

轴向柱塞泵配流副低压区织构化数值分析*

邓海顺^{1,2} 祁胜¹ 于海武¹ 王晓雷¹

(1. 南京航空航天大学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, 淮南 232001)

【摘要】 针对轴向柱塞泵配流副受力不均匀、配流盘承受偏载力矩、低压区摩擦润滑效果差等问题, 提出对配流副低压区进行织构化。建立了配流副低压区织构化的分析模型。研究了微凹坑直径、深度、面积率对低压区的油膜承载力、补偿力矩的影响。结果表明: 较大直径的微凹坑提供较大的承载力和补偿力矩; 面积率的合适范围为12%~18%, 微凹坑的深度对承载力和补偿力矩影响较大。

关键词: 柱塞泵 配流副 表面织构 偏载力矩 补偿力矩

中图分类号: TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)06-0203-05

Numerical Analysis for Textured Port Plate of Axial Piston Pump

Deng Haishun^{1,2} Qi Sheng¹ Yu Haiwu¹ Wang Xiaolei¹

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

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

2. Department of Mechanical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract

In order to deal with the problems in axial piston pump such as uneven loading of port plate pair, offset load moment of port plate and bad lubrication of port plate pair in low pressure area, textured port plate in low pressure area was studied. An analysis model was established to study the effects of diameter, depth and area ratio of micro-dimple on load carrying capacity and compensating torque. The results showed that the micro-dimples with greater dimple diameter could induce higher load carrying capacity and compensation torque. The optimum dimple area ratio was in the range of 12%~18% and the dimple depth gave an obvious affection on load carrying capacity and compensation torque.

Key words Piston pump, Port plate pair, Surface texture, Offset load moment, Compensation torque

引言

配流副是轴向柱塞泵的一对关键摩擦副, 配流副工作状况的优劣是决定轴向柱塞泵质量优劣的关键。在当前轴向柱塞泵高压化、高速化的趋势下, 配流副也是比较容易失效的一对摩擦副。配流副在工作时受到多种因素影响, 其压力场、速度场和温度场的分布都十分复杂, 国内外学者围绕配流副的配流状况进行了多方面的研究^[1-3], 但都是对现有配流

副的工作情况和摩擦润滑规律进行研究, 对配流副的压力分布不均匀导致的偏载力矩存在, 以致引起偏磨、降低轴向柱塞泵的容积效率等问题尚未提出一个较好的解决措施。

表面织构技术, 是指在摩擦副表面加工出规律分布的微凹坑形状, 以达到提高油膜承载力、降低摩擦磨损、改善润滑状态的目的, 目前在机械密封和发动机活塞环上的应用已经被广泛研究^[4-11]。研究结果表明, 表面织构能减小配流副间的摩擦力, 降低

收稿日期: 2010-07-20 修回日期: 2010-09-04

* 国家自然科学基金资助项目(50675101)和江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(CX10B_093Z-05)

作者简介: 邓海顺, 博士生, 安徽理工大学讲师, 主要从事表面工程研究, E-mail: B6232009@163.com

通讯作者: 王晓雷, 教授, 主要从事摩擦学研究, E-mail: xl_wang@nuaa.edu.cn

配流副组件的磨损情况。本文拟将表面织构应用于配流副结构的研究。

1 低压区织构化

轴向柱塞泵配流副低压区织构化示意图如图 1 所示,轴向柱塞泵配流副中的缸体相对配流盘转动,转动角速度为 ω ,配流盘固定不动,缸体与配流盘的摩擦面为光滑平面,配流盘在低压区的外密封带、内密封带以及过渡区为具有规则微凹坑分布的表面,由此可以通过在低压区的表面织构来提高低压区液压油油膜的承载能力,使配流盘和缸体的受力更加均匀,产生的力矩可以部分地补偿高压区的偏载力矩(下面称之为补偿力矩),从而减小高压区的压紧力矩。同时,微凹坑结构能存蓄油液和沉淀油液中的金属杂质,避免配流副表面的刮伤和磨损,为低压区提供润滑油膜,改善低压区的摩擦润滑状态。假定 h_0 表示缸体与配流盘的间隙油膜厚度, r_0 为单个凹坑的半径, c_0 为凹坑深度, s 为凹坑面积率。

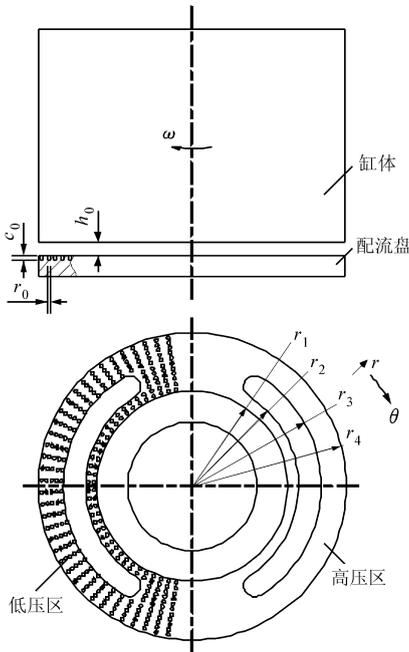


图 1 基于表面织构配流副示意图

Fig. 1 Schematic diagram of textured port plate pair

2 基于流体动压的数学模型

针对轴向柱塞泵配流副低压区织构化的设想,采用圆柱坐标形式的雷诺方程进行计算,即

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{r\rho h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\rho h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) = 12U_r \frac{\partial(\rho rh)}{\partial r} + 12U_\theta \frac{\partial(\rho h)}{\partial \theta} \quad (1)$$

其中 $U_r = 0$ $U_\theta = \frac{\omega r}{2}$

式中 ρ ——液压油密度, kg/m^3
 h ——液压油油膜厚度, μm
 p ——配流副压力, MPa
 r, θ ——配流副径向、周向坐标
 η ——液压油动力粘度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$
 U_r ——缸体径向速度, m/s
 U_θ ——缸体周向速度, m/s

对式(1)作如下假设:① 油液为普通抗磨液压油,不考虑其体积力和惯性力的影响。② 配流副处于全膜润滑状态,缸体和配流盘两表面被一层均匀液压油膜(h_0)分开。③ 配流副中的缸体和配流盘属于刚性体,始终保持平衡。④ 不考虑表面粗糙度的影响。将上述条件应用于式(1),可得

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(rh^3 \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) = 6\eta\omega r \frac{\partial h}{\partial \theta} \quad (2)$$

对式(2)进行无量纲化,令 $R = r/r_0, H = h/h_0, P = p/P_a$ 可得

$$\frac{\partial}{\partial R} \left(RH^3 \frac{\partial P}{\partial R} \right) + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(H^3 \frac{\partial P}{\partial \theta} \right) = \lambda R \frac{\partial H}{\partial \theta} \quad (3)$$

其中 $\lambda = \frac{6\omega\eta}{P_a} \left(\frac{r_0}{h_0} \right)^2$

式中 λ ——配流副的工况系数
 P_a ——大气压,为 0.101 325 MPa

2.1 有限差分法

为计算出配流副的油膜压力分布情况,采用五点差分格式离散式(3),如图 2 所示。即可得配流副计算域内任意点的液压油油膜压力方程式

$$P_{i,j} = \frac{AP_{i+1,j} + BP_{i-1,j} + CP_{i,j+1} + DP_{i,j-1} - E}{A + B + C + D} \quad (4)$$

其中 $A = \frac{R_{i+0.5} H_{i+0.5,j}^3}{\Delta R^2}$ $B = \frac{R_{i-0.5} H_{i-0.5,j}^3}{\Delta R^2}$

$$C = \frac{H_{i,j+0.5}^3}{R_i \Delta \theta^2} \quad D = \frac{H_{i,j-0.5}^3}{R_i \Delta \theta^2}$$

$$E = \frac{\lambda R_i (H_{i,j+0.5} - H_{i,j-0.5})}{\Delta \theta}$$

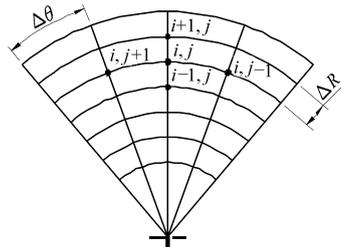


图 2 网格划分示意图

Fig. 2 Schematic diagram of mesh generation

2.2 边界条件

鉴于轴向柱塞泵配流副的特殊结构,将配流副分成 3 个区域:外密封带 I、过渡环形区域 II 和内密

封带 III 分别进行计算。如图 3 所示,采用如下边界条件:图 3 中粗线圆弧 a 、 b 、 c 、 d 为高压油口的边界,故取高压,其中粗线圆弧 a 、 c 在计算过程近似为直线,取高压油口压力;圆 1 和圆 4 在配流副工作时是油液泄漏的外边界,与外界大气压直接相通,故取低压,即为大气压。

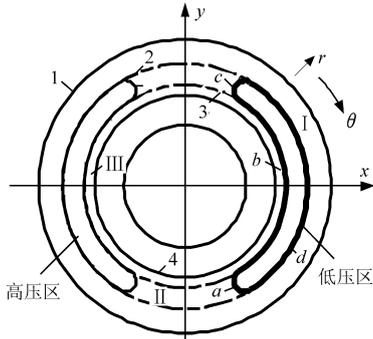


图 3 配流副的压力边界条件

Fig. 3 Pressure boundary conditions of port plate pair

由于配流副是圆形形状,可定周期性条件为

$$\begin{cases} P(i, 2\pi) = P(i, 0) \\ H(i, 2\pi) = H(i, 0) \end{cases} \quad (5)$$

液压油油膜的厚度为

$$H = \begin{cases} 1 & (X^2 + Y^2 > 1) \\ 1 + c_0/h_0 & (X^2 + Y^2 \leq 1) \end{cases} \quad (6)$$

式中 X 、 Y ——配流副计算区域任意点与结构凹坑圆心之间 x 轴、 y 轴方向的坐标差

2.3 承载力和偏载力矩

从图 3 中可以得出配流副关于 x 轴两侧的力基本对称,不存在偏载力矩,由于存在高压区和低压区, y 轴两侧的力是不对称的,存在一定的偏载力矩,如图 4 所示,根据由式(4)计算得出的无量纲压力分布,推导无量纲偏载力矩 T 和无量纲承载力 F

$$T = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0}^{\frac{m}{2}} P_{i,j} R_i^2 \sin\theta_j \Delta\theta \Delta R - \left| \sum_{i=1}^n \sum_{j=\frac{m}{2}}^m P_{i,j} R_i^2 \sin\theta_j \Delta\theta \Delta R \right| \quad (7)$$

$$F = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0}^{\frac{m}{2}} P_{i,j} R_i \Delta\theta \Delta R \quad (8)$$

3 数值分析与讨论

3.1 普通配流副油膜的压力分布分析

为突出表面织构对配流副摩擦润滑状态的影响,本文对普通配流副的油膜无量纲承载力和无量纲偏载力矩的分布情况进行了计算分析。计算参数如下:配流盘的内密封带半径 r_1 和 r_2 分别为 17 mm

和 19 mm,外密封带半径 r_3 和 r_4 分别为 23 mm 和 27.5 mm,液压油的密度 ρ 为 900 kg/m^3 ,液压油的动力粘度 μ 为 $0.025 \text{ Pa}\cdot\text{s}$,配流副间的间隙油膜厚度 h_0 为 $10 \text{ }\mu\text{m}$ 。

图 4 为普通配流副油膜无量纲压力分布图。从图中可见,配流副右边高压油口的压力远远高于左边的压力,故存在左右翻转的偏载力矩,需要较大的压紧力矩,否则易于产生偏磨,导致较大的泄漏量,对配流副的工作状况产生极为不利的影响。图 5 反映了进油口压力与配流副无量纲承载力的关系,可见随着配流副进油口压力的提高,油膜的承载力在增大,二者的关系近似呈线性关系。从图 5 还可以看出,普通配流副的无量纲偏载力矩也随着进油口压力的增大而增大,可见对于高压柱塞泵,由高压而引起的偏载力矩导致偏磨是配流副不能正常工作的重要原因之一。

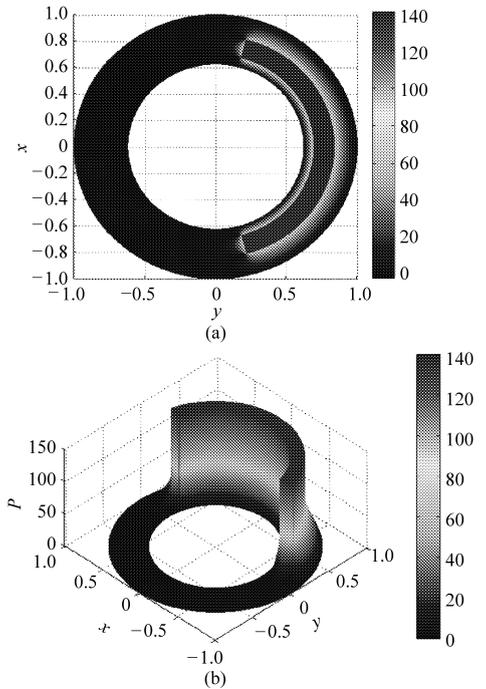


图 4 配流盘无量纲压力分布图

Fig. 4 Dimensionless pressure distribution map of port plate (a) 压力分布二维图 (b) 压力分布三维图

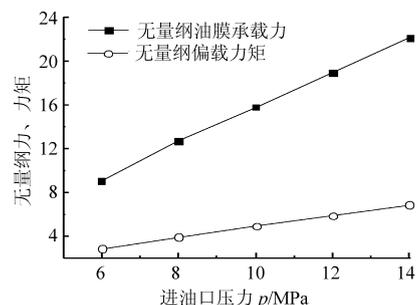


图 5 高压油口压力与油膜承载力、偏载力矩关系曲线
Fig. 5 Pressure, offset load moment for various inlet pressure

3.2 织构配流副的压力分布分析

为便于比较,本文采用相同的参数对织构配流盘进行了数值计算。图6为织构配流副的无量纲压力分布的二维图和三维图。从中可以发现,由于在低压区存在表面织构,可以形成动压效应,产生额外的油膜承载力,在低压区形成补偿力矩,平衡掉高压区的部分压力,从而有效地减小配流副的偏载力矩,可见只要设置合适的表面织构结构,如表面织构的面积率,微凹坑的直径大小和深度,以及表面织构微凹坑的分布规律,就能够找到最大的补偿力矩,最大程度的减小配流副偏载力矩。

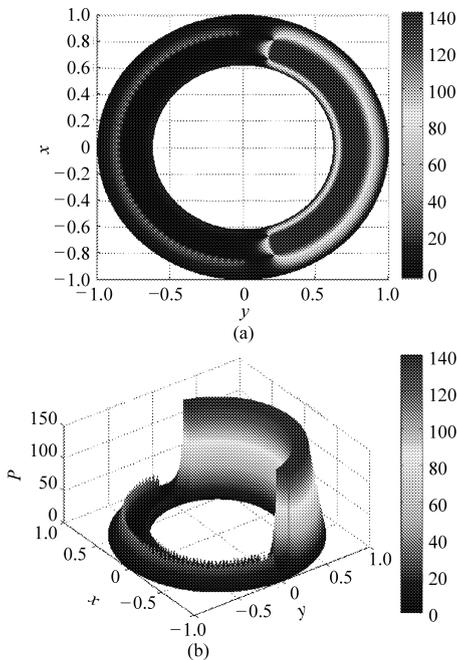


图6 织构配流副的无量纲压力分布

Fig.6 Dimensionless pressure distribution map of textured port plate pair

(a) 压力分布二维图 (b) 压力分布三维图

图7、8分别为面积率10%、转速1000 r/min时,无量纲承载力和无量纲补偿力矩随微凹坑深度变化的关系。可见,在微凹坑深度与油膜厚度相等时有最大的油膜承载力和无量纲补偿力矩,可以最大程度的抵消配流副本身存在的偏载力矩。在微凹

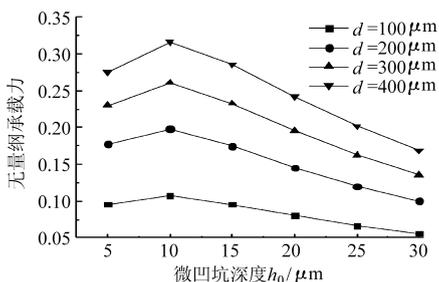


图7 无量纲承载力与微凹坑深度关系曲线

Fig.7 Relationship between dimensionless pressure and depth of micro-pits

坑深度大于油膜厚度时,随着微凹坑深度的增加,无量纲承载力和无量纲补偿力矩都随之减小。随着微凹坑直径的减小,无量纲承载力和无量纲补偿力矩都随之减小。

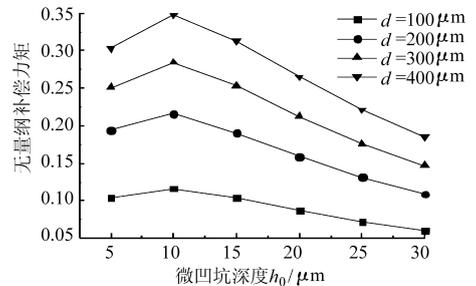


图8 无量纲补偿力矩与微凹坑深度关系曲线

Fig.8 Relationship between dimensionless compensation torque and depth of micro-pits

图9、10分别为转速1000 r/min时,直径为300 μm凹坑产生的无量纲承载力和无量纲补偿力矩随面积率的变化曲线。从图中可以看出,在不同微凹坑深度的情况,面积率对无量纲承载力和无量

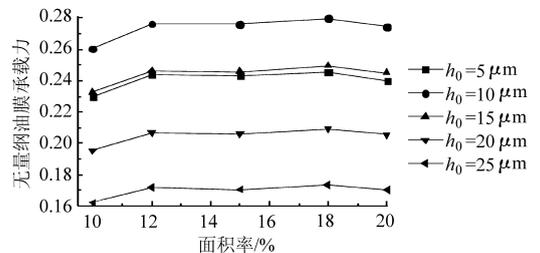


图9 无量纲承载力随面积率的变化曲线

Fig.9 Relationship between holding power and area ratio of micro-pits

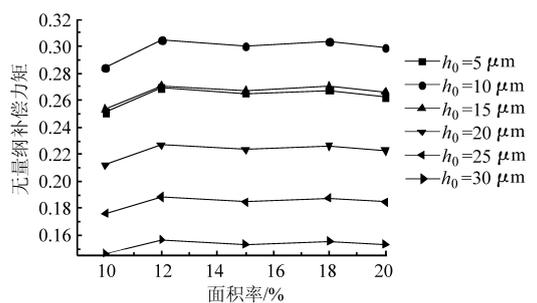


图10 无量纲补偿力矩随面积率的变化曲线

Fig.10 Relationship between compensation torque and area ratio of micro-pits

纲补偿力矩的影响情况大致相同,面积率在12%到18%之间产生的无量纲承载力和无量纲补偿力矩较大,在面积率小于12%和大于18%时,无量纲承载力和无量纲补偿力矩都有下降的趋势,同时,微凹坑深度对无量纲承载力影响较大,这和图7和图8的结果一致。通过计算还发现在微凹坑直径为100 μm、200 μm、400 μm也有类似的现象和结论。

4 结论

(1) 低压区被结构化了的轴向柱塞泵配流盘由于流体动压效应产生一定的油膜承载力,一定程度上能有效的抵消配流盘的偏载力矩,改善了配流盘和缸体的受力状况。

(2) 数值计算结果表明:轴向柱塞泵上大直径

的微凹坑提供较大的无量纲承载力和无量纲补偿力矩;微凹坑的面积率对无量纲承载力和无量纲补偿力矩也有一定影响,合适的选择范围在12%~18%之间;微凹坑深度对承载力和补偿力矩影响较大,在微凹坑深度和油膜厚度近似相等时,能最大程度地提高油膜承载力和补偿力矩。

参 考 文 献

- 艾青林,计时鸣,杨华勇. 阻尼槽型连续供油配流副润滑机理的数值模拟[J]. 农业机械学报, 2006,37(12):155~158.
Ai Qinglin, Ji Shiming, Yang Huayong. Numerical simulation on lubrication mechanism of damp groove type continuous oil supply port plate/cylinder block in axial piston pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006,37(12):155~158. (in Chinese)
- 王彬,周华,杨华勇. 轴向柱塞泵平面配流副润滑特征参数实时测量[J]. 农业机械学报, 2009,40(9):209~213,170.
Wang Bin, Zhou Hua, Yang Huayong. Real-time measurement on lubrication characteristic parameters of plane port pair in axial piston pumps[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(9):209~213,170. (in Chinese)
- 胡纪滨,邹云飞,李小金,等. 弹性变形对轴向柱塞泵配流副润滑特性的影响[J]. 农业工程学报, 2009,25(12):114~117.
Hu Jibin, Zou Yunfei, Li Xiaojin, et al. Influence of elastic deformation on lubricating characteristics of port plate pair of axial piston pump[J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(12):114~117. (in Chinese)
- Wang X, 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.
- Wang X L, Koji K, Koshi A, 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.
- 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 Haiwu, Wang Xiaolei, 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. (in Chinese)
- Etsion I. Improving tribological performance of mechanical components by laser surface texturing[J]. Tribology Letters, 2004,17(4): 733~737.
- Etsion I, Sher E. Improving fuel efficiency with laser surface textured piston rings[J]. Tribology International, 2009,42(4): 542~547.
- 刘红彬,孟永钢. 基于区域分解法的纹理表面流体润滑分析——纹理分布模式的影响[J]. 摩擦学学报, 2007, 27(6):555~560.
Liu Hongbin, Meng Yonggang. Hydrodynamic lubrication analysis of textured surfaces with the domain decomposition method-effect of texture distribution patterns [J]. Tribology, 2007,27(6):555~560. (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): 94~102.
Li Jianquan, Zhu Hua. Surface texture and its influence on tribological properties [J]. Lubrication Engineering, 2009, 34(2):94~102. (in Chinese)
- 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.
Zhou Ji, Shao Tianmin. Influence of synergistic effect of Cu particles and striated surface texture on tribological properties [J]. China Surface Engineering, 2009,22(4):20~26. (in Chinese)