

DOI: 10.7652/xjtuxb202001018

# 异形孔腔结构对液体孔型密封泄漏特性及转子耗功的影响

方志<sup>1</sup>, 李志刚<sup>1</sup>, 李军<sup>1,2</sup>

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 先进航空发动机协同创新中心, 100191, 北京)

**摘要:** 为降低透平机械中动静间隙泄漏量,提高机组运行效率与转子系统稳定性,以孔型密封为基本模型,提出了一种球凹孔腔、两种周向倾斜孔腔(倾斜角为 $\pm 30^\circ$ )和两种轴向倾斜孔腔(倾斜角为 $\pm 20^\circ$ )的密封结构。采用基于三维定常 RANS 方程的数值计算方法,研究了异形孔腔对液体孔型密封泄漏特性和转子耗功的影响,计算分析了不同转速(0~6 000 r/min)下,典型孔型密封和 5 种异形孔密封结构的泄漏量、孔腔流场、湍动能耗散率分布和转子面拖拽力矩。结果表明:球凹孔腔在转速 0~4 000 r/min 的范围内能显著降低密封泄漏量;周向倾斜孔腔能显著降低间隙内周向旋流,倾斜角为  $30^\circ$  的周向斜孔密封具有更低的泄漏量;轴向倾斜孔腔能略微降低转子耗功,倾斜角为  $20^\circ$  的轴向倾斜孔腔能降低泄漏量,而倾斜角为  $-20^\circ$  的轴向倾斜孔腔导致泄漏量增加。

**关键词:** 孔型密封;异形孔;泄漏特性;转子耗功

**中图分类号:** TK476 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2020)01-0143-07

## Investigations on the Effect of Odd-Shaped Hole Geometries on the Leakage Performance of Liquid Hole-Pattern Seals and Rotor Power Loss

FANG Zhi<sup>1</sup>, LI Zhigang<sup>1</sup>, LI Jun<sup>1,2</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;  
2. Collaborative Innovation Center of Advanced Aero-Engine, Beijing 100191, China)

**Abstract:** To reduce the leakage and increase the aerodynamic efficiency and rotor stability of turbomachinery, five hole seals with odd-shaped geometrical structures including a ball-shaped concave cavity, two circumferentially oblique hole geometries and two axially oblique hole geometries were presented based on the typical hole-pattern seal model. A steady numerical approach was used to investigate the influence of odd-shaped hole geometry on the leakage performance and rotor drag torque of hole-pattern seals. The leakage flow rate, cavity flow field, turbulent kinetic energy dissipation rate and the rotor drag torque were calculated and analyzed for the six hole seals (one typical hole seal and five odd-shaped hole seals) with different hole geometries at various rotational speeds (0, 2 000, 4 000, 6 000 r/min). Results showed that compared with the typical hole-pattern seal, the ball-shaped concave cavity can markedly reduce the leakage flow rate at the rotational speed range from 0 to 4 000 r/min; circumferentially oblique holes can obviously decrease the circumferential swirl velocity in the seal gap. The circumferentially oblique hole with an oblique angle  $\alpha=30^\circ$  has the minimum leakage flow rate,

and the axially oblique hole results in a slight decrease in the rotor drag torque. The axially oblique hole with an oblique angle  $\beta=20^\circ$  can reduce the leakage flow rate. Contrarily, the axially oblique hole with an oblique angle  $\beta=-20^\circ$  results in an increase in leakage flow rate.

**Keywords:** hole-pattern seal; odd-shaped hole geometry; leakage performance; rotor power loss

在泵与压缩机等现代透平机械中,通常使用环形密封来降低泄漏量,提高机组运行效率,增强系统稳定性<sup>[1]</sup>。液体工质透平机械中常见的密封结构有迷宫密封、螺旋密封以及孔型密封。其中:迷宫密封结构简单、易于加工与安装,但是封严性能较差<sup>[2]</sup>;螺旋密封依靠螺旋槽对流体工质产生的反向泵送压头来实现密封,具有良好的封严性能,但是螺旋密封的转子动力特性较差,不利于机组长期稳定运行<sup>[3]</sup>。孔型密封作为一种先进阻尼密封结构,能够兼顾封严性能及提高转子系统稳定性,因此逐渐广泛应用于液体透平机械中。

典型的孔型密封结构如图1所示,密封静子面上采用铣刀或电火花在金属材料上加工径向圆柱孔,具有制造工艺简单、成本低、结构可控性好、耐磨等优点<sup>[1]</sup>。孔型密封利用孔型腔室内形成的湍流涡旋以及腔壁摩擦阻力作用耗散流体工质的动能,降低密封泄漏量<sup>[4]</sup>,因此孔腔结构与形状是影响密封封严性能的关键因素。

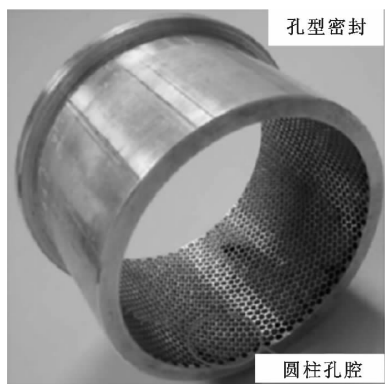


图1 孔型密封静子部件

目前关于孔型密封的研究,大量集中在孔腔几何结构参数对气体工质孔型密封性能的影响方面<sup>[5-6]</sup>。1985年,Childs等首次测试了3种静子面具有粗糙结构(包括十字型孔、棱形孔以及圆柱孔)的密封性能,结果表明圆柱孔型结构密封能够提供最小的泄漏量以及最佳的阻尼特性<sup>[7]</sup>。随后,Childs等实验研究了孔深( $H=1.9, 3.3, 6.6$  mm)对孔型密封(孔径 $D=3.175$  mm)泄漏特性、转子动力特性的影响,结果发现孔深最小时,孔型密封具有最佳的泄漏与转子动力特性<sup>[8]</sup>。方志等在此基础

上,通过数值研究提出了孔深径比 $A_R$ 是影响孔型密封泄漏量的关键因素,并指出 $A_R=0.15\sim0.25$ 时,密封泄漏量取得最小值<sup>[9]</sup>。Jin等提出了一种具有椭圆形孔的孔型密封结构,通过数值研究发现孔隙率是影响椭圆孔密封泄漏量的主要因素,而椭圆孔腔长短径比值(即椭圆形状)对泄漏量影响不显著<sup>[10]</sup>。

泵与压缩机等透平机械通常工作在润滑油、水等液相工质中,与燃气工质相比,液相工质具有更大的密度、黏度以及不可压缩性,因此流体激振以及封严问题更加显著。Jolly等实验测试了液相工质下孔型密封的转子动力特性,发现此时密封稳定性问题更加显著,甚至出现负刚度现象<sup>[11]</sup>。然而,目前关于孔型密封的应用研究大多集中于气相工质,液相工质的研究较少,这极大地限制了孔型密封在液相环境透平机械中的应用。

目前的实验测量和数值预测结果均表明,孔腔结构对孔型密封泄漏特性、转子动力特性影响显著<sup>[12-14]</sup>,但是已有文献大多集中于圆柱孔腔的几何参数如孔深、孔径等的影响研究,关于孔腔形状对密封性能影响的研究较少。因此,本文基于孔型密封结构提出了一种球凹孔密封以及两种斜孔密封结构,并数值研究了异形孔腔结构对液相孔型密封泄漏特性与转子耗电的影响,以期通过改良孔腔形状,提高孔型密封泄漏特性。

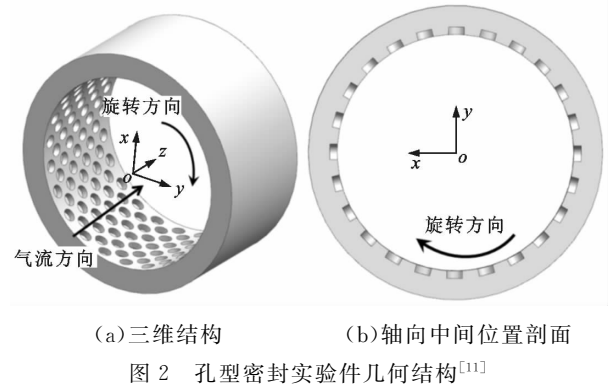
## 1 计算模型和数值方法

### 1.1 计算模型

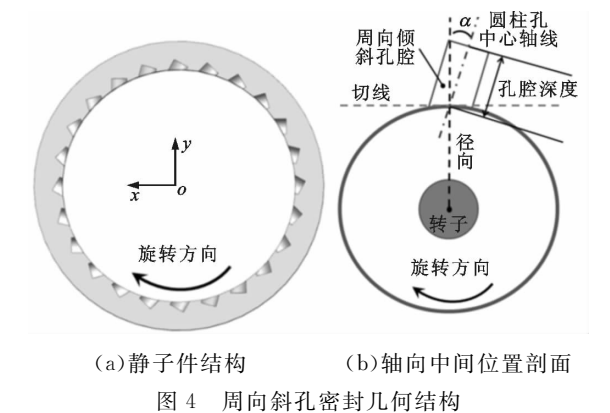
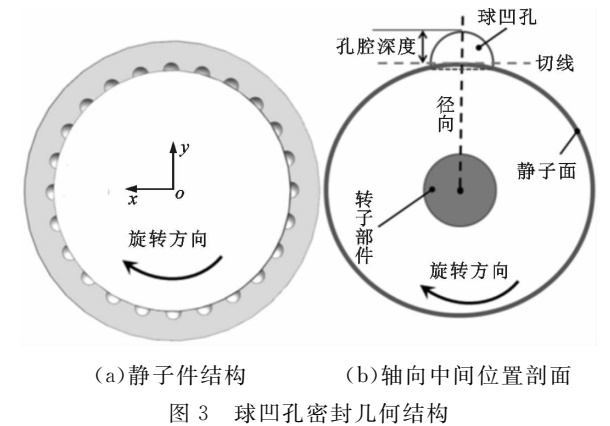
本文以Jolly实验测量的孔型密封结构<sup>[11]</sup>为基本模型,保持孔腔直径、孔腔深度、孔隙率恒定,设计了一种球凹孔密封、两种周向斜孔密封( $\alpha=\pm 30^\circ$ )和两种轴向斜孔密封( $\beta=\pm 20^\circ$ )结构。图2给出了孔型密封实验件几何结构,密封静子面上均匀布置有交错排列的径向圆柱孔腔。表1给出了孔型密封实验件几何结构参数及运行工况。

球凹孔密封几何结构如图3所示。孔腔底面为球冠面,孔腔进口正对转子中心,孔腔直径、孔腔深度及分布规律与实验件径向圆柱孔腔保持一致。

图4给出了周向斜孔密封的几何结构示意图。周向倾斜孔腔为圆柱孔形状,孔腔中心轴线在周向



| 参数      | 数值   | 参数                          | 数值      |
|---------|------|-----------------------------|---------|
| 转子直径/mm | 240  | 进口总压/MPa                    | 1       |
| 密封间隙/mm | 0.57 | 出口静压/MPa                    | 0.5     |
| 轴向长度/mm | 150  | 工质温度/℃                      | 50      |
| 孔径/mm   | 16   | 转子转速/(r·min <sup>-1</sup> ) | 0~6 000 |
| 孔深/mm   | 8    | 压比                          | 0.5     |
| 轴向孔数    | 5    | 工质                          | 水       |
| 孔隙率/%   | 38   | 总孔数                         | 240     |



发生偏移并与径向成一定角度  $\alpha$ ,当偏移方向与转子转动方向相同时  $\alpha$  为正值,当偏移方向与转子转

动方向相反时  $\alpha$  为负值。

图 5 给出了轴向斜孔密封的几何结构示意图。轴向斜孔密封孔腔为圆柱孔形状,孔腔中心轴线在轴向发生偏移并与径向成一定角度  $\beta$ ,当偏移方向与工质流动方向相同时  $\beta$  为正值,当偏移方向与流动方向相反时  $\beta$  为负值。

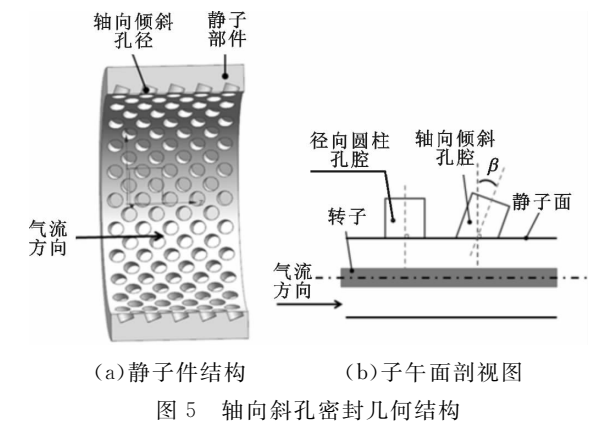
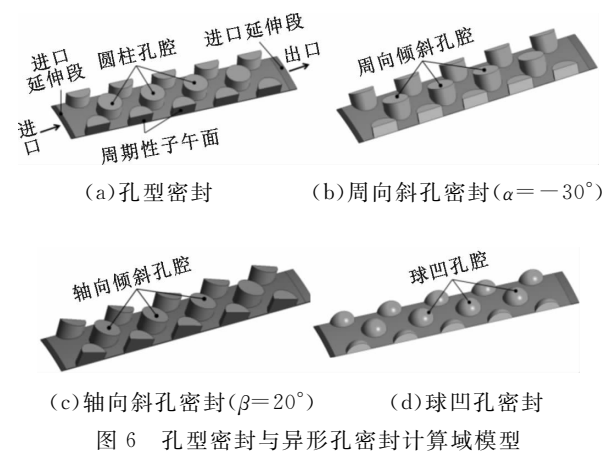


图 6 给出了孔型密封与异形孔密封的三维计算域模型,上下游均适当延长确保流动充分。由于孔型密封静子面孔腔采用的均匀交错排列方式具有旋转周期性,计算域选取两个孔腔弧段,周向两个侧面应用旋转周期性边界。



### 1.2 数值方法及验证

本文采用基于三维定常 RANS 方程的数值计算方法,计算分析了一种球凹孔密封、两种周向斜孔密封( $\alpha=\pm 30^\circ$ )以及两种轴向斜孔密封( $\beta=\pm 20^\circ$ )的泄漏特性、转子耗功和腔室流场结构。表 2 给出了本文采用的 CFD 数值方法。

采用 ANSYS ICEM 对如图 6 所示的异形孔密封三维周期性计算域模型进行了结构化网格划分,网格分布如图 7 所示,在流动复杂的密封间隙以及孔腔壁面处,网格均得到加密处理。经网格无关性分析,孔型密封以及异形孔密封周期性计算域网格

节点数均在 120 万~150 万之间,此时已保证计算结果与网格无关。

表 2 本文采用的 CFD 数值方法

|      |                     |
|------|---------------------|
| 求解器  | ANSYS CFX 16.0      |
| 网格生成 | ANSYS ICEM          |
| 求解方法 | 定常、时间推进             |
| 湍流模型 | RNG $k-\epsilon$ 方程 |
| 工质   | 水                   |
| 传热模型 | 等温                  |
| 固壁面  | 绝热,光滑               |
| 离散模型 | 高精度                 |

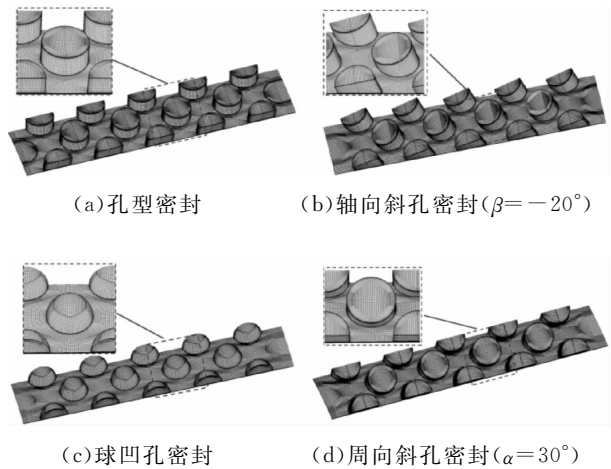


图 7 异形孔密封计算网格

以 Jolly 的孔型密封实验<sup>[11]</sup>为计算模型,以 3 种转速(2 000、4 000、6 000 r/min)下的密封泄漏量为考核指标,对本文采用的数值方法和湍流模型进行了验证,结果如图 8 所示。由图可以看出,RNG  $k-\epsilon$  湍流模型具有最佳的预测精度,预测泄漏量与实验值误差保持在 5% 以内,说明本文采用的数值方法能够准确预测液相工质下孔型密封泄漏量,因此后续计算均选用 RNG  $k-\epsilon$  湍流模型。

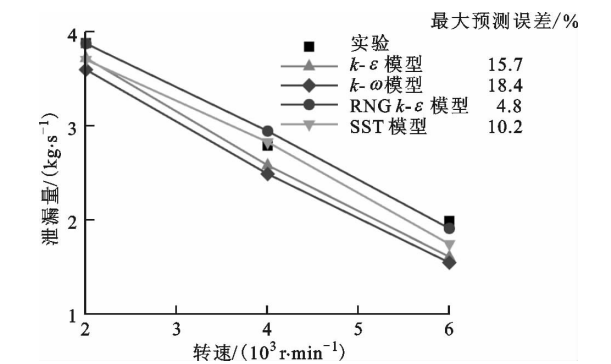


图 8 不同湍流模型下孔型密封泄漏量随转速的变化

## 2 结果与讨论

### 2.1 异形孔腔对孔型密封泄漏特性的影响

为分析异形孔腔对孔型密封泄漏特性的影响规律,计算分析了一种球凹孔密封、两种周向斜孔密封( $\alpha=\pm 30^\circ$ )和两种轴向斜孔密封( $\beta=\pm 20^\circ$ )在不同转速下的泄漏流量和流场结构。

图 9 给出了不同转速下球凹孔密封泄漏量与孔型密封泄漏量的对比曲线。由图可以看出:随转速增加,球凹孔密封与孔型密封泄漏量均呈下降趋势;与孔型密封相比,在 0 转速下,球凹孔密封具有明显更低的泄漏量(约降低 15%);在较低转速(2 000~4 000 r/min)时,球凹密封泄漏量略低于孔型密封;在较高转速(6 000 r/min)时,两种密封结构的泄漏量相近(相差小于 2%)。

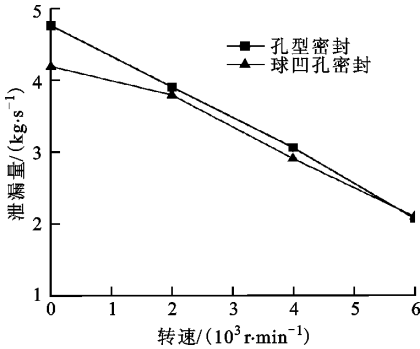


图 9 不同转速下球凹孔密封与孔型密封泄漏量的对比

图 10 给出了不同转速下两种周向斜孔密封与孔型密封泄漏量的对比曲线。由图可以看出:随转速增加,周向斜孔密封泄漏量呈下降趋势,且  $\alpha=30^\circ$  的周向斜孔结构泄漏量下降速度明显快于  $\alpha=-30^\circ$  的周向斜孔结构;与孔型密封相比,0 转速下,两种周向斜孔密封均使泄漏量明显增加(约增加 8.5%);在转速为 2 000~6 000 r/min 的范围内,倾斜角为正值的周向斜孔密封能够显著降低泄漏量,

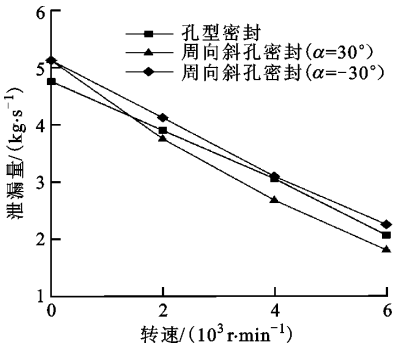


图 10 不同转速下周向斜孔密封与孔型密封泄漏量的对比

而倾斜角为负值的周向斜孔密封,泄漏量略高于孔型密封。

图 11 给出了不同转速下两种轴向斜孔密封与孔型密封泄漏量的对比曲线。由图可以看出:与孔型密封相比,倾斜角为正值的轴向斜孔密封在较低转速( $0\sim4\,000\text{ r/min}$ )时能够降低泄漏量,但是在  $6\,000\text{ r/min}$  时,泄漏量增加;倾斜角为负值的轴向斜孔密封则相反,在较低转速( $0\sim4\,000\text{ r/min}$ )时使得泄漏量增加,但在  $6\,000\text{ r/min}$  时泄漏量略降低。

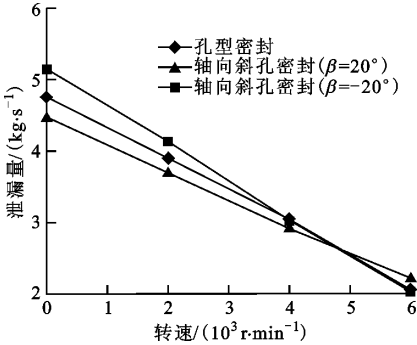


图 11 不同转速下轴向斜孔密封与孔型密封泄漏量的对比

孔型密封是利用孔型腔室内形成的湍流涡旋以及腔壁摩擦阻力作用耗散流体工质的动能,来降低密封泄漏量。腔室内的动能耗散作用的强弱决定了密封泄漏量高低,因此本文分析了孔型密封和异形孔密封腔室内的湍动能耗散率与流场结构,以解释泄漏量变化的原因。

图 12 给出了异形孔密封在不同转速下,最后一个腔室周向截面的流场和湍动能耗散率分布。由图

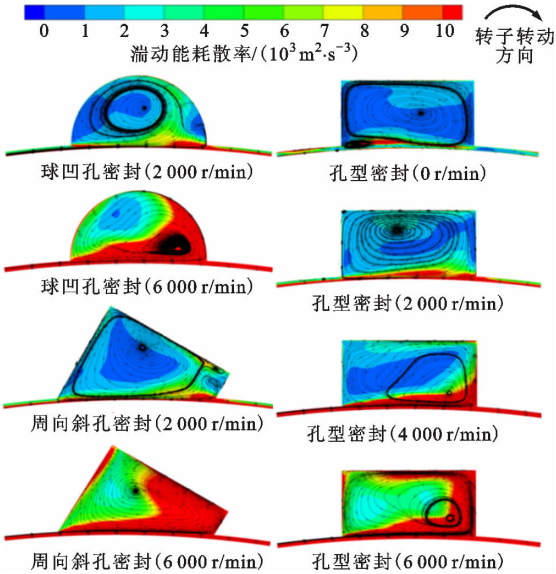


图 12 不同转速下异形孔密封轴向最后一个孔腔周向截面流线和湍动能耗散率分布

可以看出,随转速增加,流体工质流动方向逐渐向转子转动方向偏移,形成了周向的湍流涡旋,腔室内的湍动能耗散率明显增大,动能耗散作用增强,因此密封泄漏量降低。

图 13 给出了  $2\,000\text{ r/min}$  下异形孔密封轴向最后一个孔腔周向截面的流线与湍动能耗散率分布。由图可以看出,相比于圆柱孔腔,球凹孔腔与  $\alpha=30^\circ$  的周向倾斜孔腔内部流场更加复杂,在转子转动方向下游腔室壁面附近(如图 13 中①处所示),有小的涡流形成,因此湍动能耗散率更大,密封泄漏量更低。 $\alpha=-30^\circ$  的周向倾斜孔腔与圆柱孔腔相同,具有单涡核的旋流结构,且涡流尺寸更小,转子转动方向上游壁面附近湍动能耗散率较低,因此导致腔室耗散作用较弱,泄漏量相比于孔型密封更大。

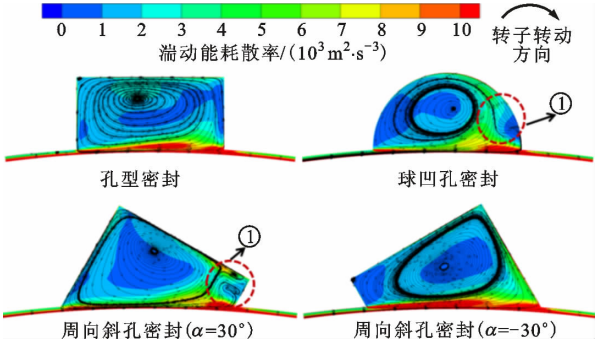


图 13  $2\,000\text{ r/min}$  下异形孔密封轴向最后一个孔腔周向截面流线与湍动能耗散率分布

图 14 给出了不同转速下异形孔密封轴向最后一个腔室子午面流线与湍动能耗散率分布。由图可以看出,相比于孔型密封,在  $0$  转速下,球凹孔腔与  $\beta=20^\circ$  的轴向倾斜孔腔在轴向下腔壁附近湍动能耗散率明显更高,且周向上游腔壁低湍动能耗散率区域较小,整体腔室内动能耗散作用更强,因此密封泄漏量较低。 $\beta=-20^\circ$  的轴向斜孔腔上游低湍动能耗散率区域较大,导致密封泄漏量略高于孔型密封。

在  $6\,000\text{ r/min}$  下,球凹孔密封在孔腔进口附近高端动能耗散率区域明显更大,动能耗散作用增强,但球凹孔腔体积较小导致湍流耗散区域较小。较高的湍流耗散率与较小的耗散体积,导致球凹孔密封泄漏量与孔型密封相近。对于轴向斜孔密封,当  $\beta=-20^\circ$  时,孔腔进口高端流耗散率区域(如图 14 中②处所示)明显更大,动能耗散作用更强,因此  $6\,000\text{ r/min}$  下,  $\beta=-20^\circ$  的轴向斜孔结构泄漏量低于  $\beta=20^\circ$  的轴向斜孔结构。

以往研究表明,密封内的气流激振力是由于转子动态偏心造成密封内工质压力周向分布不均匀,

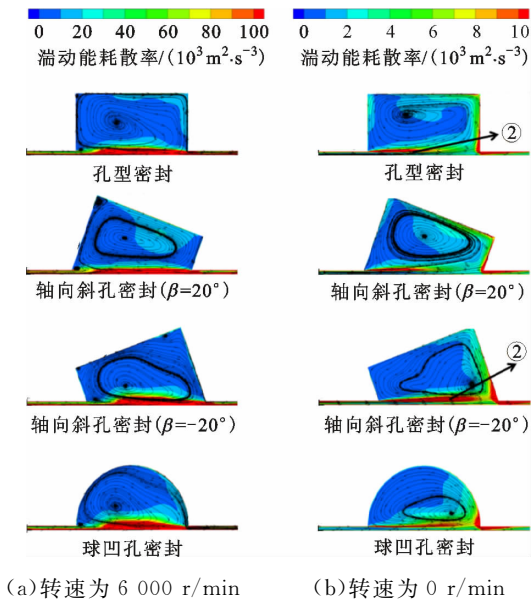


图 14 不同转速下异形孔密封轴向最后一个腔孔子午面流线与湍动能耗散率分布

以及强烈的周向旋流而产生的<sup>[15]</sup>。因此,限制密封装置中周向旋流的发展进而减小气流激振力的周向分量,是提高密封装置稳定性的有效途径。

引入量纲一的旋流比  $\mu$  来表征密封间隙内周向旋流强弱,其定义式为

$$\mu = u/U$$

式中: $u$  为流体工质周向速度; $U$  为转子面周向速度。

图 15 给出了异形孔密封间隙中间截面周向平均旋流比的轴向分布。由图可以看出,在无孔腔的轴向位置,间隙内旋流比受转子面摩擦作用逐渐上升,而在有孔腔轴向位置,孔腔的涡流耗散作用使得旋流比迅速下降。相比于孔型密封,球凹孔密封与周向斜孔密封旋流比更低,对周向旋流抑制作用更强烈。对于轴向斜孔密封,当  $\beta$  为正值时,旋流较大,轴向旋流抑制作用较弱;当  $\beta$  为负值时,轴向斜孔密封与孔型密封旋流比分布相近,抑制周向旋流

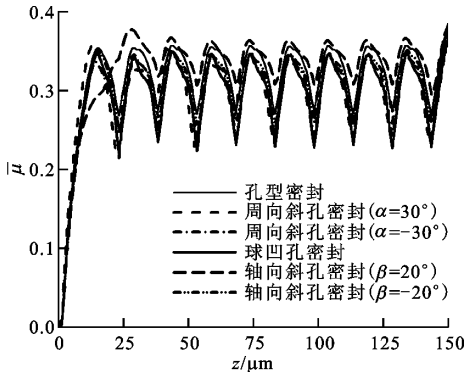


图 15 异形孔密封间隙中间截面周向平均旋流比的轴向分布

的能力相近。

### 2.2 异形孔腔对转子耗功特性的影响

在泵与压缩机等透平机械中,密封的主要作用是降低泄漏量,提高机组运行效率。转子耗功,即密封内流体工质对转子附加的拖拽力矩会导致转子输出功率较小,运行效率降低。另外,由于液相工质具有大密度和大黏性,导致转子耗功较大,不可忽略。因此,在关注密封泄漏特性的同时,准确预测转子耗功对优化密封设计、提高透平机械输出功率是十分必要的。

图 16 给出了异形孔密封转子面上拖拽力矩随转速的变化曲线。由图可以看出,与孔型密封相比,异形孔腔基本对转子耗功没有影响, $\beta=20^\circ$  的轴向斜孔密封具有最低的转子耗功特性。

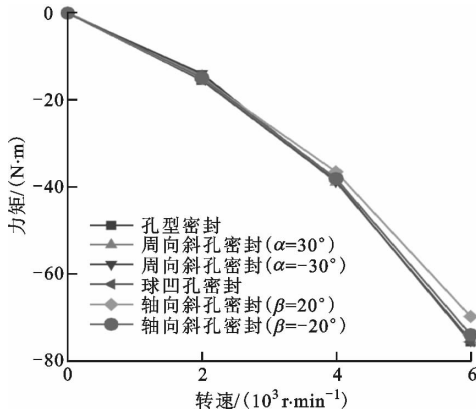


图 16 异形孔密封转子面力矩随转速的变化

### 3 结 论

本文采用基于三维定常 RANS 方程的定常数值计算方法,计算分析了异形孔腔,包括一种球凹孔腔、两种周向斜孔腔( $\alpha=\pm 30^\circ$ )和两种轴向斜孔腔( $\beta=\pm 20^\circ$ )对密封泄漏量和转子耗功的影响规律,为孔型密封的孔腔结构设计提供了理论依据,得到如下结论。

(1)球凹孔腔在转速为 0~4 000 r/min 的范围内能明显降低泄漏量。

(2)周向倾斜孔腔在 0 转速时,导致泄漏量显著增加(约增加 8.5%)。在有转速(2 000~6 000 r/min)情况下,倾斜角  $\alpha$  为正值周向斜孔腔导致泄漏量显著下降,倾斜角  $\alpha$  为负值的周向斜孔腔使泄漏量略微增加。周向倾斜孔腔对密封间隙内周向旋流的抑制作用更强烈。

(3)在转速为 0~4 000 r/min 的范围内,倾斜角  $\beta$  为正值轴向倾斜孔腔能够显著降低密封泄漏

量,倾斜角 $\beta$ 为负值的轴向倾斜孔腔导致密封泄漏量略微增加。

(4)孔腔形状对孔型密封转子耗功影响很小, $\beta=20^\circ$ 的轴向倾斜孔腔具有最低的转子耗功。

(5)孔腔内部的动能耗散作用强弱是影响密封泄漏量的主要原因。

## 参考文献:

- [1] 李军,晏鑫,李志刚. 热力透平密封技术 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2015: 93-94.
- [2] 李志刚,郎骥,李军. 迷宫密封泄漏特性的试验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(3): 48-52.  
LI Zhigang, LANG Ji, LI Jun. Experiment on leakage flow characteristic of labyrinth seal [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(3): 48-52.
- [3] NAGAI K, KANEKO S, TAURA H, et al. Numerical and experimental analyses of dynamic characteristics for liquid annular seals with helical grooves in seal stator [J]. ASME Journal of Tribology, 2018, 140(5): 052201.
- [4] MIGLIORINI P J, UNTAROIU A, WOOD H G. A numerical study on the influence of hole depth on the static and dynamic performance of hole-pattern seals [J]. ASME Journal of Tribology, 2015, 137(1): 011702.
- [5] CHILDS D W, SHIN Y S, SEIFERT B. A design to improve the effective damping characteristics of hole-pattern-stator annular gas seals [J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines & Power, 2006, 130(1): 82-93.
- [6] YAN X, HE K, LI J, et al. Numerical investigations on rotordynamic characteristic of hole-pattern seals with two different hole-diameters [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2015, 137(7): 071011.
- [7] YU Z, CHILDS D W. A comparison of experimental rotordynamic coefficients and leakage characteristic between hole-pattern gas damper seals and a honeycomb seal [J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines & Power, 1985, 120(4): 778-783.
- [8] CHILDS D W, ARTHUR S, MEHTA N. The impact of hole seal depth on the rotordynamic and leakage characteristics of hole-pattern-stator gas annular seals [J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines & Power, 2014, 136(4): 042501.
- [9] 方志,李志刚,李军. 孔型几何参数对孔型密封泄漏和鼓风加热特性影响研究 [J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(1): 135-141.  
FANG Zhi, LI Zhigang, LI Jun. Investigations on the effect of hole geometrical parameters on the leakage and windage heating characteristics of hole-pattern seals [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(1): 135-141.
- [10] PUGACHEV A O, KLEINHANS U, GASZNER M. Prediction of rotordynamic coefficients for short labyrinth gas seals using computational fluid dynamics [J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines & Power, 2012, 134(6): 062501.
- [11] JOLLY P, ARGHIR M, BONNEAU O, et al. Experimental and theoretical rotordynamic coefficients of smooth and round-hole pattern water-fed annular seals [J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines & Power, 2018, 140(11): 112501.
- [12] 晏鑫,李军,丰镇平. 孔型气体密封转子的动力特性研究 [J]. 动力工程学报, 2009, 29(1): 31-35.  
YAN Xin, LI Jun, FENG Zhenping. Research on dynamic characteristics of the rotor with annular seal of hole-pattern [J]. Journal of Power Engineering, 2009, 29(1): 31-35.
- [13] CHILDS D, WADE J. Rotordynamic-coefficient and leakage characteristics for hole-pattern-stator annular gas seals: measurements versus predictions [J]. ASME Journal of Tribology, 2004, 126(2): 326-333.
- [14] VANNARSDALL M, CHILDS D W. Static and rotordynamic characteristics for a new hole-pattern annular gas seal design incorporating larger diameter holes [J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines & Power, 2014, 136(2): 022507.
- [15] 李志刚,李军,丰镇平. 进口防旋板对孔型密封非定常气流激振特性的影响 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 5(1): 16-21.  
LI Zhigang, LI Jun, FENG Zhenping. Effect of swirl brakes on unsteady flow excitation characteristic of hole-pattern seal [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 5(1): 16-21.

(编辑 荆树蓉)