

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.03.005

# 毫米级不同形状方向性孔流体动压特性对比研究\*

余宝瑛<sup>1</sup>, 彭旭东<sup>1,2\*</sup>, 孟祥铠<sup>1,2</sup>

- (1. 浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310032;  
2. 浙江工业大学 过程装备及其再制造教育部工程研究中心, 浙江 杭州 310032)

**摘要:** 为提高多孔端面密封的流体动压特性,提出了毫米级多孔端面结构。针对密封端面间液膜空化现象问题,运用基于质量守恒的JFO空化理论建立了不同形状方向性孔(圆形、椭圆形、菱形)的理论分析模型,采用有限差分法求解了密封端面间流体膜压的Reynolds控制方程,获得了端面膜压分布图,从而在密封端面内外压差相等(即只考虑动压效应)的情况下对比分析了转速 $n$ 、方向因子 $\gamma$ 、倾斜角 $\beta$ 等参数对毫米级不同形状方向性孔的流体动压特性的影响规律。研究表明:不同形状方向性孔的流体动压特性存在较大差别,方向因子 $\gamma$ 越小、倾斜角 $\beta=0^\circ$ 的椭圆孔动压特性最佳,而方向因子 $\gamma$ 越大、倾斜角 $\beta=45^\circ$ 的菱形孔的动压特性差。该研究方法对多孔端面密封理论和工程实践具有重要的应用价值。

**关键词:** 动压特性; JFO空化理论; 方向性孔

中图分类号: TH117.2 文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2013)03-0273-04

## Comparison of hydrodynamic characteristics of millimetre-sized directional dimples of different shapes

SHE Bao-ying<sup>1</sup>, PENG Xu-dong<sup>1,2</sup>, MENG Xiang-kai<sup>1,2</sup>

- (1. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China;  
2. The MOE Engineering Research Center of Process Equipment and Its Remanufacture, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China)

**Abstract:** In order to improve hydrodynamic characteristics of dimple, the millimeter scale dimples were therefore put forward. Taking into consideration the cavitation existed in liquid film, JFO cavitation theory was used to establish the theoretical analysis models of mechanical seal face with directional dimples of different shapes (circle, ellipse, diamond). The finite difference method was applied to solve the seal face film pressure control fluid Reynolds equation, from which the film pressure distribution of mechanical seal face was obtained. Finally, the comparison analysis of influence law was conducted of different parameters such as the speed  $n$ , direction factor  $\gamma$ , angle of inclination  $\beta$  acted on the hydrodynamic characteristics of millimetre-sized directional dimples of different shape. The results show that there are huge differences among the hydrodynamic characteristics between directional dimples of different shapes. The ellipse porous has the best performance with the smaller directional factor  $\gamma$ , angle of inclination  $\beta=0^\circ$ . Whereas the diamond porous has the worst characteristic with the higher directional factor  $\gamma$ , angle of inclination  $\beta=45^\circ$ . The research has much important application value for theoretical research and engineering application of porous face seal.

**Key words:** hydrodynamic characteristics; JFO cavitation theory; directional dimples

收稿日期: 2012-11-27

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51005209)

作者简介: 余宝瑛(1986-),男,湖南邵阳人,主要从事流体密封技术方面的研究. E-mail: buddysby\_861205@163.com

通信联系人: 彭旭东,男,教授,博士生导师. E-mail: xdpeng@zjut.edu.cn

# 0 引 言

近年来出现的新型端面密封结构—激光加工多孔端面机械密封(LST-MS),是在普通机械密封的端面上加工出微米级的小坑孔,与普通端面机械密封相比,此类新型端面密封结构在降低端面摩擦磨损与端面温升、提高承载能力、延长密封使用寿命等方面具有显著的作用<sup>[1]</sup>。

为此,国内外学者主要针对微孔端面密封在几何参数<sup>[2-3]</sup>、孔形结构<sup>[4-5]</sup>、排布方式<sup>[6-7]</sup>、方向性<sup>[8-9]</sup>等方面开展了较系统的理论研究,但对毫米级孔的密封性能研究一直没有涉及到,且研究者发现:尽管微孔端面密封具有良好的动压特性,但在高压或低速启动时,微孔端面密封不能形成明显的动压开启力,以保证密封端面顺利打开,从而易造成端面的接触摩擦、磨损,甚至导致密封在开启阶段就失效。目前关于多孔端面液体润滑密封性能的研究都是基于Reynold空化边界条件,该空化边界条件不能够准确地计算出端面密封性能参数。

为改善多孔密封端面的动压特性和准确求解密封性能参数,本研究基于质量守恒的JFO空化边界条件,对毫米级不同形状方向性孔的流体动压特性进行对比研究。

# 1 模型的建立

## 1.1 几何模型

LST-MS拥有一对相对旋转的密封环,两密封环端面光滑且相互平行,本研究在静环的密封端面上采用激光加工出不同端面形状方向性孔,结构图如图1所示。

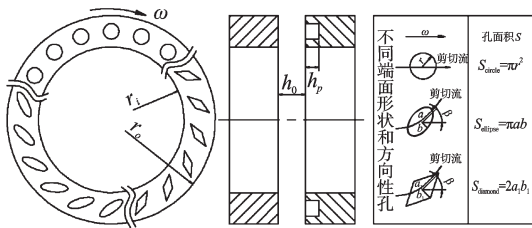


图1 不同端面形状和方向性孔结构图

$h_p$ —孔的深度;  $h_0$ —密封间隙;  $r$ —孔半径;  $a, b$ —一椭圆孔的长、短半轴;  $a_1, b_1$ —菱形孔的长、短半轴;  $r_1, r_0$ —一密封环的内、外径;  $\beta$ —孔倾斜角;  $S_{circle}$ —圆孔面积;  $S_{ellipse}$ —一椭圆孔面积;  $S_{diamond}$ —一菱形孔面积

为了研究孔的方向性对动压效应的影响,本研究定义方向因子  $\gamma = a/b = a_1/b_1$  和孔倾斜角  $\beta$ , 且方向因子  $\gamma$  和倾斜角  $\beta$  共同表征了孔的方向性。

密封端面的液膜厚度为:

$$h = \begin{cases} h_0 & \text{非孔区} \\ h_0 + h_p & \text{孔区} \end{cases} \quad (1)$$

## 1.2 数学模型

假设密封端面间压力沿膜厚方向恒定不变;密封流体为牛顿型流体,其粘度保持不变;基于上述假设条件,根据质量守恒的JFO空化理论可知,二维层流稳态不可压缩流体动力润滑 Reynolds 方程可写成<sup>[10-12]</sup>:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{rh^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial r} \right) = \frac{\omega r}{2} \frac{\partial (h\Phi)}{\partial \theta} \quad (2)$$

式中:  $\rho_c$ —液体密度;  $\rho$ —端面间任意一点的液膜密度;  $\Phi$ —液体所占的体积分数,  $\Phi = \rho/\rho_c$ ;  $r$ —端面半径;  $p$ —端面间压力;  $h$ —端面间膜厚;  $\omega$ —角速度;  $\mu$ —密封介质粘度。

为正确求解上述方程,本研究给上述方程式(2)添加了适当的边界条件和互补条件。

(1) 径向边界条件:

$$\begin{cases} p(\theta, r=r_i) = p_i = p_a \\ p(\theta, r=r_o) = p_o \end{cases} \quad (3)$$

(2) 周期性边界条件:

$$P_{(\theta=\frac{2\pi}{N}, r)} = P_{(\theta=\frac{2\pi}{N} + \frac{\pi}{2}, r)} \quad (4)$$

(3) JFO空化互补条件:

$$\begin{cases} p > p_c, \Phi = 1 \\ p = p_c, 0 < \Phi < 1 \end{cases} \quad (5)$$

为求解端面间流体膜压分布时,取一个周期作为“孔栏”计算区域进行网格划分,网格划分图如图2所示。

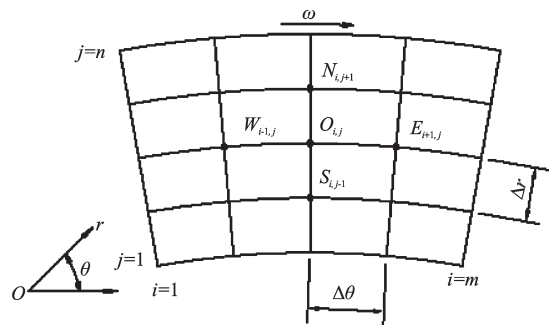


图2 有限差分计算区域网格划分图

整个孔栏区域压力分布  $p$  可以通过每一点压力积分得到,而根据差分原理,变量  $p$  在节点  $O_{i,j}$  的压力值的1阶导数可由中心差分公式求得:

$$\begin{cases} \left( \frac{\partial p}{\partial \theta} \right)_{i,j} = \frac{P_{i+1,j} - P_{i-1,j}}{2 \Delta \theta} \\ \left( \frac{\partial p}{\partial r} \right)_{i,j} = \frac{P_{i,j+1} - P_{i,j-1}}{2 \Delta r} \end{cases} \quad (6)$$

根据式(6)对式(2)进行离散,得离散方程组为:

$$p_{i,j} = \frac{1}{a_{i,j}} [b_{i,j} p_{i-1,j} + c_{i,j} p_{i+1,j} + d_{i,j} p_{i,j-1} + e_{i,j} p_{i,j+1} + f_{i,j} \Phi_{i-1,j} + g_{i,j} \Phi_{i,j}] \quad (7)$$

$$\Phi_{i,j} = \frac{1}{g_{i,j}} [a_{i,j} p_{i,j} - b_{i,j} p_{i-1,j} - c_{i,j} p_{i+1,j} - d_{i,j} p_{i,j-1} - e_{i,j} p_{i,j+1} - f_{i,j} \Phi_{i-1,j}] \quad (8)$$

其中:

$$a_{i,j} = b_{i,j} + c_{i,j} + d_{i,j} + e_{i,j};$$

$$b_{i,j} = \frac{h_{i-1/2,j}^3 \Delta r}{12\mu r_{i,j} \Delta \theta};$$

$$c_{i,j} = \frac{h_{i+1/2,j}^3 \Delta r}{12\mu r_{i,j} \Delta \theta};$$

$$d_{i,j} = \frac{h_{i,j-1/2}^3 (r_{i,j} - \Delta r/2) \Delta \theta}{12\mu \Delta r};$$

$$e_{i,j} = \frac{h_{i,j+1/2}^3 (r_{i,j} + \Delta r/2) \Delta \theta}{12\mu \Delta r};$$

$$f_{i,j} = \frac{\omega r_{i,j} \Delta r}{2} h_{i-1/2,j};$$

$$g_{i,j} = -\frac{\omega r_{i,j} \Delta r}{2} h_{i+1/2,j}.$$

然后联合边界条件式(3,4)和空化互补条件式(5),用超松弛迭代法求解该线性方程组,从而可获得一个孔栏区域上的压力分布,最后通过下式就可以求出开启力:

$$F = \int_0^{2\pi} \int_{r_i}^{r_o} p r dr d\theta \quad (9)$$

## 2 计算结果与讨论

为了便于分析,本研究针对以上大孔端面形状,

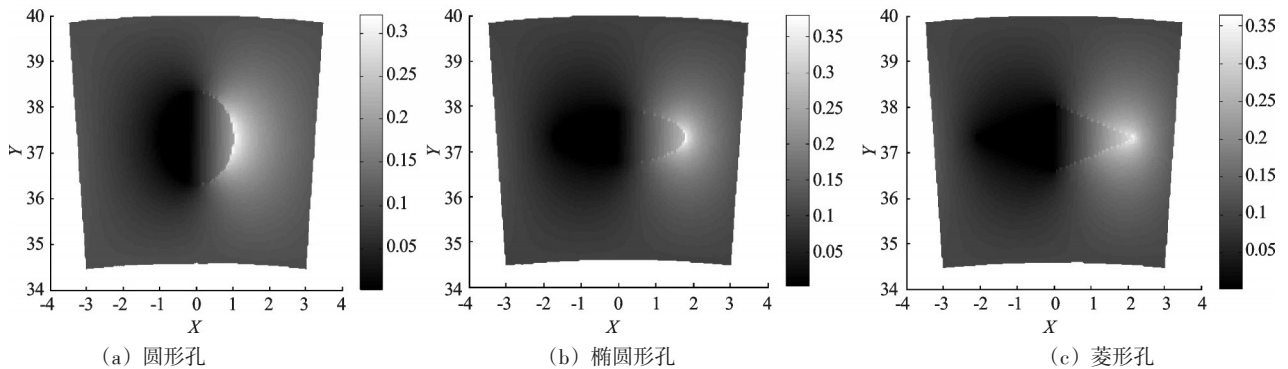


图3 不同端面形状孔的压力分布图

### 2.2 转速 $n$ 对动压特性的影响

不同端面形状(菱形、椭圆形、圆形)和倾斜角( $\beta=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ )孔在不同转速  $n$  下,动压特性的变化规律如图4所示。随着  $n$  的增大,圆形孔、 $\beta=0^\circ$  及  $\beta=90^\circ$  菱形孔和椭圆形孔的开启力都是先增大后减小,且在  $n=900$  r/min 左右开启力取最大值,  $\beta=45^\circ$  及  $\beta=135^\circ$  菱形孔和椭圆形孔的开启力都是先减小后增大,且在  $n=600$  r/min 左右开启力取最小值,这是由于孔的方向性对流体的导向作用。在同一转速  $n$  下,  $\beta=90^\circ$  椭圆孔的开启力最大,  $\beta=45^\circ$  菱形孔的开启力最小。综上可知,在不同转速  $n$  下,  $\beta=90^\circ$  椭圆孔的动压特性最好,  $\beta=45^\circ$  菱形孔的动压特性最差。

### 2.3 倾斜角 $\beta$ 对动压特性的影响

不同端面形状(菱形、椭圆形、圆形)孔在不同孔

选取以下结构参数和工况参数作为计算参数。

(1) 几何参数:密封环内半径  $r_i=34.6$  mm;外半径  $r_o=40$  mm;圆孔半径  $r=1$  mm;面积  $S_{circle}=S_{ellipse}=S_{diamond}$ ;方向因子  $\gamma=a/b=a_i/b_i=3$ ;孔深  $h_p=5$   $\mu\text{m}$ ;周期数  $N=36$ 。

(2) 工况参数:密封内压  $p_i=p_a=0.1$  MPa;外压  $p_o=0.1$  MPa;粘度  $\mu=1.005\text{e}-3$  Pa·s;转速  $n=600$  r/min;空化压力  $p_c=0.00234$  MPa。

在下文分析某参数对密封性能参数影响时,除特别说明外,其他工况参数和几何参数保持不变。

### 2.1 压力分布

不同端面形状(菱形、椭圆形、圆形)孔的压力分布图如图3所示,从图3可以看出,椭圆形孔的压力峰值最大,为0.37 MPa左右;菱形孔的压力峰值次之,为0.36 MPa左右;而圆孔的压力峰值最小,为0.32 MPa左右。这是因为流体在椭圆孔内沿周向方向流过的行程最长,由于流体的粘性剪切作用,从而使流体在孔末端压力堆积的最高,故压力峰值就最大。而流体在圆孔内沿周向流过的行程最短,故压力峰值就最小。

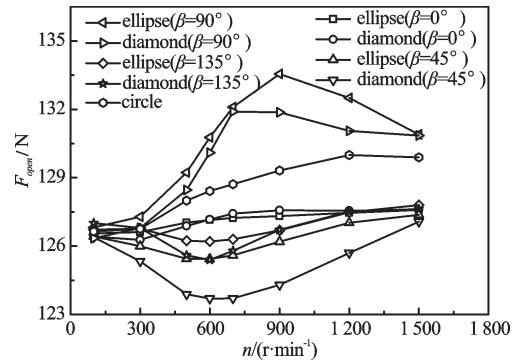


图4  $F_{open} \sim n$

倾斜角  $\beta$  下对动压特性的影响如图5所示。随着  $\beta$  逐渐增大,菱形孔和椭圆形孔的开启力都是先减小后增大,再减小再增大,且在  $\beta=60^\circ$  取最小值,在  $\beta=90^\circ$  取最大值。这主要是由于压力在  $\beta=90^\circ$  孔末端堆积的

最多,而圆形孔由于没有方向性,故开启力为一定值。在同一 $\beta$ 下,当 $70^\circ < \beta < 100^\circ$ 时,椭圆孔的开启力最大,圆孔的开启力最小,而在其他 $\beta$ 下,圆孔的开启力最大,菱形孔的开启力最小。综上可以看出, $\beta = 90^\circ$ 的椭圆孔的动压特性最好,而 $\beta = 60^\circ$ 左右的菱形孔的动压特性最差。

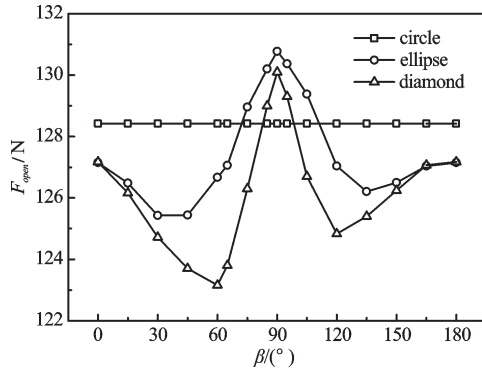


图5  $F_{open} \sim \beta$

#### 2.4 不同方向因子 $\gamma$ 对动压特性的影响

在倾斜角 $\beta = 0^\circ$ 和 $\beta = 45^\circ$ 时,不同端面形状(椭圆形、菱形)孔的方向因子 $\gamma$ 变化时对动压特性的影响如图6所示。随着 $\gamma$ 逐渐增大,倾斜角 $\beta = 0^\circ$ 椭圆形孔和菱形孔的开启力逐渐减小,倾斜角 $\beta = 45^\circ$ 椭圆形孔和菱形孔的开启力先增大后减小,这是因为随着 $\gamma$ 的增大,压力在倾斜角 $\beta = 0^\circ$ 椭圆形孔和菱形孔的末端堆积的量逐渐减小,故开启力就逐渐减小。而在 $\gamma < 1$ 时,随着 $\gamma$ 的增大,压力在倾斜角 $\beta = 45^\circ$ 椭圆形孔和菱形孔的末端堆积的量逐渐增大,故开启力就增大,而在 $\gamma > 1$ 时,随着 $\gamma$ 的增大,压力在倾斜角 $\beta = 45^\circ$ 椭圆形孔和菱形孔的末端堆积的量逐渐减小,故开启力就减小。在同一 $\gamma$ 下,倾斜角 $\beta = 0^\circ$ 的椭圆孔的开启力最大,而倾斜角 $\beta = 45^\circ$ 的菱形孔的开启力最小。故综上可知, $\gamma$ 越小且 $\beta = 0^\circ$ 的椭圆孔的动压特性最佳,而 $\gamma$ 越大且 $\beta = 45^\circ$ 的菱形孔的动压特性最差。

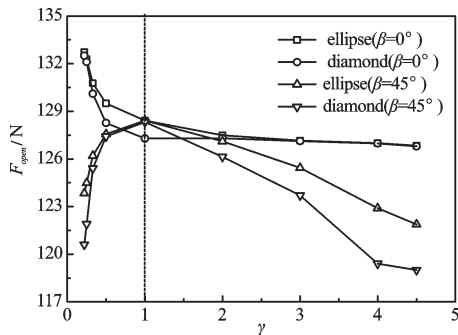


图6  $F_{open} \sim \gamma$

### 3 结束语

本研究主要基于JFO空化模型,对毫米级不同形状方向性孔(圆形、椭圆形、菱形)的流体动压特性进

行了对比研究,研究结果表明:

(1) 孔的形状和方向性对动压特性都有一定的影响,其中方向性的影响最为显著。

(2) 在不同转速 $n$ 、倾斜角 $\beta$ 、方向因子 $\gamma$ 下,在 $n = 900$  r/min时, $\gamma$ 越小、 $\beta = 0^\circ$ 椭圆孔的动压特性最佳;而在 $n = 600$  r/min时, $\gamma$ 越大、 $\beta = 45^\circ$ 菱形孔的动压特性最差。

(3) 本研究是在内外压差相等(即只考虑动压效应)的情况下,对不同形状方向性孔的流体动压效应进行对比研究。

由以上结论可知,研究者只要选择合理的端面形状和方向性孔,且保证其在最佳的结构参数和工况参数下工作,就可以获得最佳的动压特性,从而保证密封端面在低速下快速开启,避免了端面摩擦磨损现象的发生。

#### 参考文献(References):

- [1] 王志高,宋鹏云,任伟. 端面微孔机械密封研究进展[J]. 机械,2006,33(9):9-12.
- [2] ETSION I, BURSTEIN L. A model for mechanical seals with regular micro-surface structure[J]. **Tribology Transactions**, 1996, 39(3): 677-683.
- [3] 秦浩,彭旭东,白少先,等. 激光加工多孔气体端面密封的静压性能研究[J]. 摩擦学学报,2009,29(3):205-209.
- [4] 彭旭东,杜东波,李纪云. 不同型面微孔对激光加工多孔端面机械密封性能的影响[J]. 摩擦学学报,2006,26(4):367-371.
- [5] YU Hai-wu, WANG Xiao-lei, ZHOU Fei. Geometric shape effects of surface texture on the generation of hydrodynamic pressure between conformal contacting surfaces[J]. **Tribology Letters**, 2010, 37(2): 123-130.
- [6] KLIGERMAN Y, ETSION I. Analysis of the hydrodynamic effects in a surface textured circumferential gas seals[J]. **Tribology Transactions**, 2001, 44(3): 472-478.
- [7] 赵中,彭旭东,盛颂恩,等. 多孔扇形分布端面机械密封性能的数值分析[J]. 化工学报,2009,60(4):965-971.
- [8] BAI Shao-xian, PENG Xu-dong, LI Ye-feng. A hydrodynamic laser surface-textured gas mechanical face seal [J]. **Tribology Letters**, 2010, 38(3): 187-194.
- [9] 于海武,袁思欢,王晓雷,等. 微凹坑形状对试件表面摩擦特性的影响[J]. 华南理工大学学报:自然科学版,2011,39(1):106-110.
- [10] 袁家坤,张力,曹建波. 基于流体工程仿真计算的水轮机设计[J]. 机电技术,2011(6):47-48.
- [11] 张峰,肖凯,刘伟强. 热流体装置的层板构型技术及其发展综述[J]. 轻工机械,2012,30(1):109-212.
- [12] QIU Y, KHONSARI M M. On the prediction of cavitation in dimples using a mass-conservative algorithm[J]. **Journal of Tribology**, 2009, 131(4): 1-11.

[编辑:张翔]