

迷宫密封泄漏特性的试验研究

李志刚, 郎骥, 李军, 丰镇平
(西安交通大学叶轮机械研究所, 710049, 西安)

摘要: 为了研究迷宫密封泄漏特性,设计并搭建了旋转密封试验台,测量了典型迷宫密封在8种压比、5种转速、固定密封间隙下的泄漏量和密封腔室压力.通过数值模拟结果的对比分析,找出了压比、转速对迷宫密封泄漏特性和腔室压力的影响规律.研究表明:搭建的旋转密封试验台在迷宫密封泄漏量和密封腔室压力的测量精度上是可靠的;相比于试验结果,数值计算获得的泄漏量和腔室压力的最大相对误差分别为3.25%、3.6%,表明试验与数值结果吻合良好,数值方法可以较准确地预测迷宫密封的泄漏量和腔室压力;相同转速下的流量系数随着压比的提高而增大,小压比下的流量系数增加迅速;相同压比下的转速对流量系数的影响很小,可以忽略;迷宫密封腔室压力系数沿流动方向逐渐减小,密封腔室结构对压力系数影响很大.

关键词: 迷宫密封;泄漏特性;试验测量;数值模拟

中图分类号: TK262 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)03-0048-05

Experiment on Leakage Flow Characteristics of Labyrinth Seal

LI Zhigang, LANG Ji, LI Jun, FENG Zhenping
(Institute of Turbomachinery, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A rotating seal test rig with a data acquisition system was designed and established to investigate the leakage behavior of a typical labyrinth seal. The leakage and cavity pressure were measured for the labyrinth seal at eight pressure ratios, four rotational speeds, and a sealing gap. The effects of pressure ratio and rotational speed on the leakage behavior and cavity pressure of the labyrinth seal were examined by experiment and simulation. The results show that the maximum relative deviation of the leakage flow rate and cavity pressure predicted is 3.25% and 3.6%, respectively, compared with the experimental data. The flow coefficient increases with pressure ratio and is more sensitive to the smaller pressure ratio at the same rotational speed. The influence of rotational speed on the flow coefficient is very slight which might be neglected at the same pressure ratio. In addition, the cavity pressure coefficient decreases in the direction of flow and is significantly influenced by the cavity structure.

Keywords: labyrinth seal; leakage behavior; experiment measurement; numerical simulation

透平机械旋转密封泄漏特性及其影响因素的研究对于提高透平机械的气动性能、保证运行安全性具有重要的意义.迷宫密封结构简单、安装方便、工作可靠,所以被广泛用于透平机械中,也是透平机械中常用的密封元件.泄漏量是迷宫密封的一个重要

参数,准确预估和减少迷宫密封的泄漏量是现代透平设计中的一个重要目标^[1-3].

Paolillo等人^[4-5]针对直齿台阶式蜂窝面迷宫密封和斜齿台阶式蜂窝面迷宫密封的泄漏特性开展了试验研究和数值计算.结果表明,转子面旋转速度与

流体轴向速度的比值是研究泄漏量随转速变化的一个很重要的特征量,当这一比值小于1.0时,转速对泄漏量的影响不明显,而当其大于1.0时,泄漏量随转速提高而明显减少。Ahmed 和 John^[6]试验研究了密封齿的形状、厚度以及转子偏心对迷宫密封泄漏特性的影响,并测量了23种具有相同转子直径(101.6 mm)、不同密封齿结构密封件的泄漏量和腔室中的压力。结果表明:对于所有的密封装置,在相同压比 π 下,增加密封齿的厚度能使泄漏量降低10%~20%;当密封齿的厚度从3.175 mm增大到6.35 mm时,低压比下的泄漏量减少了20%,高压比下的泄漏量减少了10%~15%。Schramm 等人^[7]试验研究了蜂窝静子面对台阶式迷宫密封泄漏特性的影响,并测量了具有光滑静子面和蜂窝静子面的2种迷宫密封的泄漏量,且用激光多普勒测速仪(LVD)的流场显示法比较了不同密封间隙下的子午面流场。结果表明,蜂窝面和密封间隙对迷宫密封的流场结构有显著影响,蜂窝静子面使得密封的有效间隙增大,蜂窝静子面的迷宫密封泄漏量大于光滑面迷宫密封。Yan 等人^[8]数值研究了收敛型和扩张型台阶式迷宫密封泄漏特性。结果表明,在相同条件下,收敛型迷宫密封的泄漏量小于扩散型迷宫密封的泄漏量。

本文设计并搭建了一套完整的旋转密封试验台,针对典型的高低齿迷宫密封的泄漏特性进行了试验和数值研究,试验测量了迷宫密封在8种压比、5种转速、固定密封间隙下的泄漏量和腔室压力,并采用商用计算流体动力学软件CFX对迷宫密封的泄漏流动进行了三维数值模拟且与试验结果进行了比较,最后总结了迷宫密封泄漏特性的特定规律。

1 试验台装置及测量方法

1.1 试验装置

图1为密封试验台,主要包括供气系统、流量计、密封试验段、电机、变频器和压力温度采集系统。图2为试验台供气系统。供气系统气源为一台螺杆压缩机,最大压力可达0.7 MPa。试验工质通过压缩机再经储气罐和旁路组成的压力调节器流入由吸附式干燥器构成的油气、气水分离器,通过分离器获得的干燥、洁净的压缩空气再经进气调节阀门便为压力和流量稳定的工质气流。工质在试验段入口前依次由流量计、流量调节阀、温度传感器、总压探针来测量,工质经过试验段后直接排入大气环境。通过变频器控制电机来改变转速,电机与试验台旋转轴通

过联轴器连接,可在0~8 kr/min内连续调速。

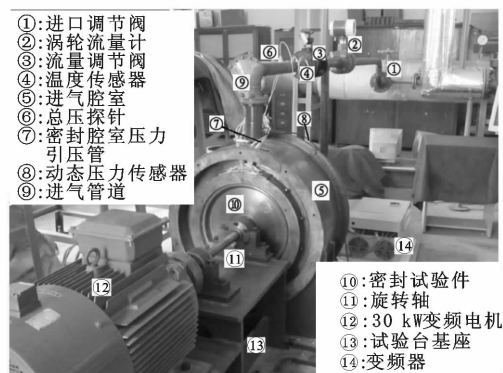


图1 密封试验台

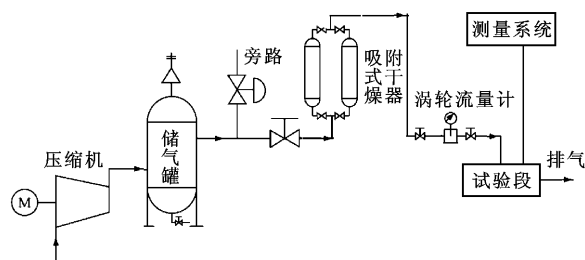


图2 试验台供气系统

图3为试验台密封试验段内部结构,主要由密封试验件、进气稳压腔、转盘、主轴、轴承、底座、电机等组成。工质气体通过进气口进入试验台的稳压腔,并在稳压腔中形成稳定、周向均匀的气流,然后进入密封试验件进口气室。在密封件的封严作用下,工质气体透过密封件直接排入大气环境。密封件为典型的高低齿迷宫密封件,其静子由周向布置的6块角度为60°的扇形弧段组成,如图4所示。

1.2 测量方法

泄漏量由安装在试验台进气管道上的涡轮流量计来测量,由于进入试验台腔室的工质均经过密封试验件后排入大气环境,所以涡轮流量计测得的流量即为密封件泄漏量。试验用涡轮流量计是具有温度、压力补偿功能的高精度气体涡轮流量计(RO-TORK QWLJ),可直接输出瞬时标准体积流量,测量精度为1.0%。

进口总压和密封腔室压力由引压管、压力传感器和计算机采集系统组成的测量系统来测量。图1给出了试验台进口总压探针及引压管的安装位置,图4为密封试验件静子测量密封腔室压力的测压孔及引压管分布。进口总压和腔室静态压力,由3051T型 ROSEMOUNT 静态压力传感器和 IMP 数据采集系统测得,测量精度可达0.075%。腔室动态压

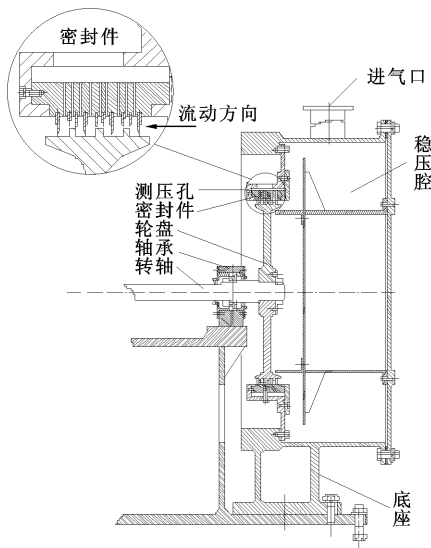
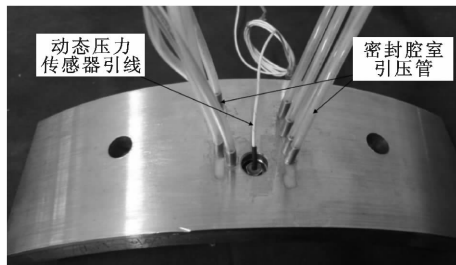
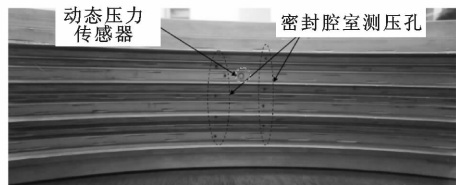


图3 试验台内部结构



(a) 外环面



(b) 内环面

图4 密封试验件静子

力,由 kulite XTL 140 (M) 小型螺纹动态压力传感器和 VISION 动态压力采集系统测得。进口温度由 WRK(镍铬-康铜)装配式 T 型热电偶测得,测量精度为 0.75%。

转速由变频器通过调整频率直接给定,转速误差小于 10 r/min。密封间隙由塞尺测量,密封试验件沿周向等弧度分为 6 块,各弧度的密封间隙有所不同,所以每一个密封间隙应该是利用塞尺测量后的平均值,间隙大小为 0.78 mm,测量误差小于 0.05 mm。

2 试验方案与数值方法

2.1 试验方案

本试验目标是研究压比、转速等因素对密封泄漏特性的影响规律,因此试验包括两部分,一是固定轮盘转速,调节进口总压,研究进出口压比对密封腔室压力和泄漏量的影响,二是变换轮盘转速,重新调节进口总压,研究转速对密封腔室压力和泄漏量的影响。压比为 1.1~1.4(0.05 为一个级差),出口压力为大气压,试验测得的大气压为 96.2 kPa。试验转速为 0~1200 r/min(300 r/min 为一个级差)。在每一工况下,需记录泄漏流量、进口总压、进口总温、各密封腔室压力及转速。

2.2 数值方法

图 5 是迷宫密封试验件的二维结构图,其中 s 是密封间隙,即齿与转轴之间的径向距离, h 是凸台或密封齿高度, t 是密封齿间距或密封齿与凸台间距, L 是凸台间距或密封长度, r 是密封转子面半径。

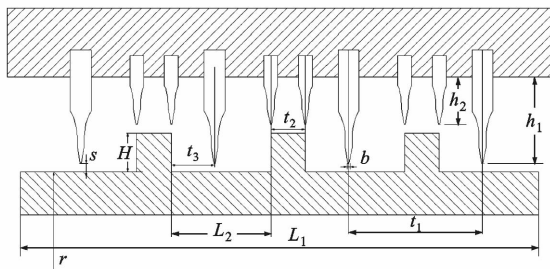


图5 密封试验件结构

图 6 为数值计算所用三维计算模型和网格,结构尺寸如图 5 所示,周向弧度为 2 rad。本文采用商用 CFD 软件 ANSYS CFX11.0 数值求解了 Reynolds-Averaged Navier-Stokes(RANS)方程。数值模拟边界条件为:通过测量获得进口总温、总压,在转子面给定转子转速,出口压力定为大气压。湍流模型为标准 $k-\epsilon$ 模型,对流项采用高精度离散格式,固体壁面均设为绝热边界,气体与壁面接触的边界条件为光滑无滑移。动量方程的残差数量级达到 10^{-6} ,连续方程的残差数量级小于 10^{-6} ,进、出口流量差小于 0.1%时可认为计算收敛。

3 结果及分析

3.1 试验的可重复性

为了能有效控制和排除装配、调节等因素造成

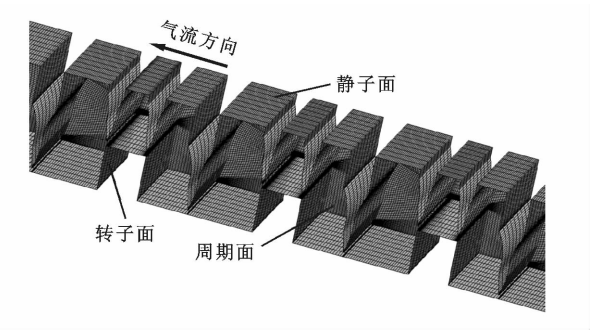


图6 密封试验件三维计算模型与网格

的误差,本文对密封试验件进行了重复性试验.图7给出了3次试验的泄漏量流量 m 随压比的变化曲线,以及试验2和试验3的数值模拟结果.从图中可以发现:3次试验结果的差别很小,最大的相差0.8%,说明试验的可重复性很好,可以满足要求;在各种压比下,数值模拟结果均小于试验结果,最大误差为3.25%,说明本文数值方法能够较准确地预测迷宫密封的泄漏量.

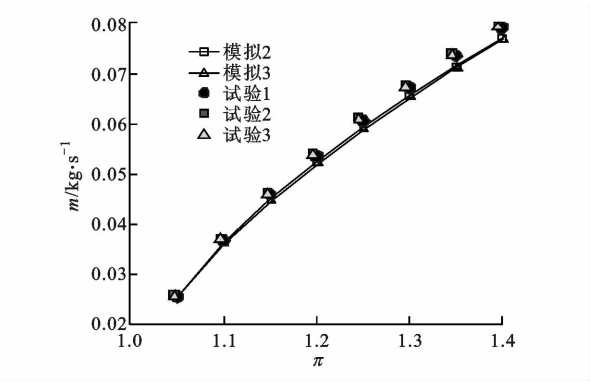


图7 n 为 600 r/min 时泄漏量随压比的变化曲线

3.2 压比影响

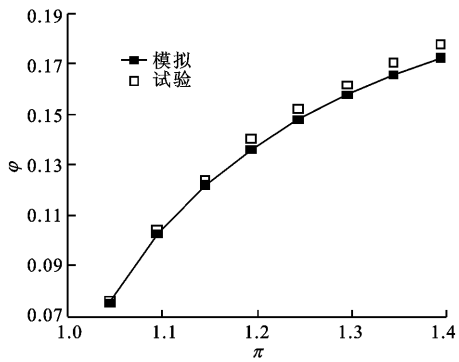
为了分析压比和转速对迷宫密封泄漏特性的影响,本文引入了流量系数 φ 来排除进口压力对压比、转速的干扰,同时使试验结果能推广应用于进口的压力、温度与本文试验不同的工况.定义^[6]

$$\varphi = \frac{m(RT_{\text{tol},\text{in}})^{1/2}}{AP_{\text{tol},\text{in}}} \tag{1}$$

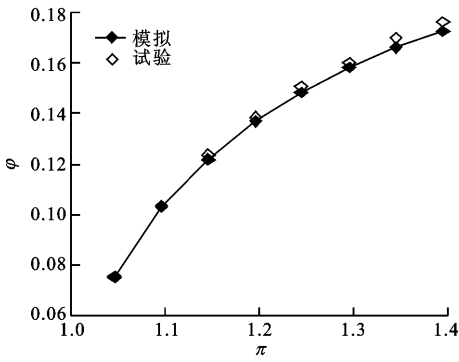
式中: R 为气体常数; $T_{\text{tol},\text{in}}$ 为进口总温,K; A 为密封试验件的泄漏面积, m^2 ; $P_{\text{tol},\text{in}}$ 为进口总压,Pa.

图8给出了转速分别为0 r/min和1 200 r/min时的试验和数值模拟得到的迷宫密封流量系数随压比的变化曲线.从图中可以看出,不同转速下,流量系数均随压比的增加而增大,压比越小,流量系数增加得越快.当转速分别为0 r/min和1 200 r/min时,数值结果与试验结果的最大误差分别为3.02%

和2.27%,可见本文的数值方法能够较为准确地预测不同转速下的迷宫密封泄漏量随压比的变化规律.



(a) n 为 0 r/min



(b) n 为 1 200 r/min

图8 不同转速下的流量系数随压比的变化曲线

3.3 转速影响

可以用 φ 随转速变化的曲线来描述转速对泄漏特性的影响,但直接分析 φ 随转速的变化不能获得具有一般性的规律,因为这里的转速必须考虑密封转子面半径 r 的影响.因此,本文引入速比的概念,速比 U/C_{ax} 是密封转子面的周向速度与密封间隙平均轴向速度的比值.

图9给出了4种压比下,流量系数随速比的变化曲线.从图中可以发现,相同压比下,随着速比的增加,流量系数有减小的趋势,但趋势不太明显(小于1%),这与文献[4-5]通过试验和数值模拟得出的结论是一致的,即转速较低时($U/C_{\text{ax}} < 1$),可以忽略转速对迷宫密封泄漏量的影响.

3.4 密封腔室内压力

为了研究密封腔室压力沿流动方向的变化规律,本文引入了压力系数^[6]

$$\phi = \frac{P_i - P_{\text{out}}}{P_{\text{tot},\text{in}} - P_{\text{out}}} \tag{2}$$

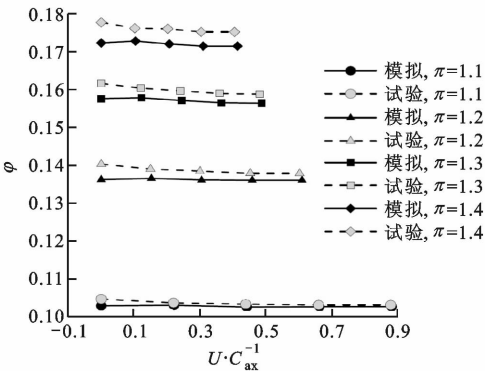


图 9 不同压比下流量系数随速比的变化曲线

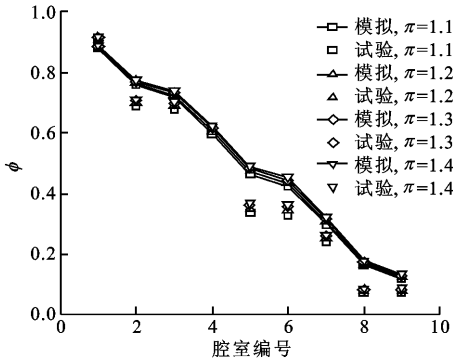
式中: P_i 为第 i 个密封腔室的压力. 从 ϕ 的定义可知, 它可以表征密封进、出口压降在各密封腔室中的分配, 即各密封腔室具有降低工质压力的能力.

图 10 给出了迷宫密封沿流动方向各腔室压力系数的变化曲线. 各腔室的压力测点的位置如图 3 和图 4 所示, 腔室编号沿流动方向依次为 1~9. 从图 10 可以发现, 除了腔室 1、4 以外, 其他腔室的压力系数的试验值均明显小于数值模拟结果, 试验与模拟二者的最大相对误差为 20%, 腔室压力最大相对误差为 3.6%. 对于密封腔室压力系数沿流动方向的变化规律, 试验结果与数值结果吻合良好. 沿流动方向的密封腔室压力系数逐渐降低, 这主要是密封间隙的节流作用和密封腔室中漩涡的耗散作用所致. 工质经过各腔室后, 压力系数减小的程度是不同的, 腔室 1、3、4、6、7、9 使压力系数减小了约 0.13, 而工质经过腔室 2、5、8 后, 压力系数变化很小(小于 0.02). 比较图 10a 和图 10b 可以发现, 各腔室的压力系数随压比的增加而增大, 而转速对压力系数的影响很小, 可以忽略.

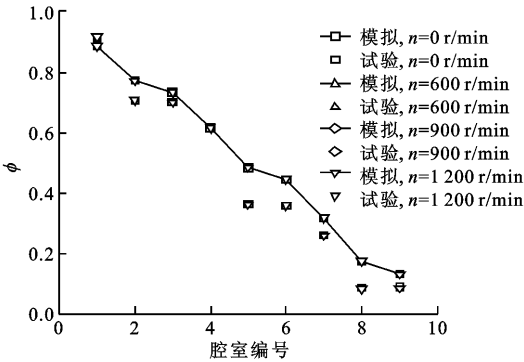
图 11 给出了迷宫密封中的流场结构. 比较图 10 和图 11 可以发现, 各腔室的压力系数主要受到腔室结构的影响. 腔室 2、5、8 前后的密封齿为直通式结构, 通过腔室的工质绝大部分在腔室中没有形成漩涡, 而是直接进入了下游腔室, 漩涡耗散作用的减弱引起了压降的减小, 透气性增强; 在其余的密封腔室中, 绝大部分工质均经过了充分的漩涡耗散后才进入下游腔室, 压降大, 透气性较差. 这说明, 为了增加密封腔室的压降, 同时减少泄漏量, 密封结构应避免采用直通式结构.

4 结 论

本文设计并搭建了一套完整的旋转密封试验



(a) n 为 1 200 r/min



(b) $\pi = 1.3$

图 10 密封腔室压力沿流动方向的变化曲线

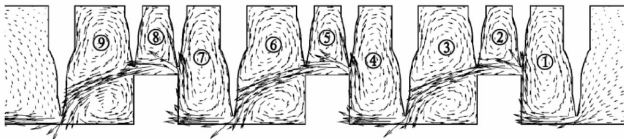


图 11 n 为 600 r/min 且 $\pi = 1.3$ 时的迷宫密封流场

台, 针对典型的高低齿迷宫密封的泄漏特性进行了试验和数值研究, 得出结论如下.

(1) 本文的旋转密封试验台能够完成转速、压比对迷宫密封泄漏特性影响规律的研究, 在迷宫密封泄漏量和密封腔室压力上的测量精度是可靠的. 本文采用的数值方法能够较为准确地预测迷宫密封的泄流量和腔室压力.

(2) 迷宫密封流量系数随压比的增加而增大, 小压比下的流量系数增加得较快, 低转速对密封泄漏量的影响可以忽略.

(3) 沿流动方向, 迷宫密封腔室压力逐渐降低, 密封腔室结构对压降的影响很大. 各腔室的压力系数随压比的增加而增大, 转速对压力系数的影响很小, 可以忽略.

参考文献:

- [1] LATTIME S B, STEINETZ B M. Turbine engine clearance control systems: current practices and future directions[J]. Journal of Propulsion and Power, 2004, 20(2): 302-311.
- [2] 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.
- [3] 李志刚,李军,丰镇平. 迷宫密封泄漏特性影响因素的研究[J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(3): 16-20.
LI Zhigang, LI Jun, FENG Zhenping. Effects of gap pressure ratio and rotational speed on discharge behavior of labyrinth seal[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(3): 16-20.
- [4] ROGER P, VASHIST T K, DAVID C. Rotating seal rig experiments: test result and analysis modeling, GT2006-90957[R]. New York, USA: ASME, 2006.
- [5] REGER P, SEAN M, DAVID C, et al. Impact of rotational speed on the discharge characteristic of stepped labyrinth seals, GT2007 - 28248 [R]. New York, USA: ASME, 2007.
- [6] AHMED J, GAMAL M, JOHN M. Labyrinth seal leakage tests: tooth profile, tooth thickness, and eccentricity effects[J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2008, 130(1): 1-11.
- [7] SCHRAMM V, WILLENBORG K, KIM S, et al. Influence of a honeycomb facing on the flow through a stepped labyrinth seal[J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2002, 124(1): 140-146.
- [8] YAN X, LI J, SONG L, et al. Investigations on the discharge and total temperature increase characteristics of the Labyrinth seals with honeycomb and smooth lands[C] // ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea, and Air. New York, USA: ASME, 2008: 1407-1414.

(编辑 苗凌)