

迷宫蜂窝密封泄漏特性的实验测量和数值研究

向新, 晏鑫, 李志刚, 李军

(西安交通大学叶轮机械研究所, 710049, 西安)

摘要: 为研究蜂窝孔径、径向间隙和运行工况对迷宫蜂窝密封泄漏特性的影响,采用静止密封泄漏特性实验测量平台,测量了 7 种压比和 5 种径向间隙下迷宫蜂窝密封的泄漏量。基于数值求解三维 Reynolds-averaged Navier-Stokes 方程和标准 $k-\epsilon$ 湍流模型的方法,研究了迷宫蜂窝密封的泄漏特性。分析了压比(1.05~1.6)、密封间隙(0.4~1.2 mm)、转速(0~8 000 r/min)和蜂窝孔径(0.8、1.6、3.2 mm)对迷宫蜂窝密封泄漏特性的影响,并与光滑面迷宫密封进行了对比。研究表明:迷宫蜂窝密封的泄漏量随着压比的增加而近似线性增大;密封流量系数随径向间隙增大而有所降低,降低最大值为 10%。在转速低于 3 000 r/min 时,转速对迷宫蜂窝密封的泄漏量影响很小;当转速高于 3 000 r/min 时,蜂窝结构能够抑制流体的周向运动使迷宫蜂窝密封在高转速时具有更优的密封性能,流量系数明显下降,转速升高到 8 000 r/min 时密封流量系数最多降低到 0 转速时的 51%。迷宫蜂窝密封流量系数随蜂窝孔径增大先减小后升高,在孔径为 0.6 mm 与齿宽相等时流量系数最低,此时流量系数比光滑面迷宫密封低 3.0%~5.5%;孔径小于 1.6 mm 时,迷宫蜂窝密封的泄漏特性优于光滑面迷宫密封。本文工作可为迷宫蜂窝密封的性能分析和设计提供参考。

关键词: 迷宫蜂窝密封;泄漏特性;密封性能;蜂窝孔径;径向间隙

中图分类号: TK474.7 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202211008 **文章编号:** 0253-987X(2022)11-0072-11

Experimental Measurement and Numerical Investigation on the Leakage Flow Characteristics of Labyrinth Honeycomb Seal

XIANG Xin, YAN Xin, LI Zhigang, LI Jun

(Institute of Turbomachinery, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: This paper studies the effects of honeycomb cell diameter, radial clearance and operating conditions on the leakage flow characteristics of labyrinth honeycomb seal. The leakage flow rate of the labyrinth honeycomb seal is measured at seven different pressure ratios and five different radial gaps using the stationary experimental test rig. Furthermore, the leakage flow characteristics of the experimental labyrinth honeycomb seal are numerically investigated using three-dimensional Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) and standard $k-\epsilon$ turbulence model. The effects of the pressure ratios (1.05–1.6), radial clearances (0.4–1.2 mm), rotational speeds (0–8 000 r/min) and honeycomb cell diameters (0–3.2 mm) on leakage flow characteristics of the labyrinth honeycomb seal are analyzed and compared with those of the smooth labyrinth seal. According to the results, the leakage flow rate of labyrinth honeycomb seal increases almost linearly with the increase of pressure ratios; the leakage flow coefficient of

labyrinth honeycomb seal decreases slightly with the increase of the radial clearance by up to 10%. The rotational speed has little effect on the leakage flow rate when it is lower than 3 000 r/min. When the rotational speed is higher than 3 000 r/min, the leakage flow coefficient of labyrinth honeycomb seal decreases significantly as the honeycomb cell structure can suppress the circumferential flow and thus improve the sealing performance of the labyrinth honeycomb seal. The leakage flow coefficient of labyrinth honeycomb seal at 8 000 r/min is reduced up to 51% compared with that when the rotational speed is 0. The leakage flow coefficient of the labyrinth honeycomb seal first decreases and then increases with the increase of honeycomb cell diameter. The smallest leakage flow coefficient of the labyrinth honeycomb seal is obtained when the honeycomb cell diameter is 0.6 mm, same as the tooth width. In addition, the leakage flow coefficient of the labyrinth honeycomb seal is 3.0% – 5.5% lower than that of the smooth labyrinth seal. When the honeycomb cell diameter is less than 1.6 mm, the sealing performance of the labyrinth honeycomb seal is better than that of the smooth labyrinth seal. The research results in this paper can provide reference for the performance analysis and structure design of the labyrinth honeycomb seal.

Keywords: labyrinth honeycomb seal; leakage characteristic; seal performance; honeycomb cell diameter; radial clearance

旋转动密封是现代透平机械中的关键部位,先进的转子和静子间的旋转动密封技术可显著提高透平机械的工作效率和稳定性。随着透平机械向着高温、高压、高转速方向发展,密封不仅需要控制泄漏流动,还需改善其转子动力特性^[1]。相比于迷宫密封,蜂窝密封具有优良的转子动力特性,因此被广泛应用于航空发动机、燃气轮机、汽轮机和其他透平机械的轴封和叶顶间隙密封^[2-4]。

迷宫蜂窝密封是一种常见的蜂窝密封结构,根据迷宫齿结构不同可分为直通式迷宫蜂窝密封、台阶式迷宫蜂窝密封和高低齿迷宫蜂窝密封。针对直通式迷宫蜂窝密封的研究较多,早在 1978 年,Stocker 等^[5]就实验研究了直通式迷宫蜂窝密封的泄漏特性,研究表明密封间隙和蜂窝孔径是决定密封泄漏量的关键几何参数。其后,Childs 等^[6]也通过实验发现蜂窝孔径和深度能够显著影响直通式迷宫蜂窝密封的泄漏量。Nayak 等^[7-8]数值研究了转速、蜂窝面磨损对直通式迷宫蜂窝密封泄漏特性和风阻加热的影响,研究表明:存在一个临界转速,该临界转速与泰勒数与雷诺数的比值有关;蜂窝面磨损使有效密封间隙增大导致泄漏量增加,但流体总温降低。聂顺鹏等^[9]实验研究发现直通式迷宫蜂窝密封的泄漏量与流量系数比光滑面迷宫密封分别降低了约 20%、10%。Wodzimierz 等^[10-11]通过数值和实验研究表明迷宫齿倾斜角、齿高、齿厚和齿位置对直通式迷宫蜂窝密封泄漏量影响很大,文中对迷

宫齿几何参数进行了优化使密封流量系数降低了 17%。Chougule 等^[12]提出了一种中心交错的蜂窝改进结构应用到直通式迷宫蜂窝密封中,并对其密封特性进行了数值研究。研究表明,采用交错蜂窝密封结构使流量系数相比常规蜂窝密封降低 9%。

Schramm 等^[13]实验研究台阶式迷宫蜂窝密封的泄漏特性,文中提出有效密封间隙的概念,指出蜂窝孔径使有效密封间隙增大而导致泄漏量增加。Kool^[14]、Paolillo^[15]等采用实验和数值方法研究了转速对台阶式迷宫蜂窝密封泄漏特性的影响,研究表明:在较小速比条件下,泄漏量受转速的影响较小,但当速比大于 5,泄漏量减少约 20%。Mohammad 等^[16]数值研究迷宫齿不同几何参数对光滑面和蜂窝面台阶式迷宫密封泄漏特性影响。研究表明在小间隙中,随着迷宫齿宽度的减小,光滑面迷宫密封的流量减小,而迷宫蜂窝密封的流量增加。Yan 等^[17-19]建立了台阶式迷宫蜂窝密封的计算模型,数值研究了压比、密封间隙、转速、蜂窝孔径对其泄漏特性和总温升特性的影响。陈秀秀等^[20]数值研究了动叶叶顶蜂窝密封的泄漏特性,研究表明密封间隙越大,密封内泄漏量近似线性增加;存在最佳的蜂窝孔径使泄漏量最少。

Li 等^[21]数值研究了密封间隙、转速、蜂窝孔径和深度对高低齿迷宫蜂窝密封泄漏特性的影响,研究表明:密封泄漏量与间隙成正比,当转速高于 3 000 r/min 时密封泄漏量开始显著降低;当蜂窝孔

径和迷宫齿宽数值相同,蜂窝深径比为 0.93 时,密封泄漏量最低。李志刚等^[22-24]将高低齿迷宫密封的低齿替换为蜂窝结构,数值研究了蜂窝孔径和深度对蜂窝密封特性的影响。孙丹等^[25]通过实验测量与数值计算对光滑面蜂窝密封的泄漏特性进行了研究,研究指出:蜂窝结构参数主要是通过影响蜂窝孔中涡系的发展和蜂窝孔的密度来影响泄漏量的。

目前对于蜂窝密封的研究主要集中在直通式迷宫蜂窝密封和光滑面迷宫密封上,对于具有高低齿迷宫蜂窝密封的研究较少。本文通过实验测量和数值模拟对高低齿迷宫蜂窝密封的泄漏特性进行研究。在密封泄漏特性静止实验台测量了 7 种压比和 5 种密封间隙下高低齿迷宫蜂窝密封的泄漏量。接着,基于实验数据对数值方法准确性验证的基础上,数值研究压比、密封间隙、转速和蜂窝孔径对迷宫蜂窝密封泄漏特性的影响,并与光滑面迷宫密封的泄漏特性进行了比较。

1 实验系统和模型

图 1 是密封泄漏特性静止实验系统示意图。实验系统由压缩机气源、管路、整流系统、试验段、试验件和测量和控制系统等组成。实验介质为压缩空气,压缩空气最多由 4 台螺杆压缩机提供,气流的最高进口压力为 0.7 MPa,最大流量为 2 kg/s。在整流段前端设有压力调节阀和旁路,以调节和控制进入试验段气流的流量和压力。DN80 罗托克气体涡轮流量计(精度 $\pm 1\%$)安装在整流段前,用于测量空气的流量。三孔探针和 K 型热电偶位于试验段前部,以测量泄漏流的压力和温度。其中测量的压力和温度的误差分别约为 $\pm 0.2\%$ 和 $\pm 1\text{ K}$ 。

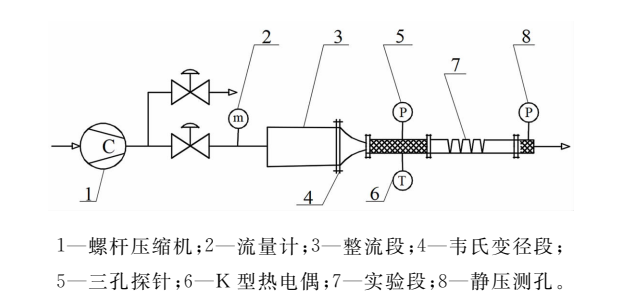


图 1 密封实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system of seal

图 2 是密封泄漏特性静止实验台图片。在实验过程中,首先根据实验需要,由压气机提供一定的压力的气流,压缩空气通过管路进入到整流段中;其次,在整流段中对流量进行微调,使试验段进口处压

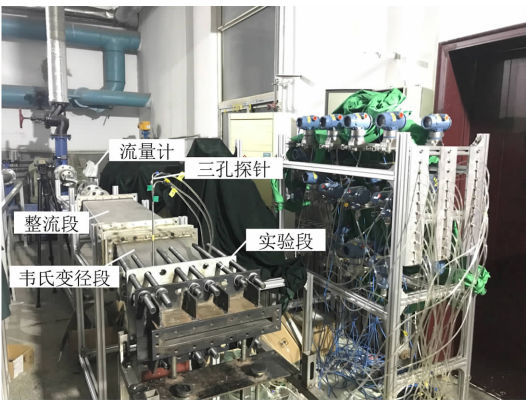
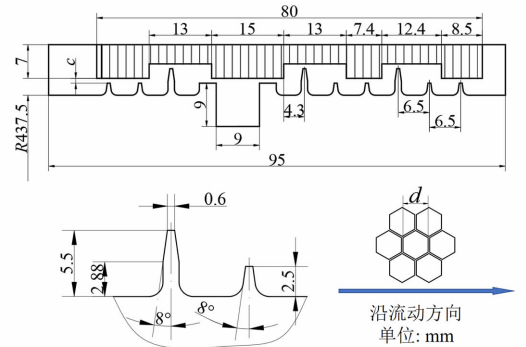


图 2 密封实验台实物图

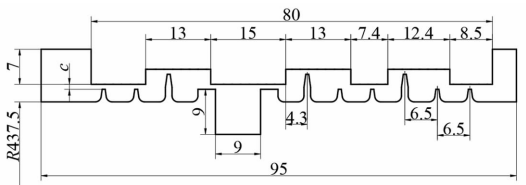
Fig. 2 Photo of the test rig of seal

力满足实验要求;等进口压力稳定后,读取三孔探针测量的压力读数,同时记录流量计流量和 K 型热电偶测量的温度读数。

图 3 给出了迷宫蜂窝密封和光滑面迷宫密封几何结构图,其主要几何参数已在图中标注,迷宫蜂窝密封的静子面为蜂窝结构。



(a) 迷宫蜂窝密封



(b) 光滑面迷宫密封

图 3 迷宫蜂窝密封和光滑面迷宫密封结构图

Fig. 3 The structure diagram of labyrinth honeycomb seal and smooth labyrinth seal

图 4 是迷宫蜂窝密封实验件实物图,由蜂窝静子面和迷宫转子面两部分组成。实验件为平板结构,长 95 mm,宽 320 mm。实验为静态平板实验,不考虑篦齿盘弧度及转速的影响,主要测量迷宫蜂窝密封在不同压比(1.05~1.6)和径向间隙(0.4~1.2 mm)下的泄漏量,以研究压比和间隙对其泄漏

特性的影响以及验证数值方法的正确性。实验中实验件的蜂窝孔径和厚度分别保持为 1.6 mm 和 0.1 mm。

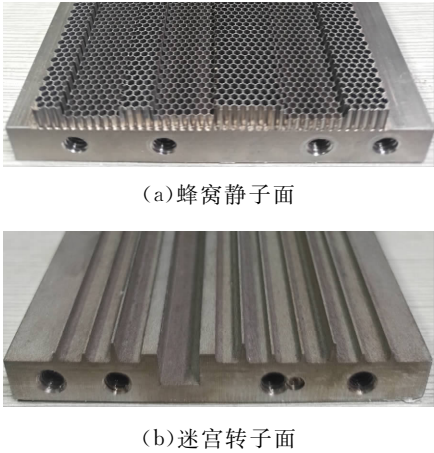


图 4 蜂窝密封实验件实物图

Fig. 4 Physical drawing of test piece of honeycomb seal

在实验基础上验证数值方法的正确性后,为接近密封真实工况,建立了考虑篦齿盘弧度的密封模型,其旋转半径 r 为 437.5 mm。数值研究压比、径向间隙、转速和蜂窝孔径对迷宫蜂窝密封泄漏特性的影响。同时为评估迷宫蜂窝密封的性能,建立了对应的迷宫密封模型,其几何参数如图 3(b)所示。

2 数值方法

图 5 给出了迷宫蜂窝密封的三维计算域模型。为节约计算资源,考虑到密封结构的周期性,取两个蜂窝孔径的弧段作为研究对象的计算域,弧段两侧采用周期性边界。采用商用软件 ICEM 生成多块结构化网格,对壁面附近的网格进行加密,以满足 y^+ 的要求。在密封间隙处网格节点数保持在 20 个以上。图 6 是迷宫蜂窝密封网格示意图。

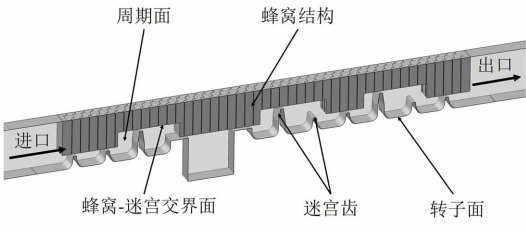


图 5 迷宫蜂窝密封计算域

Fig. 5 Computational domain of honeycomb seal

表 1 给出了迷宫蜂窝密封的计算边界条件,进口总温和出口静压分别保持为 285 K 和 98.3 kPa,压比和计算转速范围分别为 1.05~1.6 和 0~8 000 r/min。

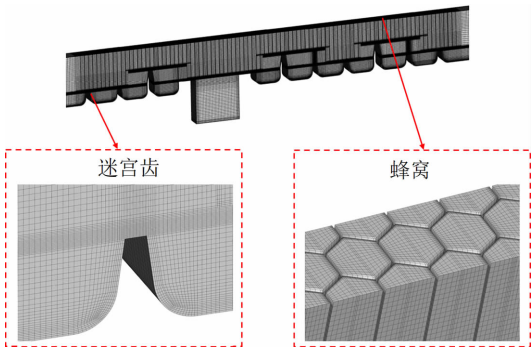


图 6 迷宫蜂窝密封网格示意图

Fig. 6 Computational grid of labyrinth honeycomb seal

表 1 迷宫蜂窝密封几何参数和计算工况

Table 1 Geometrical parameters and calculation condition of labyrinth honeycomb seal

参数	数值
进出口压比 ϵ	1.05~1.6
进口总温 T_{in}/K	285
出口静压 p_{out}/kPa	98.3
蜂窝孔径 d/mm	0.6、0.8、1.6、3.2
密封间隙 c/mm	0.4、0.6、0.8、1.0、1.2
计算转速 $n/(r \cdot min^{-1})$	0、1 500、3 000、6 000、8 000

此外还计算了 5 种径向间隙和 4 种蜂窝孔径的泄漏量以研究密封间隙和蜂窝孔径对迷宫蜂窝密封泄漏特性的影响。迷宫密封的计算边界条件同迷宫蜂窝密封保持一致。

表 2 给出了本文数值计算采用的求解方法,本文基于标准 $k-\epsilon$ 两方程湍流模型和三维 Reynolds-averaged Navier-Stokes(RANS)方程求解方法,采用商用 CFD 软件 ANSYS CFX 数值分析了压比、密封间隙、转速和孔径对蜂窝密封泄漏特性的影响,并与对应的迷宫密封泄漏特性进行了比较。计算使用的工质为理想气体;近壁面区采用改进壁面函数法;固壁面视为绝热、光滑壁面;采用高精度离散模型。

表 2 密封泄漏特性数值方法

Table 2 Numerical method of leakage flow of seal

求解器	ANSYS CFX 18.0
网格生成方法	ANSYS ICEM
求解方法	定常、时间推进
湍流模型	标准 $k-\epsilon$
工质	理想气体
固壁面处理	绝热、光滑
离散模型	高精度离散模型

当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。

2.1 网格无关性验证

在压比为 1.3,密封间隙为 1.0 mm 工况条件下,选取 3 套网格数目分别为 117 万、137 万和 173 万的网格,以迷宫蜂窝密封的泄漏量为考核指标,进行网格无关性验证。计算结果如表 3 所示,当网格数从 137 万增加到 173 万时,密封泄漏量偏差小于 0.5%,可以视为网格无关。在后续不同计算模型中,网格数均大于 137 万,确保满足网格无关性精度要求。

表 3 迷宫蜂窝密封泄漏量网格无关性验证
Table 3 Grid independence verification of labyrinth honeycomb seal

节点数/ 10^4	泄漏量 CFD 值/ ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	泄漏量实验值/ ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)
117	0.024 7	0.024 8
137	0.024 5	0.024 8
173	0.024 4	0.024 8

2.2 数值方法有效性验证

采用径向间隙为 1.0 mm 的迷宫蜂窝密封,以不同压比下密封泄漏量为考核指标,对本文采用的湍流模型进行了验证,结果如图 7 所示。3 种湍流模型随压比的增长趋势同试验数据一致,泄漏量都随着压比的增大而接近线性增加,其中标准 $k-\epsilon$ 湍流模型具有更好的预测精度,计算与试验结果偏差在 5% 以内,满足计算精度要求,因此证实本文采用的湍流模型能够准确预测迷宫蜂窝密封泄漏量。

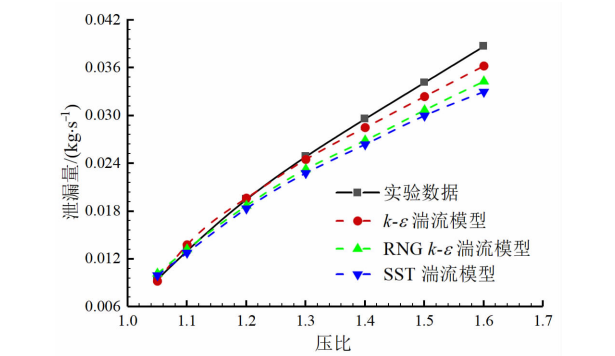


图 7 不同湍流模型泄漏量随压比变化图
Fig. 7 Variation of leakage rate with pressure ratio in different turbulence models

图 8 是迷宫蜂窝密封泄漏量实验数据与计算结果对比图。在不同的径向间隙下密封泄漏量均随着

压比的增加而接近与线性增长;密封泄漏量与径向间隙大小成正比。同时,实验测得的泄漏量要略大于数值计算的结果,但相对误差小于 7%。误差是客观存在的,造成该误差的主要原因有:第一,蜂窝板经过线切割成形后,采用焊接的方式与蜂窝底板固连,加工过程对蜂窝形状、尺寸等造成一定影响,从而不可避免地使实验件尺寸与计算模型尺寸产生一定偏差;第二,线切割加工的密封齿表面较为粗糙,可能对实验结果产生一定影响。总体上可认为数值预测结果和实验测量数据吻合良好,验证了数值方法的准确性。

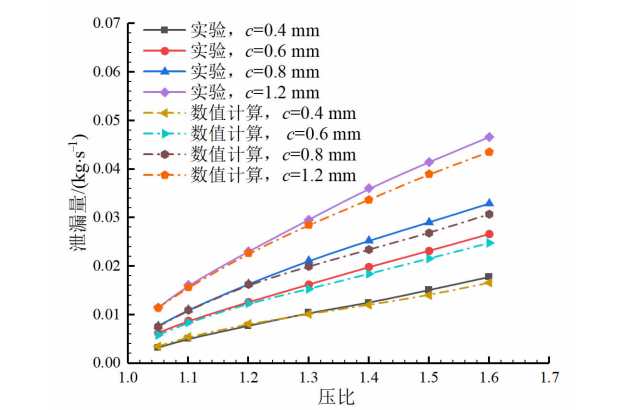


图 8 数值计算与实验测量泄漏量对比结果
Fig. 8 Comparison between numerical simulation and experimental measurement of leakage rate

3 结果分析与讨论

在验证完数值方法的准确性和可靠性的基础上,建立考虑篦齿齿弧度的密封模型,数值研究了压比、密封间隙、转速和蜂窝孔径对迷宫蜂窝密封泄漏特性的影响,揭示其封严机理。同时与迷宫密封进行了比较。在密封计算中,理想流量 m_{id} 定义为

$$m_{id} = \frac{p_{in} A}{\sqrt{R_g T_{in}}} \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa - 1} \left[\left(\frac{1}{\epsilon} \right)^{2/\kappa} - \left(\frac{1}{\epsilon} \right)^{(\kappa+1)/\kappa} \right]} \tag{1}$$

$$A = 2\pi r c \tag{2}$$

式中: T_{in} 是进口总温; p_{in} 是进口总压; A 是间隙通流面积; R_g 为气体常数; κ 为定熵指数。

本文采用无量纲流量系数 $\varphi^{[2]}$ 对密封泄漏特性开展研究

$$\varphi = \frac{m_{total} \sqrt{T_{in}}}{P_{in} A} \tag{3}$$

$$m_{total} = \frac{360}{\theta} m_{cell} \tag{4}$$

式中: m_{total} 是迷宫蜂窝密封整周泄漏量; m_{cell} 是最小周期弧段泄漏量; θ 为最小周期单元的周向角。

3.1 压比和径向间隙的影响

研究了压比和径向间隙对迷宫蜂窝密封泄漏特性的影响,并同光滑面迷宫密封进行了对比,其中蜂窝孔径保持为 1.6 mm。

图 9 是在转速为 3 000 r/min 时,两种不同径向间隙下迷宫蜂窝密封和光滑面迷宫密封的流量系数随压比的变化图。尽管光滑面迷宫密封和迷宫蜂窝密封的静子面结构不同,但两者的流量系数均随着压比的增大而增大,并且增加的趋势在减缓。如迷宫蜂窝密封间隙为 1.2 mm 时,压比从 1.05 增加到 1.3 时,流量系数增加约 130%,压比从 1.3 增加到 1.6 时,对应的流量系数仅增加约 24%。流量系数随压比的增加而增长趋势减缓的原因主要是压比较小时,流体还未充分节流膨胀,导致泄漏量显著增加;压比较大时,流体在迷宫齿和蜂窝腔室中形成了强烈的旋涡,流体能量得到充分耗散,泄漏量增加趋势变缓。

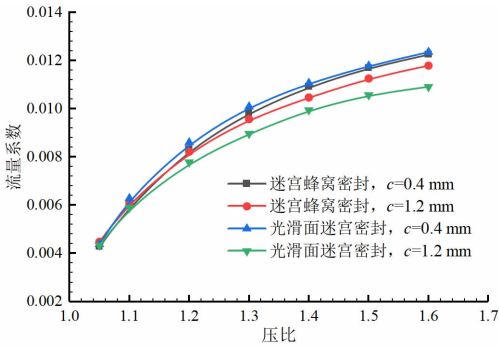


图 9 密封流量系数随压比变化曲线

Fig. 9 Leakage flow coefficient of seal varies with different pressure ratios

由图 9 可知径向间隙为 0.4 mm 时,迷宫蜂窝密封的流量系数要小于光滑面迷宫密封;在径向间隙增长为 1.2 mm 时,光滑面迷宫密封的流量系数要小于迷宫蜂窝密封。该现象说明,在小径向间隙下迷宫蜂窝密封比光滑面迷宫密封拥有更优的密封性能,在大径向间隙时则相反。

图 10 是在转速为 0 r/min 和 3 000 r/min 时,迷宫蜂窝密封的流量系数随径向间隙的变化图。在不同的转速下随着间隙的增加,流量系数略有减低。流量系数从径向间隙 0.4 mm 增加到 1.2 mm 最大降低约 10%。实验表明,迷宫蜂窝密封的泄漏量随着径向间隙的增大而增加,这主要是因为径向间隙

的增加使通流面积增加,导致泄漏量增加。造成流量系数随着间隙的增加而略有减低的主要原因,是高低齿迷宫和台阶结构对于流体的阻挡作用明显,虽然径向间隙增加导致通流面积增加使泄漏量增大,但是相对理想泄漏量增大的幅度较小,所以流量系数反而略有减低。这与蜂窝面直通式和台阶式迷宫密封有明显的不同。

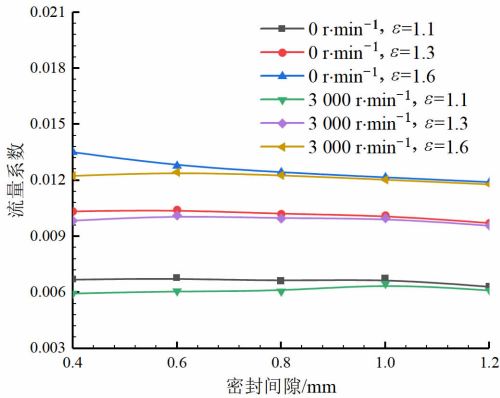


图 10 迷宫蜂窝密封流量系数随密封间隙变化曲线

Fig. 10 leakage flow coefficient of labyrinth honeycomb seal varies with different seal clearances

图 11 是在压比为 1.3、径向间隙 c 分别为 0.4 mm 和 1.2 mm 时光滑面迷宫密封和迷宫蜂窝密封的局部速度矢量分布图。从图 11 中发现:在径向间隙为 0.4 mm 时,光滑面迷宫密封和迷宫蜂窝密封的流场不同;蜂窝面使高齿齿顶间隙处的射流角度发生了偏转,带动高齿齿后所有的流体顺时针运动形成了一个完整的旋涡,流体耗散效应明显。对于光滑面迷宫密封而言,齿顶的射流仅带动高齿齿后的上半部分的流体形成一个耗散较强旋涡,而下半部分流体形成的旋涡能量耗散很弱。此外,在径向间隙小时,流体速度也较低,流入蜂窝孔中进行耗散的流体也就更多。以上原因使得在小径向间隙下,迷宫蜂窝密封比光滑面迷宫密封拥有更优的密封性能。

从图 11 中还可看出,径向间隙为 1.2 mm 时的射流速度比径向间隙为 0.4 mm 时的射流速度大,这会使得射流撞击高齿和台阶时造成更大的损失,使泄漏量降低。一方面,径向间隙增加使通流面积增加,泄漏量增大;另一方面,径向间隙增加使射流撞击迷宫齿和台阶的损失增大,泄漏量减少。这两方面的原因造成迷宫蜂窝密封的流量系数随径向间隙增加而略有减低。

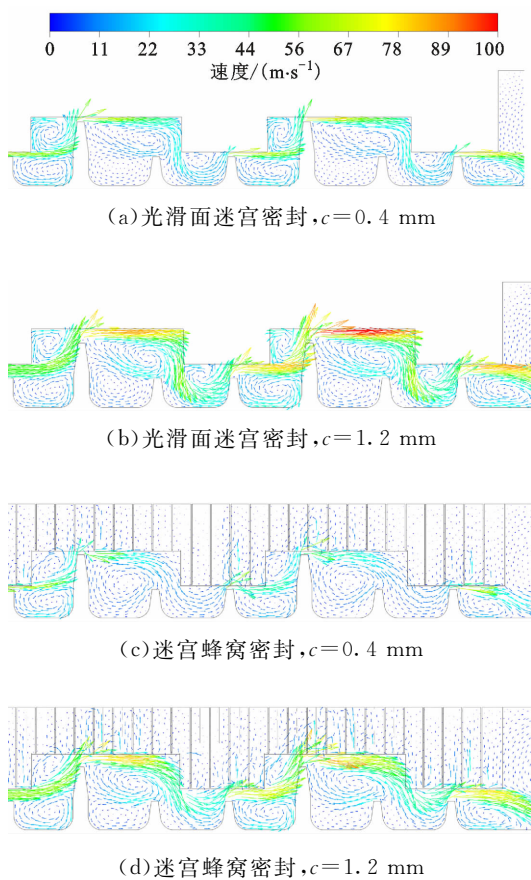


图 11 迷宫蜂窝密封和光滑面迷宫密封的速度矢量图

Fig. 11 Velocity vector diagram of labyrinth honeycomb seal and Smooth labyrinth seal

3.2 转速的影响

本小节研究了转速对迷宫蜂窝密封泄漏特性的影响,转速范围为 $0\sim 8\,000\text{ r/min}$,径向间隙为 0.6 mm 和 1.2 mm ,蜂窝孔径保持为 1.6 mm 。图 12 给出了在 2 种不同的径向间隙时迷宫蜂窝密封和光滑面迷宫密封流量系数随转速变化的变化图。

由图 12 可知,迷宫蜂窝密封转速范围在 $0\sim 3\,000\text{ r/min}$ 时流量系数变化不大,当转速大于 $3\,000\text{ r/min}$ 时,流量系数开始快速降低。如迷宫蜂窝密封在密封间隙为 0.6 mm ,压比为 1.3 时,转速由 0 r/min 变化到 $3\,000\text{ r/min}$ 时,流量系数下降了约 2.7% ,转速由 $3\,000\text{ r/min}$ 变化到 $8\,000\text{ r/min}$ 时,流量系数下降了约 22% 。同时,压比越小,流量系数降低得幅度越大,在径向间隙为 0.6 mm 、压比为 1.6 时,迷宫蜂窝密封的流量系数降低了 19% ;当压比为 1.05 时流量系数则降低了 51% 。

由图 12(a)可以看出,光滑面迷宫密封的流量系数虽然也随着转速的增大而降低,但是降低的幅度要低于迷宫蜂窝密封。在转速大于 $6\,000\text{ r/min}$

时,3 种不同压比下迷宫蜂窝密封的流量系数均低于光滑面迷宫密封。这表明转速对迷宫蜂窝密封泄漏特性的影响更大,在高转速工况下迷宫蜂窝密封拥有更好的密封性能。但是这种影响会随着径向间隙的增大而被减弱。如图 12(b)所示,当径向间隙增大为 1.2 mm 时,流量系数随转速升高而降低的趋势减缓。这主要是因为在在大径向间隙时流体的轴向速度较大,由轴旋转带动流体产生的周向速度对主流的影响较低,流体沿周向运动的趋势不强,蜂窝孔中流体的耗散作用弱。

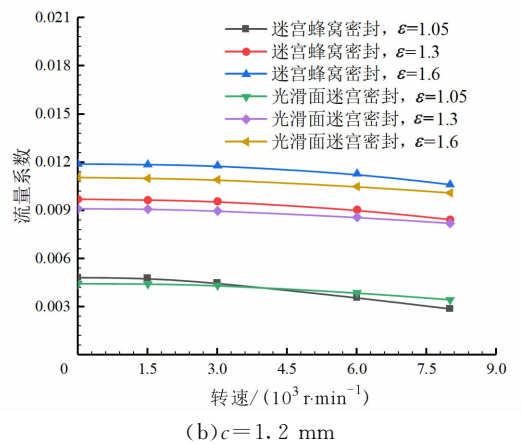
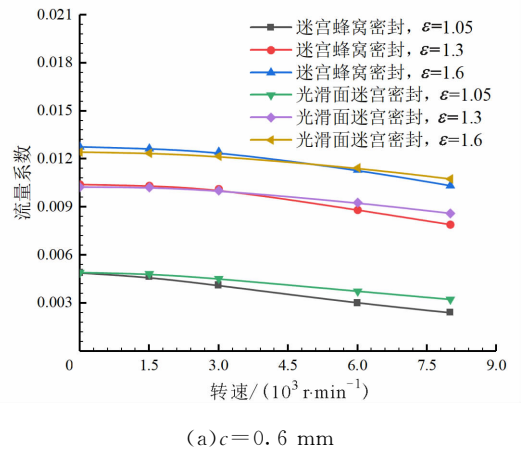


图 12 迷宫蜂窝密封和光滑面迷宫密封的流量系数随转速变化曲线

Fig. 12 Leakage flow coefficient of the labyrinth honeycomb seal and smooth labyrinth seal varies with different rotational speed

图 13 给出了迷宫蜂窝密封在 3 种不同转速时密封子午面流线和湍动能云图。如图 13(a)所示:在转速为 0 时,蜂窝孔中基本只形成一个旋涡,并且旋涡中心靠近蜂窝孔底部;湍动能数值较小且主要集中分布在密封齿顶间隙处。随着转速的升高,转子面带动近壁面流体沿旋转方向运动,在密封中产

生周向流动,有更多的流体流入孔中使蜂窝孔中流体耗散加强。如图 13(b)所示:在转速增长为 3 000 r/min 时,蜂窝孔中的旋涡个数增加,耗散加强;由于旋转使轴近壁面的流体沿旋转方向运动,高齿后部腔室中较小的旋涡变得更小。如图 13(c)所示:当转速达到 8 000 r/min 时,蜂窝孔中的旋涡也变得更加复杂,流体耗散进一步加强,高齿后部腔室中较小的旋涡消失;同时,湍动能明显增大,流体挤压造成的损失增大使密封泄漏量降低。综上所述,随着转速的升高,流体周向运动速度增大,孔中流体的耗散加强使泄漏量降低,同时流体之间的相互挤压也更剧烈造成泄漏量降低。

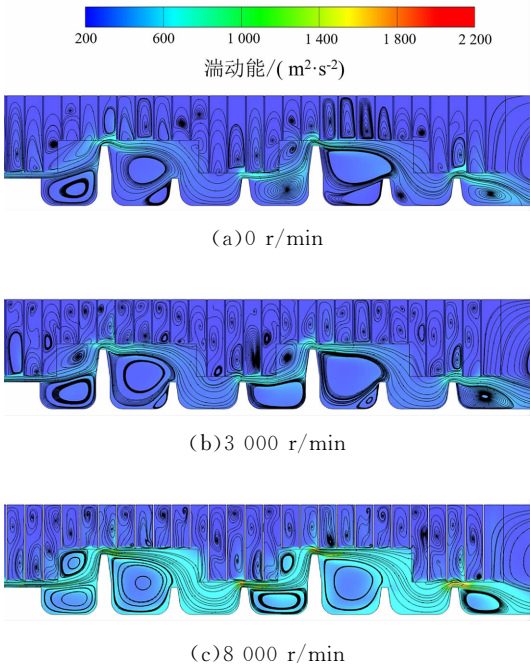


图 13 迷宫蜂窝密封子午面流线和湍动能云图
Fig. 13 Turbulent kinetic energy contours and streamline distribution of labyrinth honeycomb seal

在小压比和小径向间隙时,泄漏流体的轴向速度较小而周向速度大,这使密封中流体沿周向运动的趋势加强,孔中流体耗散加强,转速对密封泄漏特性影响更大。对于光滑面迷宫密封而言,没有类似迷宫蜂窝孔结构造成更多的损失,这使得转速对其泄漏特性的影响较小。

3.3 孔径的影响

蜂窝孔径是迷宫蜂窝密封件的重要几何参数之一。Schramm 等^[13]提出有效密封间隙 c_{eff} 的概念以分析孔径对密封泄漏特性的影响。

图 14 是有效密封间隙 c_{eff} 的示意图。值得注意的是,当蜂窝孔径 d 小于齿顶宽度 b (本文为 0.6

mm) 时,有效密封间隙 c_{eff} 等于密封间隙 c 。 c_{eff} 的表达式如下

$$c_{\text{eff}} = \sqrt{\left(\frac{d-b}{2}\right)^2 + c} \tag{5}$$

本小节研究了 5 种不同蜂窝孔径(0、0.6、0.8、1.6、3.2 mm)对迷宫蜂窝密封泄漏特性的影响,其中密封间隙保持为 0.6 mm,转速为 3 000 r/min。

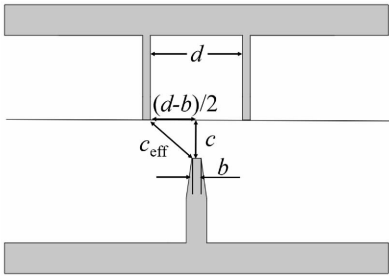


图 14 迷宫蜂窝密封有效密封间隙 c_{eff} 的示意图
Fig. 14 Schematic diagram of effective seal clearance c_{eff} of the labyrinth honeycomb seal

图 15 给出了 5 种不同压比下迷宫蜂窝密封流量系数随蜂窝孔径变化关系图,其中将光滑面迷宫密封视为蜂窝孔径为 0 时的密封。随着孔径的增大,密封流量系数先降低后升高,在蜂窝孔径 d 为 0.6 mm 时密封流量系数最低。当蜂窝孔径从 0 增大到 0.6 mm 时,泄漏系数降低 3.0%~5.5%;当孔径从 0.6 mm 增大到 3.2 mm 时,泄漏系数增大 17%~20%。同时还可从图中 15 发现,孔径 d 为 1.6 mm 时的流量系数几乎与孔径 d 为 0 mm 时一样。这表明当孔径 d 小于 1.6 mm 时,迷宫蜂窝密封的流量系数低于光滑面迷宫密封。即当蜂窝孔径 d 小于 1.6 mm 时,迷宫蜂窝密封的封严性能优于迷宫密封。

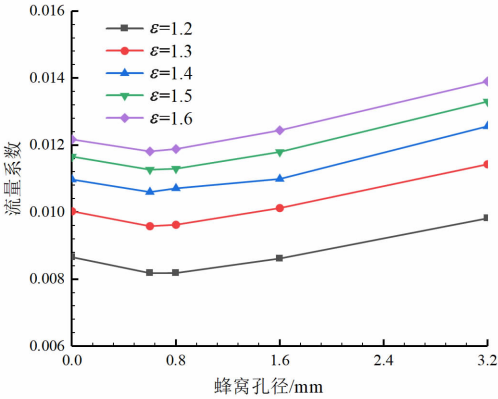


图 15 迷宫蜂窝密封流量系数随孔径变化曲线
Fig. 15 Leakage flow coefficient of the labyrinth honeycomb seal varies with different honeycomb cell diameters

图 16 给出了 4 种典型的蜂窝孔径 0、0.6、1.6 和 3.2 mm 子午切面上局部速度云图和流场分布图,此时密封压比为 1.3,转速为 3 000 r/min。如图 16(a)所示:当孔径为 0 时,有效密封间隙 c_{eff} 与径向间隙 c 一致,流经高齿齿顶间隙的射流沿轴向水平流动,带动齿后的流体形成了上下两个旋涡。如图 16(b)所示:当孔径增长为 0.6 mm 与齿宽数值一致时,有效密封间隙 c_{eff} 与径向间隙 c 差别不大,其流场分布与孔径为 0 时的流场分布较为一致。蜂窝孔径增大更多流体进入蜂窝孔内部,使流体的能量在孔中耗散降低了密封泄漏量。这在数值上表现为孔径从 0 增长到 0.6 mm 时,流量系数呈现出下降的趋势。如图 16(c)所示:当孔径增长为 1.6 mm 时,从图中和式 4 均可知道此时的有效密封间隙 c_{eff} 开始增大,齿顶射流开始向下偏转,其流场已与孔径为 0.6 mm 时的流场不同;同时从速度云图中发现

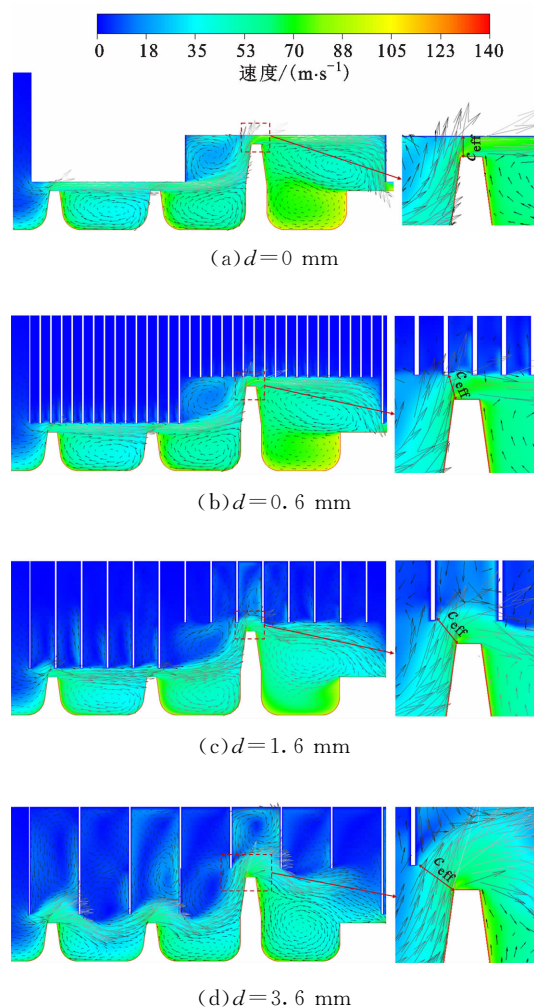


图 16 迷宫蜂窝密封不同孔径时速度云图和流场分布
Fig. 16 Velocity contours and velocity distribution in the labyrinth honeycomb seal with different cell diameters

流体在蜂窝孔内的速度升高,蜂窝孔对气流的耗散作用加强。在孔径为 1.6 mm 时,一方面有效密封间隙增大使通流面积增加导致泄漏量增大,另一方面蜂窝孔对气流的耗散作用增强使泄漏量降低,这两种原因导致孔径为 1.6 mm 时的流量系数与孔径为 0 mm 时一致;孔径从 0.6 mm 增长到 1.6 mm 时,密封流量系数也就升高。如图 16(d)所示,当孔径增长为 3.2 mm 时,有效密封间隙显著增大,流场发生了很大变化,此时蜂窝孔对气流的耗散作用加强,但是由有效密封间隙增大带来的泄漏量增加占主导作用,所以孔径从 1.6 mm 增长到 3.2 mm 时,流量系数升高。

综上,当孔径小于齿宽时,有效密封间隙为密封间隙,随着孔径的增大蜂窝孔对气流的耗散作用加强,流量系数下降;当孔径大于齿宽时,虽然随着孔径增大使蜂窝孔对气流的耗散进一步加强,但是有效密封间隙增大导致的泄漏量增加占比更大,流量系数升高。当孔径升高到 1.6 mm 时,流量系数已与光滑面迷宫密封一致,孔径高于 1.6 mm 的迷宫蜂窝密封的封严性能已经要低于光滑面迷宫密封了。

4 结 论

(1) 迷宫蜂窝密封泄漏量随着压比的增加而线性增加;迷宫蜂窝密封和光滑面迷宫密封流量系数均随着压比的增加而增加,但是增加趋势在减缓。压比从 1.05 增长到 1.6 时,迷宫蜂窝密封流量系数升高约 160%。

(2) 迷宫蜂窝密封在小密封间隙和小压比时比光滑面迷宫密封更具优势;高低齿与台阶结构对流体的阻碍作用明显,流量系数随径向间隙增大而略有降低,流量系数最多降低了约 10%。

(3) 迷宫蜂窝密封流量系数随转速的增加而降低,当转速高于 3 000 r/min 时,流量系数明显下降;在间隙为 0.6 mm、压比为 1.05 时,转速从 0 转速升高到 8 000 r/min 时,密封流量系数降低了 51%;在高转速时孔中流体耗散加强,使迷宫蜂窝密封泄漏性能优于光滑面迷宫密封。

(4) 迷宫蜂窝密封流量系数随蜂窝孔径增大先减小后升高,在孔径(0.6 mm)与齿宽相等时流量系数最低,此时流量系数比光滑面迷宫密封低 3.0~5.5%;孔径小于 1.6 mm 时,迷宫蜂窝密封的泄漏特性优于光滑面迷宫密封。

参考文献:

- [1] 晏鑫, 李军, 丰镇平. 蜂窝密封内流动传热及转子动力特性的研究进展 [J]. 力学进展, 2011, 41(2): 201-216.
YAN Xin, LI Jun, FENG Zhenping. Review of the discharge, heat transfer and rotordynamic characteristics of honeycomb seals [J]. Advances in Mechanics, 2011, 41(2): 201-216.
- [2] 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, 2016.
- [3] 王亚博. 射流蜂窝叶顶控制涡轮叶顶间隙泄漏的数值和实验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [4] 付云峰, 宋彦萍, 陈聪, 等. 机匣与叶顶蜂窝密封对涡轮叶栅顶部泄漏流动的影响 [J]. 工程热物理学报, 2016, 37(5): 963-968.
FU Yunfeng, SONG Yanping, CHEN Cong, et al. Influence of honeycomb casing and honeycomb tip on tip leakage flow in turbine cascade [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2016, 37(5): 963-968.
- [5] STOCKER H L, COX D M, HOLLE G F. Aerodynamic performance of conventional and advanced design labyrinth seals with solid-smooth abradable, and honeycomb lands [EB/OL]. (1977-11-01)[2022-02-20]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19780019484>.
- [6] CHILDS D, 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] NAYAK K C. Effect of rotation on leakage and windage heating in labyrinth seals with honeycomb lands [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2020, 142(8): 081001.
- [8] CHARAN NAYAK K, DUTTA P. Effect of rub-grooves on leakage and windage heating in straight-through labyrinth seals [J]. Journal of Tribology, 2016, 138(2): 022201.
- [9] 聂顺鹏, 刘高文, 雷昭, 等. 有无蜂窝的直通斜齿流动特性旋转实验研究 [J]. 推进技术, 2020, 41(5): 1015-1022.
NIE Shunpeng, LIU Gaowen, LEI Zhao, et al. Experimental study on rotation on flow characteristics of straight-through inclined tooth with or without honeycomb [J]. Journal of Propulsion Technology, 2020, 41(5): 1015-1022.
- [10] WRÓBLEWSKI W, FRACZEK D, MARUGI K. Leakage reduction by optimisation of the straight-through labyrinth seal with a honeycomb and alternative land configurations [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer: Part A, 2018, 126: 725-739.
- [11] SZYMAŃSKI A, WRÓBLEWSKI W, BOCHON K, et al. Experimental validation of optimised straight-through labyrinth seals with various land structures [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 158: 119930.
- [12] CHOUGULE H H, MIRZAMOGHADAM A V. CFD leakage predictions of labyrinth seals having straight and inclined notched teeth with staggered honeycomb land [C]//ASME Turbo Expo 2018: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. New York, NY, USA: ASME, 2018: V05BT15A015.
- [13] SCHRAMM V, WILLENBORG K, KIM S, et al. Influence of a honeycomb facing on the flow through a stepped labyrinth seal [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2002, 124(1): 140-146.
- [14] KOOL G A, BINGEN F, PAOLILLO R E, et al. A high temperature, high speed seal test rig at NLR-design, construction and validation [C]//41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Reston, VA, USA: AIAA, 2005: AIAA 2005-3902.
- [15] PAOLILLO R, WANG Chengzhang, VASHIST T K, et al. Rotating seal rig experiments: test results and analysis modeling [C]//ASME Turbo Expo 2006: Power for Land, Sea, and Air. New York, NY, USA: ASME, 2006: 1551-1559.
- [16] ALIZADEH M, NIKKHAHI B, FARAHANI A S, et al. Numerical study on the effect of geometrical parameters on the labyrinth-honeycomb seal performance [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part G Journal of Aerospace Engineering, 2018, 232(2): 362-373.
- [17] 晏鑫, 李军, 宋立明, 等. 蜂窝面迷宫密封内流动和总温升特性的研究 [J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(7): 823-827, 869.
YAN Xin, LI Jun, SONG Liming, et al. Study on flow and total temperature increase of honeycomb labyrinth seals [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(7): 823-827, 869.
- [18] YAN X, LI J, FENG Z. Effects of sealing clearance and stepped geometries on discharge and heat transfer characteristics of stepped labyrinth seals [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part A Journal of Power and Energy, 2011, 225(4): 521-538.

- [19] YAN Xin, LI Jun, SONG Liming, et al. Investigations on the discharge and total temperature increase characteristics of the labyrinth seals with honeycomb and smooth lands [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2009, 131(4): 041009.
- [20] 陈秀秀, 晏鑫, 李军. 蜂窝叶顶密封对透平级气动性能的影响研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2016, 50(4): 14-20.
CHEN Xiuxiu, YAN Xin, LI Jun. Effect of honeycomb shroud seals on aerodynamic performance of turbine stages [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2016, 50(4): 14-20.
- [21] LI Jun, KONG Shengru, YAN Xin, et al. Numerical investigations on leakage performance of the rotating labyrinth honeycomb seal [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2010, 132(6): 062501.
- [22] 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.
- [23] 李志刚, 郎骥, 李军, 等. 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, 64.
LI Zhigang, LANG Ji, LI Jun, et al. Experiment on leakage flow characteristics of labyrinth seal [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2011, 45(3): 48-52, 64.
- [24] 李志刚, 李军, 丰镇平. 蜂窝密封流动特性的数值研究和泄漏量计算公式的构造 [J]. *机械工程学报*, 2011, 47(2): 142-148.
LI Zhigang, LI Jun, FENG Zhenping. Numerical investigation on discharge behavior and predication formula establishment of leakage flow rate of honeycomb seal [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(2): 142-148.
- [25] 孙丹, 王猛飞, 艾延廷, 等. 蜂窝密封泄漏特性理论与实验 [J]. *航空学报*, 2017, 38(4): 277-286.
SUN Dan, WANG Mengfei, AI Yanting, et al. Theoretical and experimental study of leakage characteristics of honeycomb seal [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2017, 38(4): 277-286.

(编辑 荆树蓉 杜秀杰)