基于正交法的篦齿-蜂窝密封特性影响因素及相互作用

王宇博[1],龚文琴[2],王 栋[1],刘 超[1],麻柏慧[1],何振鹏[3]
(1. 北京邮电大学 世纪学院,北京 102100;2. 天津仁爱学院 计算机科学与技术系,天津 301636;
3. 中国民航大学 航空工程学院,天津 300300)

摘要:为提高压气机级间篦齿-蜂窝密封封严性能,针对影响其泄漏特性的9个主要参数及其常用的几何范围,采用正交试验设计的方法数值分析了不同参数的影响机理及其相互作用。结果表明:间隙和压比对封严特性影响显著,泄漏量几乎随间隙和压比增加而线性增加;蜂窝深度和芯格直径、篦齿齿高和齿距都具有极强的交互作用,取值比例适当时,蜂窝和齿腔内空间可以充分利用,使腔内旋涡充分发展以耗散能量;篦齿前倾角存在1个可使腔内空间被充分利用的最佳值,约为-10°;篦齿后倾角应向右倾斜15°,以引导齿腔涡流沿篦齿与入侵气流相冲;各参数变化对泄漏特性影响权重的主次排序为:密封间隙→压比→蜂窝壁厚→蜂窝深度→齿距→蜂窝芯格直径→后倾角→前倾角→齿高。研究结果可为篦齿-蜂窝密封的性能分析和结构设计提供参考。

关键词:蜂窝密封;交互作用;封严机理;正交试验
中图分类号:V231.3 **文献标识码:**A doi:10.13477/j.cnki.aeroengine.2025.06.017

Influencing Factors and Interactions of Sealing Characteristics of Labyrinth-Honeycomb Seal Based on Orthogonal Method

WANG Yu-bo[1], GONG Wen-qin[2], WANG Dong[1], LIU Chao[1], MA Bai-hui[1], HE Zhen-peng[3]
(1.Century College, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 102100, China;
2. Tianjin Renai College, Department of Computer Science and Technology, Tianjin 301636, China;
3. College of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: To improve the sealing performance of the interstage labyrinth-honeycomb seal in compressors, focusing on nine main parameters affecting its leakage characteristics and their commonly used geometric ranges, the influence mechanisms and interactions of different parameters were numerically analyzed using the orthogonal experimental design method. The results show that the gap and pressure ratio have a significant effect on the sealing characteristics, with leakage increasing almost linearly with the increase of the gap and pressure ratio. The honeycomb depth and cell diameter, as well as labyrinth fin height and fin pitch, exhibit strong interactions. When the proportion of the value is appropriate, the space in the honeycomb and tooth cavities can be fully utilized, allowing vortices in the cavities to fully develop and dissipate energy. There is an optimal value of about -10° for the fin front angle that can make full use of the cavity space. The fin rear angle should be tilted to the right by 15° to guide the cavity vortex along the fin to impinge against the ingress flow. The order of importance of parameter variations on leakage characteristics is: seal gap, pressure ratio, honeycomb wall thickness, honeycomb depth, fin pitch, honeycomb cell diameter, fin rear angle, fin front angle, and fin height. The research results can provide a technical reference for the performance analysis and structure design of labyrinth-honeycomb seals.

Key words: honeycomb seal; interaction; sealing mechanism; orthogonal experiment

0 引言

航空发动机气路密封的性能直接影响着发动机的燃油消耗率、推重比、运行可靠性等参数,而运行过程中,密封结构需要承受高速度、高环境温度、高密封压差以及剧烈振动等恶劣条件[1]。篦齿-封严作为一种非接触式旋转密封技术,以其结构简单、可靠性高、成本低以及在极端径向偏心或极端轴向位移等不利

收稿日期:2023-04-14
作者简介:王宇博(1997),男,硕士,讲师。

引用格式:*王宇博,龚文琴,王栋,等.基于正交法的篦齿-蜂窝密封特性影响因素及相互作用[J].航空发动机,2025,51(6):132-137.WANG Yubo, GONG Wenqin, WANG Dong, et al.Influencing factors and interactions of sealing characteristics of labyrinth-honeycomb seal based on orthogonal method [J].Aeroengine,2025,51(6):132-137.*

条件下的适用性强等优点被大量应用[2]。为避免旋转的篦齿与衬套摩擦时受到损伤，可以使用材质较软的蜂窝衬套，同时六边形蜂窝壁也可以分割泄漏流起到阻尼作用，具有良好的密封性能和转子动力稳定性，拥有极好的应用前景[3]。

为提升其封严效果，国内外学者在篦齿-蜂窝密封的结构及气动参数、篦齿和蜂窝结构等方面做了大量工作。聂顺鹏等[4]试验研究发现，迷宫蜂窝密封的泄漏量与流量系数比光滑面迷宫密封的分别降低了约 20% 和 10%；Mehta 等[5]指出前倾式斜齿迷宫密封封严效果更好；向新等[6]研究指出，随蜂窝孔径增大，迷宫蜂窝密封流量系数先减小后增大，在孔径与齿宽相等时，流量系数最低；Alizadeh 等[7]数值研究了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，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大；何立东等[8]、叶小强[9]等试验研究发现，蜂窝深度与蜂窝芯格直径存在最佳比值；孙丹等[10]研究指出，蜂窝结构参数主要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；Willenborg 等[11]通过试验和数值方法研究了压比和雷诺数对篦齿密封泄漏系数的影响，发现在低雷诺数区域，泄漏系数随雷诺数的提高而显著增大；何振鹏等[12]对比了圆形、方形和正六边形蜂窝的封严特性，指出同样工况下，圆形蜂窝封严效果最好，同时蜂窝密封泄漏系数随压比提高逐渐增大，但增加速度逐渐变缓；孔晓治等[13]和雷昭等[14]对比了常规齿、针型齿、宝塔齿和台阶斜齿的泄漏特性和温升特性，发现台阶斜齿的封严效果最好，针型齿、宝塔齿与常规齿相差不大；Asok 等[15]通过数值方法对比分析了 5 种矩形齿腔和 2 种圆形齿腔的篦齿封严，指出圆形齿腔中生成了 2 个反向旋转的旋涡，压降更大，耗散能量更多，封严效果更好；Frączek 等[16]设计了一种挤压状蜂窝衬套，结果显示在齿尖间隙较小时，挤压蜂窝封严性能更好，泄漏系数降幅最大可达 11%。

篦齿-蜂窝封严特性的影响因素较多，上述研究往往针对 1 个或者几个因素开展，而对各影响因素之间的相互联系研究较少。本文采用正交试验设计的方法，系统分析了 9 个参数对篦齿-蜂窝密封泄漏特性的影响及相互作用，可为压气机中篦齿-蜂窝密封设计提供理论参考。

1　数值计算方法及正交试验设计

1.1　物理模型

转静子级间篦齿-蜂窝密封结构如图 1 所示。在压气机的转静子级间位置，流体有从高压侧泄漏到低压侧的趋势。以具有 3 个篦齿的篦齿-蜂窝密封为研究对象，其基本结构如图 2 所示，以高压侧间隙为入口，低压侧间隙为出口。

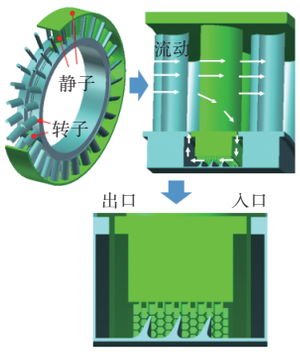


图 1　转静子级间篦齿-蜂窝密封结构

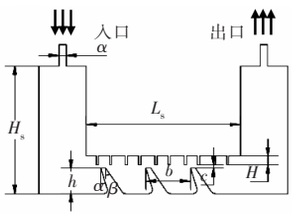


图 2　篦齿-蜂窝密封结构

1.2　网格划分及计算方法

采用商业软件对 3 维计算模型划分网格，蜂窝和齿间处网格加密，转静子壁面设置边界层网格。网格划分与边界条件定义如图 3 所示。在密封结构出口处定义平均静压为 130.7 kPa 不变，密封结构入口处定义总压和总温，并通过改变入口总压来实现对压比的控制。定义固定壁面为绝热和无滑移壁面，圆周方向上定义周期性边界条件。

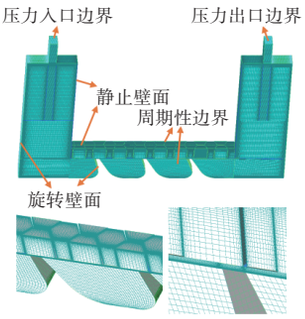


图 3　网格划分及边界条件定义

采用 ANSYS-Fluent 18.0 软件数值求解 3 维 N-S 方程和 RNG k-ε 方程组成的紊流模型封闭方程组，流体介质为理想气体，选择 Sutherland 方程以使粘性随温度变化。数值计算边界条件见表 1。数值求解方法采用 SIMPLE 算法，壁面区采用增强壁面函数，当连续方程、动量守恒方程和湍流方程的残差小于 10^{-6} 数量级时，即认为计算收敛。

表 1　篦齿-蜂窝密封边界条件

边界条件	数值	边界条件	数值
出口静压 $P_{sta,out}$/kPa	130.7	出口温度 $T_{tot,out}$/K	300
进口温度 $T_{tot,in}$/K	311.7	转速 n/(r·min^{-1})	4100

1.3　正交试验的模型设计

正交试验设计常用于多因素试验，可以通过较少

的试验次数，研究所选参数对试验指标的影响趋势和影响程度。

采用正交试验法，以泄漏量为试验指标，研究蜂窝深度H、蜂窝芯格直径D、蜂窝壁厚T、篦齿齿高h、篦齿齿距b、篦齿前倾角α、篦齿后倾角β、封严间隙c、前后腔压比r等9个因素对篦齿-蜂窝密封封严特性的影响。几何参数取值范围如下：H=1.0~2.5 mm，D=1.6~3.0 mm，T=0.1~0.4 mm，h=2~5 mm，b=3~9 mm，α=-15°~5°，β=-5°~15°，c=0.2~0.8 mm，r=1.1~2.0。齿数为当前齿距下的最大齿数。考虑到篦齿和蜂窝在实际工程中的适用范围，每个因素选4个水平，详见表2。

表2 因素水平

水平	H/mm	D/mm	T/mm	h/mm	b/mm
1	1	1.6	0.1	3	3
2	1.5	2.1	0.2	4	5
3	2	2.5	0.3	5	7
4	2.5	3.0	0.4	2	9
水平	α/(°)	β/(°)	c/mm	r	
1	5	0	0.2	1.1	
2	0	15	0.4	1.4	
3	-15	10	0.6	1.7	
4	-10	-5	0.8	2.0	

根据选定的密封参数与因素水平，若采用全面试验，需要计算大量模型，同时这些模型中会有大量的信息交叉与重叠，既很难完成又浪费算力。而采用正交设计法，依据“均匀分散、整齐可比”的设计原则，选取信息不重叠的试验模型，建立具有正交性的正交表$L_{32}(4^9)$，见表3，以反映各种因素及水平对密封泄漏量的影响。

封严模型结构如图4所示，为了节省篇幅，只给出编号为1#—6#的封严模型，且每个模型仅画出2个齿。由于齿距不同，故示意图大小不同。图中的模型与表3的几何参数一一对应。例如，密封件1#的几何参数为：H=1 mm，D=1.6 mm，T=0.1 mm，h=3 mm，b=3 mm，α=5°，β=0°，c=0.2 mm，r=1.1；密封件6#的几何参数为：H=1.5 mm，D=2.1 mm，T=0.2 mm，h=3 mm，b=3 mm，α=-10°，β=-5°，c=0.6 mm，r=1.7。

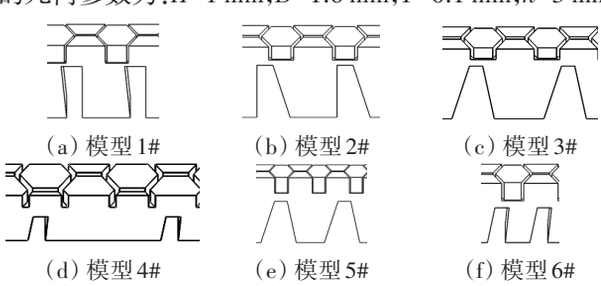


图4 封严模型结构

2 正交试验结果与分析

2.1 网格无关性验证

在相同边界条件下密封泄漏量随网格数的变化如图5所示。从图中可见，当网格数大于118万之后，对泄漏量的影响已经不大，故本研究采取的网格数都在118万以上。

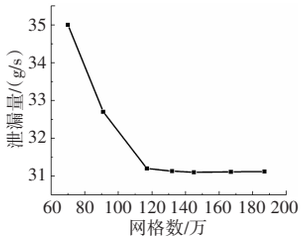


图5 泄漏量和网格数的关系

2.2 数值计算与试验结果的对比分析

在数值仿真过程中，根据文献[14]，边界条件和模型尺寸按试验工况设定，在不同转子转速下，篦齿衬套的径向位移量不同，模型中密封间隙随之改动。数值计算与试验结果的对比如图6所示。从图中可见，在不同转速下模拟结果和试验结果数值上相差不大，且变化趋势一致，因此认为本研究的数值计算结果可信。

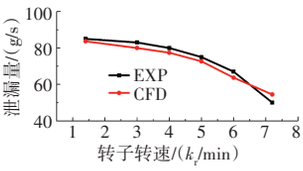


图6 试验数据与仿真数据对比

2.3 直观分析

正交试验结果与直观分析结果见表3。从表中可见，试验件1#的泄漏量最小，在32组试验件中，最佳的齿形结构就是H=1 mm，D=1.6 mm，T=0.1 mm，h=2 mm，b=3 mm，α=5°，β=0°，c=0.2 mm，r=1.1。但表3并未穷举出试验参数范围内所有齿形结构，因此无法断定试验件1#就是最佳方案。因此，通过直观分析法对试验结果作进一步分析。

(1)计算各因素各水平的泄漏量平均值K

$$K_i^{(x)} = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i^{(x)}}{n} \tag{1}$$

式中：x为任意因素；i为因素水平数，i=1，2……；$K_i^{(x)}$为x取第i水平时泄漏量的平均值；$y_i^{(x)}$为x取第i水平时试验件泄漏量；n为x取第i水平时的试验件数。

然后根据K值画出泄漏量的平均值随各因素水平变化的趋势，如图7所示。

表3　正交试验结果与直观分析

计算模型	几何参数									试验指标
编号	蜂窝深度 H/mm	芯格直径 D/mm	蜂窝厚度 T/mm	齿高 h/mm	齿距 b/mm	篦齿前倾角 α/(°)	篦齿后倾角 β/(°)	封严间隙 c/mm	压比 r	泄漏量/(m/(kg/s))
1#	1	1.6	0.1	3	3	5	0	0.2	1.1	0.013031
2#	1	2.1	0.2	4	5	0	15	0.4	1.4	0.075043
3#	1	2.5	0.3	5	7	−15	10	0.6	1.7	0.193757
4#	1	3.0	0.4	2	9	−10	−5	0.8	2.0	0.364713
5#	1.5	1.6	0.1	4	5	−15	10	0.8	2.0	0.360588
6#	1.5	2.1	0.2	3	3	−10	−5	0.6	1.7	0.124747
7#	1.5	2.5	0.3	2	9	5	0	0.4	1.4	0.092814
8#	1.5	3.0	0.4	5	7	0	15	0.2	1.1	0.025002
9#	2	1.6	0.2	5	9	5	15	0.6	2.0	0.253693
10#	2	2.1	0.1	2	7	0	0	0.8	1.7	0.345062
11#	2	2.5	0.4	3	5	−15	−5	0.2	1.4	0.161862
12#	2	3.0	0.3	4	3	−10	10	0.4	1.1	0.033724
13#	2.5	1.6	0.2	2	7	−15	−5	0.4	1.1	0.042171
14#	2.5	2.1	0.1	5	9	−10	10	0.2	1.4	0.052154
15#	2.5	2.5	0.4	4	3	5	15	0.8	1.7	0.262661
16#	2.5	3.0	0.3	3	5	0	0	0.6	2.0	0.227176
17#	1	1.6	0.4	3	9	0	10	0.4	1.7	0.130278
18#	1	2.1	0.3	4	7	5	−5	0.2	2.0	0.072717
19#	1	2.5	0.2	5	5	−10	0	0.8	1.1	0.087697
20#	1	3.0	0.1	2	3	−15	15	0.6	1.4	0.091112
21#	1.5	1.6	0.4	4	7	−10	0	0.6	1.4	0.177310
22#	1.5	2.1	0.3	3	9	−15	15	0.8	1.1	0.108795
23#	1.5	2.5	0.2	2	3	0	10	0.2	2.0	0.051044
24#	1.5	3.0	0.1	5	5	5	−5	0.4	1.7	0.149392
25#	2	1.6	0.3	5	3	0	−5	0.8	1.4	0.217843
26#	2	2.1	0.4	2	5	5	10	0.6	1.1	0.073054
27#	2	2.5	0.1	3	7	−10	15	0.4	2.0	0.165738
28#	2	3.0	0.2	4	9	−15	0	0.2	1.7	0.075309
29#	2.5	1.6	0.3	2	5	−10	15	0.2	1.7	0.046122
30#	2.5	2.1	0.4	5	3	−15	0	0.4	2.0	0.140801
31#	2.5	2.5	0.1	4	9	0	−5	0.6	1.1	0.059408
32#	2.5	3.0	0.2	3	7	5	10	0.8	1.4	0.203528
均值1	0.1285	0.1551	0.1546	0.1419	0.1169	0.1401	0.1449	0.0622	0.0554	
均值2	0.1362	0.1240	0.1142	0.1396	0.1476	0.1414	0.1285	0.1037	0.1340	
均值3	0.1658	0.1344	0.1241	0.1400	0.1532	0.1468	0.1373	0.1500	0.1659	
均值4	0.1293	0.1462	0.1670	0.1383	0.1421	0.1315	0.1491	0.2439	0.2046	
极差 R	0.0373	0.0311	0.0528	0.0036	0.0363	0.0153	0.0206	0.1817	0.1492	

从图中可见,不同密封参数变化时,泄漏量变化趋势各有不同。

蜂窝深度与芯格直径有极强的交互作用,如图8所示。当蜂窝深度为1.8 mm、芯格直径为1.9~2.4 mm时,有较好的封严效果,不同蜂窝深度下的流线如图9所示。如果蜂窝深度太小而芯格直径较大时,蜂窝孔中部形成旋涡,左右两侧气体几乎滞止,能量耗散较小;蜂窝深度太大而芯格直径较小时,蜂窝孔靠近密封间隙位置形成旋涡,但底部空间几乎浪费,同样不利于封严。同时芯格直径较大时,蜂窝孔密度降低,形成旋涡数量变少,同样减小了能量耗散。

随着蜂窝厚度增加,泄漏量先减小后增大。这是

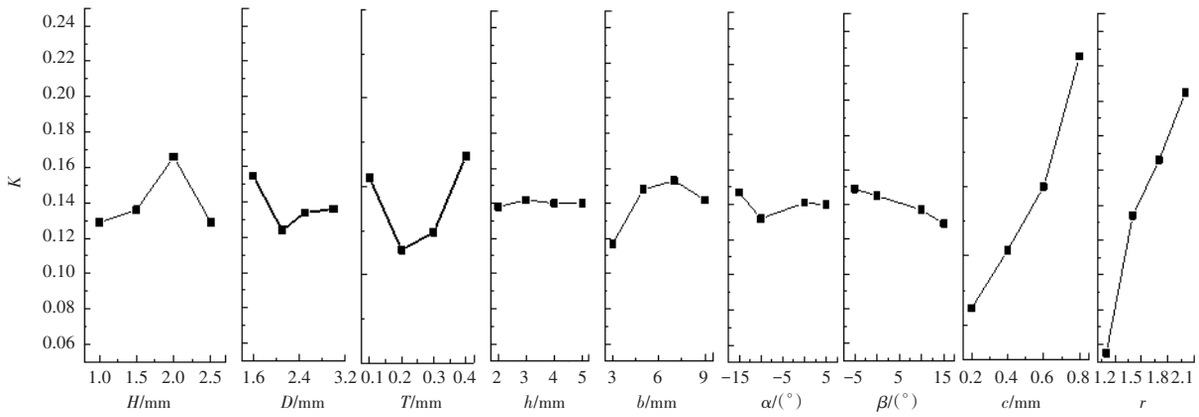


图7 泄漏量的平均值随各因素水平变化的趋势

因为壁厚增加，一定程度上增加了流体的沿程损失，能量耗散增加；但壁厚增加同时导致了蜂窝孔密度降低，旋涡数减少，能量耗散减小。所以泄漏量的变化取决于以上2方面对能量耗散的贡献。

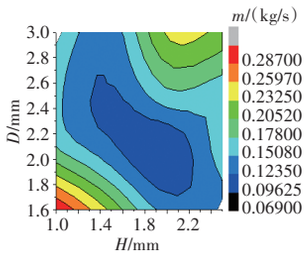
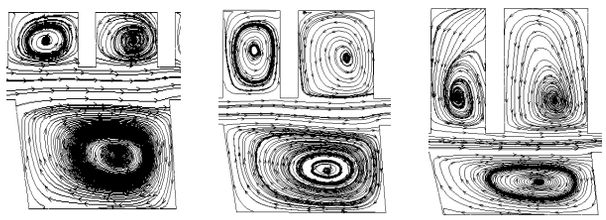


图8 蜂窝深度与芯格直径的交互作用



(a) H=1.0 mm (b) H=1.5 mm (c) H=2.5 mm

图9 不同蜂窝深度下的流线(D=1.6 mm)

齿高与齿距的交互作用如图10所示。从图中可见篦齿齿高与齿距交互作用下的泄漏量变化。当齿高为2.0~2.5 mm、齿距为5~7 mm时，泄漏量较小。不同齿距下的流线如图11所示。从图中可见，相对齿高来说齿距太小时，齿腔上部形成旋涡，齿腔底部气体几乎滞止，动能耗散较小；相对齿高来说齿距太大时，齿腔中部产生旋涡，齿腔两侧空间不能很好利用。同时齿腔数随齿距增加而减少，流场突扩突缩的次数减少，不利于封严。

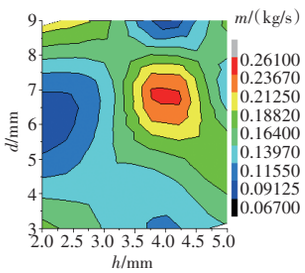
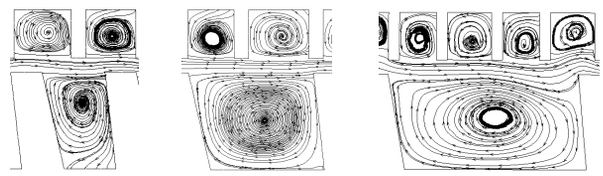


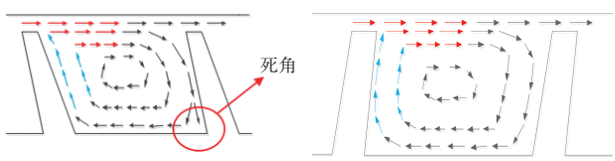
图10 齿高与齿距的交互作用

篦齿倾角以右倾为正，左倾为负。前倾角增加时，泄漏量先降低后升高。不同前后倾角下的流线如图12所示。从图中可见，随着前倾角右倾增大，齿腔区域出现旋涡不能到达的死角，此处流体几乎滞止，不利于能量耗散；前倾角同样不能左倾太大，否则齿腔形状为上宽下窄的梯形，旋涡不能完全发展，亦即存在1个最佳值，结合图7可知，前倾角最佳值约为-10°；随后倾角增大，泄漏量逐渐减小。对比图12(a)和图12(b)可知，当β<0°时，齿间处入侵气流与齿腔涡流水平上速度方向相同，当β>0°时，齿间处入侵气流与齿腔涡流水平上速度方向相反。方向相反时，二者相冲增加了能量耗散，后倾角越大，其相冲作用越大，结合图7可知，在试验参数范围内，后倾角最佳值约为15°。



(a) b=3 mm (b) b=5 mm (c) b=9 mm

图11 不同齿距下的流线



(a) α>0°、β>0° (b) α<0°、β<0°

图12 不同前后倾角下的流线

封严间隙增加导致透气效应变大，进而通过各级齿尖的流体增多；压比增加使得流体加速，壁面射流特性效果更加明显，泄漏量随之增大。

2.4 影响权重

在直观分析中，利用因素的极差R来反映试验范围内该因素变化对试验指标的影响权重，其定义为

$$R^{(x)} = \left\{K_1^x, K_2^x, K_3^x, K_4^x\right\}_{\max} - \left\{K_1^x, K_2^x, K_3^x, K_4^x\right\}_{\min} \quad (2)$$

R越大，表示该因素对密封泄漏量的影响权重越大。从表3中最末一行可见，$R^c>R^r>R^T>R^H>R^b>R^D>R^\beta>R^\alpha>R^h$，也就是说，试验范围内各因素的变化对泄漏特性影响权重的主次顺序是：密封间隙→压力比→蜂窝壁厚→蜂窝深度→齿距→蜂窝芯格直径→后倾角→前倾角→齿高。该影响权重排序是指当泄漏从最低水平变化到最高水平时，每个因素对泄漏的影响程度。例如，当间隙c从第1水平（0.2 mm）变化到第4水平（0.8 mm）的泄漏量变化大于蜂窝深度H从第1水平（1.0 mm）变化到第4水平（2.5 mm）。这是为了比较间隙c变化0.6 mm与H变化1.5 mm对泄漏量的影响大小，在这一意义上，c比H有更大的影响。

3　结论

（1）蜂窝深度和芯格直径、篦齿齿高和齿距都具有极强的交互作用，取值适当可以使腔内旋涡充分发展，增大能量耗散。

（2）篦齿前倾角右倾太大会出现死角，左倾太大会导致旋涡不能完全发展，即存在1个可使腔内空间被充分利用的最佳值；篦齿后倾角向右倾斜时，齿腔涡流沿篦齿与入侵气流相冲以耗散能量。

（3）试验范围内各因素变化对泄漏特性影响权重的主次排序为：密封间隙→压比→蜂窝壁厚→蜂窝深度→齿距→蜂窝芯格直径→后倾角→前倾角→齿高。

参考文献：

[1] 阎师，胡芳，黄首清，等．基于CFD和神经网络的2级刷式密封结构泄漏和级间不平衡性分析[J]．航空发动机，2022，48（3）：70-75.
YAN Shi，HU Fang，HUANG Shouqing，et al.Leakage and inter-stage imbalance analysis of two-stage brush seals structure based on CFD and neural network[J]. Aeroengine，2022，48（3）：70-75.（in Chinese）

[2] Chupp R E，Hendricks R C，Lattime S B，et al. Sealing in turbomachinery [J]. Journal of Propulsion & Power，2006，22（2）：313 - 349.

[3] Yan X，Chen X，He K．Influence of shroud seal dimensions on aerodynamic performance of steam turbine stages：part Ⅰ：honeycomb seal [C]// ASME Turbo Expo：Turbomachinery Technical Conference & Exposition. Seaml：ASME，2016：1-13.

[4] 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.（in Chinese）

[5] Mehta N J，Childs D W. Measured comparison of leakage and rotor dynamic characteristics for a slanted tooth and a straight-tooth labyrinth seal[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power，2014，136（1）：012501.

[6] 向新，晏鑫，李志刚，等．迷宫蜂窝密封泄漏特性的实验测量和数值研究 [J]．西安交通大学学报，2022，56（11）：72-82.
XIANG Xin，YAN Xin，LI Zhigang，et al. Experimental measurement and numerical study on leakage characteristics of labyrinth honeycomb seal[J]. Journal of Xi'an Jiao tong University，2022，56（11）：72-82.（in Chinese）

[7] Alizadeh M，Nikkhahi B，Farahania S，et al. Numerical study on the effect of geometrical parameters on the labyrinth-honeycomb seal performance[J]. Journal of Aerospace Engineering，2018，232（2）：362-373.

[8] 何立东，高金吉，尹新．蜂窝密封的封严特性研究[J]．机械工程学报，2004（6）：45-48.
HE Lidong，GAO Jinji，YIN Xin. Study on sealing characteristics of honeycomb seal [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering，2004（6）：45-48.（in Chinese）

[9] 叶小强，何立东，霍耿磊．蜂窝密封流场和泄漏特性的实验研究[J]．润滑与密封，2006（4）：95-97.
YE Xiaoqiang，HE Lidong，HUO Genglei. Experimental invertigation of the flow field and leakage characteristics of the honeycomb seal[J]. Lubrication Engineering，2006（4）：95 -97.（in Chinese）

[10] 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）：282-291.
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）：282-291.（in Chinese）

[11] Willenborg K，Kim S，Wittig S．Effects of Reynolds number and pressure ratio on leakage loss and heat transfer in a stepped labyrinth seal[J]. Journal of Turbomachinery，2001，123（4）：815-822.

[12] 何振鹏，王宇博，王伟韬，等．蜂窝结构对篦齿-蜂窝密封封严性能的影响[J]．润滑与密封，2020，45（8）：26-35.
HE Zhenpeng，WANG Yubo，WANG Weitao，et al. Effect of honeycomb structure on sealing performance of labyrinth-honeycomb seal［J］. Lubrication Engineering，2020，45（8）：26-35.（in Chinese）

[13] 孔晓治，刘高文，雷昭，等．齿型对压气机级间封严特性影响的实验研究[J]．推进技术，2018，39（9）：2085-2093.
KONG Xiaozhi，LIU Gaowen，LEI Zhao，et al. Experimental investigation for effects of tooth shapes on compressor inter-stage seal[J]. Journal of Propulsion Technology，2018，39（9）：2085-2093.（in Chinese）

[14] 雷昭，孔晓治，刘高文，等．高转速下台阶篦齿流动特性的实验与计算[J]．推进技术，2017，38（11）：2588-2596.
LEI Zhao，KONG Xiaozhi，LIU Gaowen，et al. Experimental and numerical investigations on flow characteristics of stepped labyrinth seal at high rotational speed[J]. Journal of Propulsion Technology，2017，38（11）：2588-2596.（in Chinese）

[15] Asok S P，Sankaranarayanasamy K，Sundararajan T，et al. Neural network and CFD-based optimization of square cavity and curved cavity static labyrinth seals[J]. Tribology International，2007，40（7）：1204-1216.

[16] Frączek D，Bochon K，Wróblewski W. Influence of honeycomb land geometry on seal performance[C]//Turbo Expo：Power for Land，Sea，and Air. New York：American Society of Mechanical Engineers，2016：V05AT15A025.

（编辑：程　海）