

轴向柱塞泵配流副低压区织构化试验研究

邓海顺^{1,2} 于海武¹ 王晓雷¹

(1 南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016;

2 安徽理工大学机械工程学院, 安徽 淮南 232001)

摘要 为研究低压区织构化轴向柱塞泵配流副的摩擦磨损性能, 设计了配流副的摩擦磨损试验机, 对织构化配流副进行了试验研究, 并与无织构配流副的摩擦磨损情况进行对比. 研究表明: 低压区织构化的配流副能够有效减小摩擦系数, 最大减摩率可达 29.11%; 低压区织构化的配流副比无织构的平均磨损体积要小, 且整个摩擦面磨损较为均匀, 降低了配流副的偏磨. 初步磨损试验表明: 平均磨损体积量对表面织构面积率和直径较为敏感, 最小平均磨损体积量出现在微凹坑直径 100~200 μm 范围内.

关键词 柱塞泵; 配流副; 织构化; 摩擦系数; 磨损体积; 低压区

中图分类号 TH117 **文献标志码** A **文章编号** 1671-4512(2012)06-0016-04

Study on tribological performance of textured port plates of axial piston pumps

Deng Haishun^{1,2} Yu Haiwu¹ Wang Xiaolei¹

(1 College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2 Department of Mechanical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui China)

Abstract In order to investigate the friction and wear performance of port plate pair textured in the low pressure area, a kind of friction and wear testing machine for port plate pair was developed. Friction and wear of port plate pair with many different textured parameters were tested and compared to results of untextured port plate pair. The results show that the port plate pair which is textured in the low pressure area can effectively reduce the friction coefficient, the friction reduction ratio can reach 29.11% at max. Textured port plate pair's average wear volume is much less exposed to the untextured port plate pair. Untextured port plate pair reduces eccentric wear and has a more uniform wear surface. The elementary experiment shows that the average wear volume is sensitive to the area ratio and diameter of micro-pits, the minimum average wear occurs at the range of 100~200 μm .

Key words piston pump; port plate pair; textured; friction factor; wear volume; low pressure area

轴向柱塞泵作为液压系统的核心动力元件之一, 广泛应用于航空航天和工程机械中. 其工作原理和结构特点决定了配流副是轴向柱塞泵最为重要的摩擦副^[1], 国内外专家对此进行了大量研究, 通过理论分析得出配流副压力^[2]、泄漏量^[3]分布规律及摩擦润滑特性^[4], 并以此为基础进行数值计算^[5]和计算机仿真^[6], 优化配流副的结构参数, 通过对表面材料特性的改进如渗氮和镀层^[7]来改

善配流副的摩擦学性能. 但对如何减小配流副的不平衡力和改善配流副的受力状态仍缺少有效措施, 有深入研究的必要.

表面织构作为一种改善摩擦副表面摩擦磨损特性的技术手段, 已引起广泛关注. 对表面织构的加工手段^[8]、工作机理^[9]、数值计算^[10-11]和实验分析^[12-13]已有大量研究, 研究对象主要集中在发动机活塞环^[14]、机械密封^[15]和计算机硬盘^[16]上. 尽

收稿日期 2011-10-21.

作者简介 邓海顺(1978-), 男, 博士研究生, E-mail: B6232009@163.com.

基金项目 国家自然科学基金资助项目(51175246).

管摩擦副的运动方式有往返运动和平动, 润滑状态有富油和贫油, 研究结果有摩擦分析和磨损分析, 但研究对象所承受的负载力都是平衡的. 将表面织构技术应用于轴向柱塞泵配流副是一个全新构思. 本课题对轴向柱塞泵配流盘低压区进行织构化, 通过试验得出低压区织构化配流副摩擦磨损受微凹坑几何尺寸的影响规律, 并研究低压区织构化配流副的摩擦学性能.

1 试验设计

1.1 试验原理

根据轴向柱塞泵配流副的工作原理, 研制了一台偏载型摩擦磨损试验机, 如图 1 所示, 从下试件一侧通入高压液压油 (提供偏载力), 下试件另

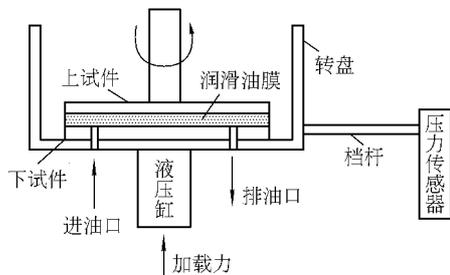
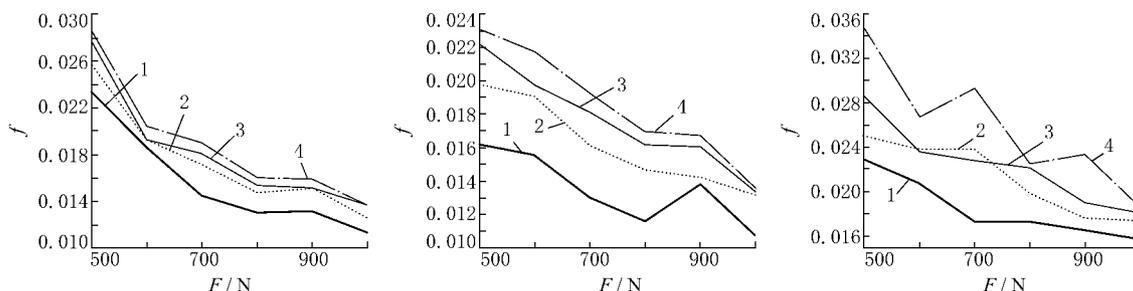


图 1 试验机工作原理示意图

一侧排出低压液压油, 导致摩擦副的两侧存在压力差, 实现偏载摩擦磨损试验, 试验中将偏载力固定在 0.5 MPa. 通过液压缸使上下试件压紧 (提供加载力), 偏载力和加载力都可以通过溢流阀进行无级调节, 上试件通过电动机带动相对下试件转动, 下试件和转盘固定在一起, 使档杆压在压力传感器上, 通过多功能数据采集卡实时采集数据, 通过计算机动态显示摩擦系数. 本文所涉及的摩擦系数均为在记录时间内的平均摩擦系数, 摩擦系



(a) 凹坑直径 100 μm , 凹坑深度 10 μm , 面积率 10% (b) 凹坑直径 300 μm , 凹坑深度 10 μm , 面积率 10% (c) 无织构
1—300 r/min; 2—450 r/min; 3—600 r/min; 4—750 r/min (下同).

图 2 摩擦系数随加载力的变化

下有最大的减摩率 27.03%.

图 3 为相同微凹坑深度 ($h = 10 \mu\text{m}$) 和加载

数测量时间为 2 min, 采样间隔为 10 ms.

1.2 试件制备

根据试验的要求, 设计了轴向柱塞泵配流副的上、下试件, 下试件模拟配流盘, 材料选择 45 # 钢, 经过高温 (800 $^{\circ}\text{C}$) 淬火后低温 (200 $^{\circ}\text{C}$) 回火而得, 硬度为 50HRC, 左右腰形槽分别用于进入高压液压油和排除低压液压油. 下试件经过磨床粗磨和精磨后, 用 14 #, 7 # 和 5 # 金相砂纸打磨后抛光, 采用光刻电解加工技术, 在低压区加工出有规律分布的圆柱形微凹坑阵列. 上试件模拟轴向柱塞泵缸体, 材料采用 GCr15 轴承钢, 硬度约为 61HRC, 表面处理过程与下试件类似. 试验前, 采用抛光垫分别对上、下试件进行抛光处理, 时间为 2 min, 以保证试件表面的光滑和清洁, 上、下试件的表面粗糙度均为 $S_a = 50 \sim 60 \text{ nm}$.

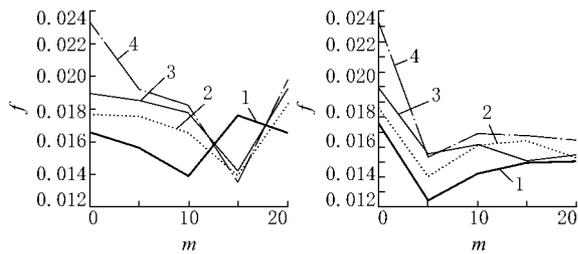
2 试验结果分析

2.1 摩擦系数分析

图 2 为低压区织构化和无织构配流副间的摩擦系数 f 在转速 300, 450, 600 和 750 r/min 下随加载力 F 的变化曲线. 由图可见: 当加载力较小时, 相对于无织构配流副, 摩擦系数变化不大, 减摩效果不明显; 当加载力逐渐变大时, 织构化配流副的减摩效果开始体现. 总体而言, 微凹坑直径在 100 μm , 面积率为 10%, 微凹坑深度为 10 μm 相对其他微凹坑参数有更好的减摩效果, 在 4 种转速和 6 种加载力下均体现出减摩效果. 当加载力为 500 N、转速为 300 r/min 时, 微凹坑直径为 300 μm 、面积率为 10% 的情况下有最大的减摩率 29.11%; 当加载力为 1 kN、转速为 750 r/min 时, 微凹坑直径为 300 μm 、面积率为 10% 的情况

力 ($F = 900 \text{ N}$) 的情况下不同微凹坑面积率 m 对配流副间摩擦系数 f 的影响曲线, 从图 3(a) 中发

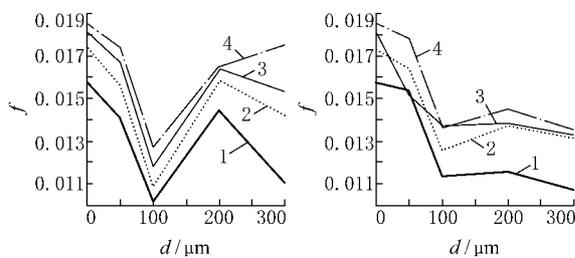
现:当面积率为 15% 时,除低速 300 r/min 外都表现出最小的摩擦系数;而在图 3(b)中可以发现当面积率为 5% 时,4 种速度下都表现出最好的摩擦系数.相比于图 3 中面积率为零(即无织构)的摩擦系数,面积率为 20% 时减摩效果不甚理想,微凹坑直径为 50 μm 时甚至出现增加摩擦系数的情况.



(a) 凹坑直径 50 μm (b) 凹坑直径 100 μm

图 3 摩擦系数随面积率的变化

图 4 为相同加载力($F=1$ kN)和相同微凹坑深度($h=10$ μm)、不同微凹坑直径 d 情况下,低压区织构化配流副间摩擦系数 f 的变化曲线.从图 4(a)中可以看出:当微凹坑直径为 100 μm 时,在 4 种转速条件下,低压区织构化配流副均体现出最小的摩擦系数;当微凹坑直径为 300 μm 时,配流副相对微凹坑直径 200 μm 又有了下降趋势,这是因为随着直径的增大,低压区的油膜支撑力也随之增大,此时摩擦力的增大可以认为是由于配流副低压区动压效果与偏载力相对平衡的结果.图 4(b)相对于图 4(a)而言,由于面积率的增大,使得配流副的平衡状态在较小微凹坑直径下的减压效果就体现出来.由此可见:低压区织构化配流副的减摩效果是由表面织构减摩机理和配流副受力状态共同决定的,在平衡状态下,表面织构的减摩效果体现得更明显和突出.



(a) 面积率 5% (b) 面积率 10%

图 4 摩擦系数随微凹坑直径的变化

2.2 磨损体积分析

为了研究低压区织构化配流副的磨损情况,将低压区织构化的配流副在低速轻载的情况下运行 1.5 h,进行初步磨合.然后将加载力固定在 1 kN,转速固定为 600 r/min,连续运行 4 h.为定量分析织构化对配流副的影响,取上试件进行测量,

以其磨损体积作为低压区织构化配流副磨损程度的衡量参数.测量方法如下:在上试件上沿圆周方向均匀取 4 个矩形区域,长宽比为 6 : 1,采用 MicroXAM 非接触式表面三维形貌仪测量矩形区域内的磨损体积,考察 4 个矩形区域各自的磨损体积及平均磨损体积,即可分析低压区织构化配流副的磨损情况.

表 1 为无织构和微凹坑直径为 200 μm、微凹坑深度为 10 μm 时各测量位置的磨损体积和平均磨损体积.从表中可见:无织构配流副的平均磨损量远远大于其他 4 种织构化配流副的平均磨损量,这说明低压区织构化的减小磨损的效果比较明显.试验设计时使下试件存在一定的自适应能力,导致上试件也出现了偏磨现象,可作为衡量低压区织构化配流副平衡状况的指标.从表中还可以看出:无织构和 4 种面积率下的最大磨损体积与最小磨损体积之差分别为: 5.288×10^{-13} , 0.486×10^{-13} , 2.009×10^{-13} , 2.093×10^{-13} 和 2.232×10^{-13} m³.可见当面积率为 15% 时,平均磨损体积最小,最大与最小磨损体积之差也较小,说明面积率为 15% 时具有较好的减小磨损的效果,同时织构的平衡作用也体现出来.

表 1 不同面积率下的磨损体积 10^{-13} m³

位置	无织构	m/%			
		5	10	15	20
1	9.52	1.47	1.77	1.73	4.25
2	7.98	1.96	2.60	1.09	2.69
3	4.93	1.48	1.37	3.18	2.01
4	4.23	1.68	3.38	1.12	3.06

图 5 为 4 种面积率下平均磨损体积 V 随微

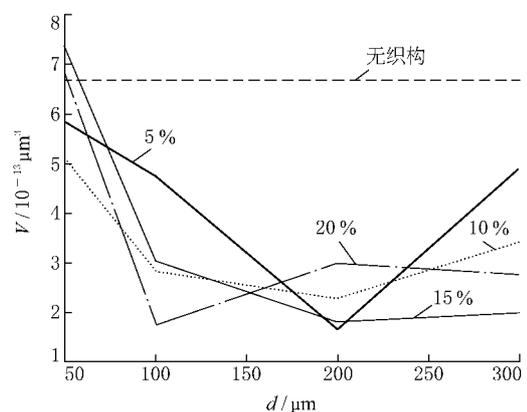


图 5 平均磨损体积与面积率的关系

凹坑直径 d 的变化情况,从图中可见:4 种面积率下的平均磨损体积都随面积率的上升而出现先下降后上升的现象.当面积率为 5%,10% 和 15%,微凹坑直径为 200 μm 时有着较小的平均磨损体积量;当面积率为 20%,微凹坑直径为 100 μm 时

有最小的平均磨损体积量;当微凹坑直径约100~200 μm 时有最小的平均磨损体积量;当微凹坑直径为 50 μm 时,面积率为 15%和 20%的点出现在无织构的标准线之上,已经不具备减小磨损的能力,这与前述的减摩效果一致,且当微凹坑直径为 50 μm 时,各种面积率下都不具备良好的减小磨损的效果.

3 结论

本研究对低压区织构化的配流副进行了摩擦学试验,对其摩擦磨损的行为进行了分析,得出如下结论.

a. 相对于无织构配流副,载荷较小时,减摩效果不是很明显,甚至有增大摩擦系数的趋势;当载荷较大时,织构的减摩效果较为明显,最大减摩率达到 29.11%. 不同织构参数对摩擦系数的影响不同,在相同面积率、速度和载荷的情况下,微凹坑直径 100 μm 相对于其他微凹坑体现出更好的减摩效果.

b. 低压区织构化配流副的减摩效果是由表面织构减摩机理和配流副受力状态共同决定的,在低压区织构化的动压效果与偏载力相对平衡时,表面织构的减摩效果体现得更为明显和突出,这是因为在平衡状态下,摩擦副之间的固体金属直接接触的机会大为减小.

c. 低压区织构化配流副相对于无织构的平均磨损体积要小,4 个测量位置磨损体积较为均匀,有减小配流副偏磨的作用. 平均磨损体积量对微凹坑的面积率和直径比较敏感,在相同试验条件下,微凹坑直径在 100~200 μm 范围有最小平均磨损量.

本研究取得了轴向柱塞泵配流副织构化试验的结果,为下一步更高偏载力的试验打下基础.

参 考 文 献

- [1] 李壮云,葛宜远. 液压元件与系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [2] Bergada J M, Watton J, Kumar S. Pressure, flow, force, and torque between the barrel and port plate in an axial piston pump[J]. Journal of Dynamic Systems Measurement, and Control, 2008, 130(1): 1011-1016.
- [3] Bergada J M, Kumar S, Davies D L. A complete analysis of axial piston pump leakage and output flow ripples[J]. Applied Mathematical Modelling, 2012, 36(04): 1731-1751.
- [4] 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: 浙江大学机械工程系, 2009.
- [5] Zloto T, Nagorka A. An efficient FEM for pressure analysis of oil film in a piston pump[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2009, 30(1): 49-61.
- [6] Kumar S, Bergada J, Watton J. Axial piston pump grooved slipper analysis by CFD simulation of three-dimensional NVS equation in cylindrical coordinates[J]. Computers and Fluids, 2009, 38(3): 648-663.
- [7] 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.
- [8] 符永宏,叶云霞,张永康. 用于显著改善摩擦副润滑状态的激光珩磨技术[J]. 机械工程学报, 2002, 38(8): 115-117.
- [9] Menezes P L, Kishore, Kailas S V. Influence of roughness parameters and surface texture on friction during sliding of pure lead over 080 M40 steel[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 43(7-8): 731-743.
- [10] 马晨波,朱华,孙见君. 考虑粗糙度影响的表面织构最优参数设计模型[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2011, 39(8): 15-18.
- [11] Yu H, Wang X, Zhou F. Geometric shape effects of surface texture on the generation of hydrodynamic pressure between conformal contacting surfaces[J]. Tribology Letters, 2010, 37(2): 123-130.
- [12] Wang X, Koji Kato, Koshi Adachi, 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.
- [13] 周吉,邵天敏. Cu 颗粒和条纹表面织构的协同作用对摩擦副摩擦磨损性能的影响[J]. 中国表面工程, 2009, 22(4): 20-26.
- [14] Ogihara H, Tomoyuki Kido, Hiroshi Yamada, et al. Technology for reducing engine rubbing resistance by means of surface improvement[J]. HONDA R&D Technical Review, 2000, 12(2): 93-98.
- [15] Etsion I. Improving tribological performance of mechanical components by laser surface texturing[J]. Tribology Letters, 2004, 17(4): 733-737.
- [16] Ranjan 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.