

# 考虑空化效应的螺旋槽液膜密封特性数值研究

郝木明, 庄媛, 章大海, 任宝杰, 李振涛, 杨丹丹

(中国石油大学密封技术研究所, 山东青岛 266580)

**摘要:**为了研究空化效应对液膜密封性能的影响,获得最佳的工况参数,建立螺旋槽液膜密封端面三维模型,在引入JFO空化边界条件下利用ANSYS FLUENT14.0对其流场进行数值模拟,考察空化效应时工况参数对开启力、液膜刚度、泄漏量及空化区域变化的影响。结果表明:在本文的参数下,Sommerfeld条件下液膜在厚度 $1.6\ \mu\text{m}$ 左右出现最大刚度,JFO条件下刚度在膜厚为 $1.5\sim 2\ \mu\text{m}$ 比较稳定,且此时刚漏比出现拐点,最佳膜厚在 $1.5\sim 2\ \mu\text{m}$ ;液膜温度在 $65\ ^\circ\text{C}$ 时空化效应最弱;开启力、液膜刚度、泄漏量、空化区域随转速的增加而增大。

**关键词:**液膜密封;空化;数值研究;密封性能

**中图分类号:**TB 42 **文献标志码:**A

**引用格式:**郝木明,庄媛,章大海,等.考虑空化效应的螺旋槽液膜密封特性数值研究[J].中国石油大学学报:自然科学版,2015,39(3):132-137.

HAO Muming, ZHUANG Yuan, ZHANG Dahai, et al. Numerical study on sealing performance of spiral groove liquid film seal considering effects of cavitation[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015,39(3):132-137.

## Numerical study on sealing performance of spiral groove liquid film seal considering effects of cavitation

HAO Muming, ZHUANG Yuan, ZHANG Dahai, REN Baojie, LI Zhentao, YANG Dandan

(Institute of Sealing Technique in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

**Abstract:** A 3D model of spiral groove liquid film seal was established for obtaining the optimum operation condition and studying the effects of cavitation on liquid film seal. The flow field was simulated using JFO cavitation boundary condition based on ANSYS FLUENT14.0. Considering the effects of cavitation, the influences of operation parameters on opening force, pumping output, stiffness of film and cavitation area were analyzed. Results indicate that the stiffness of liquid film peaks at the thickness of  $1.6\ \mu\text{m}$  under Sommerfeld cavitation boundary condition, while under JFO condition it stabilizes at the thickness of  $1.5\sim 2\ \mu\text{m}$ , and a inflection point appears on the stiffness-leakage ratio curve, then the stiffness gradually decreases. The optimum thickness is  $1.5\sim 2\ \mu\text{m}$  considering stiffness and stiffness-leakage ratio. The cavitation has the least effects on the liquid temperature of  $65\ ^\circ\text{C}$ . In addition, opening force, pumping output, stiffness of film and cavitation area increase with the increase of rotary speed.

**Keywords:** liquid film seal; cavitation; numerical study; sealing performance

以螺旋槽液膜密封为代表的液膜润滑非接触式机械密封因其具有密封效果优良、适用范围广等突出优点,在石油化工等行业各类泵中得到广泛的应用。然而在一些工况条件下,如锅炉给水泵、凝结水泵、循环水泵,液膜密封经常会因为密

封端面液膜空化,出现运行状态不稳定的状况,甚至导致密封提前失效引发事故<sup>[1-2]</sup>。有必要研究空化效应对液膜密封性能的影响。目前对液膜密封空化的研究多集中在波形面和微孔端面密封中<sup>[3-4]</sup>。顾永泉<sup>[5]</sup>总结介绍了空化现象、决定机械

密封性能的空化边界和边界确定的算法,并做了计算示例;潘晓梅等<sup>[6]</sup>对多孔端面机械密封中空化边界条件的计算速度和精度进行了比较,指出 Reynolds 条件的计算速度较快, JFO 条件的精度更好;然而对螺旋槽液膜密封的报道中,鲜有关于空化效应的分析。笔者考察不同空化边界条件准确性后,在端面液膜数值分析中引入 JFO 空化边界条件,计算端面液膜中的气相分数,开启力、泄漏量等密封性能参数及其变化规律。

## 1 研究对象及条件

### 1.1 物理模型确定

以动静环间液膜作为研究对象,动环内径开槽,其端面结构根据文献<sup>[7]</sup>确定。具体参数为内径  $R_i = 44.25$  mm, 外径  $R_o = 53.25$  mm, 根径  $R_g = 50.55$  mm, 螺旋槽数  $N = 12$ , 槽台宽比  $\gamma = 1$ , 螺旋角  $\alpha = 18^\circ$ , 槽深  $h_c = 12$   $\mu\text{m}$ 。为了减小误差以液膜全膜作为计算模型,采用分块法划分网格,如图 1 所示。



图 1 网格划分模型(Z向放大)

Fig. 1 Model of film grid division

### 1.2 密封端面液膜的基本假设

计算中所用流体为水,在 20  $^\circ\text{C}$  时,其密度  $\rho = 998.2$   $\text{kg}/\text{m}^3$ ,黏度  $\eta = 0.001$   $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ,饱和蒸汽压  $p_c = 2.3333$  kPa(绝对压力)。为了便于计算分析,忽略一些对研究重点影响较小的因素,作假设如下:①忽略体积力的作用,如重力;②与黏性力比较,可以忽略惯性力的影响;③流体在密封面间的流动为层流;④不考虑同一工况端面温度变化<sup>[8]</sup>。

## 2 空化模型

### 2.1 空化边界条件

Dowson 和 Taylor<sup>[9]</sup>总结了 4 种空化边界条件: Sommerfeld 边界条件、Half-sommerfeld 边界条件、Reynolds 边界条件及 JFO 边界条件。Sommerfeld 条件是无空化边界条件,认为介质的空化压力为无穷小;Half-sommerfeld 边界条件简单,可作第一次近似

解。Reynolds 边界条件较接近实际,但动载条件下或考虑温度影响时,或端面乏液或薄膜液体产生相变时,该条件不再适合<sup>[6]</sup>。本文中液膜空化发生相变,故采用 JFO 边界条件。JFO 空化边界条件假设在全液膜区的密封流体不可压缩,密度保持恒定,空化区的流体是可压缩的,空化压力取饱和蒸汽压。

### 2.2 控制方程

基于空化的连续性方程、动量方程、气相传输方程<sup>[10]</sup>为

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_m v_{mi}) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m v_{mi}) + v_{mi} \frac{\partial (\rho_m v_{mj})}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu_m \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial v_{mi}}{\partial x_j} + \frac{\partial v_{mj}}{\partial x_i} \right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha \rho_v) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\alpha \rho_v v_{vi}) = R_e - R_c. \quad (3)$$

其中

$$\rho_m = \alpha \rho_v + (1 + \alpha) \rho_l, \quad \mu_m = \alpha \mu_v + (1 - \alpha) \mu_l.$$

式中,  $\rho_m$  为混合物密度;  $v_m$  为质量平均速度;  $\mu_m$  为混合黏性系数;  $R_e$ 、 $R_c$  分别为气泡产生、溃灭源项;  $n$  为相数,下标  $v$  为气相,下标  $l$  为液相;  $\alpha$  为气相体积分数。

### 2.3 FLUENT 中的空化模型

在 FLUENT 中有 3 种多相流模型,即 VOF (volume of fluid) 模型、混合 (mixture) 模型和欧拉 (Eulerian) 模型。本文中密封间隙的液体在螺旋槽底部由于局部低压产生汽化,故选用混合模型。ANSYS FLUENT14.0 混合模型中有 3 种可用的空化模型,即 Singhal et al. 模型、Schnerr and Sauer 模型和 Zwart-Gerber-Belamri 模型<sup>[11]</sup>。Singhal et al. 模型不易收敛, Schnerr and Sauer 模型和 Zwart-Gerber-Belamri 模型结果基本相同,且在数值上更健壮、收敛更快<sup>[12]</sup>,计算采用 Schnerr and Sauer 模型,为更快地收敛,可先计算不考虑空化效应时的流场,稳定后再将空化模型加入。

## 3 计算结果及其分析

### 3.1 模拟方法检验

采用 Gambit 软件对网格进行划分。由于液膜长宽尺寸为毫米级,而液膜厚度、螺旋槽深度属于微米级,故涉及跨尺度网格划分问题。对此,采用统一网格划分加局部网格加密的方法,并对膜厚方向进行网格无关性检测。

表 1 所示为网格无关性检测结果,其中层数前

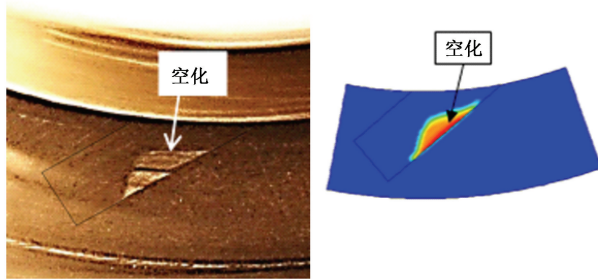
两位是膜厚方向层数,后两位是槽深方向层数。可以得出,液膜厚度方向大于或等于5层,槽深方向大于或等于14层网格数对模拟结果影响很小,故文中厚度方向统一用5层网格、开槽处用14层网格。

表1 网格层数对液膜开启力的影响

Table 1 Effects of grid layers on opening force

层数 $N_c$	开启力 $F_o/N$	层数 $N_c$	开启力 $F_o/N$	层数 $N_c$	开启力 $F_o/N$
0101	215.7	0102	350.3	0103	397.3
0104	416.7	0105	426.6	0106	432.1
0107	435.4	0108	437.6	0109	439.2
0110	440.2	0111	441.0	0112	441.6
0113	442.1	0114	442.4	0115	442.4
0214	493.3	0314	503.5	0414	507.2
0514	509.0	0614	509.0	—	—

以水为介质,对内斜直线槽端面液膜空化进行试验研究<sup>[12]</sup>,利用相机拍摄了空化照片。为验证本文方法,采用文献[13]中的参数进行数值模拟,结果对比如图2所示。由图2可见,本文方法计算得到的空化区形状特征与实验结果一致。



(a) 文献[13]空化照片 (b) 本文计算结果

图2 空化区结果对比

Fig.2 Comparison of results in cavitation area

### 3.2 膜厚影响

假设转速为4970 r/min,分析液膜厚度在1.0~5.5 μm区域变化时对密封性能及空化效应的影响。

图3为膜厚与开启力、膜厚与刚度关系。膜厚增大开启力变小,考虑空化边界(JFO)条件的开启力小于不考虑空化(Sommerfeld)条件的。液膜刚度的物理意义为稳定工况下开启力变化与对应膜厚变化的比值。图3表明:Sommerfeld条件下的刚度在膜厚1.6 μm左右出现峰值,此时液膜稳定性最好;JFO条件下的刚度随膜厚增大而减小,变化较平缓,没有明显拐点。膜厚稍大于1 μm后JFO条件的刚度小于Sommerfeld条件下的,说明空化会使液膜的稳定性降低。图4为膜厚与刚漏比关系。由图4可知,随着膜厚增大刚漏比呈下降趋势,且在膜厚为1.5~2 μm之间出现拐点。合适的刚漏比有利于机

械密封性能的稳定,过大的刚漏比不利于端面的冷却,过小的刚漏比说明泄漏量较大或刚度过小。现实中膜厚一般在1~5 μm,综合考虑刚度和刚漏比,认为最佳膜厚在1.5~2 μm。

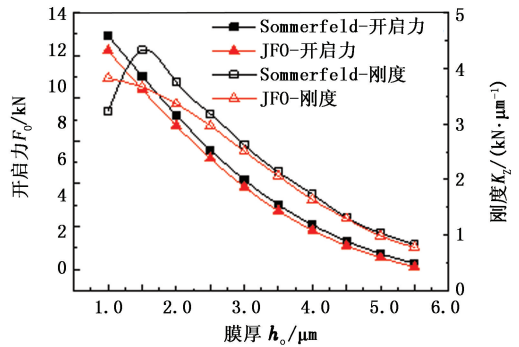


图3 膜厚-开启力-刚度关系

Fig.3 Relationship of film thickness, opening force and stiffness

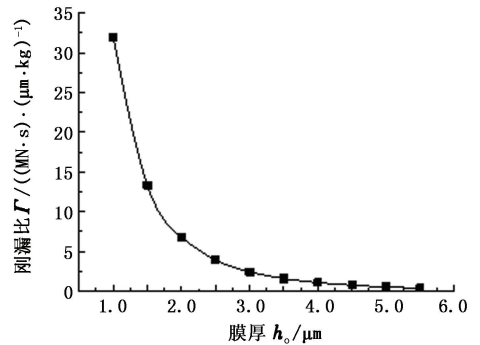


图4 膜厚与刚漏比关系

Fig.4 Relationship between film thickness and ratio of stiffness to leakage

图5为膜厚-气相分数-液膜混合密度关系。

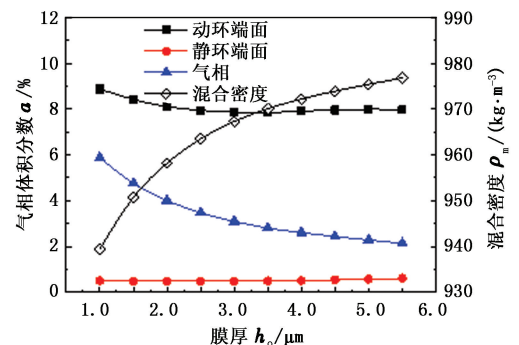


图5 膜厚-气相分数-液膜混合密度关系

Fig.5 Relationship of film thickness, gas phase fraction and liquid mixture density

由图5可以看出:随着膜厚增大,空化区体积分数减小,液膜的混合密度增大;静环端面空化面积分数很小且基本不随膜厚变化,动环端面空化区面积分数比静环端面的大14~18倍,且随膜厚增大而减

小(直观分布见图 6)。说明虽然膜厚很小,但在膜厚方向上空化区域仍是变化的,空化主要发生在液膜的槽区部分,因此衡量空化效应的强弱应以气相体积分数为准。

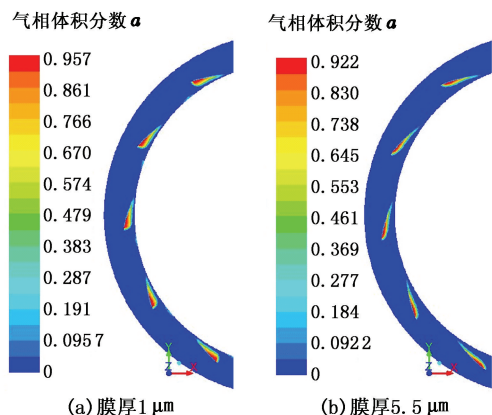


图 6 动环端面气相分布

Fig. 6 Gas phase distribution on moving ring end face

### 3.3 转速影响

用 1.6 μm 的膜厚计算不同转速下液膜的密封性能和空化情况。图 7 为转速与最小压力关系。由图 7 可以看出,在确定的进压力条件下,转速越高动压效应越强,最小压力越小,易产生空化;在确定转速条件下,进出口压力增大,对应的最小压力增大,不易产生空化现象。以压力为 0.1 MPa 为例,转速在约 1 270 r/min 时会产生负压,当转速高于该值时不可避免出现空化现象。图 8 为转速-开启力-刚度关系。

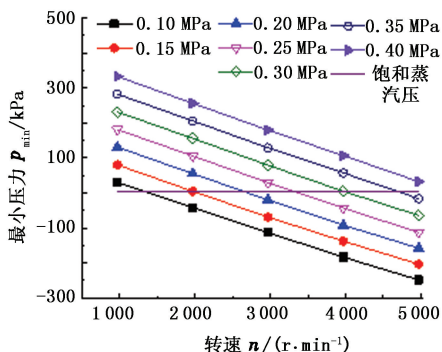


图 7 转速与最小压力的关系

Fig. 7 Relationship between speed and minimum pressure

图 8 表明:转速较小不发生空化时,JFO 条件与 Sommerfeld 条件的计算结果相同;转速增大二者开启力都增大,但 JFO 条件的增速较小,这是由转速增大坝槽交界处增速降压作用明显导致空化区增大造成的。刚度随转速的变化规律有相同的趋势,这是由刚度的物理意义决定的:膜厚稳定时,刚度只受开启力影响,因此有相同的变化规律。

图 9 为转速-气相体积分-液膜混合密度关系,图 10 为不同转速下液膜气相分布。图 9 表明:在低转速下,液膜空化区域为 0,混合密度就是水的密度,与图 10(a)相吻合。随着转速增大,空化区域增大,同时混合密度减小。

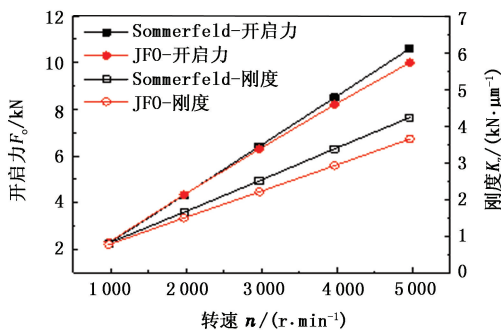


图 8 转速-开启力-刚度关系

Fig. 8 Relationship of speed, opening force and stiffness

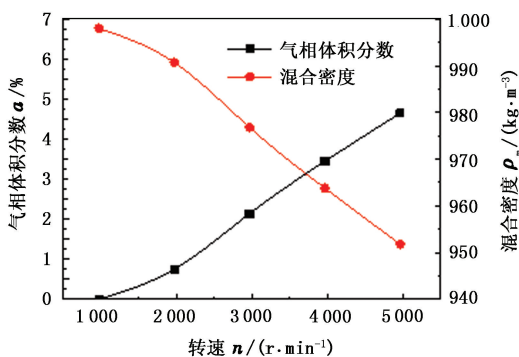


图 9 转速-气相体积分-液膜混合密度关系

Fig. 9 Relationship of speed, gas phase volume fraction and liquid film mixture density

图 10 表明,转速对空化区域的面积和位置有明显影响:转速为 970 r/min 时,没有发生空化,气相体积分数为 0,即全部为液相水;随着转速增大,空化区域由堰、槽区交界处向槽区发展,面积增大;空化区域中最大气相体积分也随速度增大,由 1 970 r/min 时的 81.5% 增加到 4 970 r/min 时的 93.4%。

### 3.4 端面平均温度影响

水的饱和蒸汽压、黏度均受温度的影响<sup>[13]</sup>,根据雷诺方程,黏度变化会引起压力变化,而压力和饱和蒸汽压又是影响空化的重要条件,因此须考察不同温度下的情况。计算膜厚 1.6 μm,转速 4 970 r/min 时不同液膜平均温度的液膜密封性能及空化区域,见图 11。

由图 11 表明,随着温度升高,液膜的最大压力变小,最小压力增大,其中 JFO 条件下的最小压力即为某温度下水的饱和蒸汽压。



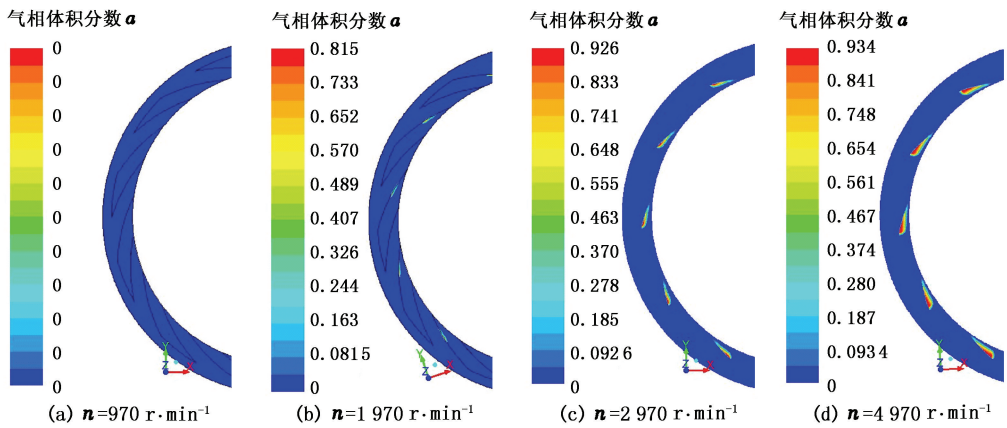


图 10 不同转速下液膜气相分布

Fig. 10 Contours of cavitation volume fraction at different speed

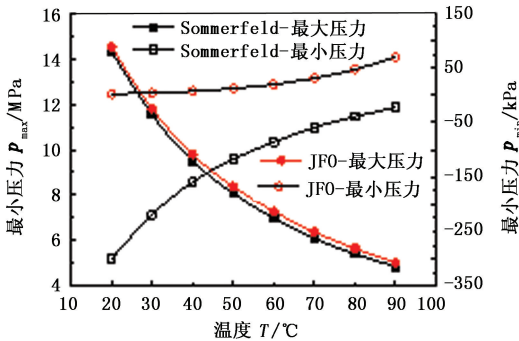


图 11 温度与压力峰值关系

Fig. 11 Relationship of temperature and peak pressure

图 12 为温度-开启力-刚度图。由图 12 表明,开启力随温度升高而减小,其中 50 °C 和 70 °C 两种条件计算开启力相差不大,其他温度时 JFO 条件下的开启力明显偏小。这是因为在黏度和饱和蒸汽压的双重作用下,50 ~ 70 °C 之间液膜的空化效应较弱,对开启力的影响较小。刚度变化也有相同的规律:随温度升高而减小的同时,在 50 °C 和 70 °C 两种条件下的温度-刚度关系曲线基本平行。

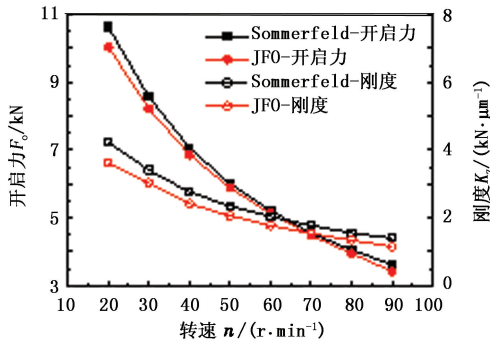


图 12 温度-开启力-刚度

Fig. 12 Relationship of temperature, opening force and stiffness

图 13 为温度与泄漏量关系。由图 13 表明: Sommerfeld 条件下的泄漏量随温度升高略有增大,

这是由黏度随温度升高而减小造成的; JFO 条件下泄漏量随温度升高先增大后减小。

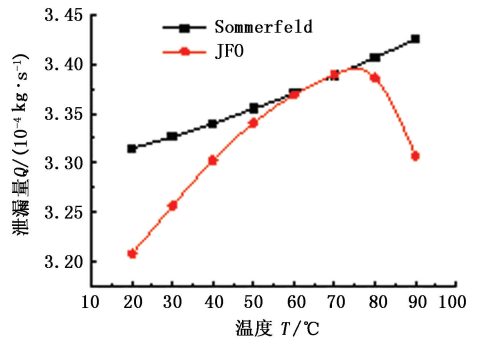


图 13 温度与泄漏量关系

Fig. 13 Relationship between temperature and leakage

图 14 为温度-气相体积分数-混合密度图。由图 14 表明,随温度升高空化效应先减弱再增强,在 65 °C 左右空化效应最弱,此时空化区体积分数约为 2%。JFO 条件下的泄漏量与空化效应的强弱负相关,空化区越大,泄漏量越小,这与空化区压力梯度为零,没有压差流相吻合。

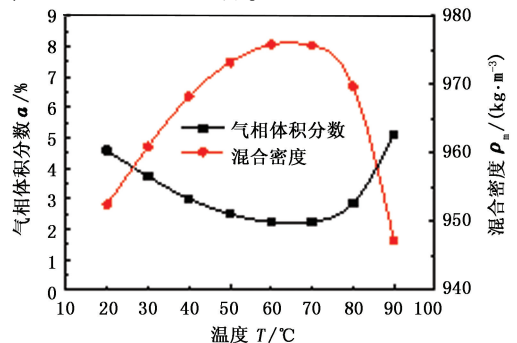


图 14 温度-气相体积分数-混合密度

Fig. 14 Relationship of temperature, gas phase volume fraction and liquid film mixture density

图 15 为 100 °C 时液膜的空化情况。需要注意的是,此时水的饱和蒸汽压即为 1 个大气压,而计算

时进出口压力均为大气压,现实中高温水泵机械密封进出口压力一般高于1个大气压,因此这是一种极端情况,空化效应非常剧烈,可能造成密封失稳。

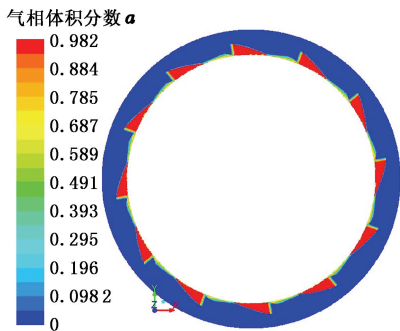


图15 100 °C时气相体积分数分布

Fig. 15 Contours of cavitation volume fraction at 100 °C

## 4 结论

(1) Sommerfeld 条件下液膜在厚度  $1.6 \mu\text{m}$  左右出现最大刚度, JFO 条件下刚度没有峰值, 在  $1.5 \sim 2 \mu\text{m}$  比较稳定, 且此时刚漏比出现拐点, 最佳膜厚在  $1.5 \sim 2 \mu\text{m}$ 。

(2) 温度对空化效应的影响比较复杂, 随温度升高空化效应先减弱再增强, 在  $65 \text{ }^\circ\text{C}$  左右空化效应最弱。

(3) 转速较小时液膜不发生空化, 随着转速增大液膜开启力、刚度、泄漏量、气相体积分数均增大; 考虑空化的液膜开启力、刚度、泄漏量均小于不考虑空化的计算结果, 空化导致液膜稳定性变差, 泄漏量减小。

## 参考文献:

- [1] YOUNG L A, KEY B, PHILIPPS R, et al. Mechanical seals with laser machined wavy SiC faces for high duty boiler circulation and feedwater applications [J]. *Lubrication Engineering*, 2003, 59(4): 30-39.
- [2] 彭旭东, 顾永泉. 不同相态下端面形貌和流体惯性对机械密封性能的影响 [J]. *石油大学学报: 自然科学版*, 1990, 14(3): 62-70.  
PENG Xudong, GU Yongquan. The effects of coning face and fluid inertia on the performance of mechanical face seals at various phase states [J]. *Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science)*, 1990, 14(3): 62-70.
- [3] LEBECK A O. A study of mixed lubrication in contacting mechanical face seals: proceeding of 4th Leeds-Lyon Symposium [C]. London: Mechanical Engineering Publications Limited for the Institute of Tribology, 1977: 45-67.
- [4] KANGO S, SHARMA R K, PANDEY R K. Thermal analysis of microtextured journal bearing using non-Newtonian rheology of lubricant and JFO boundary conditions [J]. *Tribology International*, 2014, 69: 19-29.

- [5] 顾永泉. 机械密封的空化和空化边界确定 [J]. *流体机械*, 1998, 26(12): 16-20.  
GU Yongquan. Cavitation of mechanical seal and cavitation boundary determined [J]. *Fluid Machinery*, 1998, 26(12): 16-20.
- [6] 潘晓梅, 彭旭东, 骆建国, 等. 激光加工多孔端面机械密封中空化边界条件的比较 [J]. *润滑与密封*, 2007, 32(2): 47-50.  
PAN Xiaomei, PENG Xudong, LUO Jianguo, et al. Comparison of cavitation boundary conditions in analyses of a laser surface textured mechanical seal [J]. *Lubrication Engineering*, 2007, 32(2): 47-50.
- [7] 胡丹梅, 郝木明, 吴德利. 螺旋槽上游泵送机械密封有限元数值计算 [J]. *石油大学学报: 自然科学版*, 2002, 26(6): 74-77.  
HU Danmei, HAO Muming, WU Deli. Finite element numerical calculation of spiral groove upstream pumping mechanical seals [J]. *Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science)*, 2002, 26(6): 74-77.
- [8] 王涛, 黄伟峰, 王玉明. 机械密封液膜汽化问题研究现状与进展 [J]. *化工学报*, 2012, 63(11): 3375-3382.  
WANG Tao, HUANG Weifeng, WANG Yuming. Research and progress of mechanical seals operating with vaporization transition [J]. *CIESC Journal*, 2012, 63(11): 3375-3382.
- [9] DOWSON D, TAYLOR C M. Cavitation in bearings [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1979, 11(1): 35-65.
- [10] 陈懋章. 黏性流体动力学基础 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 34-50.
- [11] 熊永强. 计入空化效应的水润滑径向滑动轴承数值模拟研究 [D]. 上海: 上海交通大学机械与动力工程学院, 2011.  
XIONG Yongqiang. Numerical study of the water-lubricated journal bearings considering the effects of cavitation [D]. Shanghai: School of Mechanical Engineering in Shanghai Jiaotong University, 2011.
- [12] 李京浩. 机械密封空化效应的数值计算方法与实验研究 [D]. 北京: 清华大学精密仪器与机械学系, 2011.  
LI Jinghao. Numerical computing method and experimental study for cavitation in mechanical seals [D]. Beijing: Department of Precision Instruments and Machinery in Tsinghua University, 2011.
- [13] 《化学化工物性参数手册》编委会. 化学化工物性参数手册 [M]. 无机卷. 北京: 化学工业出版社, 2002: 17.