磨损之间存在良好的相关性, 较小的摩擦系数也表现出较小的磨损量.

由于下试件的外径小于上试件, 磨损后的下试件表面均有磨损, 无法取得基准作为平均磨损截面面积的测量基准, 试验中分析了磨损下试件的表面粗糙度作为下试件磨损情况的评价指标. 采用三维接触式形貌仪分别对无结构试件表面及结构化试件微凹坑之间的不同区域测量磨损试验后的表面粗糙度  $R_a$ , 测得的平均表面粗糙度如图 10 所示. 由图 10 可知,  $r=10\%$  时, 不同微凹坑直

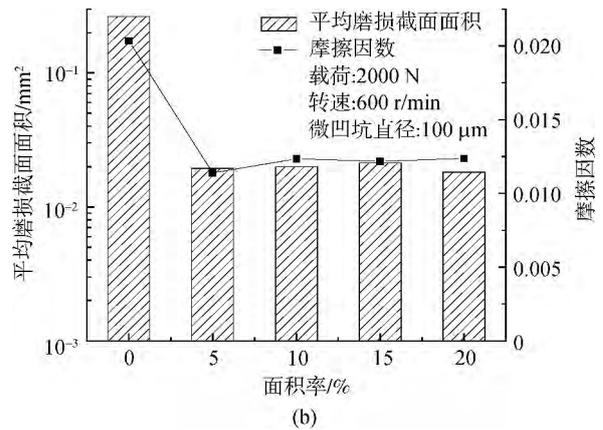
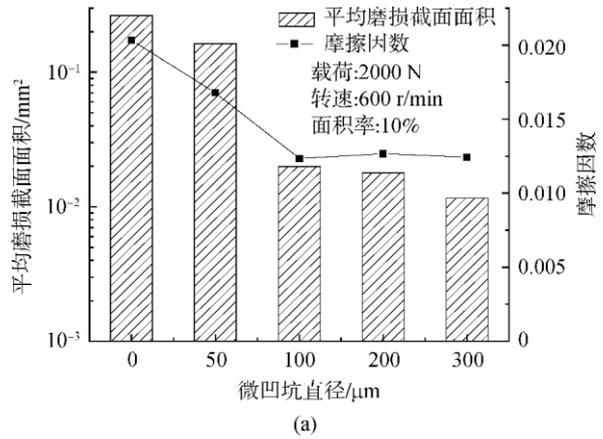


图 9 不同参数下摩擦系数和平均磨损截面面积的关系  
Fig. 9 Relationship between friction coefficient and average wear sectional area in different parameters

径的试件磨痕区的  $R_a$  分别为 257.5, 182.9, 140, 149.2, 133.7  $\mu\text{m}$ , 与试验前的试件相比, 表面粗糙度分别为试验前的 256.6%, 153.3%, 93.9%, 106.6% 和 85.2%, 可以看出结构化下试件的表面粗糙度远小于无结构试件, 表面粗糙度变化的最小值出现在  $d=300\ \mu\text{m}$ ,  $r=10\%$  时, 这也与上试件在相同参数时取得最小平均磨损截面面积相一致.

从图 11 中的部分下试件的 SEM 照片中也可以看出, 无结构试件同样形成了对应于上试件的黏着磨损, 而  $d=300\ \mu\text{m}$ ,  $r=10\%$  的结构化下试件的磨损表面明显变得平滑, 只有轻微的磨损. 并且可以发现, 沿运动方向的微凹坑间的表面比微凹坑两侧的表面更为平滑, 这是由于表面结构在摩擦过程中起到了捕获磨屑的作用. 同时, 由于表面结构产生的附加流体动压力减少了试件粗糙峰的直接接触, 改善了润滑条件, 从而减缓了摩擦热和磨屑的产生, 达到减小试件摩擦和磨损的效果.

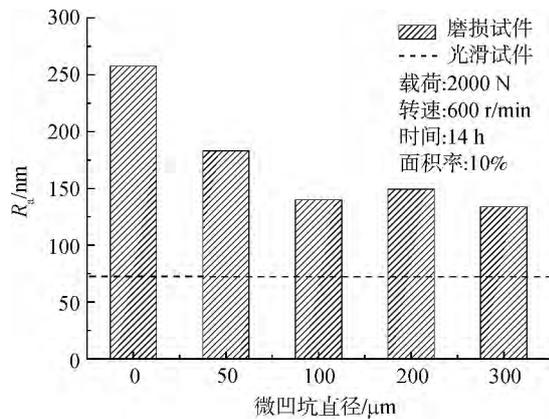
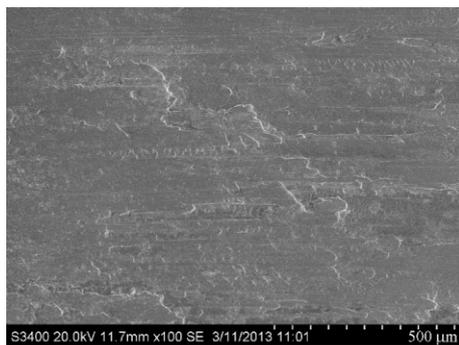
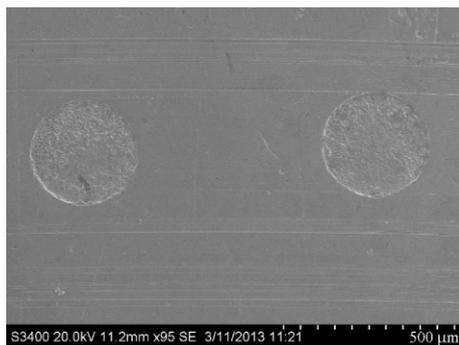


图 10 不同微凹坑直径下试件的表面粗糙度

Fig. 10 Surface roughness of lower specimens with different micro-dimples diameters



(a) 无结构下试件



(b)  $d=300\ \mu\text{m}$ ,  $r=10\%$  的织构化下试件

图 11 下试件磨痕的 SEM 照片

Fig. 11 SEM micrographs of wear scars of lower specimens

### 3 结 论

本文采用光刻-电解的加工技术在配流盘表面加工出微凹坑表面织构,对配流副的摩擦磨损性能进行了试验研究.试验结果表明:

1) 表面织构能有效地减小配流副的摩擦因数.载荷大于 1200 N 时,摩擦因数随速度的增大而减小.这是由于在高速时,表面织构的存在更有

利于润滑油膜的形成,有效减小了表面间粗糙峰的直接接触,甚至减少了黏着现象,从而减小了摩擦因数.

2) 织构化试件平均磨损截面面积和表面粗糙度均小于无织构试件.相比于无织构上试件的磨损区域出现较为严重的黏着磨损,微凹坑直径为 100~300  $\mu\text{m}$  时,仅表现为轻微的磨粒磨损,此时的平均磨损截面面积仅为无织构试件的 4.54%~7.14%.

3) 摩擦因数和平均磨损截面面积间存在良好的相关性,合理地减小摩擦因数有利于减小磨损.

### 参考文献:

- [1] 杨华勇,艾青林,周华.轴向柱塞泵配流副润滑特性的研究进展[J].中国机械工程,2004,15(17):1587-1593.  
YANG Huayong, AI Qinglin, ZHOU Hua. Development of lubrication of port plate/cylinder block in axial piston pump[J]. China Mechanical Engineering, 2004, 15(17): 1587-1593. (in Chinese)
- [2] 周元康,罗述洁,刘盛.  $\text{N}^+$  注入改性的 25Cr3MoA 材料在轴向柱塞泵配流盘上的应用研究[J]. 贵州工业大学学报:自然科学版,1998,27(5):50-54.  
ZHOU Yuankang, LUO Shujie, LIU Sheng. The applied research of 25Cr3MoA modified by  $\text{N}^+$  implantation in the valve plate of pump[J]. Journal of Guizhou University of Technology: Natural Science Edition, 1998, 27(5): 50-54. (in Chinese)
- [3] Lee S Y, Kim S D, Hong Y S. Application of the duplex TiN coatings to improve the tribological properties of electro hydrostatic actuator pump parts[J]. Surface and Coatings Technology, 2005, 193(1/2/3): 266-271.
- [4] Hong Y S, Lee S Y. A comparative study of Cr-X-N (X=Zr, Si) coatings for the improvement of the low-speed torque efficiency of a hydraulic piston pump[J]. Metals and Materials International, 2008, 14(1): 33-40.
- [5] 何必海,孙健国,叶志锋.燃油柱塞泵滑靴副和配流副油膜计算研究[J].航空动力学报,2010,25(6):1437-1442.  
HE Bihai, SUN Jianguo, YE Zhifeng. Calculation and analysis of film thickness for slipper pair and valve plate pair in fuel piston pump[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(6): 1437-1442. (in Chinese)
- [6] Bergada J M, Kumar S, Davies D L, et al. A complete analysis of axial piston pump leakage and output flow ripples[J]. Applied Mathematical Modelling, 2012, 36(4): 1731-1751.
- [7] 王彬.轴向柱塞泵平面配流副的润滑特性及其参数优化[D].杭州:浙江大学,2009.  
WANG Bin. Lubrication characteristics and parameter optimization of plane block-port plate pair in axial piston pump[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009. (in Chinese)
- [8] Hamilton D B, Walowit J A, Allen C M. A theory of lubri-

- cation by micro-irregularities[J]. *Journal of Basic Engineering*, 1966, 88(1): 177-185.
- [9] WANG Xiaolei, Kato K, Adachi K. The lubrication effect of micro-pits on parallel sliding faces of SiC in water[J]. *Tribology Transactions*, 2002, 45(3): 294-301.
- [10] ZHANG Bo, HUANG Wei, WANG Xiaolei. Biomimetic surface design for ultrahigh molecular weight polyethylene to improve the tribological properties[J]. *Journal of Engineering Tribology*, 2012, 226(8): 705-713.
- [11] Wakuda M, Yamauchi Y, Kanzaki S, et al. Effect of surface texturing on friction reduction between ceramic and steel materials under lubricated sliding contact[J]. *Wear*, 2003, 254(3/4): 356-363.
- [12] Bolander N W, Sadeghi F. Surface modification for piston ring and liner[R]. Netherlands: International Union of Theoretical and Applied Mechanics Symposium on Elastohydrodynamics and Micro-elastohydrodynamics, 2006.
- [13] Ogihara H, Kido T, Yamada H, et al. Technology for reducing engine rubbing resistance by means of surface improvement[J]. *Honda Research and Development Technical Review*, 2000, 12(2): 93-98.
- [14] Marian V G, Gabriel D, Knoll G, et al. Theoretical and experimental analysis of a laser textured thrust bearing[J]. *Tribology Letters*, 2011, 44(3): 335-343.
- [15] Etsion I, Halperin G, Brizmer V, et al. Experimental investigation of laser surface textured parallel thrust bearings[J]. *Tribology Letters*, 2004, 17(2): 295-300.
- [16] Etsion I. Improving tribological performance of mechanical components by laser surface texturing[J]. *Tribology Letters*, 2004, 17(4): 733-737.
- [17] 邓海顺, 于海武, 王晓雷. 轴向柱塞泵配流副低压区结构化试验研究[J]. *华中科技大学学报: 自然科学版*, 2012, 40(6): 16-19.  
DENG Haishun, YU Haiwu, WANG Xiaolei. Study on tribological performance of textured port plate of axial piston pump[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2012, 40(6): 16-19. (in Chinese)
- [18] 邓海顺, 祁胜, 于海武, 等. 轴向柱塞泵配流副低压区结构化数值分析[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(6): 203-207.  
DENG Haishun, QI Sheng, YU Haiwu, et al. Numerical analysis for textured port plate of axial piston pump[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(6): 203-207. (in Chinese)