

孔型参数对流体孔型密封泄漏特性和转子耗功的影响

方志¹, 李志刚¹, 李军^{1,2}

(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: 为评估孔型密封在液体透平机械动静间隙的封严效果,明确液体工质下孔型密封设计中关键几何参数孔深、孔径选取准则,采用基于动网格技术的网格自动生成方法和基于三维定常雷诺时均 Navier-Stokes(RANS)方程的孔型密封泄漏流动数值计算方法,研究了液体工质下孔型几何参数孔深、孔径对孔型密封泄漏特性和转子耗功的影响规律。计算分析了2种转速(2 000, 6 000 r/min)、5种孔径(3, 6, 9, 12, 16 mm)下孔深在0.5~15 mm范围连续变化时,液体孔型密封的泄漏量、转子耗功以及孔腔流场结构,并与实验结果进行了对比。结果表明:所采用的数值方法能够准确预测液体孔型密封泄漏量;液体孔型密封泄漏量随转速增大而线性减小;深径比(孔深与孔径之比)对孔腔内涡系结构具有显著影响,是影响液体孔型密封泄漏量的关键参数;随孔深径比增加,液体孔型密封泄漏量先减小后增大;存在最佳孔深径比范围0.5~0.6,此时液体孔型密封泄漏量最小;不同孔径下,液体孔型密封转子耗功随孔深径比的增加而急剧减小。

关键词: 流体孔型密封;孔深;孔径;泄漏特性;转子耗功

中图分类号: TK476 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtubxb202009009 **文章编号:** 0253-987X(2020)09-0081-08



OSID 码

Effects of Hole Depth and Diameter on the Leakage Characteristics and Rotor Power Loss of Liquid Hole-Pattern Seals

FANG Zhi¹, LI Zhigang¹, LI Jun^{1,2}

(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 evaluate the sealing performance of the hole-pattern seals in liquid turbomachines and provide a comprehensive selection criterion of the critical geometry parameters (hole depth and hole diameter) for the design of liquid hole-pattern seals, the mesh auto-generation method and numerical solution method for the prediction of the steady leakage flow in the hole-pattern seals were proposed and validated using the 3D steady Reynolds-averaged Navier-Stokes(RANS) equations. The influences of the hole depth and hole diameter on the seal leakage characteristics and rotor power loss were numerically investigated for a hole-pattern seal of water fluid. The leakage flow rate, rotor drag torque, and flow fields in the hole cavities were calculated and analyzed for liquid hole-pattern seals with various hole depths ($H=0.5-15$ mm) and five hole diameters ($D=3, 6, 9, 12, 16$ mm) at two rotational speeds ($n=2\,000, 6\,000$ r/min). Numerical results show that the present numerical methods possess better accuracy for the

prediction of leakage flow rate of the liquid hole-pattern seal. The leakage flow rate of the liquid hole-pattern seal decreases linearly with the rotational speed. From a view of seal leakage performance, the ratio of hole depth to hole diameter (A_R), which significantly influences the structure of the vortex system in the hole cavity, is the most critical design parameter for liquid hole-pattern seals. With the increase of A_R , the leakage flow rate firstly decreases and then increases. There is an optimum region for A_R (0.5 - 0.6), where the liquid hole-pattern seal possesses the best sealing performance with minimum leakage. For the liquid hole-pattern seals with different hole diameters, the rotor power loss obviously decreases with the increase of A_R .

Keywords: liquid hole-pattern seal; hole depth; hole diameter; leakage characteristics; rotor power loss

旋转动密封是现代透平机械的关键部件之一,先进的动密封技术,能够有效减小泄漏流量,提高机组运行效率,提升系统稳定性^[1]。泵等透平机械通常工作在高压润滑油、水等液体工质中,与传统气体工质相比,液体工质具有大密度、高黏度以及不可压缩等特性,泄漏损失与流体激振问题更加显著。因此,针对液体工质开展先进的动密封技术研究,对提高透平机械运行效率与安全稳定性具有重要意义。

传统的液体工质透平机械,通常使用迷宫密封^[2]与螺旋密封^[3]作为密封部件。迷宫密封具有结构简单、制造成本低、易于安装等优点,但是迷宫密封不能有效抑制密封间隙内周向泄漏流的发展,因此密封切向失稳气流激振力显著,密封转子稳定性较差^[2,4]。螺旋密封依靠螺杆泵原理,在螺旋槽内产生反向的泵送压头与泵送流量,达到降低密封泄漏量目的^[5]。螺旋密封密封性能与转速密切相关,在高速情况下螺旋密封具有极佳的封严性能,甚至能够实现零泄漏,但在较低转速下,由于泵送效应较弱,螺旋密封密封性能较差。

孔型密封是一种典型的阻尼密封结构。相比于迷宫密封与螺旋密封,孔型密封兼顾了优良的封严性能与良好的转子系统稳定性,是一种更先进的阻尼密封形式^[6-14]。目前,孔型密封主要应用于多级离心压缩机平衡螺栓密封和中心密封等高压气体工质环境,在液体工质中的应用与研究较少。2018年,Jolly等通过实验证实了在液体工质下,孔型密封仍具有优良的封严性能,实验测试表明,相比于光滑密封,液体孔型密封能够降低泄漏量30%以上^[7]。但是,目前国内外关于孔型密封液体工质下的性能研究较少,液体孔型密封泄漏特性和转子动力特性及其影响因素尚未明确,限制了孔型密封在液体透平机械中的推广应用。

孔型密封利用圆孔腔室内形成的湍流涡旋以及

腔壁摩擦阻力作用耗散流体力工的动能,降低密封泄漏量,因此孔腔结构是影响孔型密封封严性能的关键几何因素^[8]。目前,国内外的研究主要集中于气体工质下孔型密封孔腔结构参数对其泄漏与转子动力特性的影响研究。1985年,Childs等首次测试了3种具有不同孔腔形状(十字形孔、菱形孔、圆柱孔)的气体孔型密封结构,实验结果证实了圆柱孔型密封具有最佳的泄漏与转子动力特性^[9]。随后,Yu等通过实验进一步指出了孔深、孔径是影响孔型密封性能的关键参数,但是实验没有得出确切的影响规律^[10-13]。为明确孔型密封结构参数对其性能的影响,方志等数值研究了孔深、孔径对孔型密封泄漏特性的影响,结果发现深径比 A_R (孔深与孔径之比)是影响孔型密封泄漏量的关键参数,并且指出 A_R 为0.15~0.25时,气体工质孔型密封泄漏量取得最小值^[15]。

目前,实验测量以及数值预测均表明,孔型参数孔深、孔径是影响气体孔型密封泄漏与转子动力特性的关键因素^[10-16],但液体工质下孔型参数对孔型密封性能的影响规律仍未明确。因此,本文开展了液体工质下孔型参数孔深、孔径对孔型密封泄漏性能影响的研究,以期孔型密封在液体透平机械中的推广应用和结构优化设计提供更充分的理论依据。此外,与气体工质不同,液体工质具有大密度、高黏度以及不可压缩等特性,工质对密封转子拖拽力矩(即转子耗功)更大,对泵、压缩机等透平机械运行效率影响更显著。因此,开展高性能的液体孔型密封研究,转子耗功也是必须考虑的关键因素之一。

为推广孔型密封在液体透平机械中的应用,明确液体孔型密封设计中孔型参数选取准则,本文采用了基于动网格技术的网格自动生成方法和基于三维定常雷诺时均Navier-Stokes(RANS)方程的孔型密封泄漏量的数值计算方法,数值研究了液体工质

下孔型几何参数孔深、孔径对孔型密封泄漏特性以及转子耗功的影响规律,计算分析了 2 种转速($n=2\,000,6\,000\text{ r/min}$)、5 种孔径($D=3,6,9,12,16\text{ mm}$)下孔深 H 在 $0.5\sim15\text{ mm}$ 范围变化时孔型密封的泄漏量、转子耗功和孔腔流场结构,以期为液体孔型密封设计与应用提供明确可靠的理论依据。

1 计算模型和数值方法

1.1 计算模型

本文以 Jolly 等实验孔型密封结构为基本模型^[7],保持密封直径、轴向长度以及密封间隙不变,设计了 5 种孔径($D=3,6,9,12,16\text{ mm}$)的孔型密封结构。实验孔型密封结构如图 1 所示,密封静子面均匀交错布置有孔径 16 mm 、孔深 7.6 mm 的孔腔结构。表 1 给出了详细的实验孔型密封几何参数与实验工况。表 2 给出了本文设计的不同孔径孔型密封的几何结构参数。以往研究^[12,14]表明,深径比 A_R 是影响气体孔型密封泄漏特性的关键因素,因此本文也采用 A_R 来表征孔深,针对每种孔径,分别设计了 10 种孔深结构, A_R 范围均为 $0.1\sim1.0$ 。

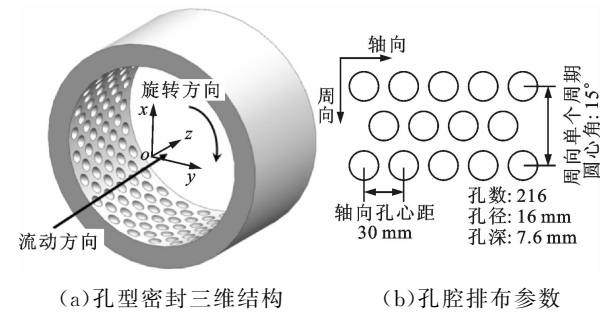


图 1 孔型密封实验件几何结构^[7]

表 1 孔型密封实验件几何结构参数及运行工况			
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/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	0~6 000
孔深/mm	7.6	压比	0.5
轴向孔数	5	工质	水
孔隙率/%	38	总孔数	240

图 2 给出了孔型密封三维计算域模型,密封进出口均适当延伸以保证均匀流动边界条件。由于孔型密封孔腔采用的均匀交错布置方式具有旋转周期性,因此本文选取的计算域模型为周向包含两个孔腔的周期性弧段,弧段两个侧面应用旋转周期性边

界条件。

表 2 不同孔径下孔型密封几何结构参数

孔径/mm	孔数	轴向孔心距/mm	孔深/mm	轴向孔数	周向周期数
3	5 880	6	0.3~3	24,25	120
6	1 440	12	0.6~6	12	60
9	855	15	0.9~9	9,10	45
12	448	20	1.2~12	7	32
16	216	30	1.6~16	4,5	24

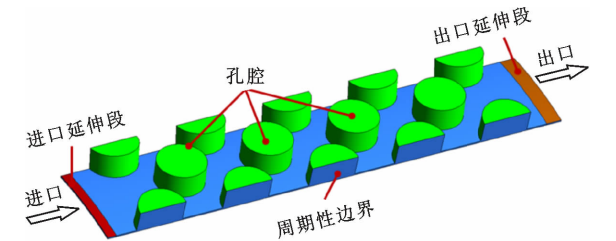


图 2 $H=16\text{ mm}$ 、 $D=7.6\text{ mm}$ 的孔型密封三维计算域模型

1.2 计算网格

为研究液体工质下孔型参数孔深、孔径对孔型密封泄漏特性的影响,本文设计了共计 50 种具有不同孔深、孔径的孔型密封结构,并进行三维结构化网格划分。针对每种孔径下具有不同孔深的孔型密封,本文首先采用商业软件 ANSYS ICEM 对一种孔深的密封结构进行了三维结构化网格划分,然后依靠基于动网格技术和节点位移扩散方程的孔型密封网格自动生成方法,生成具有其他孔深的孔型密封结构化网格。图 3 分别给出了两种不同网格生成方法生成的网格,如图所示,两种方法生成的网格质量良好,均满足计算网格质量要求。基于动网格技术和节点位移扩散方程的孔型密封网格自动生成方法具有几何识别精度高、速度快、计算成本小等优点,对小尺寸连续变化的计算模型网格剖分具有显著优势。

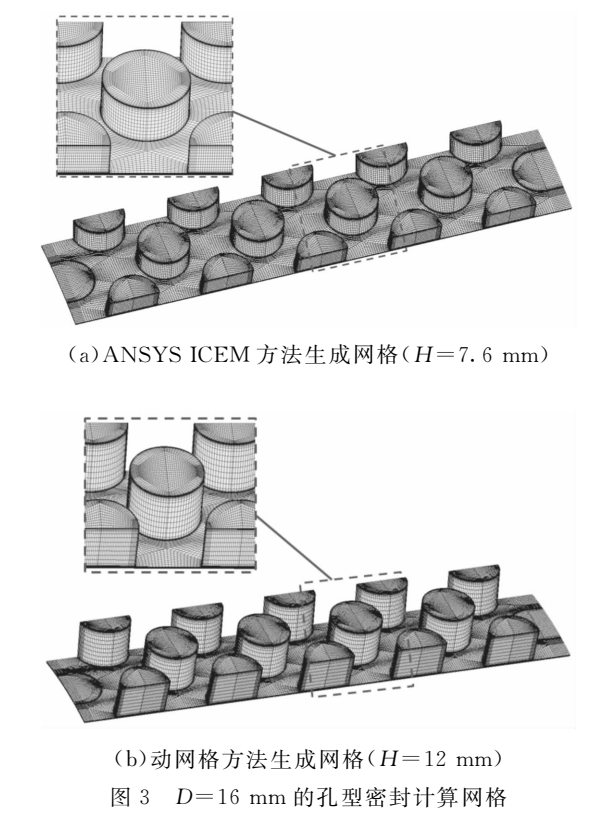
本文采用的孔型密封网格自动生成方法,是利用 ANSYS CFX 求解节点位移扩散方程的动网格技术。节点位移扩散方程如下

$$\nabla \cdot (\Gamma_d \nabla \delta) = 0 \tag{1}$$

式中: δ 为密封孔顶面节点径向位移; Γ_d 为网格刚度,决定计算域内相邻网格节点一起移动的程度,网格刚度越大的区域,相邻节点间相对位移越小。网格刚度 Γ_d 由刚度模型决定,为保证边界层网格质量,本文选取基于网格控制体积的刚度模型如下

$$\Gamma_d = \left(\frac{V_{\text{ref}}}{V} \right)^{C_f} \tag{2}$$

式中： V_{ref} 为参考控制体积，默认为 1 m^3 ； V 为控制体积； C_f 为刚度模型指数系数。该刚度模型表明，网格刚度随着控制体积减小而呈指数增大，而 C_f 决定了网格刚度增大速率。在初始网格加密区域（如近壁面边界层区域），由于控制体积小，网格刚度大，相邻节点间相对位移很小，保证了孔深增大或减小时新生成的网格节点相对分布不变。



1.3 数值方法与验证

表 3 给出了本文数值计算采用的数值方法。本文计算边界条件与实验工况保持一致，由表 1 给出。采用商业软件 ANSYS CFX 16.0 对三维定常 RANS 方程进行求解。传热模型考虑实际应用工况采用等温模型，进出口给予压力边界条件，转速为实验转速 $0\sim6\,000\text{ r/min}$ 。

表 3 数值计算方法	
求解器	ANSYS CFX 16.0
网格生成方法	ANSYS ICEM 及 CFX 动网格方法
求解方法	定常、时间推进
湍流模型	RNG $k-\epsilon$
工质	水
传热模型	等温模型
固壁面处理	绝热，光滑
离散模型	高精度离散模型

为保证计算网格无关性，选用实验孔型密封几何结构 ($D=16\text{ mm}$, $H=7.6\text{ mm}$) 生成 6 套不同疏密程度的计算网格，计算网格在壁面边界层内均适当加密，且孔腔内采用 O 型网格加密，网格数在 $2\times 10^5\sim 15\times 10^5$ 之间，以 $6\,000\text{ r/min}$ 下的密封泄漏量为考核指标，进行了网格无关性验证。图 4 给出了孔型密封泄漏量随网格数变化的曲线。如图所示，当网格数大于 8×10^5 时，计算结果偏差小于 0.5% ，可以视为网格无关。后续不同计算模型，网格数均在 $8\times 10^5\sim 20\times 10^5$ 之间，满足网格无关性精度要求。

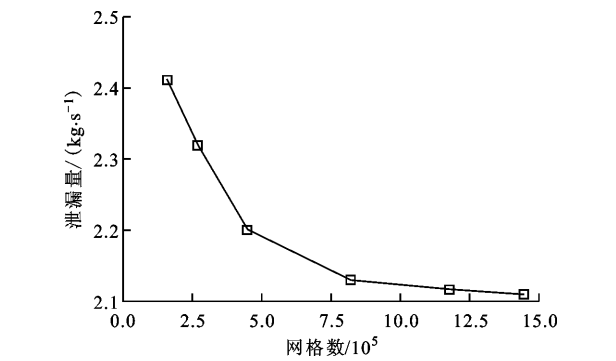


图 4 孔型密封泄漏量随网格数变化的曲线

选用实验孔型密封几何结构 ($D=16\text{ mm}$, $H=7.6\text{ mm}$)，以不同转速下密封泄漏量为考核指标，以动网格方法生成的结构化网格为计算网格，对本文采用的数值方法以及网格生成方法进行了验证，结果如图 5 所示。在 3 种转速下，采用 RNG $k-\omega$ 湍流模型均具有较好的预测精度，并且计算与实验结果偏差均在 5% 以内，满足计算精度要求，因此证实本文采用的数值方法以及网格生成方法能够准确预测液体孔型密封泄漏量。

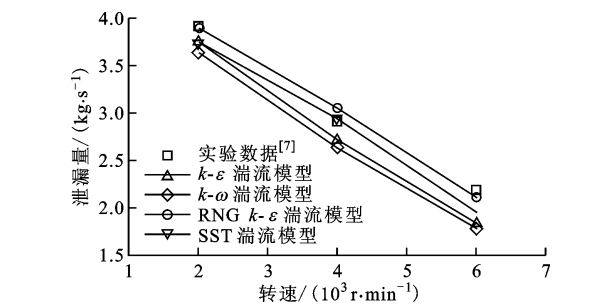


图 5 孔型密封泄漏量随转速的变化

2 结果与讨论

本文采用基于三维定常 RANS 方程的数值方法，以及基于节点位移扩散方程与网格变形技术的动网格生成方法，数值研究了液体工质下孔型参数

孔深、孔径对孔型密封泄漏特性与转子耗功的影响,计算分析了 5 种孔径下,孔深在 0.5~15 mm 范围变化的孔型密封泄漏量、孔腔内流场结构以及转子耗功。

2.1 泄漏特性

图 6 给出了 2 000、6 000 r/min 下不同孔径孔型密封泄漏量随深径比的变化曲线。如图所示,液体工质下,对所有孔径的孔型密封,随孔深增加,孔型密封泄漏量均呈先降低后增加的变化趋势,并且均在 $A_R=0.5\sim0.6$ 范围内取得最小值。方志等在文献[15]中的研究表明,气体工质下,孔型密封泄漏量在 $A_R=0.15\sim0.25$ 范围内取得最小值。因此,可以得出结论:针对可压缩(气体)和不可压缩(液体)工质,孔型密封最佳孔型参数不同;液体工质下,孔型密封最佳深径比范围是 0.5~0.6,此时密封泄漏量最小。

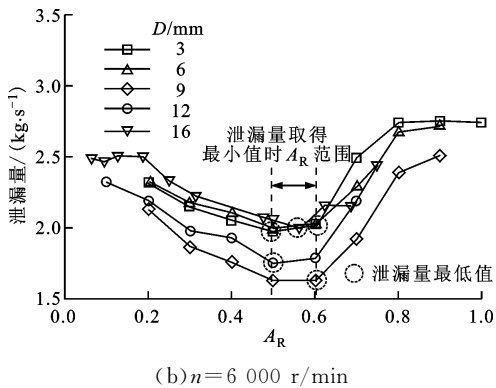
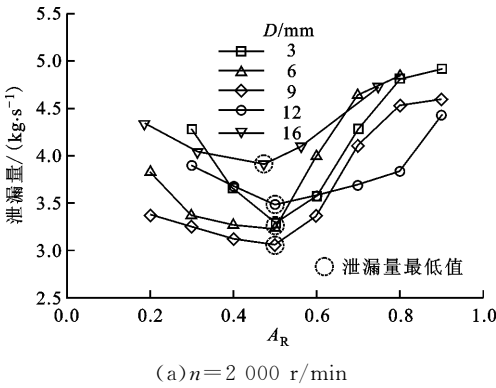
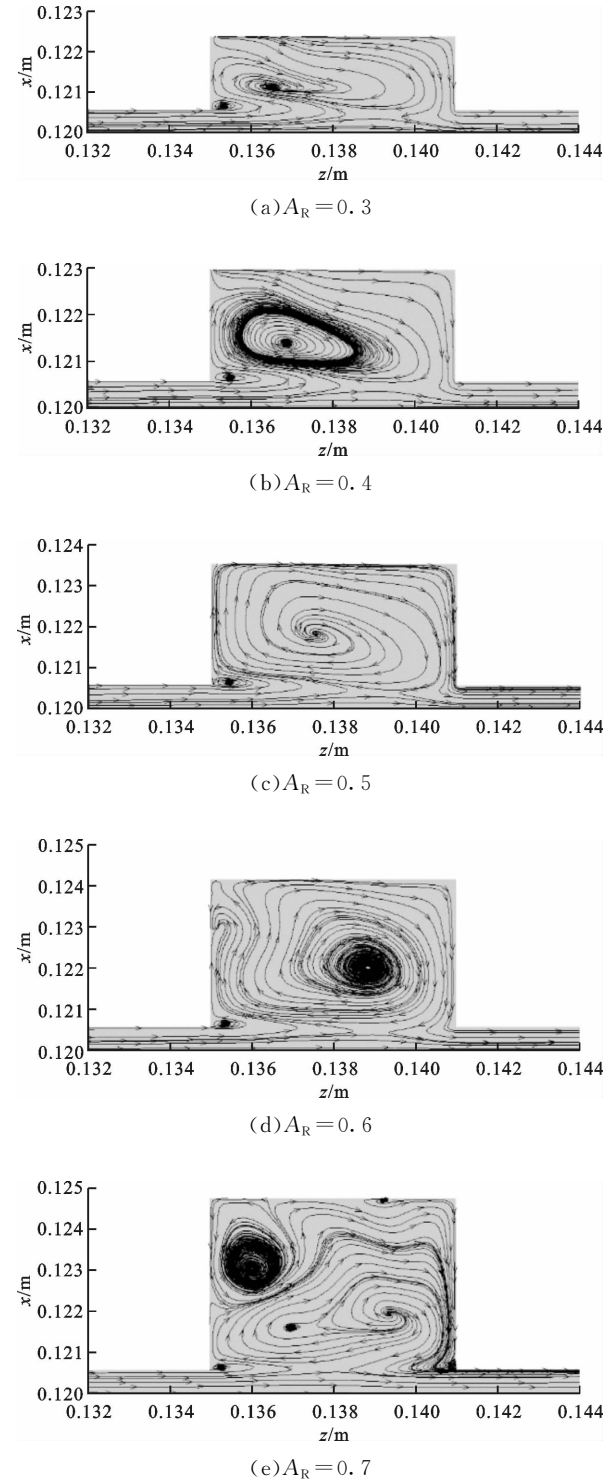


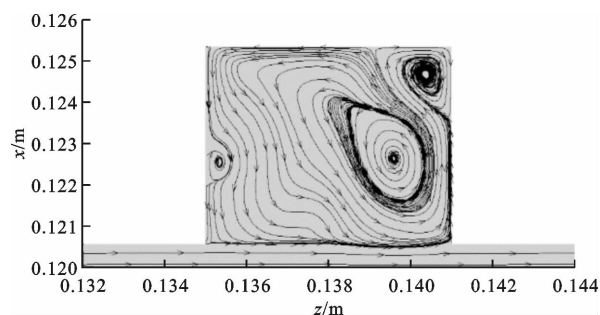
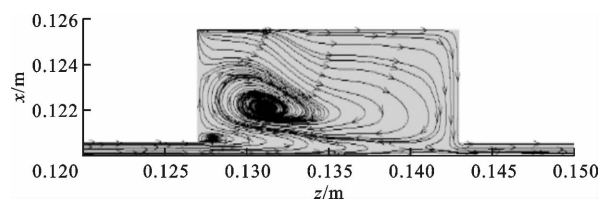
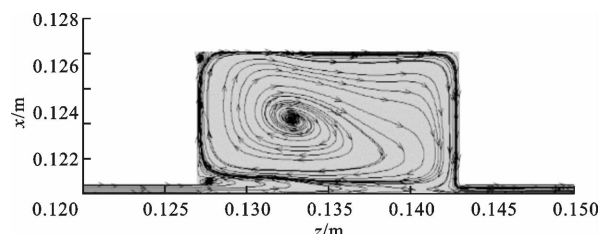
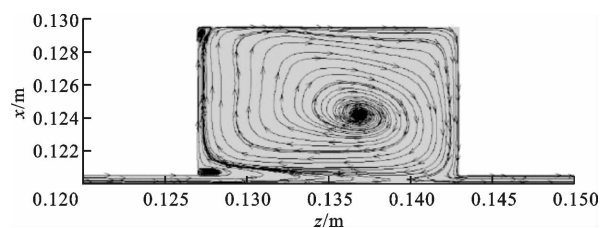
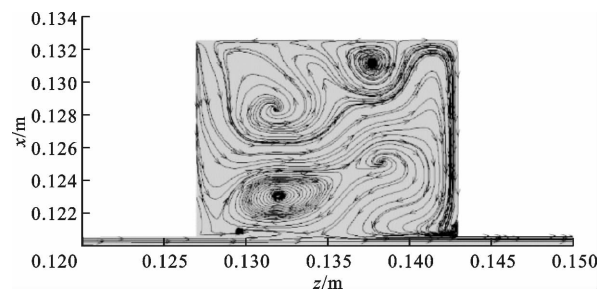
图 6 不同孔径下孔型密封泄漏量随深径比的变化曲线

研究表明,对气体孔型密封,当 $n<15\,000\text{ r/min}$ 时,转速对密封泄漏量影响很小($<5\%$),而对液体孔型密封,密封泄漏特性对转速变化极为敏感^[8-11]。如图 5 和图 6 所示:液体孔型密封泄漏量随转速增大而线性减小;当转速从 2 000 r/min 增大到 6 000 r/min 时,液体孔型密封泄漏量减小了约 5%。因此,液体孔型密封设计和泄漏性能评估中必

须考虑转速的影响。

研究还表明,孔型密封利用孔腔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,孔腔内涡流结构是影响孔型密封泄漏特性的关键因素^[8,14]。因此,为解释孔型密封泄漏量随深径比增加呈现先增加后降低的变化趋势,本文分析了不同深径比下,孔型密封孔腔子午面的涡流结构。图 7、图 8 分别给出了孔径为 6、16



(f) $A_R=0.8$ 图7 $D=6$ mm的孔型密封孔腔子午面流场结构(a) $A_R=0.313$ (b) $A_R=0.475$ (c) $A_R=0.563$ (d) $A_R=0.75$ 图8 $D=16$ mm的孔型密封孔腔子午面流场结构

mm时孔型密封轴向最后一个孔腔子午面的流场结构。如图所示:孔型密封孔径一定时,随 A_R 在0.1~0.6范围内增加,孔腔内流场始终为单涡核结构,并且涡流尺寸逐渐增大,孔腔动能耗散作用增强,因

此密封泄漏量逐渐降低;当 A_R 大于0.6时,孔腔内的流场由单涡核结构转变为几个尺寸较小的涡流结构,孔腔的动能耗散作用减弱,因此密封泄漏量增加。

图9给出了孔径为16 mm时不同孔深的孔型密封间隙内的静压沿轴向的分布。如图所示: A_R 较小(0.125)时,孔型密封孔腔下方的间隙区域静压基本保持不变,表明此时孔腔内涡流对间隙内的工质动能耗散作用很弱,而在下游齿尖区域,由于齿尖的节流作用,压力能转换成动能,因此静压会急剧下降; $A_R=0.563$ 时,孔型密封孔腔下方的间隙区域静压呈现明显的先降低后升高的过程。此时上游齿尖节流作用增强,导致该区域静压继续下降,并且孔腔内的涡流对间隙内工质流体动能耗散作用增强,导致静压显著增加。这表明 $A_R=0.563$ 时,孔型密封的齿尖节流与孔腔内涡流耗散作用都增强,因此 $A_R=0.563$ 时密封泄漏量达到最低值(如图6所示)。 $A_R=0.75$ 时,孔型密封孔腔下方间隙区域的静压呈现缓慢降低的趋势,表明此时齿尖节流作用以及孔腔内涡流耗散作用减弱,因此密封泄漏量增加(如图6所示)。

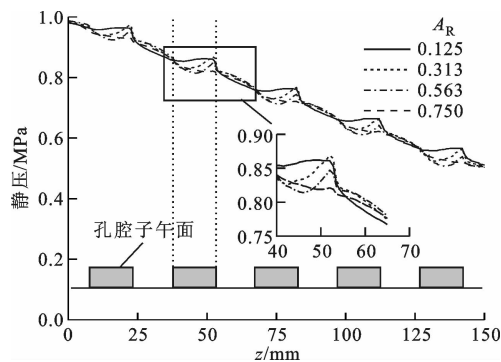
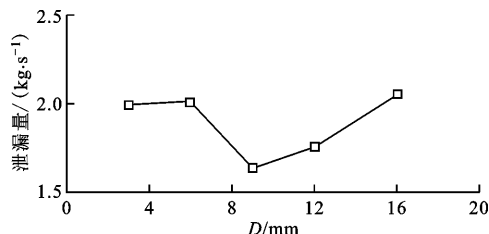
图9 $D=16$ mm的孔型密封间隙内静压沿轴向的分布

图10给出了 $A_R=0.5$ 、 $n=6\ 000$ r/min时孔型密封泄漏量随孔径变化的曲线。如图所示, A_R 恒定时,随孔径在3~16 mm(对应当量齿数25~5)范围内增加,孔型密封泄漏量整体呈现先降低再增加的趋势,并且在 $D=9$ mm时取得最小值。这是由于密封泄漏量受腔室涡流耗散作用增强以及密封当量

图10 $A_R=0.5$ 、 $n=6\ 000$ r/min时孔型密封泄漏量随孔径变化的曲线

齿数(轴向孔数)减少的耦合影响所致。密封轴向长度和直径一定时,随孔径的增大,密封轴向和周向具有耗散作用的孔腔数减少,即当量密封齿数减小;同时,孔径的增大使孔腔上下游间隙射流行程增大,动能输运效应减弱,即单个孔腔的耗散作用增强。当孔径较小(3~9 mm)时,密封当量齿数较大,孔腔内涡流耗散作用变化是导致密封泄漏量变化的主要因素,密封孔径增大导致孔腔涡流耗散作用增强,动能输运系数减小,因此密封泄漏量降低;孔径进一步增加(9~16 mm)时,由于当量齿数急剧减小,当量齿数成为影响密封泄漏量变化的主要因素,孔径增加,当量齿数减小,因此密封泄漏量增加。

2.2 转子耗功

与气体工质密封相比,液体孔型密封由于工质流体具有大密度、高黏度以及不可压缩等特性,工质对转子拖拽力矩较大,显著影响了透平机械的输出功率与运行效率,因此将孔型密封推广应用于液体工质透平机械,尤其是小功率离心泵时,必须综合评估密封泄漏量和转子耗功对装置效率的耦合影响。

图 11 给出了不同孔径下孔型密封转子耗功随深径比变化的曲线。如图所示: $A_R=0.1\sim0.7$ 时,随 A_R 增加,不同孔径孔型密封转子耗功均呈快速下降趋势;当 $A_R>0.7$ 时, A_R 增加对转子耗功影响不大。另外,相同 A_R 下,随孔径增加,孔型密封转子耗功整体呈现先增加后降低的趋势。因此,在孔型密封设计时,为避免较大的转子耗功导致透平机械输出功率降低,应选取较大的深径比($A_R>0.5$)和较小的孔径($D<9\text{ mm}$)。

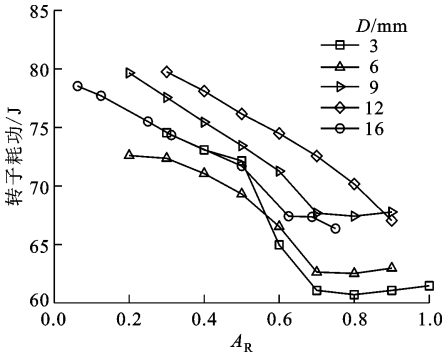


图 11 6 000 r/min 时不同孔径下孔型密封转子耗功随深径比变化的曲线

3 结 论

本文采用基于动网格技术以及节点位移扩散方程的新型孔型密封结构化网格自动生成方法,以及基于定常 RANS 方程的数值方法,数值研究了孔型

参数孔深、孔径对孔型密封泄漏特性与转子耗功的影响规律。计算分析了 2 种转速、5 种孔径下,孔深径比在 0.1~1.0 范围内变化的液体孔型密封的泄漏量、转子耗功、孔腔涡流结构。相关结果可对孔型密封在液体旋转机械应用和设计孔型参数孔深、孔径的选取提供可靠的理论依据,主要结论如下。

(1)本文采用的新型孔型密封结构化网格自动生成方法和泄漏流动数值计算方法能够准确预测液体工质孔型密封的泄漏量,数值校验误差在 5% 以内。

(2)相同孔径下,随深径比增加,液体孔型密封泄漏量先减小后增大。不同孔径(3~16 mm)下孔型密封泄漏量均在 $A_R=0.5\sim0.6$ 时达到最小值,因此液体孔型密封设计中孔深和孔径的选取应遵循最佳 $A_R=0.5\sim0.6$ 的原则。

(3)液体孔型密封深径比对孔腔内的涡系结构具有显著影响,这是导致孔型密封泄漏量随深径比变化的主要原因。随 A_R 增加(0.1~0.6),孔腔内涡流结构始终为单涡核结构,并且涡流尺寸逐渐增加,故而密封泄漏量降低; A_R 进一步增加(0.6~1.0)时,孔腔内单涡核结构转变成若干尺寸较小的涡流,动能耗散作用减弱,故泄漏量增加。

(4) $A_R=0.5$ 时,随孔径增加,液体孔型密封泄漏量先减小后增大,存在最佳的孔径。

(5)液体孔型密封设计时,为避免较大的转子耗功导致透平机械输出功率降低,应在保证密封性能基础上,选取较大深径比和较小孔径。

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 experiment analyse of dynamic characteristics for liquid annular seals with helical grooves in seal stator [J]. Journal of Tribology, 2018, 140(5): 052201.

[4] 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.
- [5] YI M Z, JI B H, CHAO W. Dynamic analysis of spiral-groove rotary seal ring for wet clutches [J]. Journal of Tribology, 2013, 136(3): 031710
 - [6] CHILDS D W, ELROD D, HALE K. Annular honeycomb seals: test results for leakage and rotordynamic coefficients; comparisons to labyrinth and smooth configurations [J]. Journal of Tribology, 1989, 111(2): 293-300.
 - [7] JOLLY P, ARGHIR M, BONNEAU O, et al. Experimental and theoretical rotordynamic coefficients of smooth and round-hole pattern water-fed annular seals [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines & Power, 2018, 140(11): 112501.
 - [8] 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]. Journal of Tribology, 2015, 137(1): 259-263.
 - [9] CHILDS D W, KIM C H. Analysis and testing of turbulent annular seals with different directionally homogeneous surface roughness treatments for rotor and stators elements [J]. Journal of Tribology, 1985, 107(3): 296-306.
 - [10] 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]. Journal of Engineering for Gas Turbines & Power, 1998, 120(4): 778-783.
 - [11] 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]. Journal of Engineering for Gas Turbines & Power, 2014, 136(4): 042501
 - [12] MIGLIORINI P J, UNTAROIU A, WOOD H G. A numerical study on the influence of hole aspect ratio on the performance characteristics of a hole-pattern seal [C]// Proceedings of ASME Turbo Expo 2014. New York, USA: ASME, 2014: GT2014-26581.
 - [13] 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.
 - [14] 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.
 - [15] 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.
 - [16] YAN X, HE K, LI J, et al. Numerical investigations on rotordynamic characteristic of hole-pattern seals with two different hole-diameters [J]. Journal of Turbomachinery, 2015, 137(7): 071011.

[本刊相关文献链接]

- 梁志远, 桂雍, 赵钦新. 超临界二氧化碳条件下 3 种典型耐热钢腐蚀特性实验研究. 2019, 53(7): 23-29. [doi: 10.7652/xjtuxb201907004]
- 卓明, 杨利花, 夏凯, 等. 考虑热场的重型燃气轮机组转子盘间接触应力分析. 2018, 52(11): 58-64. [doi: 10.7652/xjtuxb201811009]
- 吴凡, 杜长河, 王杰枫, 等. 周向喷嘴数对旋流冷却流动传热特性的影响. 2018, 52(7): 94-100. [doi: 10.7652/xjtuxb201807014]
- 叶明亮, 黄琰, 晏鑫, 等. 隔板位置对凹槽叶顶传热和冷却性能的影响. 2018, 52(3): 55-62. [doi: 10.7652/xjtuxb201803008]
- 陈阳, 李军, 周帅, 等. 间隙泄漏对透平级气动性能影响的数值研究. 2018, 52(4): 63-69. [doi: 10.7652/xjtuxb201804009]
- 张垚垣, 李志刚, 宋立明, 等. 槽缝射流旋流比和密度比对涡轮端壁冷却和吸力面泛冷冷却性能的影响. 2018, 52(9): 95-101. [doi: 10.7652/xjtuxb201809013]
- 程舒娴, 李军. 1.5 级涡轮轮缘密封燃气入侵特性的数值研究. 2018, 52(5): 12-20. [doi: 10.7652/xjtuxb201805002]

(编辑 荆树蓉)