

DOI: 10.7652/xjtuxb201307002

# 两级刷式密封泄漏特性的实验与数值研究

邱波<sup>1</sup>, 李军<sup>1</sup>, 冯增国<sup>2</sup>, 江生科<sup>2</sup>, 孔祥林<sup>2</sup>

(1. 西安交通大学叶轮机械研究所, 710049, 西安; 2. 东方汽轮机有限公司, 618000, 四川德阳)

**摘要:** 基于刷式密封的泄漏量实验测试平台和 Non-Darcian 多孔介质方法的泄漏流动数值模型, 详细研究了密封间隙、压比和转速对两级刷式密封泄漏流动特性的影响规律, 分析了两级刷式密封的泄漏流动形态以及刷丝束表面的压力分布规律。结果表明: 在相同的间隙和转速下, 两级刷式密封的泄漏量随着压比的增加而增大; 在相同的转速和压比下, 两级刷式密封的泄漏量随着间隙的增加而增大; 在相同的压比和间隙下, 两级刷式密封的泄漏量随着转速的增加而减小。转子高速旋转时产生的离心伸长效应使密封间隙减小, 因此数值计算时考虑转子的离心伸长效应对密封间隙的影响可以更加准确地预测两级刷式密封的泄漏量。

**关键词:** 两级刷式密封; 泄漏特性; 实验测量; 数值模拟

**中图分类号:** TK474.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)07-0007-06

## Experimental and Numerical Investigations of the Leakage Characteristics of Two-Stage Brush Seal

QIU Bo<sup>1</sup>, LI Jun<sup>1</sup>, FENG Zengguo<sup>2</sup>, JIANG Shengke<sup>2</sup>, KONG Xianglin<sup>2</sup>

(1. Institute of Turbomachinery, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Dongfang Steam Turbine Co. Ltd., Deyang, Sichuan 618000, China)

**Abstract:** The effects of the sealing clearance, pressure ratio and rotational speed on the leakage flow characteristics of the two-stage brush seal were investigated in detail using the leakage test rig and numerical leakage flow model based on non-Darcian porous medium of brush seal. The leakage flow fields and pressure distributions of two-stage brush seal were also analyzed. The results show that the leakage rate of the two-stage brush seal increases with respect to pressure ratio at the same sealing clearance and rotational speed. The leakage rate also increases with respect to sealing clearance at the same rotational speed and pressure ratio, and decreases with respect to the rotational speed at the same sealing clearance and pressure ratio. In addition, the sealing clearance is reduced by rotor centrifugal growth during high speed rotation. Therefore, the predictions of brush seal leakage are more accurate with consideration of the sealing clearance reduction caused by the rotor centrifugal growth during calculations.

**Keywords:** two-stage brush seal; leakage characteristics; experimental measurement; numerical simulation

密封技术已成为发展高性能和高可靠性透平机械的一项关键技术<sup>[1]</sup>。迷宫密封作为非接触式动密

封具有结构简单、成本低廉和容易替换的特点, 广泛应用于透平机械中。但是, 迷宫密封与转子间存在

收稿日期: 2012-11-20。 作者简介: 邱波(1987—), 男, 博士生; 李军(通信作者), 男, 教授, 博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50976083); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目。

网络出版时间: 2013-04-23

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20130423.1659.004.html>

固有间隙,其泄漏量相比接触式刷式密封较大,特别是在转子发生瞬时径向偏移时,迷宫齿会产生永久性磨损,使得密封间隙增大,密封性能下降。刷式密封中,当转子发生瞬时径向偏移时,刷丝的柔性会产生弹性退让,当转子从偏心位置恢复时,刷丝又会在弹性恢复力的作用下及时跟随转子,以保证良好的密封性能。相比迷宫密封,刷式密封作为接触式动密封具有更加优秀、稳定和持久的密封性能,但会受到接触速度、承压能力等的限制,会产生摩擦热效应、迟滞效应等。用刷丝束代替迷宫密封中的迷宫齿而组成单级或多级刷式密封,不仅具有优秀和持久的密封性能,同时还具有很强的承压能力<sup>[2]</sup>。

Bayley 等首次通过静态实验测量了刷式密封中刷丝顶端的轴向压力分布和后夹板的径向压力分布,并引入 Darcian 多孔介质模型对刷式密封进行了数值研究<sup>[3]</sup>;Chew 等引入 Non-Darcian 多孔介质方法,在考虑刷丝束的黏性阻力和惯性阻力时建立了刷式密封泄漏流动的数值模型<sup>[4]</sup>;黄学民等采用多孔介质模型对典型单级刷式密封的泄漏特性进行了数值研究<sup>[5]</sup>;曹广州等对刷式密封在使用初期的泄漏流动特性进行了实验和数值研究<sup>[6]</sup>;李军等基于 Non-Darcian 多孔介质模型和实验测量的方法开展了刷式密封泄漏特性和摩擦热效应的研究<sup>[2,7-8]</sup>。

多级刷式密封用于透平机械的轴封可以显著降低泄漏损失,但目前针对多级刷式密封泄漏流动特性的实验研究鲜见发表。本文通过对两级刷式密封在 5 种压比、4 种转速和 3 种密封间隙下的泄漏量进行了实验测量,研究密封间隙、压比、转速对泄漏特性的影响规律。同时,采用基于 Non-Darcian 多孔介质模型的 Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)方程的数值求解技术,对实验测量的两级刷式密封内泄漏流动形态以及刷丝束表面的压力分布规律进行了详细的数值研究,在数值模拟刷式密封的泄漏流动时考虑了转子离心伸长效应对密封间隙和泄漏量的影响。

### 1 实验装置

图 1 为两级刷式密封旋转实验台。刷式密封泄漏实验系统主要包括密封实验段、电机、供气系统和测量系统。实验时高压空气是由压缩机供给,油气和气水经过分离处理使其干燥、洁净,然后流经调节阀、流量计后进入密封实验段,最终直接排入大气环境。刷式密封的泄漏量采用具有温度和压力补偿功能的高精度气体涡轮流量计测量,测量精度为

±1%。进口压力用位于涡轮流量计下游的流量调节阀调节,进口总压用静态压力传感器测量,测量精度为±0.075%;出口静压为大气环境压力。实验中定义压比  $R_p$  为进口总压与出口静压之比。图 2 为两级刷式密封的结构和实物。两级刷式密封是用刷丝束代替了迷宫密封的迷宫长齿。密封的转子直径为 671 mm,转速通过变频器控制电机调节。实验中分别测量了两级刷式密封在 5 种压比(1.1~1.5),4 种转速(0、1 500、2 400、3 000 r/min)和 3 种初始密封间隙(0.0、0.1、0.2 mm)下的泄漏量。

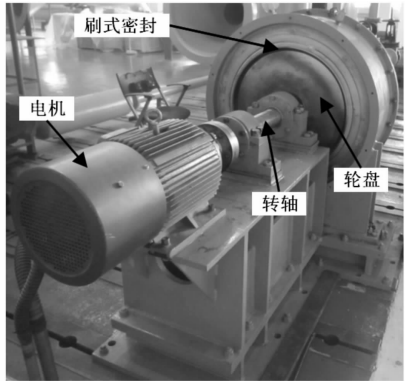
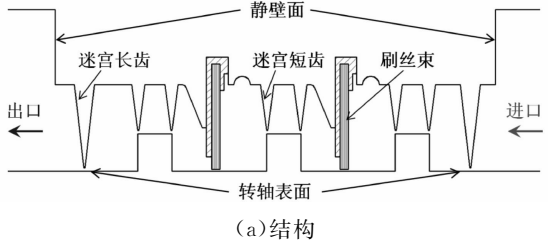
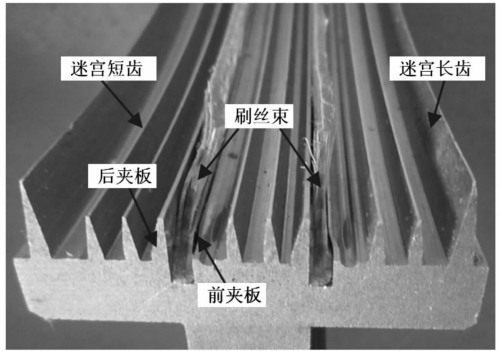


图 1 两级刷式密封旋转实验台



(a) 结构



(b) 实物

图 2 两级刷式密封的结构和实物

### 2 数值方法

#### 2.1 刷式密封泄漏流动的计算流体动力学模型

刷式密封中刷丝束是由排列紧密的纤细刷丝层叠构成。对于接触式刷式密封,气流只能通过刷丝

间微小空隙泄漏。采用 Non-Darcian 多孔介质模型模拟气流在刷丝束内部的流动的方法,是在动量方程中增加了黏性损失项和惯性损失项,分别代表附加的黏性阻力和惯性阻力,则有

$$F_i = -\mathbf{A}_i \mu u_i - \frac{1}{2} \mathbf{B}_i \rho |u| u_i \tag{1}$$

式中:  $\mathbf{A}_i$  和  $\mathbf{B}_i$  分别表示刷丝束多孔介质内部的黏性损失系数矩阵和惯性损失系数矩阵。

由于刷丝束内部的泄漏流动与通过填充床渗透的流体流动相似,因此本文采用 Eugrn 方程推导刷丝束多孔介质区域的阻力系数,详细的推导过程以及有效性验证见文献[2,8]。Ergun 方程给出了流体通过多孔介质渗透时压力下降与阻力系数之间的关系<sup>[9]</sup>,即

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{\alpha \mu (1-\epsilon)^2}{D_p^2 \epsilon^3} V + \frac{\beta \rho (1-\epsilon)}{D_p \epsilon^3} V^2 \tag{2}$$

式中:  $\alpha$  和  $\beta$  是 Eugrn 方程的经验常数,大量实验论证  $\alpha=150$  和  $\beta=1.75$  时适用于常见雷诺数范围;  $D_p$  为填充床内平均颗粒直径

$$D_p = 6/a_v = 1.5d \tag{3}$$

$$a_v = \frac{S_{\text{Total}}}{V_{\text{Total}}} = \frac{\pi dl}{(\pi d^2/4)l} = \frac{4}{d} \tag{4}$$

利用式(1)~式(3)可以获得的垂直于刷丝方向的黏性阻力系数  $a_z$ 、 $a_n$  和惯性阻力系数  $b_z$ 、 $b_n$ ,沿着刷丝方向的惯性阻力系数  $b_s$  为 0,即

$$\left. \begin{aligned} a_z &= a_n = \frac{66.67(1-\epsilon)^2}{d^2 \epsilon^3} \\ a_s &= 0.4\epsilon a_n \\ b_z &= b_n = \frac{2.33(1-\epsilon)}{d\epsilon^3} \\ b_s &= 0 \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

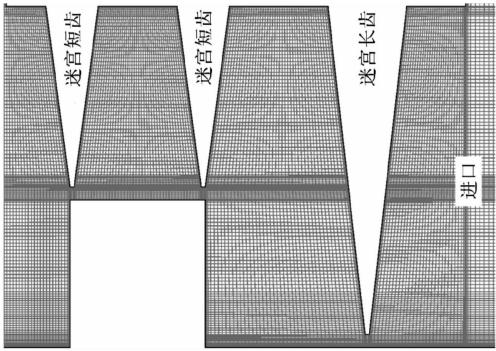
刷丝束的阻力系数可由孔隙率

$$\epsilon = 1 - V_{\text{Bristle}}/V_{\text{Total}} = 1 - \pi d^2 N/(4w\sin\Phi) \tag{6}$$

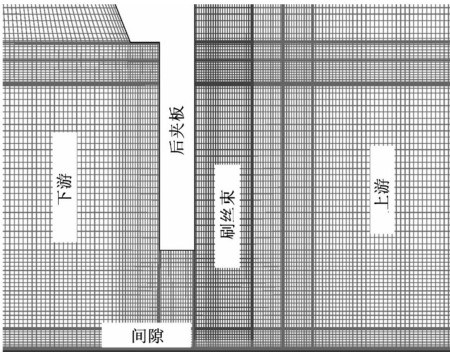
和刷丝直径  $d$  计算获得;刷丝束的孔隙率等于刷丝束中空隙体积与总体积的比值,可由刷丝直径、倾斜角、刷丝束厚度计算获得。实际运行中,刷式密封的刷丝会在气流压差的作用下排列得更加紧密,使得刷丝束厚度减小,因此通过经验公式计算得出的刷丝束的阻力系数和孔隙率需要用实验数据进行校准。校准方法是改变刷丝束的厚度,使数值预测的泄漏量与实验测量值相吻合。

刷式密封结构具有轴对称特点,因此本文采用二维轴对称旋流模型 ANSYS-FLUENT 来模拟刷式密封内的泄漏流动。两级刷式密封的计算区域由

周向截面内的刷丝束多孔介质区域和流体区域组成,转子面和刷式密封的前后夹板壁面等所有固体壁面均为无滑移壁面。用软件 ANSYS ICEM CFD 生成多块结构化网格,计算网格数为 24 万,如图 3 所示;用有限体积法来离散控制方程,用  $k-\omega$  SST 两方程紊流模型模拟刷丝束以外的流体区域,其中对流项选用二阶迎风格式,扩散项采用中心差分格式;用层流模型模拟刷丝束多孔介质区域内的流动,因为刷丝束内部流动的雷诺数很小;工质是可压缩理想空气,进口给定总压、总温,出口给定静压,转轴壁面的转速根据实验工况设定。



(a) 迷宫齿区域的网格



(b) 刷式密封的网格

图 3 两级刷式密封的计算网格

2.2 转子离心伸长的有限元模型

实验用两级刷式密封的转速可以达到 3 000 r/min,因此在数值预测刷式密封的泄漏量时需要考虑转子离心伸长效应对密封间隙的影响。采用软件 ANSYS 对不同转速下转子离心伸长进行了有限元计算,其中转子选取为 8 节点的六面体单元,1/8 弧段转子的网格如图 4a 所示,网格数为 51 701。表 1 为转子的材料属性。实验中转子温度变化很小,所以计算转子离心伸长时未考虑热应力的作用。

表 1 转子的材料属性

| 材料    | 温度/K | 弹性模量/GPa | 泊松比  | 密度/kg·m <sup>-3</sup> |
|-------|------|----------|------|-----------------------|
| CrMoV | 310  | 206      | 0.29 | 7 850                 |

3 结果与讨论

3.1 泄漏量

高速旋转时转子产生径向离心伸长,对于具有径向间隙的两级刷式密封,转子离心伸长会使密封间隙减小。图 4b 为有限元方法计算得到的转速为 3 000 r/min 时转子径向离心伸长云图,转子表面径向离心伸长为 25 μm。图 5 为刷式密封间隙随转速的变化。从图 5 可以看出:密封间隙随着转速的升高而减小,转子的径向离心伸长效应对具有较小间隙的刷式密封影响较大。

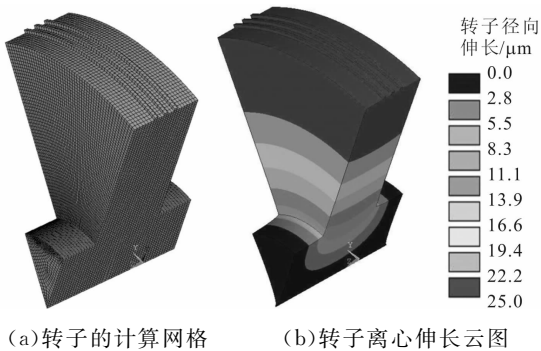


图 4 转子的计算网格和离心伸长云图

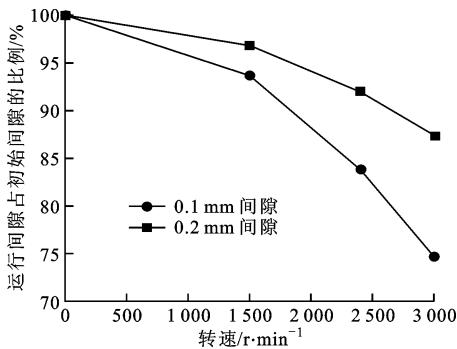


图 5 刷式密封间隙随转速的变化

图 6 为转速在 3 000 r/min 时 3 种间隙下两级刷式密封的泄漏量随压比的变化。从图 6 可以看出:两级刷式密封的泄漏量随着密封间隙的增加而显著增大,随着压比的增大而增加;当不考虑转子离心伸长效应时,数值预测的 3 种初始间隙下刷式密封的泄漏量在整个压力范围内均明显大于实验值,这是由于转子离心伸长效应使得刷式密封的实际径向间隙小于初始间隙的缘故;当考虑转子离心伸长效应时,数值预测的 3 种初始间隙下刷式密封的泄

漏量在整个压力范围内与实验值均吻合良好。未考虑转子离心伸长效应时,0.2 mm 间隙下刷式密封的泄漏量最大预测误差达到 11.6%。因此,当转子直径较大或转速较高时,采用数值方法来预测刷式密封的泄漏量需要考虑转子的离心伸长效应对密封间隙的影响。

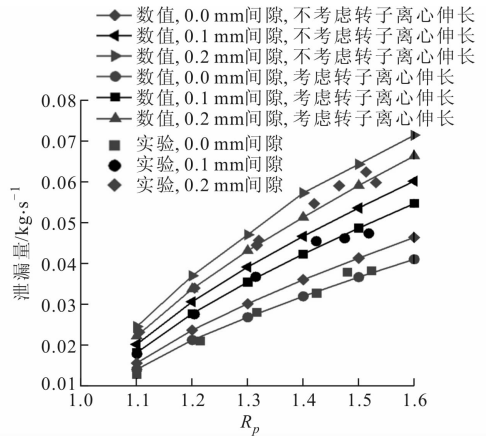


图 6 两级刷式密封的泄漏量与压比的关系

图 7 为 3 种初始间隙下两级刷式密封的泄漏量随转速的变化,各种间隙下泄漏量的测量均在相同压比和不同转速下进行。实验和数值结果表明,刷式密封的泄漏量随着转速的升高而降低,原因是:①在离心伸长效应的作用下,转子直径随着转速的升高略微增大,刷式密封的间隙随着转速的升高略微减小,而密封间隙的减小会降低刷式密封的泄漏量;②由于密封齿和刷丝束的阻隔,泄漏气流在密封腔室中形成强烈的旋涡流动,使得泄漏气流的动能能有效转化为内能(黏性耗散效应)。转速升高,密封腔室中的旋涡流动强度和壁面剪切力显著增大,黏性耗散作用逐渐增强,使得泄漏气流的动能能更有效地转化为热能,刷式密封的泄漏量由此降低。

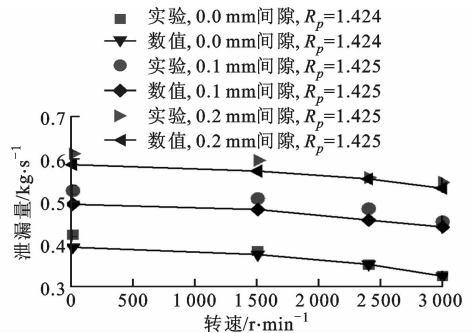


图 7 3 种初始间隙下两级刷式密封的泄漏量与转速的关系

图 8 为数值预测的迷宫密封及不同初始间隙和级数下刷式密封泄漏量对比。计算时密封的压比为 1.3,转速为 3 000 r/min。从图 8 可以看出:刷式密

封的泄漏量均小于迷宫密封;两级 0 间隙刷式密封的泄漏量仅仅是迷宫密封的 49.6%。对于刷式密封,增加刷丝束的级数和减小刷丝束的间隙都可以降低刷式密封的泄漏量,减小刷丝束的间隙比增加刷丝束的级数对降低密封泄漏量更有效。

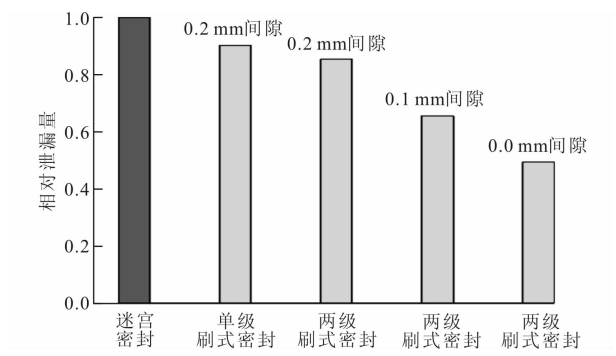


图 8 密封泄漏量对比

3.2 流场分布

图 9 为刷式密封的静压与流场分布。静压从密封进口到出口呈阶梯式下降,刷丝束前后的静压下降的程度大于迷宫齿前后的情况。泄漏射流经长齿间隙进入迷宫腔室后撞击到转子凸台,受长齿和凸台的作用,在腔室内形成了 2 个逆时针方向的和 1 个顺时针方向的旋涡。泄漏射流偏转后沿着凸台表面流动,再通过短齿间隙进入相邻迷宫腔室,从而形成了 2 个方向相反的旋涡。泄漏气流通过短齿间隙进入下一个相邻的密封腔室后分为两部分,一部分撞击刷丝束,通过刷丝之间的空隙渗入到下游腔室,另一部分通过刷丝束与转子的间隙泄漏到下游腔室。迷宫刷式密封的泄漏流动就是如此循环地进行,直到进入密封出口。正是这种泄漏流动形成了密封腔室内的强烈旋涡流动,使得泄漏射流的动能有效地转化为热能,进而起到了密封的作用。

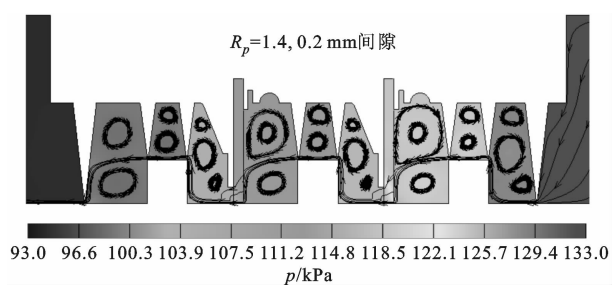


图 9 两级刷式密封的静压与流场分布

3.3 压力分布

图 10 为刷式密封的刷丝束上表面、下表面、上游面和下游面示意。图 11~图 14 为数值模拟的刷丝束表面的径向和轴向静压分布。从图 11 可以看

出,刷丝束上表面静压近似为刷丝束上游压力,但刷丝束下表面静压从上游到下游沿轴向均匀下降。从图 12 可以看出,径向压差沿轴向从刷丝束上游到下游逐渐增大,压比较大时刷丝束的径向压差相对较大,下游刷丝束的径向压差相比上游刷丝束更大。从图 13 可以看出,刷丝束上游面的静压近似为上游压力。刷丝束围栏高度以外,刷丝束下游面的静压沿上游到下游逐渐下降,静压下降主要集中在刷丝束围栏高度附近;刷丝束围栏高度以内,刷丝束下游面的静压近似为下游压力。因此,刷丝束沿轴向的压力下降主要集中在刷丝束围栏高度以内。从图 14 可以看出,刷丝束的轴向压差与径向压差相同,

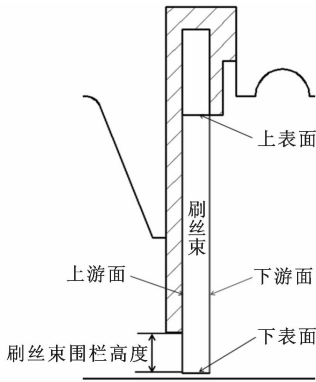


图 10 刷丝束的上表面、下表面、上游面和下游面示意

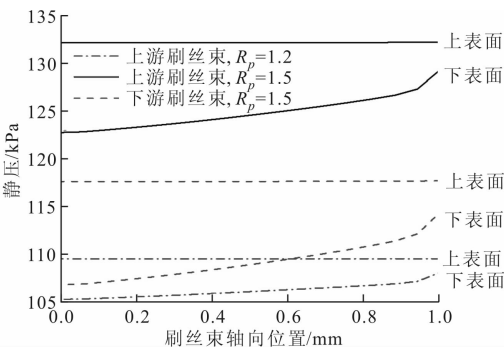


图 11 刷丝束上表面与下表面轴向静压分布

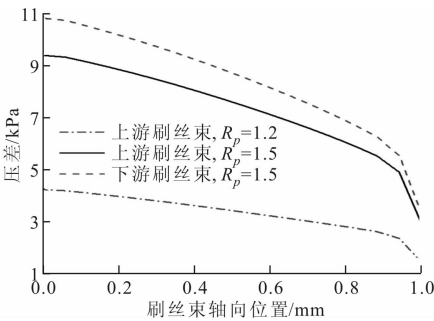


图 12 刷丝束上表面与下表面径向压差分布

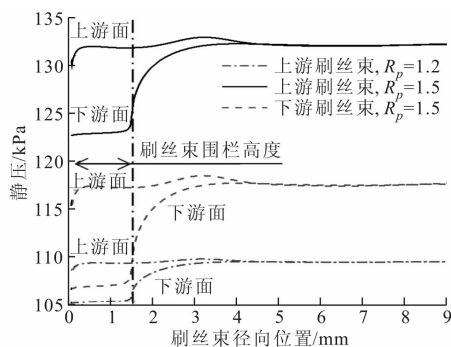


图13 刷丝束上游面与下游面径向静压分布

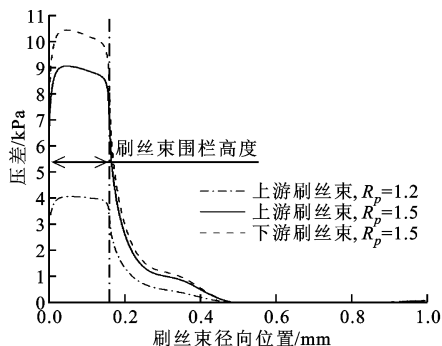


图14 刷丝束上游面与下游面轴向压差分布

压比较大时刷丝束的轴向压差相对较大,下游刷丝束轴向压差相比上游刷丝束更大,表明下游刷丝束对刷式密封的封严性能影响更大。

## 4 结 论

通过建立刷式密封的泄漏量实验测试平台,基于 Non-Darcian 多孔介质方法的泄漏流动数值模型,详细研究了密封间隙、压比和转速对两级刷式密封泄漏流动特性的影响规律。两级刷式密封的泄漏流动模型考虑了转子高速旋转时离心伸长效应对密封间隙的影响,研究结果如下。

(1)受转子的离心伸长效应的影响,密封间隙会随着转速的升高而减小。在数值预测刷式密封的泄漏量时,考虑转子离心伸长效应对密封间隙的影响,可以大大降低数值预测误差,特别是当转子直径较大或转速较高时,转子离心伸长使密封间隙明显减小。因此,数值模拟刷式密封的泄漏流动时需要考虑转子离心伸长效应对密封间隙的影响。

(2)两级刷式密封的泄漏量随着压比和密封间隙的增大而显著升高,随着转速的升高而降低。减小刷丝束的间隙较增加刷丝束的级数,对降低密封泄漏量更有效。为最大限度提高刷式密封的封严性能,设计时刷丝束间隙应为0。

(3)刷丝束表面的轴向、径向压差随着压比的增

加而增大。两级刷式密封的下游刷丝束所承受的轴向、径向压差相比上游刷丝束更大。

## 参考文献:

- [1] CHUPP R E, HENDRICKS R C, LATTIME S B, et al. Sealing in turbomachinery [J]. Journal of Propulsion and Power, 2006, 22(2): 313-349.
- [2] LI Jun, QIU Bo, FENG Zhenping. Experimental and numerical investigations on the leakage flow characteristics of the labyrinth brush seal [J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2012, 134(10): 102509.
- [3] BAYLEY F J, LONG C A. A combined experimental and theoretical study of flow and pressure distributions in a brush seal [J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1993, 115(2): 404-410.
- [4] CHEW J W, HOGG S I. Porosity modeling of brush seals [J]. ASME Journal of Tribol, 1997, 119: 769-775.
- [5] 黄学民, 史伟, 王洪铭. 刷式密封中泄漏流动的多孔介质数值模型 [J]. 航空动力学报, 2000, 15(1): 56-58.
- [6] HUANG Xuemin, SHI Wei, WANG Hongmin. Porous medium leakage flow model of brush seal [J]. Journal of Aerospace Power, 2000, 15(1): 56-58.
- [7] 曹广州, 吉洪湖, 纪国剑. 刷式封严初期使用特性的实验和数值研究 [J]. 推进技术, 2010, 31(4): 478-482, 489.
- [8] CAO Guangzhou, JI Honghu, JI Guojian. Experimental and numerical study on the leakage characteristics of brush seals at the early stage of operating [J]. Journal of Propulsion Technology, 2010, 31(4): 478-482, 489.
- [9] 李军, 晏鑫, 丰镇平, 等. 基于多孔介质模型的刷式密封泄漏流动特性研究 [J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(7): 768-771.
- [10] LI Jun, YAN Xin, FENG Zhenping, et al. Study on the leakage flow characteristics of brush seal based on porous medium model [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(7): 768-771.
- [11] 邱波, 李军. 刷式密封传热特性研究 [J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(9): 94-100.
- [12] QIU Bo, LI Jun. Investigation on the heat transfer characteristics of brush seal [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(9): 94-100.
- [13] ERGUN S. Fluid flow through packed columns [J]. Chem Eng Prog, 1952, 48: 89-94.

(编辑 苗凌)