

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2015.03.005

# 4种表面微观结构推力轴承的承载特性研究

熊勇刚, 杨加佳

(湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 设计了凹圆、凸圆、凹条、凸条4种典型的表面微观结构, 并采用有限元方法对这4种表面微观结构推力轴承在液体中的承载特性进行了研究, 分析了各表面微观结构轴承在不同轴承间隙、转速和液膜黏度等工况条件下对承载力的影响规律。结果表明: 4种表面微观结构轴承在液体润滑条件下均能产生承载力, 不同微观结构轴承在相同工况条件下承载力大小不同, 推力轴承的承载力随轴承间隙的增大而逐渐降低, 随轴承角速度的增大而增大, 随润滑液液膜黏度的增加而增大; 凸形微观结构推力轴承的承载力受轴承间隙、转速和液膜黏度的影响较大, 而凹形微观结构推力轴承的承载力受以上因素的影响较小。

**关键词:** 推力轴承; 微观结构; 凹圆; 凸圆; 凹条; 凸条

中图分类号: TH117

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2015)03-0025-05

## Research on Bearing Behavior of Thrust Bearings with Four Surface Microstructures

Xiong Yonggang, Yang Jiajia

(School of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** Surface microstructures including pits, gibbosity, groove and ridge were designed. Finite element analysis was used to study the bearing behavior of thrust bearing with different surface microstructures in liquids. And the effects of surface microstructures on bearing capacities were analyzed under different bearing clearance, angular velocity and liquid film viscosity. The results indicated that the bearings with four surface microstructures could generate bearing capacity under liquid lubrication condition, and the bearing capacity was different for bearings with different surface microstructures under same working condition. The bearing capacity of thrust bearing gradually decreased with the increase of bearing clearance, increased with the increase of angular velocity and the increase of lubricant film viscosity; The bearing clearance, rotational speed and the viscosity of liquid film had large influence on the bearing capacity of convex microstructure thrust bearing and had little influence on the bearing capacity of concave microstructure thrust bearing.

**Keywords:** thrust bearing; microstructure; pits; gibbosity; groove; ridge

## 0 引言

良好的承载能力和高速的运转能力是机械设备

的必备条件, 这就要求机械的零部件间相对滑动表面应具有良好的润滑性能。相对滑动的表面不可避免地会出现摩擦磨损情况, 从而影响其润滑性, 这

收稿日期: 2015-03-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51345005), 湖南省自然科学基金资助项目(09JJ6074), 江苏省博士后基金资助项目(1202003B)

作者简介: 熊勇刚(1966-), 男, 湖南益阳人, 湖南工业大学教授, 博士, 主要从事机械设计及理论方面的教学与研究,  
E-mail: xygyxj@163.com

一现象已引起了国内外相关学者的重视。因此，控制摩擦、减小磨损、改善润滑性能，对提高机械产品性能、延长机械设备的使用寿命和增加运行可靠性有着重要作用。

改善机械的摩擦学特性，可以从改变摩擦面之间的润滑介质、改变摩擦副表面的材料和表面微观结构等方面进行研究。其中，加工特定的表面微观结构可以改善摩擦副的摩擦学特性，从而提高机械的承载能力，降低其摩擦磨损，提高产品的可靠性，延长产品的使用寿命<sup>[1-2]</sup>。目前，该项技术在推力轴承<sup>[3]</sup>、活塞环<sup>[4]</sup>、机械密封<sup>[5-6]</sup>、汽缸垫珩磨中<sup>[7-8]</sup>以及磁储存器装置表面<sup>[9-11]</sup>等方面已有了大量研究。

仿生学的发展为表面微观结构的设计提供了丰富的理论和设计素材。根据生物体表具有几何非光滑结构单元的特征，可以把生物表面的微观结构主要分为凹圆形、凸圆形、波纹形等多种形态<sup>[12]</sup>。这些形态特征使生物体表具有优良的抗摩擦、磨损的性能。已有研究表明，这些微观结构可以在不同程度上影响摩擦副的摩擦性能和润滑性能。实验表明，某些微观结构可以提高结构的承载能力，提高摩擦副间的润滑性能<sup>[13-18]</sup>。

本研究拟以推力轴承一对配合环为研究对象，设计凹圆、凸圆、凹条、凸条4种典型的表面微观结构，并建立几何模型，采用有限元方法，从数值模拟角度出发，研究其对流体润滑的影响，以期为轴承表面设计提供一定的理论指导。

### 1 微观结构模型的建立

本文设计的凹圆、凸圆、凹条、凸条4种表面微观结构的样式，如图1所示。

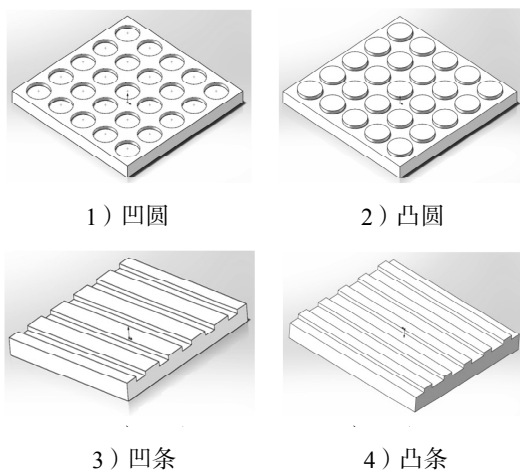


图1 4种表面微观结构示意图

Fig.1 Schematics of four surface microstructures

根据所建立的4种表面微观结构的样式，可以建

立用于润滑计算的表面微观结构几何轮廓的数学模型。

对于凹圆和凹条形式的微观结构，其数学模型的表达式为：

$$h(x,y) = \begin{cases} h_0 + h_p, & (x,y) \in \text{微观结构区}; \\ h_0, & (x,y) \in \text{其他区}. \end{cases} \quad (1)$$

对于凸圆和凸条形式的微观结构，其数学模型的表达式为：

$$h(x,y) = \begin{cases} h_0 - h_p, & (x,y) \in \text{微观结构区}; \\ h_0, & (x,y) \in \text{其他区}. \end{cases} \quad (2)$$

式(1)和式(2)中：

$h_0$  为接触面的间隙或膜厚；

$h_p$  为微观结构的深度或高度。

本文采用有限元方法，对凹圆、凸圆、凹条、凸条4种微观结构分别建立有限元的几何模型。采用 Reynolds 方程作为基本控制方程<sup>[19]</sup>：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\rho h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\rho h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 6 \left[ \rho(u_0 - u_h) \frac{\partial h}{\partial x} + \rho(v_0 - v_h) \frac{\partial h}{\partial y} + h \left( \frac{\partial}{\partial x} \rho U + \frac{\partial}{\partial y} \rho V \right) + 2\rho(w_h - w_0) \right] \quad (3)$$

其中，控制方程的左边表示润滑膜压力变化的情况，其右边表示压力产生的各种效应。

为了研究凹圆、凸圆、凹条、凸条4种形式表面的微观结构在推力轴承上产生的动压效果及其对承载力的影响，需要对4种仿生表面的微观结构进行相同的区域划分，即把轴承表面沿径向向放射状分布的微观结构进行区域划分，取一小段轴承端面上的扇形区域作为研究对象，具体如图2所示。

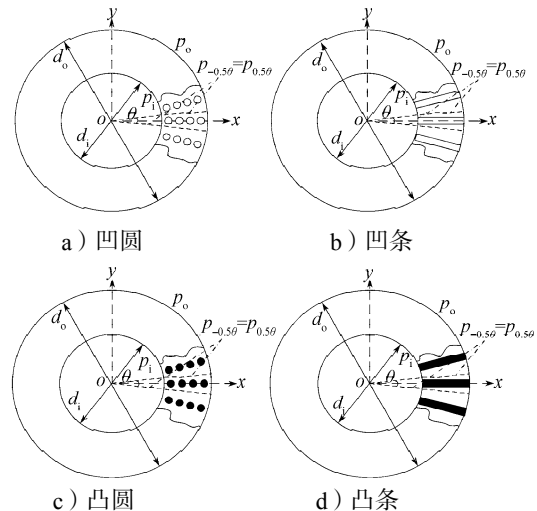


图2 轴承端面4种微观结构分布图

Fig.2 The distribution of four microstructures on end face of bearing

利用控制方程(3)对4种形式表面微观结构扇形区域的润滑性能进行数值求解。采用三角形网格进行自由划分。同时,为了使计算模拟的结果更加精确,在仿生表面微观结构的区域采用密网格进行划分,在没有表面微观结构的区域采用疏网格进行划分,具体划分方式如图3所示。

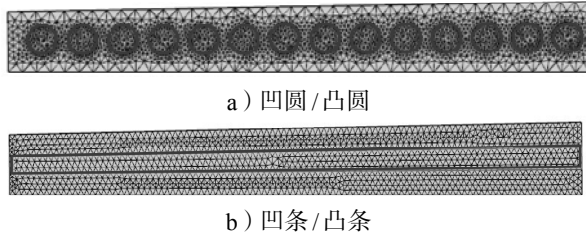


图3 扇形润滑区域有限元划分示意图

Fig. 3 FEM division diagram for sector lubricating area

## 2 模拟软件和参数设定

### 2.1 软件介绍

为了便于对微观结构的形貌参数进行建模、预测及优化,要求所选用的软件或程序能够实现自动化的参数建模及网格的自动划分。由于研究推力轴承端面微观结构在液体润滑条件下的作用效果时,需要采用空化的Reynolds边界条件,而该边界条件无法在单一的商业软件中实现,必须根据需要对软件进行二次开发。根据这些要求,经过详细筛选,采用COMSOL Multiphysics商业软件中的COMSOL with MATLAB平台进行数值模拟。该软件是在MATLAB有限元分析工具包基础上发展而来的,所以除了图形用户界面(graphical user interface, GUI)外,所有功能模块均提供了函数接口(application programming interface, API),在MATLAB中可以直接调用,便于与COMSOL进行联合计算求解。

### 2.2 边界条件和收敛条件的设定

研究对象如图2所示,因为它是在整个环形区域中抽取一小段轴承端面扇形进行研究,所以对于沿圆周方向的边界条件为:

$$p_{-0.5\theta} = p_{0.5\theta} \quad (4)$$

同时,因为轴承内外径的压力都为大气压力,所以有:

$$p_o = p_i = p_a \quad (5)$$

式中 $p_a$ 为大气压力。

根据摩擦学的理论可知,空化是微观结构动压效应产生承载力的主要原因。本研究采用Reynolds边界条件,该边界条件计算方便,效率较高,在工程上的使用较为普遍。

进行数值分析时,为了得到数值分析的精确结

果,必须对数值解法的收敛条件进行相关设定,根据需要的模型,设定收敛条件如下:

$$\frac{\sum |p_2 - p_1|}{\sum p_2} \leq 10^{-6} \quad (6)$$

式中: $p_2$ 为本次迭代的压力值;

$p_1$ 为上一次迭代的压力值。

根据多次计算分析发现,收敛精度取为 $10^{-6}$ 时,已经可以满足计算分析要求。

在求解过程中,除即将讨论的参数外,轴承表面4种微观结构的参数和轴承运行的参数设定如下:

a) 轴承外直径 $d_o$ ,  $d_o=25.4$  mm;

b) 轴承内直径 $d_i$ ,  $d_i=21$  mm;

c) 凹圆的面密度 $S_p$ ,  $S_p=20\%$ ;

d) 凹圆/凹条的深度或凸圆/凸条的高度 $h_p$ ,  $h_p=0.5$   $\mu\text{m}$ ;

e) 空化压力 $p_a$ ,  $p_a=0.09$  MPa;

f) 流体黏度 $\mu$ ,  $\mu=0.001$  Pa $\cdot$ s;

g) 旋转环的角速度 $\omega$ ,  $\omega=3\ 000$  r/min;

h) 最小液膜厚度 $h_o$ ,  $h_o=1$   $\mu\text{m}$ 。

## 3 仿生表面微观结构承载力对比分析

### 3.1 轴承间隙对承载力的影响

图4所示为4种不同微观结构轴承的间隙变化对承载力的影响规律。

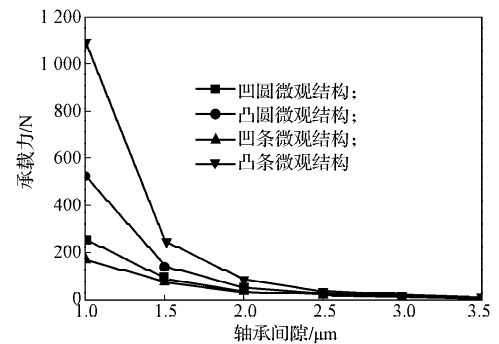


图4 不同微观结构轴承的间隙变化对承载力的影响

Fig. 4 Influence of the bearing clearance on loading-capacity of bearings with different microstructures

由图4可以看出,4种不同微观结构推力轴承的承载力随着轴承间隙的增大而逐渐降低,最后趋于平缓;对于不同的表面微观结构,其承载力降低的速率有所不同。凸形表面微观结构轴承的承载力降低速率比凹形微观结构的快。由此可知,凹形表面微观结构产生的承载力的稳定性要优于凸形表面微观结构的。当推力轴承间隙较大时,4种微观结构轴承的承载力均很小,且相差不大;当推力轴承间隙较小时,如轴承间隙为1  $\mu\text{m}$ 时,凸形微观结构能够

产生的承载力远大于凹形微观结构的承载力。通过计算可以得出，当轴承间隙小于  $2.0\ \mu\text{m}$  时，轴承承载力的大小关系为：凸条>凸圆>凹圆>凹条。

### 3.2 轴承转速对承载力的影响

推力轴承的角速度对轴承承载力也有重要影响，图 5 展示了 4 种不同微观结构轴承的转速变化对承载力的影响规律。

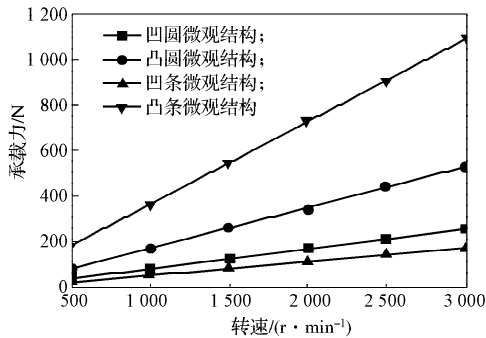


图5 不同微观结构轴承的转速变化对承载力的影响  
Fig. 5 Influence of the rotation speed on loading-capacity of bearings with different microstructure

从图 5 中可以看出，4 种不同微观结构推力轴承的承载力随着轴承转速的增大而增大。在相同的转速条件下，凸条表面微观结构轴承的承载力最大，而凹条表面微观结构轴承的承载力最小，且凸圆表面微观结构轴承的承载力高于凹圆表面微观结构轴承的承载力。

随着转速的增加，不同的表面微观结构轴承的承载力增加速率不同。由图 5 可知，随着转速的增大，凸形表面微观结构轴承的承载力增加较快，而凹形表面微观结构的承载力增加较慢。4 种不同微观结构推力轴承承载力的增加幅度大小为：凸条>凸圆>凹圆>凹条。

### 3.3 润滑油液膜黏度对承载力的影响

轴承间隙润滑油液膜黏度对推力轴承的承载力也有一定的影响，图 6 所示为实验所得润滑油液膜黏度对 4 种不同微观结构推力轴承承载力的影响结果。

由图 6 可以看出，4 种不同微观结构推力轴承的承载力随着轴承间隙润滑油液膜黏度的增加而增大。在相同的液膜黏度条件下，凸条微观结构轴承的承载力最大，而凹条微观结构轴承的承载力最小，且凸圆微观结构轴承的承载力高于凹圆微观结构轴承的承载力。

由图 6 还可以得知，随着轴承间隙润滑油液膜黏度的增加，不同的表面微观结构轴承的承载力增加速率有所不同。随着液膜黏度的增加，凸形表面微观结构的承载力增加较快，而凹形表面微观结构的承载力增加较慢。4 种不同微观结构推力轴承承

载力的增加程度大小为：凸条>凸圆>凹圆>凹条。

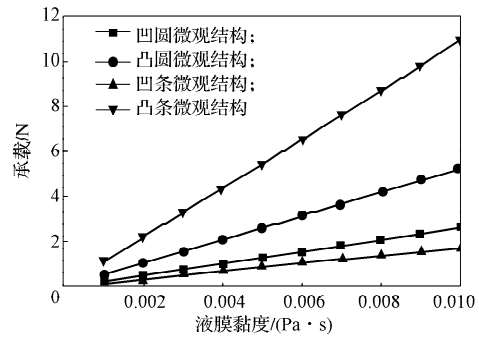


图6 不同微观结构轴承间隙的润滑油黏度变化对承载力的影响

Fig. 6 Influence of the liquid viscosity on loading-capacity of bearings with different microstructures

从以上 4 种（凹圆、凸圆、凹条、凸条）表面微观结构在轴承间隙、主轴转速、液膜黏度变化时对推力轴承承载力的影响规律可知，不同表面微观结构对轴承的承载力改变有着重要影响。凸形微观结构推力轴承的承载力受轴承间隙、转速和液膜黏度的影响较大，而凹形微观结构推力轴承的承载力受以上因素的影响较小，表明凹形表面微观结构的推力轴承稳定性较高。在相同工况条件下，凸形微观结构轴承的承载力高于凹形微观结构的承载力。

## 4 结论

本文采用有限元方法，对 4 种表面微观结构（凹圆、凸圆、凹条、凸条）推力轴承在液体中的润滑效果进行了研究，分析了不同微观结构轴承的承载力在不同工况条件下的变化规律，结果表明：

- 1) 凸形微观结构推力轴承的承载力受轴承间隙、转速和液膜黏度的影响较大，而凹形微观结构推力轴承的承载力受以上因素的影响较小，从而表明凹形表面微观结构的推力轴承稳定性较高。
- 2) 推力轴承的承载力随着轴承间隙的增大而逐渐降低，随着轴承间隙的变化，凹形微观结构轴承的承载力变化较小，表明其稳定性较高；
- 3) 推力轴承的承载力随着轴承转速的增大而增大，其中凸形表面微观结构的承载力随着转速的增大增加较快；
- 4) 推力轴承的承载力随着润滑油液膜黏度的增加而增大，其中凹形表面微观结构的承载力随着液膜黏度的增大增加较慢。

### 参考文献：

[1] Etsion I, Kligerman Y, Halperin G. Analytical and

- Experimental Investigation of Laser-Textured Mechanical Seal Faces[J]. Tribology Transactions, 1999, 42(3): 511-516.
- [2] 万 轶,熊党生.激光表面微孔化改善端面密封的摩擦学性能[J].润滑与密封,2007,32(2):29-31.  
Wan Yi, Xiong Dangsheng. Laser Surface-Micropored Improving Tribological Properties of Face Seals[J]. Lubrication Engineering, 2007, 32(2): 29-31.
- [3] Brizmer V, Kligerman Y, Etsion I. A Laser Surface Textured Parallel Thrust Bearing[J]. Tribology Transactions, 2003, 46(3): 397-403.
- [4] Ryk G, Kligerman Y, Etsion I, et al. Experimental Investigation of Partial Laser Surface Texturing for Piston-Ring Friction Reduction[J]. Tribology Transactions, 2005, 48(4): 583-588.
- [5] Etsion I, Burstein L. A Model for Mechanical Seals with Regular Microsurface Structure[J]. Tribology Transactions, 1996, 39(3): 677-683.
- [6] Etsion I, Kligerman Y, Halperin G. Analytical and Experimental Investigation of Laser-Textured Mechanical Seal Faces[J]. Tribology Transactions, 1999, 42(3): 511-516.
- [7] Jeng Y R. Impact of Plateaued Surfaces on Tribological-Performance[J]. Tribology Transactions, 1996, 39(2): 354-361.
- [8] Willis E. Surface Finish in Relation to Cylinder Liners[J]. Wear, 1986, 109: 351-366.
- [9] 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.
- [10] Zhou L, Kato K, Vurens G, et al. The Effect of Slider Surface Texture on Flyability and Lubricant Migration Under Near Contact Conditions[J]. Tribology International, 2003, 36(4/5/6): 269-277.
- [11] Raman V, Jen D H, Ramirez M L, et al. Considerations in Head-Disk Interface Design for Near Contact Recording [J]. ASME, 1996, 6: 57-63
- [12] 佟 金,马云海,任露泉.天然生物材料及其摩擦学[J].摩擦学学报,2001,21(4):315-320.  
Tong Jin, Ma Yunhai, Ren Luquan. Naturally Biological Materials and Their Tribology: A Review[J]. Tribology, 2001, 21(4): 315-320.
- [13] Siripuram R, Stephens L S. Effect of Deterministic Asperity Geometry on Hydrodynamic Lubrication[J]. Journal of Tribology, 2004, 126: 527-534.
- [14] Stephens L S, Siripuram R, Hayden M, et al. Deterministic Micro Asperities on Bearings and Seals Using a Modified LIGA Process[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2004, 126(1): 147-154.
- [15] Brizmer V, Kligerman Y, Etsion I. A Laser Surface Textured Parallel Thrust Bearing[J]. Tribology Transactions, 2003, 46(3): 397-403.
- [16] Ronen A, Etsion I, Kligerman Y. Friction-Reducing Surface-Texturing in Reciprocating Automotive Components [J]. Tribology Transactions, 2001, 44(3): 359-366.
- [17] Schreck S, Zum Gahr K H. Laser-Assisted Structuring of Ceramic and Steel Surfaces for Improving Tribological Properties[J]. Applied Surface Science, 2005, 247: 616-622.
- [18] Costa H L, Hutchings I M. Hydrodynamic Lubrication of Textured Steel Surfaces Under Reciprocating Sliding Conditions[J]. Tribology International, 2007, 40(8): 1227-1238.
- [19] 温诗铸.摩擦学原理[M].北京:清华大学出版社,1990:22-42.  
Wen Shizhu. Principles of Tribology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1990: 22-42.

(责任编辑:廖友媛)