

基于多孔介质模型的刷式密封泄漏 流动特性研究

李军¹, 晏鑫¹, 丰镇平¹, 江生科², 孔祥林², 孙奇², 王建录²

(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产品开发处, 618001, 德阳)

摘要: 采用数值求解基于多孔介质模型的 Reynolds-averaged Navier-Stokes 方程技术, 对刷式密封内泄漏流动特性进行了详细的数值研究. 根据刷式密封的泄漏量试验数据, 确定了刷丝束多孔介质的渗透率系数. 利用所确定的渗透率系数, 数值计算和分析了 7 种压比和 5 种径向间隙条件下的某轴端刷式密封的泄漏量和泄漏流动形态, 并且与迷宫式密封进行了比较. 结果表明: 在相同的压比下, 刷式密封的泄漏量小于迷宫式密封; 压比影响刷式密封的泄漏量, 但对泄漏流动形态的影响可以忽略; 径向间隙不仅影响刷式密封的泄漏量, 而且影响泄漏流动形态; 在相同的径向间隙下, 压比越大则泄漏量越大; 在相同的压比条件下, 径向间隙越小则泄漏量越小. 研究工作可对刷式密封在汽轮机中的应用提供理论依据和技术参考.

关键词: 刷式密封; 多孔介质模型; 泄漏流动; 数值模拟

中图分类号: TK262 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)07-0768-04

Study on the Leakage Flow Characteristics of Brush Seal Based on Porous Medium Model

Li Jun¹, Yan Xin¹, Feng Zhenping¹, Jiang Shengke², Kong Xianglin², Sun Qi², Wang Jianlu²

(1. Institute of Turbomachinery, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Design & Research Department, Dongfang Turbine Company Ltd., Deyang 618001, China)

Abstract: The leakage flow behavior through a brush seal was numerically investigated using the Reynolds-averaged Navier-Stokes solution based on the porous medium model. The permeability coefficients of the bristle pack were determined according to the published experimental data. The leakage flow rate and flow characteristics of a typical shaft brush seal were studied at seven pressure ratios and five kinds of the sealing clearances using the permeability coefficients obtained. The numerical results show that the leakage flow rate of the brush seal is smaller than that of the labyrinth seal at the same pressure ratio. Moreover, the pressure ratio can affect the leakage flow rate while its influence on the leakage flow pattern can be neglected. In addition, the leakage flow rate increases linearly with the increase of the pressure ratio at a fixed sealing clearance for the brush seal. The leakage flow rate of the brush seal decreases with the decrease of sealing clearance at a fixed pressure ratio.

Keywords: brush seal; porous medium model; leakage flow; numerical simulation

先进的转子和静子间的动密封技术可显著提高大功率汽轮机的工作效率和可靠性^[1]. 刷式密封的泄漏量小于迷宫式密封, 使汽轮机的泄漏损失大幅下降, 并改善了转子的稳定性^[2]. 刷式密封在透平机

械中的进一步合理应用要求对刷式密封内的泄漏流动特性有充分的了解和掌握. 随着计算流体动力学技术(CFD)和试验测试技术的发展,刷式密封内泄漏流动的研究得到了飞速发展^[3-7]. 刷式密封的泄漏流动特性数值分析一般有2类方法:一类是基于刷丝横向结构交错排列的“刷式密封简单泄漏模型”及有关修正方法;另一类是基于多孔介质模型的CFD方法^[5-7],将刷式密封的刷丝束作为各向异性多孔介质进行处理. 基于多孔介质模型的CFD方法由于更多地考虑了真实流动特征而得到设计和研究人员的广泛应用. 文献[5]提出了多孔介质模型结合一维动量方程,对简单的单排刷式密封进行了泄漏流动分析与试验数据进行了比较,验证了所提出的方法具有一定的可靠性. 文献[6]在文献[7]的刷式密封多孔介质数值模型^[7]的基础上提出了改进的计算模型和数值方法,研究了轴对称二维 Reynolds-averaged Navier-Stokes(RANS)方程技术,对试验的单排刷式密封进行了详细的计算和分析,验证了多孔介质模型在刷式密封性能分析中的可靠性.

多排刷式密封在大功率汽轮机轴封上的应用可提高机组的效率和经济性,但关于多排刷式密封性能的研究报道却很少,大多针对试验用的简单单排刷式密封进行分析研究. 本文针对大功率汽轮机迷宫式密封的结构,以减小泄漏量为目的,将迷宫式密封设计成三排刷式密封. 采用基于多孔介质模型数值求解三维 RANS 方程技术,对其泄漏流动特性进行研究分析,分别研究了压比和刷丝束与轴表面间的径间间隙对密封性能的影响规律.

1 多孔介质模型

刷式密封的主要部件是上游环、刷丝束和下游环,其中刷丝束是直径为 0.05~0.07 mm 的细金属丝捆扎在一起、按与轴径向 30°~60°方向排列的部件. 刷丝束自由端以一定角度与轴表面接触,既可以减少刷毛的磨损,又可以在轴瞬间大幅径向位移后,使刷丝束可弹回并保持密封间隙不变.

图 1 给出了试验测试的刷式密封结构^[3]. 转子半径是 60.88 mm,刷丝束厚度为 0.6 mm,上游环和下游环高度分别是 1.4 和 10.32 mm. 计算区域包括上游环、刷丝束多孔介质和下游环. 上游环和下游环区域是可压缩紊流流动,流动控制方程表达如下

$$\partial \alpha_i / \partial x_i = 0 \quad (1)$$

$$u_j (\partial \alpha_i / \partial x_j) = -\partial p / \partial x_i + \mu \partial^2 u_i / (\partial x_j \partial x_j) \quad (2)$$

式中: x_i 为流动方向; u_i 是 x_i 方向的流速; p 为液体的压力.

采用多孔介质模型处理刷丝束内流动需要确定其渗透率系数. 刷丝束多孔介质渗透率系数的确定需要由刷式密封的泄漏量试验数据确定. 多孔介质内的流动相对于非多孔介质的流动要受到附加的流体与刷丝束表面间摩擦阻力的作用. 多孔介质的渗透率系数是多孔介质通过流体能力的表征参数. 牛顿流体通过多孔介质的速度和压降可由以下 Darcy 定律给出

$$-dp/dx_i = \mu u_i / K_i \quad (3)$$

式中: K_i 是多孔介质的渗透率系数; μ 是流体的动力黏性系数.

式(3)是仅考虑了黏性阻力效应的线性化的 Darcian 多孔介质模型^[7],针对刷式密封,文献[7]发展了考虑黏性阻力和内部阻力的压降计算公式,即

$$-dp/dx_i = a_i \mu u_i + b_i \rho |u_i| |u_i| \quad (4)$$

式中: a_i 是 3 个正交方向的黏性阻力系数; b_i 是 3 个正交方向的内部阻力系数.

式(4)可简化为下列形式

$$-dp/dx_i = (\alpha_i |u_i| + \beta_i) u_i \quad (5)$$

式中: α_i 和 β_i 分别表示内部阻力和黏性阻力. 已知 α_i 和 β_i 可以计算多孔介质的渗透率系数 K_i .

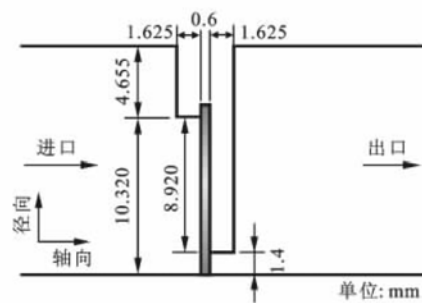


图 1 试验采用的刷式密封几何结构

式(5)表示了流体工质通过多孔介质时在压力梯度项和阻力项之间的平衡,反映了通过多孔介质的流动特性与流体工质和流动条件的相关性. 数值求解 RANS 方程来分析刷丝束多孔介质渗流特性需要将式(5)作为附加项添加在式(2)右边进行求解,再采用试验测试的刷式密封泄漏量数据^[3]来验证刷式束多孔介质的 α_i 和 β_i 参数的可靠性. 从图 2 可看出,单排刷式密封的泄漏量数值结果与试验数据的吻合良好,所确定的刷丝束多孔介质渗透率系数可以较准确地计算刷式密封的泄漏量.

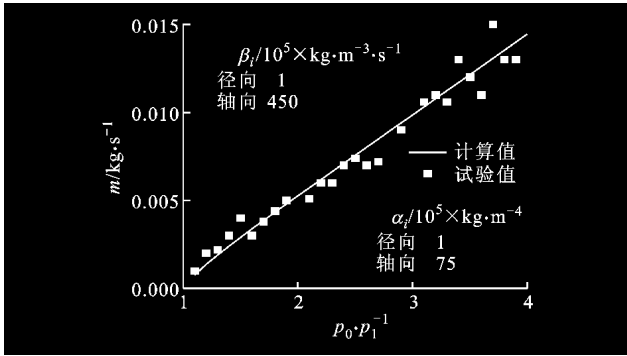
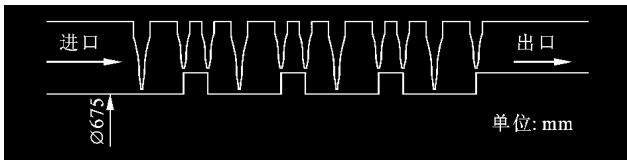


图2 刷式密封泄漏量的计算值与试验数据的比较

2 计算模型和数值方法

利用所确定的刷丝束多孔介质渗透率系数,采用数值求解三维 RANS 方程技术,对典型的轴端刷式密封的泄漏流动特性进行分析研究,同时与迷宫式密封的泄漏流动特性进行了比较.由图 3 可看出:高低齿迷宫式密封的轴端直径是 675 mm,凸台高是 2.5 mm,相邻长齿间安装 2 个短齿;高低齿与轴表面的径向间隙是 0.55 mm.刷式密封的结构是将高低齿迷宫式密封的长齿部分设计成刷式密封,刷丝束厚度 h 是 1.6 mm.



(a) 迷宫式密封



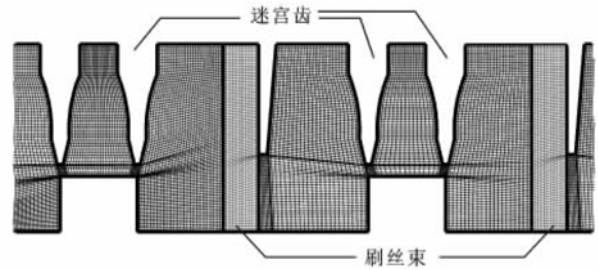
(b) 刷式密封

图3 刷式密封和迷宫式密封结构图

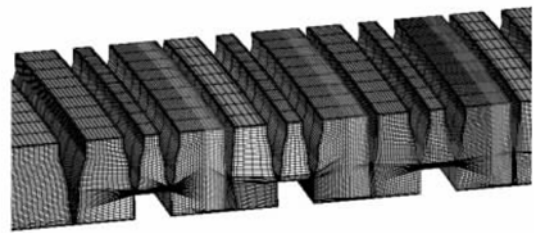
采用多块结构化网格技术对刷式密封进行网格生成(见图 4),三维网格是在二维网格的基础上周向旋转 5° 生成的.

采用商用 CFD 软件 FLUENT 数值求解 RANS 控制方程,用有限体积方法离散控制方程,用 SIMPLE 算法和标准 $k-\epsilon$ 两方程紊流模型进行求解,对流项和扩散项分别采用 2 阶和 1 阶迎风差分格式.密封计算的边界条件设置是给定进口总温总压,出口边界给定静压.轴表面设置成旋转固壁,转速是 3 000 r/min,密封周向的 2 个面设置成周期性边界条件.刷丝束内部区域设置成多孔介质区域,内部阻力系数和黏性阻力系数取值是根据试验确定的

数值.迷宫式密封和刷式密封的设计工况为进口总温 516.12 $^\circ\text{C}$,进口总压 14.696 5 MPa,出口静压 14.141 3 MPa.计算不同压比是将进口总温总压确定,改变出口静压,分别计算从 1.02 到 1.14 每隔 0.02 工况下的 7 种压比.计算时刷丝束的径向间隙 s 分别取 0.25、0.20、0.15、0.10 mm 和 0 间隙时 5 种间隙的泄漏量和流动特性.



(a) 二维计算网格图(网格数约 4 万个)



(b) 三维计算网格图(网格数约 40 万个)

图4 刷式密封计算网格

3 结果分析

图 5 的计算结果表明,只要网格数在 40 万以上,所采用的数值计算方法得到的泄漏量与网格数具有无关性,因此本文计算分析所采用的计算网格数均为 40 万左右.

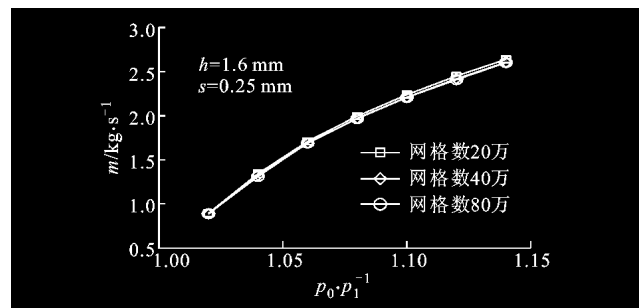


图5 不同网格数计算的刷式密封泄漏量

从图 6 可以看出:泄漏射流从长齿间隙进入旋转轴与相邻长短齿间的腔室内,撞击到凸台上,形成一个逆时针的大旋涡,再从短齿与凸台间隙进入 2

个相邻短齿间空腔内形成一个大的旋涡和顶部区域的小旋涡,然后从短齿进入相邻短长齿间的空腔内,由于凸台和长齿的作用,形成 2 个旋转方向相反的旋涡. 迷宫式密封的泄漏流动如此循环进行,直到密封的出口. 正是由于密封齿与轴表面和凸台间空腔内形成的旋涡流动,有效地将泄漏射流的动能转化为热能,起到了一定的密封作用. 压力每经过一个密封齿均有下降,直到等于密封的出口压力.

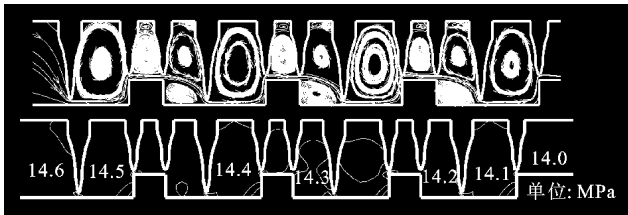


图 6 压比为 1.04 时迷宫式密封的流线和静压等值线分布

从图 7、图 8 可以看出:刷式密封内流动形态与迷宫式密封有较大的区别,从迷宫齿间隙泄漏的射流直接撞击到刷丝束上,一部分经过多孔介质刷丝束进入下一个腔室,另一部分形成回流在腔室内构成一个较大的旋涡流,将泄漏射流的动能转化为热能;对于 0 和 0.1 mm 间隙的刷式密封,泄漏流动形态在刷丝束相邻的腔室有所不同,因为 0 间隙的泄漏流动只能从刷丝束中渗流到下一个腔室,而 0.1 mm 间隙的刷式密封的泄漏流动不仅可以从密封间隙泄漏进入下一个腔室,而且可以从刷丝束中渗流进入下一个腔室,这样泄漏流动造成腔室内的旋涡流动形态会有所不同,进而泄漏射流动能转化为热能的情况会有所改变,最终影响密封的泄漏量. 从图

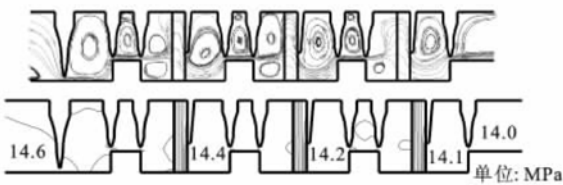


图 7 压比为 1.04、径向间隙为 0 时刷式密封流线和静压等值线分布

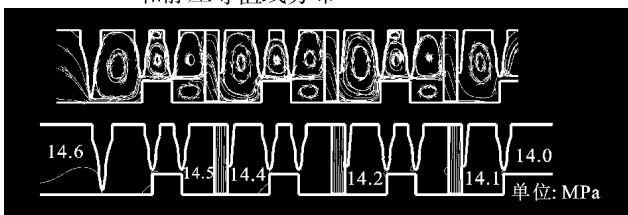


图 8 压比为 1.04、径向间隙为 0.1 mm 时刷式密封流线和静压等值线分布

7 和图 8 的静压等值线分布可以看出,泄漏流经过刷丝束后的压降大于经过迷宫齿时的情况,说明刷丝束可以有效地阻止泄漏流,提高密封效果.

图 9 给出了在 7 种压比和 5 种径向间隙下刷式密封泄漏量以及与迷宫式密封的比较. 在 5 种间隙下,刷式密封的泄漏量均小于相同压比下的迷宫式密封. 对于刷式密封,刷丝束与轴表面的径向间隙对泄漏量的影响较大,随着密封径向间隙的减小,泄漏有较大幅度的下降. 在相同压比下,0 间隙时刷式密封的泄漏量最小.

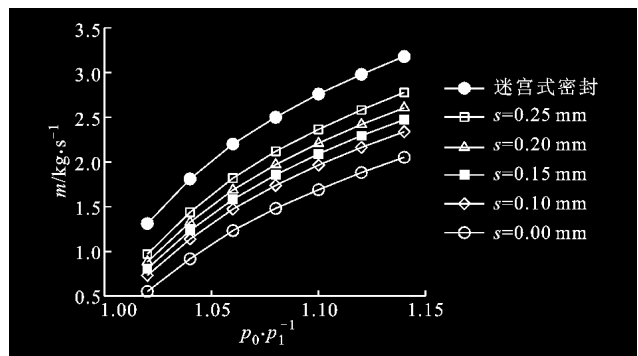


图 9 不同径向间隙和压比下刷式密封计算的泄漏量

4 结 论

采用基于多孔介质模型的 RANS 方程求解技术对某刷式密封的泄漏流动特性进行了分析研究,分别计算了 7 种压比和 5 种间隙情况下的泄漏流动特性. 研究表明:在相同压比条件下,刷式密封的泄漏量小于迷宫式密封的泄漏量;刷式密封的泄漏量随着压比的增加而增加,随着刷丝束径向间隙的减小而减小. 由于刷丝束的材料特性,刷丝束径向间隙取值可以远小于迷宫式密封. 研究表明,汽轮机轴端采用多排刷式密封代替迷宫式密封可以有效地减小泄漏量.

参考文献:

[1] Dinc S, Demiroglu M, Turnquist N, et al. Fundamental design issues of brush seals for industrial applications[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2002, 124(2): 293-300.
 [2] 何立东,袁新,尹新. 刷式密封研究的进展[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(12): 28-32, 53.
 He Lidong, Yuan Xin, Yin Xin. The advance in the investigation of brush seal[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(12): 28-32,53.
 [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] Chen L H, Wood P E, Jones T V, et al. Detailed experimental studies of flow in large scale brush seal model and a comparison with CFD predictions[J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2000, 122(4): 672-679.
- [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. Huang Xuemin, Shi Wei, Wang Hongmin. Porous medium leakage flow model of brush seal[J]. Journal of Aerospace Power, 2000, 15(1): 56-58.
- [6] Dogu Y. Investigation of brush seal flow characteristics using bulk porous medium approach[J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2005, 127(1): 136-144.
- [7] Chew J W, Lapworth B L, Millener P J. Mathematical modeling of brush seal[J]. Int J Heat Fluid Flow, 1995, 16(6): 494-500.

(编辑 王焕雪)