

文章编号:1000-8055(2013)04-0825-07

齿形几何参数对直通篦齿封严 泄漏特性影响的正交实验

杜发青¹, 吉洪湖¹, 帅海山¹, 张 勃¹,
王 丁¹, 陆海鹰², 邓明春²(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016;
2. 中国航空工业集团公司 沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015)

摘 要: 针对影响直通篦齿泄漏特性的 6 个主要几何参数(齿宽、封严间隙、齿高、齿距、前倾角和后倾角)及其常用的取值范围,依据正交原理设计了 25 个篦齿实验件,实验研究了其对泄漏特性的影响。结果表明:上述参数对流量系数的影响趋势有明显的区别;根据实验结果推断:封严效果最好的齿形结构为齿宽取 0.1 mm、封严间隙取 0.3 mm、齿高取 3 mm、齿距取 9 mm、前倾角取 0°、后倾角取 15°;上述参数在实验范围内的变化对流量系数影响程度的主次排序为:齿距→封严间隙→后倾角→齿宽→齿高→前倾角,齿距影响非常显著,封严间隙影响显著,后倾角和齿宽有一般影响,齿高和前倾角影响不显著。

关 键 词: 直通篦齿; 几何参数; 泄漏; 流量系数; 正交

中图分类号: V231.1

文献标志码: A

Orthogonal experiment of effect of fin geometrical parameters on leakage of straight-through labyrinth seals

DU Fa-qing¹, JI Hong-hu¹, SHUAI Hai-shan¹, ZHANG Bo¹,
WANG Ding¹, LU Hai-ying², DENG Ming-chun²(1. College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. Shenyang Engine Design and Research Institute,
Aviation Industry Corporation of China, Shenyang 110015, China)

Abstract: An orthogonal experiment was made to study the influence of the geometry parameters of straight-through labyrinth seals on sealing characteristics. The geometry parameters studied include the fin tip thickness, seal clearance, fin height, fin pitch, fin front inclined angle and rear inclined angle. The experiment was made with 25 models that were designed according to the orthogonal test method. The results show that various parameters have different influences on discharge coefficient. The best combination of various geometry parameters for sealing in the test range is that fin tip thickness takes 0.1 mm, seal clearance takes 0.3 mm, fin height takes 3 mm, fin pitch takes 9 mm, fin front inclined angle takes 0 degree and rear inclined angle takes 15 degree. The rank of importance of each parameter's variation from its maximum to minimum value on sealing characteristics is fin pitch, seal clearance, rear inclined angle, fin tip thickness, fin height, fin front inclined

收稿日期:2012-04-27

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130417.1353.201304.825_015.html

作者简介:杜发青(1988—),男,江苏盐城人,硕士生,主要从事航空发动机封严技术研究。E-mail:dufaqing372@sina.com

angle. Fin pitch is the most important parameter, seal clearance is less important than fin pitch, rear inclined angle and fin tip thickness have certain impact on the sealing characteristics, while fin height and fin front inclined angle have little influence on it.

Key words: straight-through labyrinth; geometrical parameter; leakage; discharge coefficient; orthogonal

随着航空事业的发展,现代燃气涡轮发动机增压比和涡轮进口温度不断提高,发动机动静件之间的封严系统的泄漏问题日益严重.而封严结构的优劣直接影响到发动机的性能,高质量的封严结构可以有效地减少封严系统的泄漏,增加发动推质比、减少耗油率显著提高发动机的效率^[1].有资料表明^[2-4]:未来航空发动机性能的提高,其中一半将取决于封严技术的改进和泄漏量的降低;因此,从发动机的燃油消耗率、推质比、可靠性和耐久性等方面考虑,先进的封严技术已成为一项关键的因素.

篦齿封严是航空发动机中广泛使用的一种有效的、长寿命的封严结构,它是利用齿尖节流和齿腔涡流作用来增加流阻以控制流量的.影响封严效果的篦齿参数主要包括篦齿几何参数、齿数、篦齿前后压差和篦齿转速.其中转速对它的影响不大.20世纪90年代,Demko等^[5]用数值计算的方法研究了转速对直通篦齿封严效果的影响,发现低转速下,旋转对封严效果几乎没有影响,增大转速到泰勒数 $Ta > 0.5Re$ 时,流量系数才略有减小. Waschk等^[6]通过实验也得到了类似的结论:篦齿转速低于4000 r/min时,随着转速的增加流量系数几乎不变,转速高于4000 r/min后,流量系数缓慢减小;近年来,纪国剑等^[7-8]通过计算和实验得到转速对泄漏的影响不大,其程度取决于齿尖流体周向线速度与轴向节流速度的大小.此外,有学者分析指出^[9],旋转所产生的离心力会导致篦齿径向膨胀变形,造成封严间隙减小,从而引起泄漏量下降,所以单纯的转速对泄漏几乎没有影响.

为了节省实验研究的成本,许多学者采用静止模型研究封严特性. Denecke等^[10]在静止实验台上研究篦齿齿尖磨损槽对封严泄漏特性的影响,发现齿尖磨损槽会使泄漏量增大,将磨损槽深度 b 固定不变,调节间隙 c ,发现当 $0.43b < c < 2.33b$ 时,流量系数最小.黄晓光等^[11-12]通过静止实验对齿腔内的速度分布和压力分布等进行了测量,分析得到篦齿腔内的气流速度分布规律和流场的旋涡分布,随着 Re 和 t/c 的增大,旋涡分布越来越明显,篦齿顶板部位的气流壁面分离现象越显著.

由于篦齿封严间隙很小,在以往的实验研究中大多采用放大模型^[10-12],这样难以真实地反映篦齿结构中的边界层效应,并且在间隙很小时,放大引起的比例效应也较为显著^[13].同时,由于影响篦齿封严特性的因素有很多,而以往的研究往往仅针对一个或者几个因素进行研究,这样就忽略了篦齿各个影响因素之间的相互联系.

如上所述,影响篦齿泄漏特性的因素很多,若针对所有因素进行实验研究,则工作量巨大,难以实现.为此,本文暂不考虑转速和齿数的影响,建立了篦齿封严静止实验台,针对5个齿的篦齿结构,采用正交实验法,根据航空发动机篦齿的实际尺寸范围,设计了25组篦齿实验件.在不同气动参数下,实验研究了齿宽、封严间隙、齿高、齿距、前倾角和后倾角对直通篦齿封严泄漏特性的综合影响.

1 实验系统

实验系统由气源、气路系统、实验段、实验件和测量系统组成.

1.1 气源、气路系统

图1是直通篦齿封严静止实验台系统示意图,其中气源由额定压力为0.7 MPa的压气机提供,经储气罐稳压、干燥后供实验使用.气源提供的高压气体由进气管道进入,然后依次经过扩压段、稳压腔、过渡段,然后进入实验段;在实验段内经篦齿封严结构的节流作用后,流出实验段;之后流过收缩段、排气管道、流量计,而后排入环境.

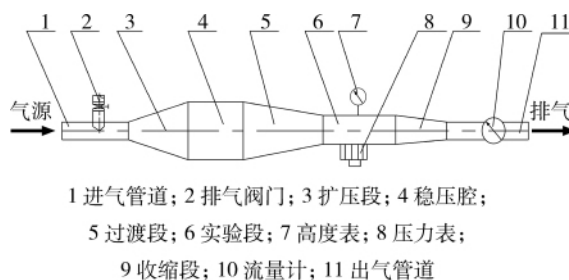


图1 实验系统示意图

Fig. 1 Figure of test system

1.2 实验段

图2是迷宫实验段的剖面图。气流进口高为12 mm、宽为200 mm的矩形口,气流出口高为10 mm、宽为200 mm的矩形口;所有的迷宫实验件的宽度均为200 mm,固定在迷宫托板上,托板的下表面与主腔室内部的下表面之间的通道为气流通道(见图2中间箭头所示),齿尖与主腔室之间的间隙就是封严间隙。封严间隙的大小可以通过精细螺纹杆推拉迷宫托板进行调节,调节时通过高度表监测封严间隙。该实验台可以通过更换迷宫实验件,实验研究不同封严结构参数对泄漏特性的影响。

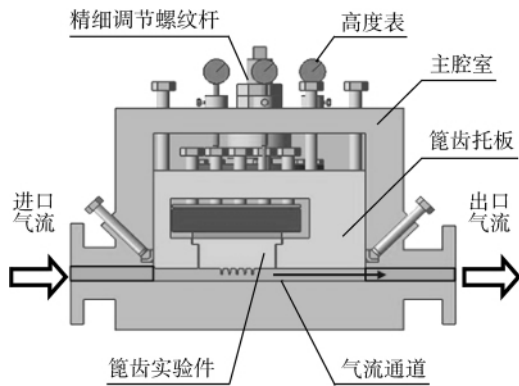


图2 实验段剖面图

Fig.2 Section of test

1.3 正交实验的实验件设计

正交实验设计是用于多因素实验的一种方法,它是从全面实验中挑选出部分有代表性的点进行研究。优点是可以通过较少的实验次数,研究所选参数对实验指标的影响趋势和影响程度。

本文采用的迷宫实验件结构示意图如图3所示。它由齿宽 t 、封严间隙 c 、齿高 H 、齿距 B 、迷宫前倾角 α 、迷宫后倾角 β 、齿数等7个参数确定。本文将利用5个齿的模型,通过正交实验法,以流量系数为实验指标,研究 $t, c, H, B, \alpha, \beta$ 等6个因素对迷宫泄漏特性的影响。迷宫几何参数取值的范围如下: t 取0.1~0.7 mm; c 取0.2~0.6 mm; H 取3~7 mm; B 取3~9 mm;迷宫倾斜角取 $0^\circ \sim 15^\circ$ 。综合考虑迷宫实验件的设计与加工,每个因素选5个水平,详见表1。

根据选定的实验件结构参数,若是做全面的实验,需要加工 $5^6 = 15625$ 个模型,这样耗资大、耗时长。若采用正交实验法,选择正交表 $L_{25}(5^6)$ (见表2的第2列~第7列,为节省篇幅,不再单独列出),把各个因素逐个安排在正交表的任意列上,那么每次实验对应的实验模型由6个因素的

水平共同确定,实验仅需要研究25个模型,可以节省大量的财力与物力。

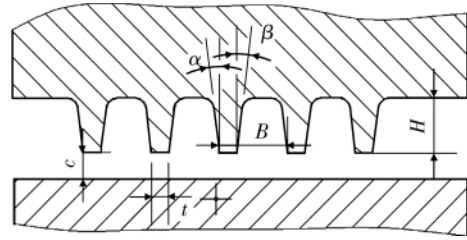


图3 迷宫封严结构示意图

Fig.3 Structure of labyrinth seal

表1 因素水平表

Table 1 Factors and levels

水平	t/mm	c/mm	H/mm	B/mm	$\alpha/(\circ)$	$\beta/(\circ)$
1	0.7	0.2	3	3	0	0
2	0.5	0.3	4	4	5	5
3	0.3	0.5	5	6	8	8
4	0.2	0.4	6	7	12	12
5	0.1	0.6	7	9	15	15

图4为25个迷宫实验件齿形结构示意图。为了节省篇幅,每个实验件仅画出两个齿用于示意。图中第1排从左到右依次为实验件1#,2#,3#,4#,5#,以下4排则依次为实验件6#~25#。图中每个实验件的几何参数与表2的前7列一一对应。例如,迷宫件1#的几何参数为: $t=0.7\text{ mm}$, $H=3\text{ mm}$, $B=3\text{ mm}$, $\alpha=0^\circ$, $\beta=0^\circ$, $c=0.2\text{ mm}$;迷宫件2#的几何参数为: $t=0.7\text{ mm}$, $H=4\text{ mm}$, $B=4\text{ mm}$, $\alpha=5^\circ$, $\beta=5^\circ$, $c=0.3\text{ mm}$ 。

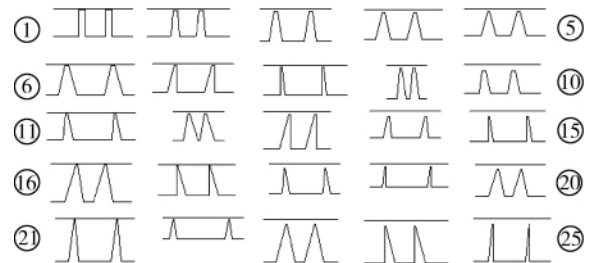


图4 25个迷宫实验件齿形结构示意图

Fig.4 Figure of part structure of 25 labyrinth test pieces

1.4 测量系统

实验数据采集有3套测量系统,即压力测量、温度测量和流量测量。测量的数据主要包括:实验

表 2 正交实验结果与直观分析表
Table 2 Design and results of orthogonal experiment

实验模型	几何参数						实验指标
编号	t/mm	c/mm	H/mm	B/mm	$\alpha/(^{\circ})$	$\beta/(^{\circ})$	流量系数 C_d
1 [#]	0.7	0.2	3	3	0	0	0.4503
2 [#]	0.7	0.3	4	4	5	5	0.5001
3 [#]	0.7	0.5	5	6	8	8	0.5808
4 [#]	0.7	0.4	6	7	12	12	0.3887
5 [#]	0.7	0.6	7	9	15	15	0.4489
6 [#]	0.5	0.2	4	6	12	15	0.3609
7 [#]	0.5	0.3	5	7	15	0	0.4255
8 [#]	0.5	0.5	6	9	0	5	0.4397
9 [#]	0.5	0.4	7	3	5	8	0.6407
10 [#]	0.5	0.6	3	4	8	12	0.5511
11 [#]	0.3	0.2	5	9	5	12	0.3566
12 [#]	0.3	0.3	6	3	8	15	0.4268
13 [#]	0.3	0.5	7	4	12	0	0.5950
14 [#]	0.3	0.4	3	6	15	5	0.4756
15 [#]	0.3	0.6	4	7	0	8	0.4935
16 [#]	0.2	0.2	6	4	15	8	0.5159
17 [#]	0.2	0.3	7	6	0	12	0.3862
18 [#]	0.2	0.5	3	7	5	15	0.3604
19 [#]	0.2	0.4	4	9	8	0	0.3692
20 [#]	0.2	0.6	5	3	12	5	0.5871
21 [#]	0.1	0.2	7	7	8	5	0.3308
22 [#]	0.1	0.3	3	9	12	8	0.2736
23 [#]	0.1	0.5	4	3	15	12	0.5089
24 [#]	0.1	0.4	5	4	0	15	0.3437
25 [#]	0.1	0.6	6	6	5	0	0.4973
K^1	0.4737	0.4029	0.4222	0.5228	0.4227	0.4675	
K^2	0.4836	0.4024	0.4465	0.5012	0.4710	0.4667	
K^3	0.4695	0.4969	0.4587	0.4601	0.4517	0.5009	
K^4	0.4438	0.4436	0.4537	0.3998	0.4410	0.4383	
K^5	0.3908	0.5156	0.4803	0.3776	0.4750	0.3881	
R	0.0928	0.1132	0.0581	0.1452	0.0523	0.1128	

件进口和出口的总温、静温、总压、静压、齿腔静压、封严泄漏量等。

为了方便测量压力和温度,在实验段底部加工直径为 1 mm 的小孔,如图 5 所示。孔 1~孔 8 为测压孔(孔 2 与孔 8 为总压测孔,其余为静压测孔),将引压管由测压孔底部伸入至压力采集点,

再接压力表进行测量。孔 9~孔 12 为测温孔(孔 10 与孔 12 为总温测孔,其余为静温测孔),将热电偶头部从测温孔底部伸入,固定在温度采集点,然后将小孔封堵住,通过温度巡检仪读取温度。

实验采用玻璃转子流量计测量流量,布置在实验段后端(见图 1 中的编号 10)。

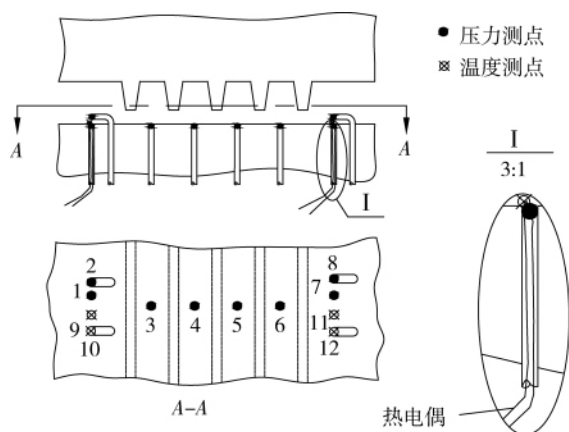


图5 实验段的压力与温度测孔示意图

Fig. 5 Figure of point for collecting pressure and temperature

1.5 实验过程

在实验过程中,利用排气阀门(见图1中的编号2)控制进入实验台的气流流量,以调节实验件进口总压与出口静压的比值 p_0/p_n . 对于每一个实验件,分别在压比为1.2,1.3,1.4,1.5,1.6和1.8六个工况下进行实验.由于篇幅的限制,本文仅仅整理压比为1.2时的实验结果,其他压比下的实验有类似结果.

2 实验数据处理

在封严结构中,以流量系数 C_d 作为评价封严性能的参数,其定义式为

$$C_d = m_r / m_i \quad (1)$$

式中 m_r 为实验中流量计测得的流量, m_i 为理想流量

$$m_i = \frac{p_0 A}{\sqrt{\kappa R T_0}} \sqrt{\frac{2\kappa^2}{\kappa-1} \left(\frac{p_n}{p_0}\right)^{\frac{2}{\kappa}} \left[1 - \left(\frac{p_n}{p_0}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right]} \quad (2)$$

式中 p_0, p_n 分别为封严进口总压和出口静压, A 为封严间隙截面积, κ 为空气等熵指数, R 为空气气体常数.

3 正交实验的结果与分析

本文实验方案是依据正交实验原理设计的,因此实验结果也需要依据正交实验相关理论进行分析.本文将选取典型压比为1.2时的实验数据,采用直观分析法和方差分析法进行综合分析.

3.1 泄漏特性的直观分析

表2给出了压比为1.2下的正交实验结果与直观分析结果.比较每个实验件的实验结果,可以发现实验件22#的流量系数最小,在25组实验件

中,最佳的齿形结构就是 t 取0.1mm, c 取0.3mm, H 取3mm, B 取9mm, α 取 12° , β 取 8° .但表1中的实验参数范围可以有15625种齿形结构,因此无法断定实验件22#就是实验参数范围内的最佳方案.为此,以直观分析法对实验结果作进一步分析.

首先计算各因素各水平的指标平均值 K ,其定义式为

$$K_i^{(X)} = \frac{\sum y_i^{(X)}}{n} \quad (3)$$

式中 X 为任意因素,下同; i 为因素水平数; $K_i^{(X)}$ 为因素 X 取第 i 水平时,实验指标的平均值, $y_i^{(X)}$ 为因素 X 取第 i 水平时实验件的实验指标, n 为因素 X 取第 i 水平时的实验件的个数.

然后根据 K 值,画出流量系数的平均值随各因素水平变化的趋势图,如图6所示,此趋势图以6个因素的水平值为横坐标, K 为纵坐标.

观察图6可以发现:齿形几何参数水平变化对流量系数的影响趋势有明显的区别:①随着 t 的增大,开始时流量系数迅速增大,随后流量系数变化很小.这或许是由于随着 t 的增大透气效应增大而造成的.纪国剑等^[14]的数值计算研究表明:直通篦齿中上一节齿尖的射流有一部分贴壁流动的气体直接冲入下一节齿尖间隙,这就是透气效应;而远离壁面的部分射流与齿腔内气体形成强剪切层导致齿腔内形成旋涡,引起动能衰减后再进入下一节齿尖间隙.可以推断随着 t 的增大,上一节齿尖射流的扩张角减小,将导致透气效应增大,动能的旋涡衰减减小,从而导致泄漏量增大.②随着 c 的增大,流量系数总体上逐渐增大.这是由于随着 c 的增大,封严截面积增大,通过齿尖的射流速度减小,齿腔中的旋涡转速变慢,封严性能减弱.③随着 H 的增大,流量系数总体上逐渐增大.这是因为随着 H 的增大,气流在齿腔内的涡流作用使得空腔底部的流动逐渐减小甚至趋于滞止,减弱了动能耗散的程度,虽然空腔回流面积增大,但其综合能量耗散效应却逐渐减小.④随着 B 的增大,流量系数逐渐减小,这是因为随着齿腔 B 的增大,气流在空腔回流面积增大,使得流体的能量耗散逐渐增大.⑤随着 α 和 β 的增大,流量系数有明显的波动.但总体趋势是随着 α 的增大,流量系数是增加的;随着 β 的增大,流量系数是下降的.这是由于这两个角度对齿腔流动不同的影响造成的,有待进一步探究.

观察图6发现 $t_5, c_2, H_1, B_5, \alpha_1, \beta_5$ (该处各参数的下标表示其参数水平数,例如 t_5 为表1中 t 因素取第5个水平,其值为0.1下同)的平均流量系数

最小,因此依据正交分析理论可以得出,封严效果最佳的篦齿齿形结构应为: $t_5, c_2, H_1, B_5, \alpha_1, \beta_5$,即 $t=0.1\text{ mm}, c=0.3\text{ mm}, H=3\text{ mm}, B=9\text{ mm}, \alpha=0^\circ, \beta=15^\circ$.

在直观分析中,用因素的极差 R 反映该因素在实验范围内的变化对实验指标的影响程度, R 定义为该因素指标平均值的最大值与最小值之差,即

$$R^{(X)} = \max\{K_1^{(X)}, K_2^{(X)}, K_3^{(X)}, K_4^{(X)}, K_5^{(X)}\} - \min\{K_1^{(X)}, K_2^{(X)}, K_3^{(X)}, K_4^{(X)}, K_5^{(X)}\} \quad (4)$$

一般来说,各因素的极差是不相等的,这说明在实验范围内各因素的变化对指标的影响程度是不同的, R 越大表明该因素对指标的影响越大. 由表2可知, $R^{(B)} > R^{(c)} > R^{(\beta)} > R^{(t)} > R^{(H)} > R^{(\alpha)}$,也就是说各因素在实验范围内的变化对泄漏特性影

响程度的主次排序为: $B \rightarrow c \rightarrow \beta \rightarrow t \rightarrow H \rightarrow \alpha$. 该影响程度的排序是就各因素由最低水平变化到最高水平时对流量系数的影响程度而言的. 例如,齿距 B 由第1水平(3 mm)变化到第5水平(9 mm)时,流量系数的变化大于封严间隙 c 由第1水平(0.2 mm)变化到第5水平(0.6 mm)时对流量系数的影响. 这里是把 B 变化6 mm对流量系数产生的影响与 c 变化0.4 mm产生的影响进行比较,在这个意义上, B 比 c 的影响程度大.

3.2 泄漏特性的方差分析

为了更精确地估计各因素对泄漏特性影响的重要程度,本文进一步以均方差最小的因素 H 为基准(认为 H 是影响不显著因素),采用方差分析法,对其他因素进行显著性检验^[15],结果如表3所

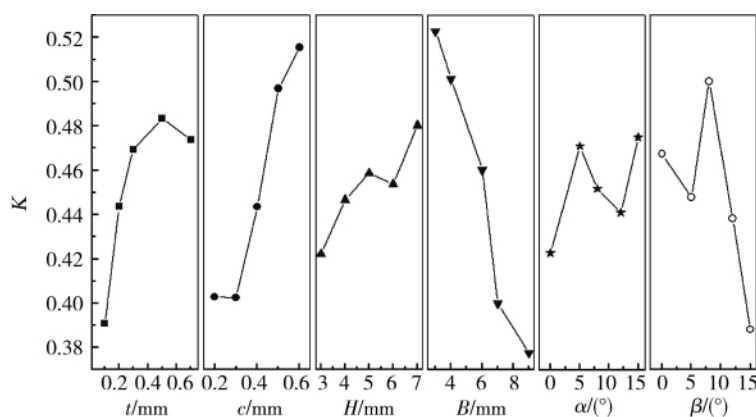


图6 各因素水平变化对流量系数的影响

Fig. 6 Effect of different levels on flow coefficient

表3 流量系数方差分析表

Table 3 Analysis of variance for flow coefficient

参数	偏差平方和 S	自由度 f	均方差 V	统计量 F	显著性
t	0.0279	4	0.0070	3.0697	一般影响
c	0.0550	4	0.0137	6.0471	显著
H	0.0088	4	0.0022		不显著
B	0.0788	4	0.0197	8.6639	非常显著
α	0.0094	4	0.0023	1.0455	不显著
β	0.0355	4	0.0089	3.9076	一般影响
总和 S_{II}	0.2154	24			

注:1) 各因素 $S = 5 \times \sum_{i=1}^5 (K_i - \bar{y})^2$, $V = \frac{S}{f}$. 其中 $f = m(\text{水平数}) - 1$, F 值为因素水平改变引起的均方差 V 与基准因素的均方差的比值.

2) 置信限: $F_{0.1}(4, 8) = 2.81$; $F_{0.05}(4, 8) = 3.84$; $F_{0.01}(4, 8) = 7.01$. 若 $F > F_{0.01}(4, 8)$, 则该因素非常显著; 若 $F_{0.01}(4, 8) \geq F > F_{0.05}(4, 8)$ 则该因素显著; 若 $F_{0.05}(4, 8) \geq F > F_{0.1}(4, 8)$, 则该因素有一般影响; 若 $F < F_{0.1}(4, 8)$, 则该因素不显著.

示,各因素对流量系数影响的显著性程度不同,因素 B 影响非常显著,因素 c 影响显著,因素 β 和 t 有一般影响,因素 H 和 α 影响不显著.

4 结 论

本文实验研究了篦齿封严中齿宽 t 、封严间隙 c 、齿高 H 、齿距 B 、前倾角 α 和后倾角 β 对泄漏特性的影响,在实验参数范围内,得到以下结论:

1) 齿形不同几何参数对流量系数的影响趋势有明显的区别.随着 t 、 c 和 H 的增大,流量系数总体上逐渐增大;随着 B 的增大,流量系数逐渐减小;而随着 α 和 β 的增大,流量系数有明显的波动.

2) 依据正交直观分析推断,封严效果最佳的篦齿齿形结构为: t 取 0.1 mm, c 取 0.3 mm, H 取 3 mm, B 取 9 mm, α 取 0° , β 取 15° .

3) 各参数在最小取值与最大取值之间变化时对流量系数的影响程度的主次排序为: $B \rightarrow c \rightarrow \beta \rightarrow t \rightarrow H \rightarrow \alpha$, 因素 B 影响非常显著,因素 c 影响显著,因素 β 和 t 有一般影响,因素 H 和 α 影响不显著.

参考文献:

- [1] 刘卫华,林丽,朱高涛.迷宫密封激励的研究现状及其展望[J].流体机械,2007,35(2):35-39.
LIU Weihua, LIN Li, ZHU Gaotao. Current situation of the research and development of the mechanism of labyrinth seal[J]. Fluid Machinery, 2007, 35(2): 35-39. (in Chinese)
- [2] Sturgess G J. Application of CFD to gas turbine engine secondary flow system[R]. AIAA-SS-3203, 1988.
- [3] Steinetz B M, Hendricks R C. Engine seal technology requirements to meet NASA's advanced subsonic technology program goals[R]. AIAA-94-2698, 1994.
- [4] Steinetz B M, Hendricks R C. Advanced seal technology role in meeting next generation turbine engine goal[R]. NASA/TM-1988-206961, 1988.
- [5] Demko J A, Morrison G L, Rhode D L. Effect of shaft rotation on the incompressible flow in a labyrinth seal[J]. Journal of Propulsion and Power, 1990, 6(2): 171-176.
- [6] Waschka W, Witting S, Kim S. Influence of high rotational speeds on the heat transfer and discharge coefficients in labyrinth seals[J]. ASME Paper 90-GT-330, 1990.
- [7] 纪国剑,吉洪湖.旋转状态下篦齿-蜂窝结构封严特性研究[J].工程热物理学报,2006,27(1):161-164.
JI Guojian, JI Honghu. Investigation of sealing characteristics of labyrinth-honeycomb seal under rotating condition[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2006, 27(1): 161-164. (in Chinese)
- [8] 纪国剑,吉洪湖,曹广州.旋转对小间隙篦齿-蜂窝结构封严特性的影响[J].南京航空航天大学学报,2008,40(2):142-145.
JI Guojian, JI Honghu, CAO Guangzhou. Effect of rotating speed on leakage characteristics of labyrinth honeycomb seal with small clearance[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 40(2): 142-145. (in Chinese)
- [9] 塔鲁达纳斯基.非接触密封:间隙密封与迷宫密封的原理和应用[M].北京:机械工业出版社,1986.
- [10] Denecke J, Schramm V, Kim S, et al. Influence of rub-grooves on labyrinth seal leakage[J]. Journal of Turbomachinery, 2003, 125: 387-393.
- [11] 黄晓光,吴丁毅.直通式篦齿密封内部流动和换热实验台设计及流场分布的实验研究[J].流体机械,1999,27(5):6-9.
HUANG Xiaoguang, WU Dingyi. The design of test bench for investigating on flow and heat characteristics and the experimental investigation on flow field distribution of straight labyrinth seal[J]. Fluid Machinery, 1999, 27(5): 6-9. (in Chinese)
- [12] 黄晓光,吴丁毅.直通篦齿封严篦齿内部流动和换热的实验研究[J].推进技术,1999,20(5):80-85.
HUANG Xiaoguang, WU Dingyi. Design of experiment platform and investigation of flow field and heat transfer in straight labyrinth seal[J]. Journal of Propulsion Technology, 1999, 20(5): 80-85. (in Chinese)
- [13] Wittig S L K, Dorr L, Kim S. Scaling effects on leakage losses in labyrinth seals[J]. Journal of Engineering for Power, 1983, 105(2): 305-309.
- [14] 纪国剑,吉洪湖.直通篦齿封严结构压损规律和临界特性的研究[J].航空动力学报,2008,23(3):415-420.
JI Guojian, JI Honghu. Numerical and experimental investigation of pressure loss and critical sealing characteristics of straight-through labyrinth seals[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(3): 415-420. (in Chinese)
- [15] 何长征,张永福,韦红旗.正交实验设计及其在锅炉燃烧调整中的应用[J].能源研究与利用,2004,4(6):40-43.
HE Changzheng, ZHANG Yongfu, WEI Hongqi. The orthogonal experiment design and the application in combustion regulation test on the boiler[J]. Energy Research and Utilization, 2004, 4(6): 40-43. (in Chinese)