

变参数篦齿-蜂窝密封泄漏特性的研究

王梓齐^{1,2}, 李文豪^{1,2}, 徐磊^{1,2}, 何坤¹, 晏鑫²

(1. 西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室, 710049, 西安;

2. 西安交通大学叶轮机械研究所, 710049, 西安)

摘要: 为全面分析变参数下篦齿-蜂窝密封的泄漏特性, 搭建了燃气轮机篦齿-蜂窝密封泄漏流动特性实验台, 并开展了对应的数值分析, 研究了6种压比、4种间隙、6种蜂窝深度、4种蜂窝直径、4种齿高、3种篦齿倾角、2种齿宽、2种篦齿节距下的篦齿-蜂窝密封封严性能。结果表明: 篦齿-蜂窝密封流量系数、泄漏量分别随压比、间隙的增加线性增大, 其中密封压比每增加10%, 流量系数增加3.47%, 封严间隙每增大1倍, 泄漏量增加57.94%; 篦齿-蜂窝密封泄漏量随蜂窝深度增加先减小后增大, 在蜂窝深度为3.5 mm时封严效果最优, 泄漏量较最小蜂窝深度减少9.81%; 随着蜂窝直径增大, 泄漏量先减小后增大, 并在蜂窝直径为1.6 mm时实现最佳封严效果, 其泄漏量相较于最大蜂窝直径时降低8.11%; 随着齿高、倾角增加, 泄漏量单调降低; 篦齿节距对封严效果影响较大, 而齿宽影响最小。

关键词: 蜂窝密封; 篦齿; 泄漏量; 实验; 数值分析

中图分类号: TK263.2 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202509020 **文章编号:** 0253-987X(2025)09-0209-11

Study on Leakage Characteristics of Labyrinth-Honeycomb Seals under Variable Parameters

WANG Ziqi^{1,2}, LI Wenhao^{1,2}, XU Lei^{1,2}, HE Kun¹, YAN Xin²

(1. MOE Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

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

Abstract: To comprehensively analyze the leakage characteristics of labyrinth-honeycomb seals under variable parameters, an experimental platform for investigating the leakage flow characteristics of gas turbine labyrinth-honeycomb seals and conducts corresponding numerical simulations is established. The sealing performance is investigated under six pressure ratios, four clearance gaps, six honeycomb depths, four honeycomb diameters, four tooth heights, three labyrinth tooth inclination angles, two tooth widths, and two tooth pitches. The results indicate that the flow coefficient and leakage rate of labyrinth-honeycomb seals increase linearly with the pressure ratio and clearance gap. Specifically, for every 10% increase in the sealing pressure ratio, the flow coefficient increases by 3.47%, while doubling the clearance gap leads to a 57.94% increase in leakage. The leakage rate initially decreases and then increases with increasing honeycomb depth, achieving the optimal sealing effect at a honeycomb depth of 3.5 mm, where leakage is

收稿日期: 2025-03-17。 作者简介: 王梓齐(1998—), 男, 博士生; 何坤(通信作者), 女, 副教授, 博士生导师。

基金

项目: 国家科技重大专项资助项目(J2019-III-0007-0050)。

网络出版时间: 2025-05-20

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20250520.1004.002>

reduced by 9.81% compared to the minimum depth. Similarly, leakage first decreases and then increases with increasing honeycomb diameter, reaching the best sealing performance at a diameter of 1.6 mm, with an 8.11% reduction in leakage compared to the maximum diameter. Leakage decreases monotonically with increasing tooth height and inclination angle. The tooth pitch has a significant impact on sealing performance, while tooth width has the least influence.

Keywords: honeycomb seal; labyrinth; leakage; experiment; numerical simulation

随着透平机械向高压、高温、高转速方向发展,动静间隙泄漏流引起的气动损失对机组的运行性能产生重要影响。研究表明,泄漏流引起的损失约占透平级总损失的22%^[1]。为控制间隙流动、减小泄漏损失,工业界提出了多种密封结构^[2],应用于多种透平机械领域。其中,篦齿密封与蜂窝密封因易加工、封严性能好,在燃气轮机各处动静间隙得到了广泛应用。由于篦齿-蜂窝密封具有较多设计参数,其封严性能对燃气轮机透平级气动产生显著影响。因此,研究篦齿-蜂窝密封关键参数对其封严性能的影响规律,对提升燃气轮机设计水平具有重要工程价值。

工业界分别对篦齿和蜂窝几何对封严性能的影响开展了相关的实验、数值和理论研究。实验研究方面,Zhang等^[3]发现篦齿密封封严性能随齿宽的增大而减弱,随齿高、齿距和齿数的增加而增强。杨淋麟等^[4]指出,随着齿尖倒角增大,封严性能分段线性降低,而篦齿倾斜尤其后倾角增加显著提升了封严性能。王锁芳等^[5]发现,迷宫腔大小和形状是决定篦齿密封封严性能的主要因素。周国宇等^[6]优化了篦齿结构,通过压缩有效封严间隙降低了27.5%的泄漏量。王旭等^[7]发现,小封严间隙下,迷宫齿转子配合蜂窝静子封严性能最佳,而间隙与压比较大时,应配合光滑静子使用。Zhao等^[8]指出,随蜂窝深度增加,泄漏量先增加后减少,且不受入口预旋状态影响。Childs等^[9]发现,环形结构下蜂窝密封封严性能最佳,且预旋与轴旋转方向相同时转子动力特性最佳,相反时效果最差。

数值研究方面,Li等^[10]研究发现腔室深度显著影响转子动力特性,其次是间隙和齿数。张尧等^[11]研究了转子轴向偏移对高低齿迷宫密封封严性能的影响并定位了最优转子结构。Dogu等^[12-13]研究了齿尖变形对封严性能的影响,指出变形使封严间隙增加并使封严性能大幅退化。陈尧兴等^[14]与Yan等^[15]研究了篦齿弯曲变形对封严性能的影响,并指出后弯使封严性能大幅降低而前弯影响不大,但缩流效应使前弯篦齿在变间隙时封严性能退化更明显。陈秀秀等^[16]研究发现,叶顶处蜂窝密封深度与

直径增加会引起封严性能与等熵效率显著提升。Li等^[17]指出,旋转条件下,当蜂窝直径与篦齿齿宽相同,且蜂窝深径比为0.93时封严性能最佳,并且增加转速有利于提升封严性能。Yan等^[18]研究发现,降低蜂窝直径可以提升封严性能,但减小到一定值后提升有限,且随蜂窝深度变化泄漏量出现多个极值。Alizadeh等^[19]发现,小封严间隙下,齿宽减小可以提升光滑静子的封严性能,但使蜂窝静子封严性能恶化,且蜂窝越深恶化越严重。Zengin等^[20]指出,大封严间隙下,斜齿较直齿在采用蜂窝结构后的封严性能提升更明显。

理论研究方面,杜发青等^[21]总结了封严性能受篦齿各参数影响的敏感性,由大到小为齿距、封严间隙、后倾角、齿尖宽度、齿高、前倾角。阎洪涛等^[22]总结了迷宫密封泄漏量预测关联式,并针对台阶迷宫结构改进了关联式。孙丹等^[23]研究了变蜂窝密封的泄漏特性,发现蜂窝通过涡系发展影响封严性能,并总结了蜂窝几何参数关联式。Wittig等^[24]研究并总结了多种篦齿齿面传热系数分布的参数关联式。

篦齿-蜂窝密封作为性能优异的密封结构,国内外学者为通过优化几何结构提升其封严性能进行了大量研究,但研究大多采用数值方法,并且实验研究也缺乏针对篦齿-蜂窝密封可变几何参数的全面研究以及对对应结构下的机理分析。因此,本文针对篦齿-蜂窝密封重要可变参数对封严性能的影响机理进行了实验与分析,总结给出了篦齿-蜂窝密封压比与几何参数对封严性能的影响规律,以期为篦齿-蜂窝密封几何设计提供理论指导。

1 实验设计及实验方法

1.1 实验台结构

图1给出了篦齿-蜂窝密封泄漏流动实验台示意图。高压气流流过进口阀门后依次流经涡轮流量计、供气管道后进入整流段,然后流入维氏变径段对流道进行再次调整后进入实验段,并最终排入大气。

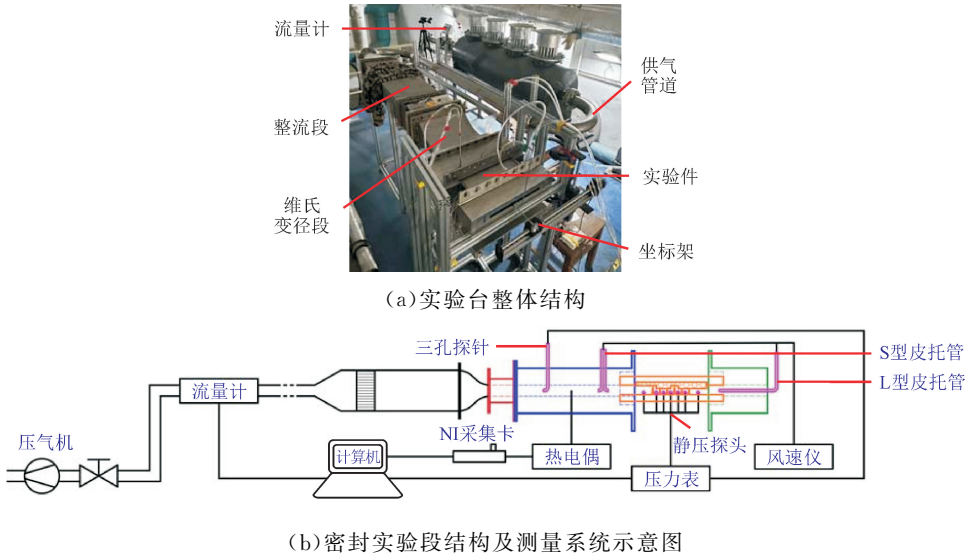


图 1 篦齿-蜂窝密封泄漏特性实验平台

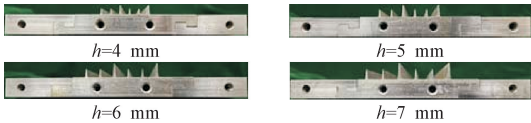
Fig. 1 Typical sealing unit sealing characteristics testing platform

1.2 实验件几何结构

为全面分析篦齿-蜂窝密封工况、几何参数对封严性能的影响方法,针对篦齿密封 4 种可变参数——齿高、篦齿倾角、齿尖宽度与篦齿节距,配合不同直径、深度的蜂窝密封,研究了各密封结构在不同封严间隙及密封压比下的泄漏特性。在实际机组常用范围内,均匀选取了多个实验几何参数与密封压比设计值,如表 1 所示,总计完成了 384 个工况下封严性能的实验研究,实验件结构见图 2。

表 1 密封特性实验设计参数

Table 1 Design parameters for sealing performance experiment	
参数	数值
齿高 $h, h'/\text{mm}$	4、5、6、7(低篦齿) $h'=1.64h$ (高篦齿)
齿尖宽度 b/mm	0.6、1.2
篦齿倾角 $\alpha/(\text{^\circ})$	0、15、30
篦齿节距 l	$h', 2h'$
蜂窝深度 H/mm	0.7、1.4、2.1、2.8、3.5、4.2
蜂窝直径 D/mm	0.8、1.6、2.5、3.2
封严间隙 s/mm	0.6、1.0、1.4、1.8
密封压比 π	1.1、1.3、1.5、1.7、1.9、2.0



(a)不同齿高的篦齿密封

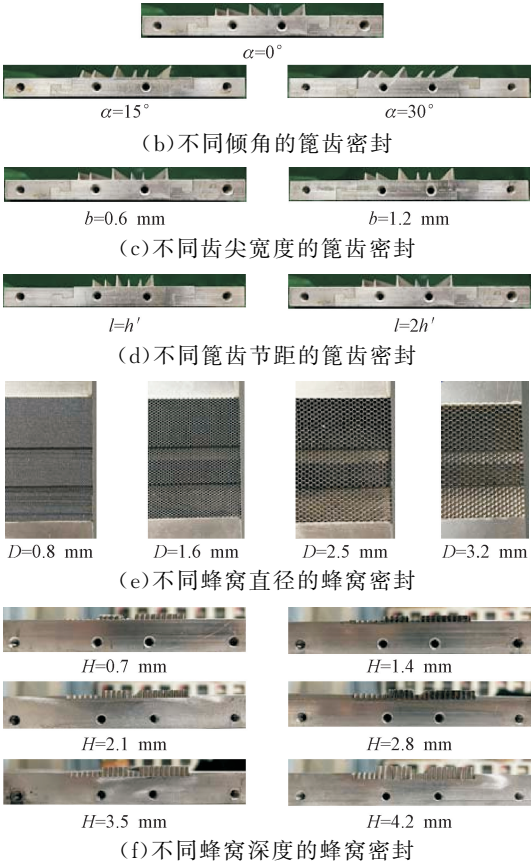


图 2 篦齿-蜂窝密封实验件几何结构

Fig. 2 Geometric structure of typical sealing unit test specimens

1.3 实验测量仪器

本实验主要测量篦齿-蜂窝密封泄漏量、压力、流速、温度等参数。其中,泄漏量使用流量计测量,

测量范围为 20~400 m³/h,测量误差小于 1%。主流温度使用 K 型热电偶测量,测量范围为-20~1 200 °C,测量精度为±1 °C。压力由压力传感器采集,测量量程分别为 0~60 kPa、0~250 kPa,测量误差均小于 0.175%。进、出口流速由风速仪测量,量程分别为 0~50 m/s、0~220 m/s,测量精度均为±0.25%。

2 计算模型及方法

2.1 计算模型

为验证实验结果并深入分析密封内部流动特征,本文对全部实验工况开展了数值研究。图 3 以蜂窝孔 $D=3.2\text{ mm}$ 、 $H=4.2\text{ mm}$, 篦齿 $h=6\text{ mm}$ 、 $\alpha=0^\circ$ 的篦齿-蜂窝密封为例,给出了泄漏流动特性研究的计算模型。计算模型与实验件内部流道截面几何完全一致。为节省计算资源,并结合密封结构的平移周期性特征,计算沿实验件宽度方向只截取一个完整蜂窝周期作为计算域,单个周期宽度 $B=D+2b$ 。



图 3 篦齿-蜂窝密封计算模型

Fig. 3 Computational model of labyrinth-honeycomb seal

2.2 数值计算方法

本文使用 ANSYS ICEM 软件对篦齿-蜂窝密封流道进行网格划分,如图 4 所示。对所有近壁面区域网格进行加密,加密第一层网格厚度为 1 μm,网格增长比为 1.1,保证所有壁面处 $y^+<2$ 。

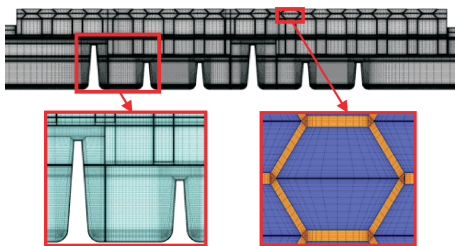


图 4 篦齿-蜂窝密封计算网格

Fig. 4 Meshes for labyrinth-honeycomb seal

对于边界条件设置,保持计算与对应实验工况一致。其中,密封进出口设为开放性边界,并分别给定进出口总温、进口总压与出口静压;全部固壁设为无滑移定温壁面,壁温为流体实际温度;流道侧面设为周期性平移交界面。对于湍流模型,基于前人对各种密封结构与湍流模型的研究发现^[25],当存在流动分离时,SST $k-\omega$ 湍流模型预测效果更好。而在迷宫密封中,齿尖引起的间隙收缩造成显著的流动分离。因此,本文采用 SST $k-\omega$ 湍流模型并应用 ANSYS CFX 软件进行数值计算。为判断计算是否收敛,除基本方程残差外,还设置了泄漏量与静压监

测点。当全部均方根残差小于 10^{-6} ,静压波动小于 0.2 kPa,泄漏量波动小于 1 g/s 时,认为计算收敛。

为消除网格数对计算结果的影响,研究生成了多套不同网格数的篦齿-蜂窝密封计算网格。表 2 给出了典型密封结构在不同篦齿网格数级别下泄漏量的计算结果。可以看出,当网格数增大到 850.6 万时,其泄漏量与更高网格数下计算结果的相对误差小于 1%,满足工程精度要求。因此,本文采用 850 万级别的计算网格数开展研究。

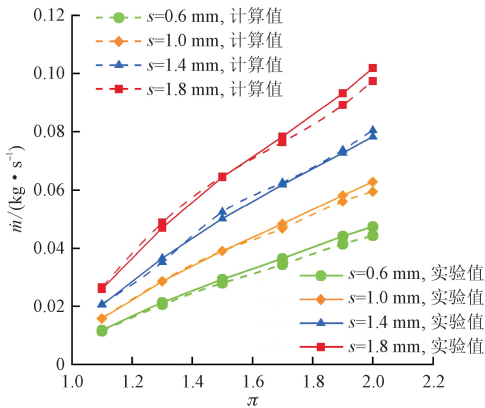
表 2 篦齿-蜂窝密封结构在不同网格数下泄漏量的计算结果

Table 2 Calculation results of leakage for labyrinth-honeycomb seal under different mesh numbers

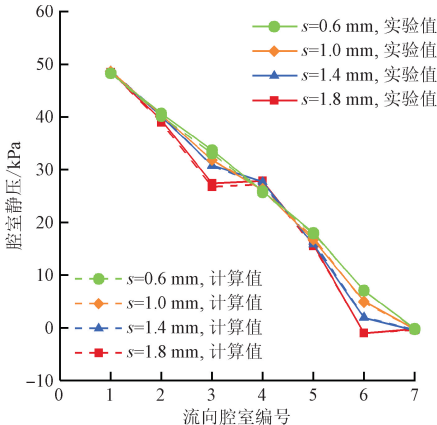
网格数/万	泄漏量/(m ³ ·h ⁻¹)	相对误差/%
222	184.38	2.523
446.7	189.15	2.098
850.6	193.20	0.848
1 651.1	194.84	

2.3 计算结果验证

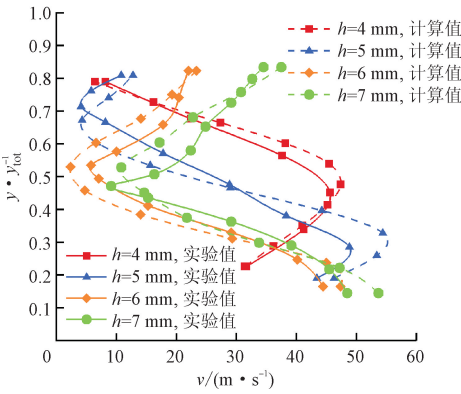
图 5 给出了泄漏量、腔室静压与密封出口流速 3 个测量参数的实验测量与计算结果的对比情况。其中,图 5(b)中腔室编号依次为沿流动方向由蜂窝所围成的密封腔室,图 5(c)纵轴 $y \cdot y_{\text{tot}}^{-1}$ 为出口腔室径向相对高度。



(a) 不同压比、间隙下泄漏量变化



(b) 不同间隙下腔室内静压变化



(c)不同齿高下出口径向速度变化

图 5 篦齿-蜂窝密封参数实验测量与计算结果对比情况
Fig. 5 Comparison between experimental measurements and computational results of parameters in labyrinth-honeycomb seal

从图 5 中可以看出,各参数计算值均与实验值拟合良好,证明了实验的准确性与数值研究的可行性。

3 结果与分析

为分析各参数对封严效果的影响,除泄漏量 $\dot{m}$ 外,本文还引入了无量纲流量系数 φ 以量化分析泄漏特性,并结合流阻系数 C_d 分析密封结构对气流的阻滞效果,其定义为

$$\varphi = \frac{\dot{m}}{m_{ideal}} \quad (1)$$

$$m_{ideal} = \frac{p_0 A}{\sqrt{T_0}} \sqrt{\frac{2\gamma}{R} \left[\left(\frac{1}{\pi} \right)^{2/\gamma} - \left(\frac{1}{\pi} \right)^{(\gamma+1)/\gamma} \right]} \quad (2)$$

$$C_d = \frac{2\Delta P}{\rho v_{in}^2} \quad (3)$$

式中: p_0 为进口总压; T_0 为进口温度; ΔP 为进出口压降; $A = Ls$, L 为实验件宽度,在本文实验中 $L = 320 \text{ mm}$; R 为气体常数; γ 为气体比热容比。

3.1 篦齿-蜂窝密封压比对泄漏特性的影响

图 6 以密封几何 $D=3.2 \text{ mm}$ 、 $H=4.2 \text{ mm}$ 、 $h=5 \text{ mm}$ 、 $\alpha=0^\circ$ 为例,给出了流量系数 φ 、流阻系数 C_d 以及泄漏量 $\dot{m}$ 随压比与封严间隙的变化特性。

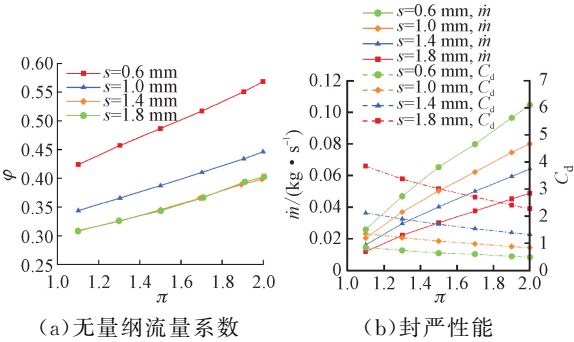


图 6 泄漏特性随密封压比的变化
Fig. 6 Variation of leakage characteristic with pressure ratio

从图 6 可以看出,篦齿-蜂窝密封流量系数随压比的增加线性增长,而泄漏量随压比提升而增大但增加梯度逐渐减小。这是由于在密封结构维持不变时,流场特征相对稳定。虽然因节流、碰撞等因素引起由速度变化造成的湍动能损失随压比的提升近乎线性增加,但由各篦齿腔室以及各蜂窝孔所能容纳的滞止涡强度增长幅度却因几何限制,导致因涡旋造成的能量损失随压比的增长梯度逐渐降低,如图 7、图 8 所示,从而使密封整体封严能力随压比的提升而降低,流量系数随压比增长不断提升。

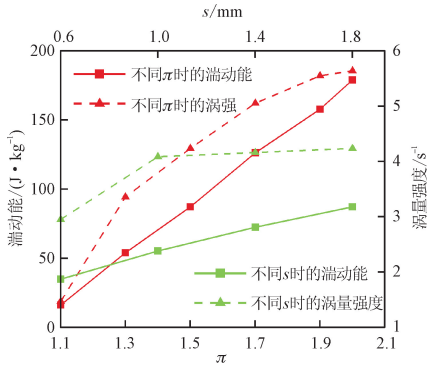


图 7 能量耗散随密封压比与封严间隙的变化
Fig. 7 Variation characteristic of energy dissipation with pressure ratio and sealing clearance

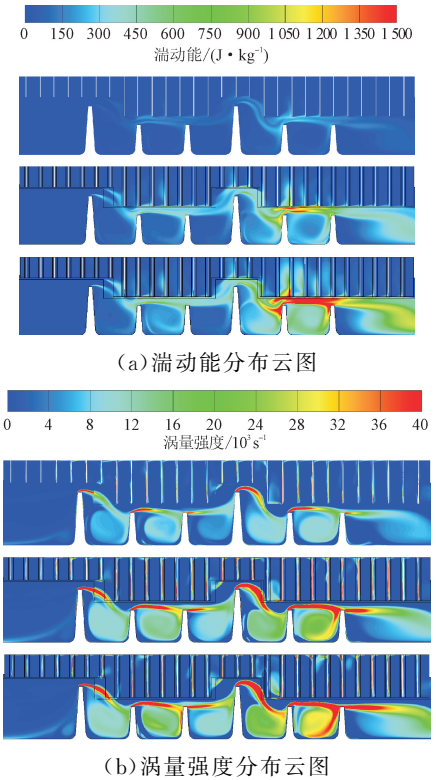


图 8 不同压比下篦齿-蜂窝密封内部能量耗散分布
Fig. 8 Energy dissipation in labyrinth-honeycomb seal under different pressure ratio

3.2 篦齿-蜂窝密封封严间隙对泄漏特性的影响

图 9 给出了蜂窝深度 $H=4.2\text{ mm}$ 、密封压比 $\pi=2.0$ 条件下,不同蜂窝直径的篦齿-蜂窝密封流阻系数 C_d 以及泄漏量 $\dot{m}$ 随间隙的变化特性。

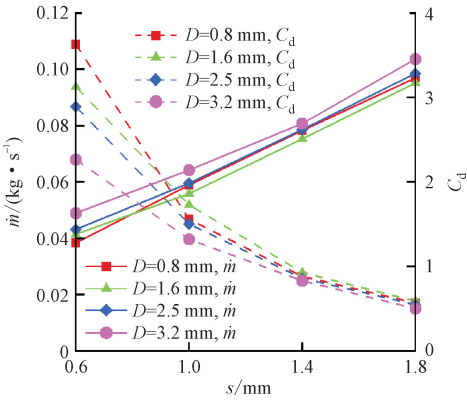


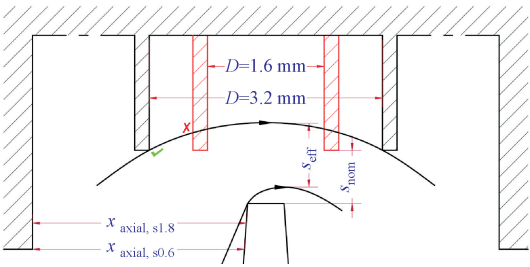
图 9 蜂窝直径的密封结构泄漏特性随封严间隙的变化
Fig. 9 Variation of leakage characteristic with sealing clearance at different cell diameters

从图 9 可以看出,泄漏系数随封严间隙的增加不断减小。这是由于当泄漏流流过迷宫齿顶间隙时,形成典型的齿尖收缩效应,但与单一迷宫密封不同,篦齿-蜂窝组合密封由于蜂窝孔的存在使流体通过齿顶间隙时,可以继续向上偏转,跨越设计间隙极限,通过进出蜂窝孔跨越篦齿齿尖进入下一密封腔室,如此形成蜂窝扩张效应扩大通流间隙。在齿尖收缩与蜂窝扩张的共同作用下,齿顶有效封严间隙区别于密封设计间隙,其定义方法如下

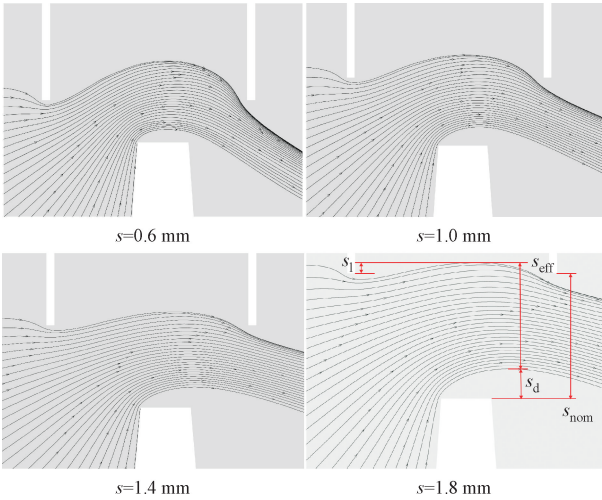
$$s_{\text{eff}} = s_{\text{nom}} + s_1 - s_d \tag{4}$$

式中: s_{eff} 为有效封严间隙; s_{nom} 为设计几何间隙; s_1 为蜂窝扩张效应产生的通流扩张尺寸; s_d 为齿尖收缩效应产生的通流收缩尺寸,如图 10(b)所示。

从图 10 还可以看出,随封严间隙增加,齿尖收缩效应增大,蜂窝扩张效应减小。不同设计间隙下有效封严间隙组成如表 3 所示,可以看出随着封严间隙增大,有效间隙增速始终小于设计间隙,这直接导致泄漏系数随设计间隙的提升不断降低。但随着设计间隙增加,实际通流间隙增加速率不断提升,使泄漏系数降低梯度逐渐减小。就有效封严间隙变化而言,泄漏量在设计间隙较小时增长相对缓慢,随着封严间隙增加,泄漏量增长梯度不断提升。但实验发现泄漏量始终线性增长,这是由于封严间隙较小时,流量较小,腔室涡造成的能量损失比例较大(见图 8),密封对泄漏流的阻滞能力较大,补足了有效封严间隙对封严性能的影响。



(a) 蜂窝内二次泄漏及间隙尺寸示意图



(b) 不同封严间隙下齿顶有效封严间隙特征

图 10 有效封严间隙及蜂窝孔二次泄漏

Fig. 10 Effective sealing clearance and secondary leakage in honeycomb cells

表 3 不同设计间隙下的有效封严间隙对比

Table 3 Comparison of the effective sealing clearance under different designed sealing clearances

设计间隙 s_{nom}/mm	齿尖收缩 间隙 s_d/mm	蜂窝扩张 间隙 s_1/mm	有效封严间隙 s_{eff}/mm
0.6	0.194 2	0.565 4	0.971 2
1.0	0.277 8	0.336 4	1.058 6
1.4	0.356 4	0.224 5	1.268 1
1.8	0.431 6	0.150 9	1.519 3

从图 9 还可以看出,在泄漏量随封严间隙线性增长的基本趋势下,不同蜂窝直径的密封结构泄漏量还表现出了不同程度的上凹与下凸特征,并且随蜂窝直径减小,泄漏量变化趋势逐渐由上凹转变为下凸。这是由于在梯形高低篦齿中,随封严间隙增加,当气流由低篦齿流向高篦齿时,来流攻角削减,流线更加平滑,如图 10(b)所示,从而不仅降低了流

入蜂窝孔的概率,还使气流流经蜂窝孔时更容易二次流出,使密封对泄漏流的阻滞能力降低。从图 10 中可以看出,蜂窝直径越大,蜂窝孔可以限制的流量越少,对气流的阻滞效果越弱。除此之外,封严间隙的增加也使阶梯蜂窝底面径向高度处对应的篦齿宽因其自身梯形特征而减薄,增加了篦齿-蜂窝间的轴向宽度 x_{axail} ,如图 10(a)所示,同样削减了封严性能,进而使泄漏量增加速率超过封严间隙,导致泄漏量变化曲线呈现上凹特点。此外,随蜂窝直径减小,泄漏流侵入蜂窝孔的深度变浅,如图 11 所示,这也导致有效封严间隙随设计间隙的变化幅度随之减小。当与之配合的篦齿结构不变时,因齿尖收缩效应引起的有效封严间隙维持不变,这就使在相同的封严间隙变化幅度下,小蜂窝直径的密封结构随封严间隙变化呈现出更明显的下凸特点。

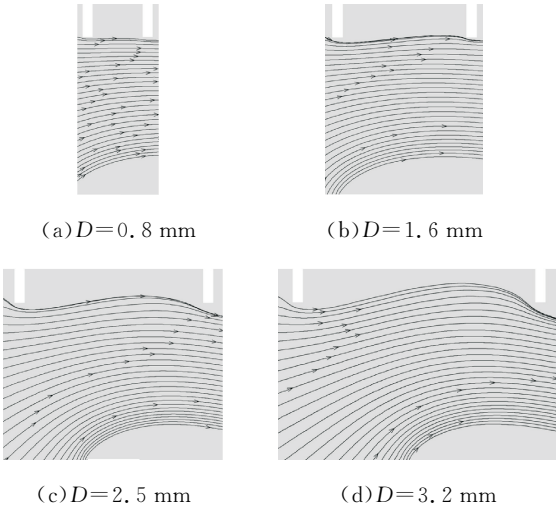


图 11 不同蜂窝直径下的有效封严间隙
Fig. 11 Effective sealing clearance under different honeycomb diameters

综上,在几何结构的影响下,封严间隙变化对篦齿-蜂窝密封泄漏量的影响存在对立的两种影响方法。当蜂窝直径较大时,因封严间隙增加产生的平滑气流造成的蜂窝封严失效效果明显起主导作用,使泄漏量随封严间隙的变化呈现出上凹特征;而当蜂窝直径较小时,有效封严间隙变化较大,呈现出显著的下凸特征;其他蜂窝结构下两种因素相互制约呈现出较高线性度。

3.3 蜂窝直径对泄漏特性的影响

图 12 给出了 $s=0.6, 1.8\text{ mm}$ 时,流阻系数 C_d 与泄漏量 $\dot{m}$ 随蜂窝直径的变化特性。

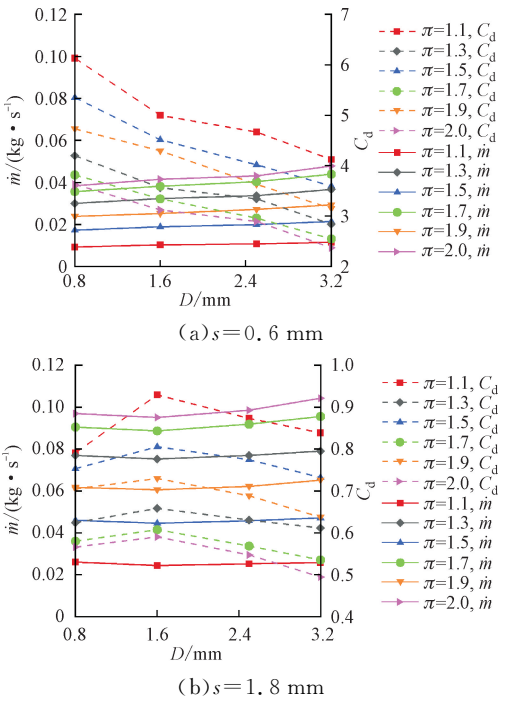


图 12 泄漏特性随蜂窝直径的变化
Fig. 12 Variation of leakage characteristic with cell diameter

从图 12 可以看出,当封严间隙较大时,泄漏量随蜂窝直径的增长先减小后增大,在蜂窝直径 $D=1.6\text{ mm}$ 时实现最佳封严性能,而在封严间隙最小的结构下,泄漏量随蜂窝直径的增长而增大。如前文针对蜂窝直径与封严间隙的几何关联性对泄漏特性影响的分析,在封严间隙较小时,通过高篦齿齿顶封严间隙的流体具有较大来流攻角,泄漏流更容易进入蜂窝孔,各孔径下的蜂窝孔均对泄漏流具有较好的密封效果,有效封严间隙主要受蜂窝直径主导从而在不同蜂窝直径间差异较大,泄漏量随蜂窝直径显著变化。反之,当封严间隙较大时,有效封严间隙随孔径变化较小,并且流动较为平滑,二者共同作用使蜂窝孔对泄漏流的封严能力逐渐占据主导,使实现更优封严性能的孔径随封严间隙增大向直径增加方向偏移。因此,为实现良好的封严效果,蜂窝直径选择需与封严间隙相适合。即蜂窝直径较小的蜂窝结构仅在封严间隙相当小的条件可以实现优良的封严性能,而封严间隙较大或工况变化剧烈的工况下应选择蜂窝直径较大的蜂窝结构。

3.4 蜂窝深度对泄漏特性的影响

图 13 给出了 $s=1.8\text{ mm}$ 时,不同压比下流阻系数 C_d 以及泄漏量 $\dot{m}$ 随蜂窝深度的变化特性。从图 13 可以看出,随着蜂窝深度增加,泄漏量先减小后增大,并在 $H=3.5\text{ mm}$ 的蜂窝深度下实现最佳封严性能。首先,本文选用蜂窝直径 $D=3.2\text{ mm}$ 开展蜂窝深度对泄漏特性影响的研究。在较大的蜂

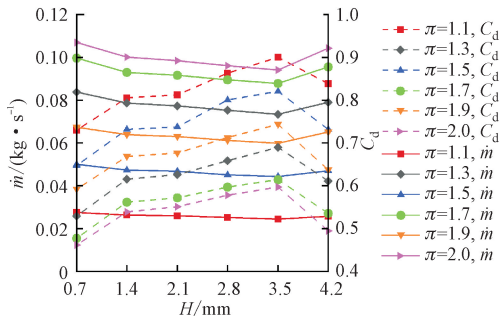


图 13 泄漏特性随蜂窝深度的变化

Fig. 13 Variation of leakage characteristic with cell depth

窝直径下,当气流流经蜂窝深度极薄的蜂窝结构时,蜂窝孔不仅无法限制来流攻角较小的泄漏流,来流攻角较大的流线同样也会在冲击蜂窝齿底平面后转而向下流出蜂窝孔,使蜂窝结构失效造成封严能力的大幅下降。随着蜂窝深度逐渐增加,蜂窝孔封严失效的现象逐渐减弱直至消失,封严性能不断提升。随着蜂窝深度继续增加,流入蜂窝孔的流体在与蜂窝孔下游侧壁碰撞后向齿根发展,并在蜂窝孔内逐渐形成完整的腔室涡后再次流出蜂窝孔。但在完整腔室涡形成前,二次出流速度矢量与主流差异较大,并在掺混过程中再次造成能量损失,使封严性能提升。而当蜂窝深度继续增加至完整涡系形成后,二次出流与泄漏主流速度方向相近,因掺混导致的能量损失显著降低,导致封严性能再次削弱从而造成泄漏流量增加。可以预见,随着蜂窝深度继续增加,蜂窝孔内将形成更多且复杂的内部涡系,从而造成封严性能周期性增强和减弱,使篦齿-蜂窝密封泄漏量随蜂窝深度的变化曲线呈现出波动特征,直至进入蜂窝孔的流体在全部动能耗散不再汇入主流后最终达到泄漏量的稳定,如图 14 所示。

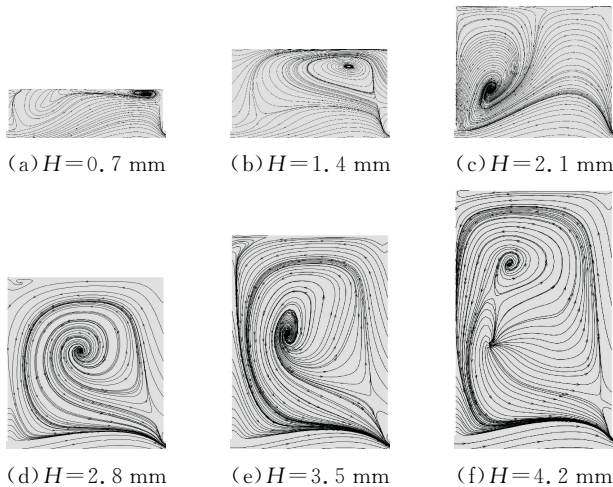


图 14 不同蜂窝深度下蜂窝孔内流线特征

Fig. 14 Characteristic of streamlines in honeycomb cell under different honeycomb depths

3.5 齿高对泄漏特性的影响

图 15 给出了 $s=1.8\text{ mm}$ 时,不同压比下流阻系数 C_d 及泄漏量 $\dot{m}$ 随齿高的变化特性。

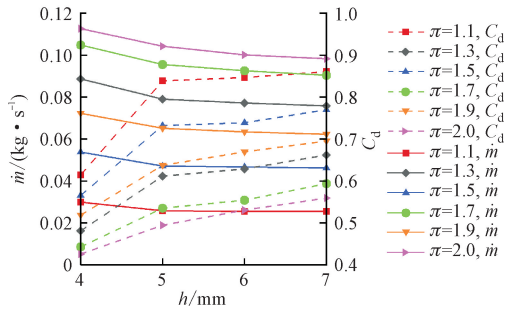


图 15 泄漏特性随齿高的变化

Fig. 15 Variation of leakage characteristic with tooth height

从图 15 可以看出,随着齿高增加,泄漏量逐渐减小封严性能提升。这是由于在本文设计方法下,齿高增加使篦齿节距随之增大,并且由各篦齿围成的腔室体积变大。这使得通过封严间隙的泄漏流在出流攻角向下的情况下,更多的泄漏流无法直接通过下一封严间隙,而是受到篦齿阻挡,并受迫沿齿面经过更长的流动距离产生更多耗散后与泄漏主流掺混才进入下一密封腔室甚至滞留形成涡强更大的腔室涡,造成更强烈的动能耗散,如图 16 所示。此外,随齿高增加,密封有效密封表面积成比例增长,流体沿程阻力提升,摩擦损失增加,多种因素共同作用使密封结构对泄漏流阻滞能力增强,从而实现更良好的封严性能。

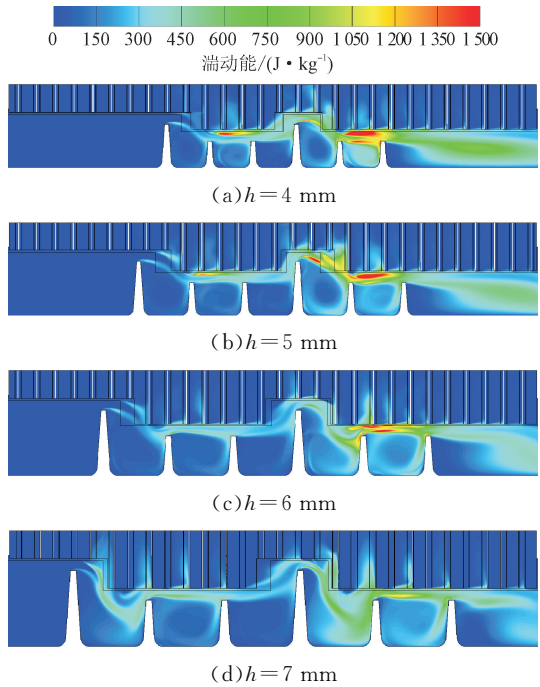


图 16 不同齿高下篦齿-蜂窝密封内部能量耗散分布

Fig. 16 Energy dissipation in labyrinth-honeycomb seal under different tooth heights

3.6 篦齿倾角对泄漏特性的影响

针对倾角对封严性能影响,本文采用密封齿前倾角与后倾角同时等比例变化的几何设计方法,前、后倾角增长比例为 5 : 7。图 17 给出了 $s=1.8\text{ mm}$ 时,不同压比下流阻系数 C_d 以及泄漏量 $\dot{m}$ 随倾角的变化特性。

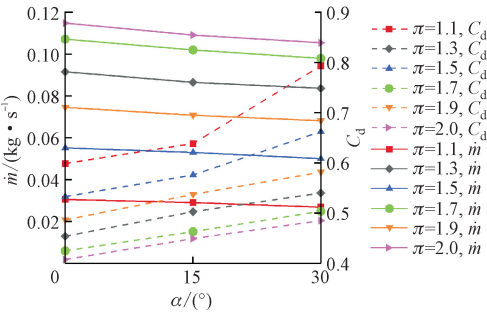


图 17 泄漏特性随篦齿倾角的变化

Fig. 17 Variation of leakage characteristic with tooth angle

从图 17 可以看出,随着倾角增加,泄漏量逐渐降低。这是由于倾角较大时,贴近篦齿前壁的流体在绕过篦齿齿顶进入封严间隙时速度与泄漏主流方向相反,使掺混过程中动能大幅损失并转化为热量耗散。并且该部分泄漏流也会挤压泄漏主流,不仅压缩有效封严间隙,如图 18 所示,也使流体进入蜂窝孔的概率增加,使封严性能显著提升。其次,随后倾角增加,泄漏流流出封严间隙的分离角在几何引流的作用下向下偏转增强,使泄漏流与下列密封齿前壁面碰撞后流向齿根形成腔室涡的概率增加。此外,在密封篦齿向前倾斜的过程中,齿面长度以反余弦函数形式增长,增大了流动的沿程阻力损失,多因素共同作用使密封封严性能提升。

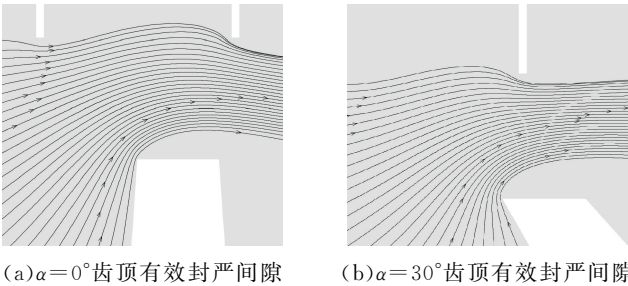


图 18 不同篦齿倾角下封严间隙处泄漏流线

Fig. 18 Leakage streamlines in sealing clearance under different tooth inclination angles

3.7 齿宽及篦齿节距对泄漏特性的影响

表 4 给出了 $s=1.8\text{ mm}$ 时,不同齿宽下的泄漏量 $\dot{m}$ 的对比情况,可以看出齿宽更小的密封具有更

好的封严性能,但提升效果甚微。这是由于齿宽增加使泄漏流在齿顶封严间隙内轴向流动距离增加,使泄漏流受篦齿结构的整流效果提升,降低了封严间隙内泄漏流速度矢量沿径向的波动,使泄漏流流过连续低篦齿时,流出前列篦齿的泄漏流径向速度分量更小,更容易直接流过下一封严间隙,使封严效果产生一定削弱。但随齿宽增加,也使有效封严间隙减小,对提升密封封严性能具有积极作用。因此,在两种相互制约的影响下,篦齿-蜂窝密封封严性能受齿宽影响敏感性较低。

表 4 不同齿尖宽度下泄漏量对比情况

Table 4 Comparison of leakage rate at different tooth tip widths

压比	泄漏量/(kg · s ⁻¹)	
	$b=0.6\text{ mm}$	$b=1.2\text{ mm}$
1.1	0.030 1	0.030 6
1.3	0.054 4	0.055 1
1.5	0.074 8	0.074 9
1.7	0.090 4	0.091 1
1.9	0.107 0	0.108 6
2.0	0.115 1	0.116 8

表 5 给出了 $s=1.8\text{ mm}$ 时,不同篦齿节距下泄漏量 $\dot{m}$ 的对比情况。

表 5 不同篦齿节距下泄漏量对比情况

Table 5 Comparison of leakage rate at different tooth pitches

压比	泄漏量/(kg · s ⁻¹)	
	$l=h'$	$l=2h'$
1.1	0.025 8	0.030 1
1.3	0.046 9	0.054 4
1.5	0.065 4	0.074 8
1.7	0.079 9	0.090 4
1.9	0.096 0	0.107 0
2.0	0.103 9	0.115 1

从表中可以看出,篦齿节距增加使泄漏量大幅提升。首先,根据前文分析及已有研究^[21],在相对较小的篦齿节距范围内增长过程中,由于密封齿后出流角水平向下,流出前一封严间隙的泄漏流由于节距的增加产生的径向向下位移更大,会被下一密封篦齿更好阻挡使封严性能得到提升。但随篦齿节距的大幅增加,流出前一封严间隙的泄漏流会在未到达下一篦齿前便与齿根平面碰撞,使泄漏流径向速度转而向上直接冲向封严间隙,这不仅使腔室涡

体积与强度大幅削减,也减小了因流出密封腔室的泄漏流与泄漏主流之间掺混造成的能量损失,二者共同作用造成封严性能的大幅削弱。并且在高低齿结构中,当泄漏流由高篦齿流向低篦齿时,流出封严间隙的泄漏流水平向下角度较大,使间隙出流与齿根平面的碰撞点进一步向上游移动,从而加剧削弱了封严效果,造成泄漏量的大幅增加。

4 结 论

(1) 篦齿-蜂窝密封流量系数随密封压比提升线性提升,密封压比每增加 10%,流量系数增加 3.47%;泄漏量随封严间隙增大线性增加,封严间隙每增大 1 倍,泄漏量增加 57.94%。

(2) 蜂窝深度对封严性能的影响呈类三角函数特征,在蜂窝深度为 3.5 mm 时封严性能最佳,其泄漏量相较封严性能最差的蜂窝结构减少了 9.81%;蜂窝直径使泄漏量先减小后增大,在直径为 1.6 mm 时封严性能最佳,泄漏量相较最大蜂窝直径降低了 8.11%。

(3) 齿高、倾角增加通过增强密封内能量耗散与齿尖收缩效应显著提升了密封封严性能。在本文设计结构下,泄漏量随齿高、前倾角的增大分别降低了 12.07%、8.58%。此外,篦齿节距对篦齿-蜂窝密封封严性能影响较大,而齿宽对封严性能影响甚微。

参考文献:

- [1] 王新军,李亮,宋立明,等. 汽轮机原理 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2014.
- [2] CHUPP R E, GHASRIPOOR F, TURNQUIST N A, et al. Advanced seals for industrial turbine applications; dynamic seal development [J]. Journal of Propulsion and Power, 2002, 18(6): 1260-1266.
- [3] ZHANG Bo, DOU Yuanyuan, HONG Quan, et al. Experimental investigation of effect of tooth geometrical parameters to flow characteristics in slant labyrinth seals [J]. Concurrency and Computation: Practice and Experience, 2018, 30(24): e4951.
- [4] 杨淋麟,张丽,朱惠人. 篦齿结构对封严性能的影响 [J]. 科学技术与工程, 2013, 13(33): 10069-10073.
YANG Linlin, ZHANG Li, ZHU Huiren. The effects of seal labyrinth characteristics on the sealing performance of straight labyrinth [J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(33): 10069-10073.
- [5] 王锁芳,吕海峰,夏登勇. 封严篦齿结构特性的数值分析和实验研究 [J]. 南京航空航天大学学报, 2004, 36(6): 732-735.
- WANG Suofang, LÜ Haifeng, XIA Dengyong. Numerical analyses and experimental investigations of seal labyrinth characteristics [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2004, 36(6): 732-735.
- [6] 周国宇,王旭东,林智荣,等. 高低齿迷宫密封泄漏量实验及计算分析 [J]. 工程热物理论, 2015, 36(9): 1889-1893.
ZHOU Guoyu, WANG Xudong, LIN Zhirong, et al. Preliminary analysis to the leakage of the staggered labyrinth seal based on experiment and simulation [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015, 36(9): 1889-1893.
- [7] 王旭,张文平,马胜远,等. 转子蜂窝密封封严特性的试验研究 [J]. 热能动力工程, 2004, 19(5): 521-525.
WANG Xu, ZHANG Wenping, MA Shengyuan, et al. Experimental investigation of the sealing characteristics of a rotor honeycomb seal [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2004, 19(5): 521-525.
- [8] ZHAO Huan, ZHANG Ran, SUN Dan, et al. Influence factors of honeycomb seal performance and stability analysis of rotor system [J]. Journal of Aerospace Engineering, 2022, 35(4): 04022042.
- [9] 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.
- [10] LI Zhigang, LI Jun, FENG Zhenping. Labyrinth seal rotordynamic characteristics: part II geometrical parameter effects [J]. Journal of Propulsion and Power, 2016, 32(5): 1281-1291.
- [11] 张尧,张万福,李春,等. 变工况下高低齿迷宫密封泄漏特性及结构优化 [J]. 热能动力工程, 2018, 33(5): 33-39.
ZHANG Yao, ZHANG Wanfu, LI Chun, et al. Leakage characteristics and structure optimization of staggered labyrinth seal at off-design condition [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2018, 33(5): 33-39.
- [12] DOGU Y, SERTÇAKAN M C, BAHAR A S, et al. Computational fluid dynamics investigation of labyrinth seal leakage performance depending on mushroom-shaped tooth wear [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2016, 138(3): 032503.
- [13] DOGU Y, SERTÇAKAN M C, GEZER K, et al. Leakage degradation of straight labyrinth seal due to

- wear of round tooth tip and acute trapezoidal rub-groove [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2017, 139(7): 072506.
- [14] 陈尧兴, 李志刚, 晏鑫, 等. 迷宫齿弯曲磨损时密封泄漏特性和转子动力特性系数研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2018, 52(6): 157-164.
- CHEN Yaoxing, LI Zhigang, YAN Xin, et al. Investigations on the leakage characteristics and rotordynamic coefficients of labyrinth seal with tooth bending damage [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2018, 52(6): 157-164.
- [15] YAN Xin, DAI Xinbo. Effects of labyrinth fin wear on aerodynamic performance of turbine stages: part I bending damages [C]//ASME Turbo Expo 2019: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. New York, USA: ASME, 2019: V008T29A004.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] YAN Xin, LI Jun, FENG Zhenping. Effects of inlet preswirl and cell diameter and depth on honeycomb seal characteristics [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2010, 132(12): 122506.
- [19] 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.
- [20] ZENGIN I, ERDOGAN B. Numerical analysis of geometry and operating conditions in combined honeycomb and inclined labyrinth sealing elements [J]. *Progress in Computational Fluid Dynamics, an International Journal*, 2023, 23(1): 1-12.
- [21] 杜发青, 吉洪湖, 帅海山, 等. 齿形几何参数对直通篦齿封严泄漏特性影响的正交实验 [J]. *航空动力学报*, 2013, 28(4): 825-831.
- DU Faqing, JI Honghu, SHUAI Haishan, et al. Orthogonal experiment of effect of fin geometrical parameters on leakage of straight-through labyrinth seals [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2013, 28(4): 825-831.
- [22] 阎洪涛, 杨健, 赵铎, 等. 燃气机曲折型迷宫密封的泄漏特性 [J]. *润滑与密封*, 2016, 41(7): 112-114.
- YAN Hongtao, YANG Jian, ZHAO Duo, et al. Leakage and flow characteristics of stagger labyrinth seals on gas turbine [J]. *Lubrication Engineering*, 2016, 41(7): 112-114.
- [23] 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.
- [24] WITTIG S, JACOBSEN K, SCHELLING U, et al. Heat transfer in stepped labyrinth seals [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1988, 110(1): 63-69.
- [25] 代欣波. 迷宫密封磨损机理及封严性能退化机制的研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2022.

(编辑 亢列梅)