

基于正交试验法的刷式封严泄漏特性数值研究^{*}

刘 志¹, 吉洪湖¹, 胡娅萍¹, 杜春华¹, 力 宁², 周 坤²

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016;

2. 中国航发湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412002)

摘 要: 为了研究刷式封严的泄漏特性, 针对刷环外径 D_o , 刷环内径 D_i , 刷丝直径 d , 刷丝排列角度 β , 刷束厚度 B , 后挡板保护高度 H_f 以及上下游压差 Δp , 环境温度 T 和转子转速 N 等9个影响刷式封严泄漏特性的主要参数, 依据正交试验原理设计了32个封严结构模型, 对零间隙配合时各参数对泄漏特性的影响进行了数值研究。研究表明: 在给定的参数范围内, 上述参数对刷式封严泄漏量的影响程度有明显区别, 其影响程度由主到次的顺序为: $\Delta p \rightarrow D_i \rightarrow D_o \rightarrow B \rightarrow d \rightarrow H_f \rightarrow \beta \rightarrow T \rightarrow N$ 。根据以上正交试验结果可以推断泄漏量最小的刷式封严结构, 并用数值计算证明了其泄漏量最小。

关键词: 刷式封严; 泄漏特性; 几何参数; 气动参数; 正交试验

中图分类号: TB42 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2018) 03-0630-08

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.2018.03.017

Numerical Simulation on Leakage Characteristics of Brush Seal on Orthogonal Test Method

LIU Zhi¹, JI Hong-hu¹, HU Ya-ping¹, DU Chun-hua¹, LI Ning², ZHOU Kun²

(1. College of Energy and Power Engineer, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002, China)

Abstract: Numerical simulation was carried out with 32 models that are designed according to the principle of orthogonal test to study the effects of the main parameters including outer diameter D_o , inner diameter D_i , bristle diameter d , bristle lay angle β , bristle back width B , fence height H_f and pressure drop Δp , rotor speed N , temperature T on leakage characteristics of brush seals, when the clearance between the brush and rotor is zero. The results show that there are obvious differences between the parameters about the influence on leakage within the scope of the parameters. In all of the parameters, the rank of importance on leakage characteristics is $\Delta p \rightarrow D_i \rightarrow D_o \rightarrow B \rightarrow d \rightarrow H_f \rightarrow \beta \rightarrow T \rightarrow N$. The geometry for the least leakage can be inferred based on the above test, and it is minimum leakage by numerical simulation.

Key words: Brush seals; Leakage characteristics; Geometry parameters; Aerodynamic parameters; Orthogonal test

1 引 言

自20世纪80年代以来,刷式封严逐渐取代篦齿封严成为航空发动机主要的封严技术,而且已经进入军用航空发动机的应用阶段^[1~3]。作为一种新型

的封严技术,它的基本结构是由刷环和与之配合的转子组成,相同工况条件下,刷式封严结构的泄漏水平只有典型篦齿封严的1/2,甚至能达到1/10~1/5^[4],而且刷式封严能适应转子的径向跳动和膨胀,可以有效地减小封严装置的磨损情况。当前国内外学者

^{*} 收稿日期: 2016-10-12; 修订日期: 2016-12-13。

作者简介: 刘 志,男,硕士生,研究领域为封严技术研究。E-mail:1148396341@qq.com

对刷式封严泄漏特性的研究一般以实验为主,同时也相应地发展了两类数值计算方法,一类是有效厚度模型^[5],即直接利用计算流体动力学模拟刷丝间的流动,另一类是采用多孔介质模型^[6],数值预测刷式封严的泄漏量。多孔介质模型不关心刷丝之间的流动情况,而将整个刷束处理为多孔介质,较为简化,实际应用也就较多。

国内外众多学者对刷式封严的泄漏特性和密封机理进行了大量的研究。20世纪90年代, Bayley 和 Long 等^[7]首次采用 Darcian 多孔介质模型对刷式封严结构进行了数值研究,并与他们实验获得的泄漏量进行了对比。Dogu^[8]采用多孔介质的方法对零间隙的刷式封严结构的泄漏流动特性进行了详细的研究。Chew^[9]等以及 Chew 和 Hogg^[6]则引入同时考虑流体的惯性阻力和粘性阻力的 Non-Darcian 多孔介质模型来数值计算刷式封严的泄漏量。丁水汀等^[10]数值研究了刷式封严的流动换热特性。邱波等^[11~13]对刷式密封的泄漏特性、摩擦热效应和传热特性、接触力特性和迟滞效应3个方面的研究现状和最新进展进行了综述,还利用 Ergun 方程推导得出了基于多孔介质孔隙率的刷丝内部阻力系数的表达式,并在数值模拟中运用此表达式数值预测了刷式封严的泄漏量和压力分布,结果与实验数据^[7]吻合良好。曹广州等^[14]对刷式封严初期的泄漏特性及其影响因素开展了实验研究以及数值研究。白花蕾等^[15]也利用多孔介质模型模拟了刷式封严结构中的泄漏流动特性,并根据试验结果对计算模型进行修正,使计算结果与试验结果较好吻合。

对于刷式封严,泄漏特性的影响因素较多,本文研究的影响因素有9个,如采用传统的单因素轮换法安排数值计算算例,算例会比较多,且因素之间相互影响,并不能全面反映因素对泄漏特性的影响情况,无法对因素的影响程度进行准确分析。采用正交试验法便能克服单因素轮换法的诸多缺点,不仅能减小数值计算的算例,在计算结果的处理上也能比较全面地反映因素对泄漏特性的影响,获得因素对泄漏特性的影响程度。

影响刷式封严泄漏特性主要有几何参数和气动参数,几何参数包括刷环外径、刷环内径、刷丝直径、刷丝排列角度、后挡板保护高度、刷束厚度等,气动参数包括上下游压差、环境温度以及转子转速等。本文采用正交试验法安排数值计算算例,共设计了32个封严结构模型,利用多孔介质模型数值研究了几何参数以及气动参数对刷式封严泄漏特性的影响

程度以及影响规律,为刷式封严的结构设计提供了一定参考。

2 数值计算模型

2.1 物理模型及计算域

如图1所示为本文研究的刷式封严基本模型,其几何参数主要有刷环外径 D_o , 刷环内径 D_i , 刷丝直径 d , 刷丝排列角度 β , 刷束厚度 B 以及后挡板保护高度 H_F ; 气动参数则有上下游压差 Δp , 转子转速 N 以及环境温度 T 。本文中转子与密封装置的配合状态为零间隙配合。

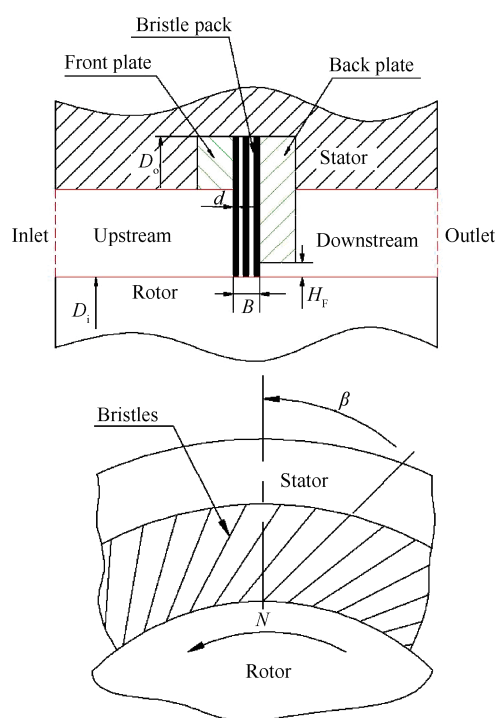


Fig. 1 Diagram of brush seal structure

如图1所示红色边界区域为本文研究的刷式封严计算域,主要由四部分组成:上游高压区域、刷束区域、后挡板保护高度区域以及下游低压区域。

2.2 边界条件

根据刷式封严的实际工作情况,本文边界条件设定如下:

出口压力为0.1MPa,进口压力根据上下游压差的范围要求而定,即 $\Delta p = p_u - p_d$, 本文计算时上下游压差取值为0.05MPa, 0.1MPa, 0.2MPa, 0.3MPa, 故进口压力分别为0.15MPa, 0.2MPa, 0.3MPa, 0.4MPa; 泄漏流体处理为理想气体,其密度随压力温度发生变化;气体温度为进口边界与出口边界的温度,依照范围来取,分别为400℃, 450℃, 500℃, 550℃;转子表面和静止表面采用无滑移边界条件,且为绝热壁面,转

子转速范围 20.9~45kr/min, 分别取 20.9kr/min, 24.035kr/min, 38kr/min, 45kr/min; 刷束区域处理为多孔介质区域。

2.3 多孔介质模型

数值计算时, 刷式封严的泄漏流场可以分为两个区域, 即刷束区域和刷束以外的区域。刷束以外的区域采用传统的 CFD 技术进行处理, 而刷束区域是由大量的刷丝紧密排列而成, 流体在刷丝之间的流动情况也十分复杂, 研究学者发现, 流体在刷束区域内的流动形式与多孔介质中的流动相似, 因此将刷束区域处理为多孔介质模型。

对于刷束以外的区域采用传统的流动传热控制方程, 在此不一一赘述。

对于刷束区域, 采用以下稳态质量、动量、能量守恒控制方程

$$\nabla(\rho \varepsilon_a \mathbf{V}) = 0 \quad (1)$$

$$\rho(\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{V} + S_v + S_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho c_p u_i T)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

泄漏气体满足理想气体状态方程

$$p = \rho R T \quad (4)$$

式中 ε_a 为多孔介质的面孔隙率; S_v 为广义牛顿粘性项; S_i 为多孔介质附加的动量源项, 表示由多孔介质引起的惯性阻尼和内部阻尼; k_{eff} 为多孔介质的有效导热系数, 是综合考虑多孔介质固架与内部空隙的有效导热系数, 其计算表达式为

$$k_{\text{eff}} = \varepsilon_a k_f + (1 - \varepsilon_a) k_s \quad (5)$$

式中 k_f 为流体的导热系数; k_s 为固体的导热系数。

本文采用 RNG 形式的 k - ε 湍流模型对上述方程进行求解, 该模型能较为准确地求解近壁区域的低雷诺数流动的问题。曹广州等^[17]采用该湍流模型的数值计算结果能与实验数据较好地吻合。

多孔介质的孔隙率是指多孔介质中空隙容积与多孔介质总容积之比。面孔隙率则是指多孔介质截面上, 空隙截面积与总截面积之比, 由于在各个不同的截面上可能有所不同, 故使用定向面孔隙率^[16]时, 往往需说明其所在截面的法线方向。结合刷束的结构特点, 曹广州、吉洪湖等^[17]推导出刷束区域轴向、径向以及周向三个方向的定向面孔隙率分别为

$$\varepsilon_{ax} = 1 - \frac{nd^2 \cdot L}{4(r_o^2 - r_i^2) \cdot B \cdot \cos \beta} \quad (6)$$

$$\varepsilon_{ar} = 1 - \frac{nd^2}{8 \cdot r \cdot B \cdot \cos \beta} \quad (7)$$

$$\varepsilon_{a\theta} = 1 - \frac{nd^2 \cdot L}{4(r_o^2 - r_i^2) \cdot B \cdot \cos \beta} \quad (8)$$

式中 d 为刷丝直径 (mm); n 为刷丝的总根数; r_o 为刷封外环半径 (mm), 即 $r_o = D_o/2$; r_i 为刷封内环半径 (mm), 即 $r_i = D_i/2$, 在零间隙配合时即为转子外径; L 为刷丝长度 (mm); B 为刷束厚度 (mm); β_i 为任意径向位置处刷丝与径向位置的夹角 ($^\circ$); β 为刷丝排列角度 ($^\circ$); r 为径向位置 (mm)。

上述中刷丝的总根数 n 可由计算得到

$$n = \left(1 + \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{B}{d} - 1 \right) \right) \cdot \left(\frac{\pi D_i}{d} \cos \beta \right) \quad (9)$$

由式 (5)~(7) 可知, 刷束的孔隙率主要由 $d, n, r_o, r_i, r, \beta, \beta_i$ 和 B 等参数决定, 当刷式封严的结构设计确定后, $d, n, r_o, r_i, r, \beta, \beta_i$ 等结构参数也就确定了, 此时刷束厚度 B 就成为唯一一个确定孔隙率大小的参数。 B 的大小不仅与刷丝直径 d 和刷丝层数 i 有关, 还受到刷丝排列状态的影响。刷丝排列状态又受到多方面的影响, 如刷环制作工艺以及刷束在工作中承受的压差 Δp 。曹广州、吉洪湖等^[17]详细分析了刷束孔隙率的确定方法并根据实验结果确定了该孔隙率, 从而对多孔介质模型进行修正, 修正后的多孔介质数值计算结果可以与实验数据很好地吻合。本文也采用上述方法对多孔介质模型进行修正, 保证数值计算的可靠性。图 2 给出了模型修正后数值计算的结果, 并与实验数据进行了比较。由图可得数值计算结果能较好地与实验数据吻合。

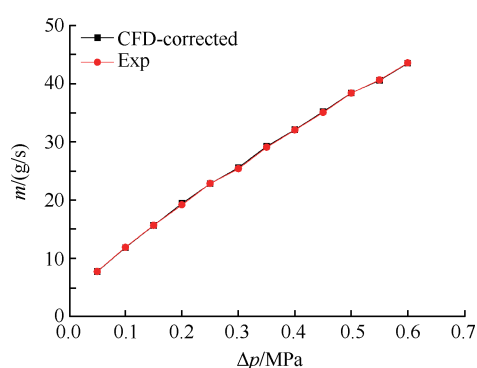


Fig. 2 Computational results with correction compare with experimental results

如图 3 所示, AB 为单根刷丝, 其中 A 为刷丝严内环的接触点, B 为刷丝与外环的接触点。刷丝长度为

$$L = \sqrt{r_o^2 - r_i^2 \sin^2 \beta} - r_i \cos \beta \quad (10)$$

在任意径向位置 r 处的角度为

$$r \sin \beta = r_i \sin \beta_i \quad (11)$$

动量源项 S_i 由粘性损失项和内部损失项组成, 即

$$S_i = -\left(\frac{\mu}{\alpha}V + \frac{1}{2}C_2\rho|V|V\right) \quad (12)$$

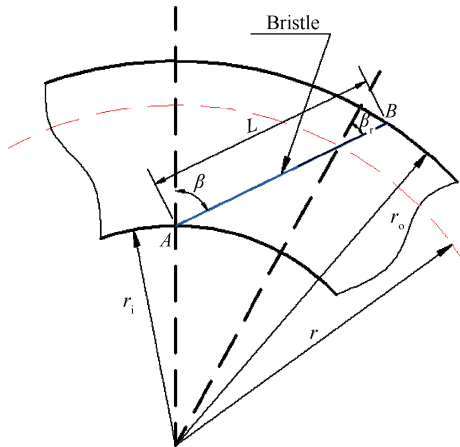


Fig. 3 Diagram of bristle lay angle

式中,等号右边第一项为粘性损失项,第二项为内部损失项。 $1/\alpha$ 为多孔介质的粘性损失系数, C_2 为多孔介质内部损失系数,二者可以由以下经验公式^[18]求得

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{150(1-\varepsilon_a)^2}{d^2 \varepsilon_a^3} \quad (13)$$

$$C_2 = \frac{3.5(1-\varepsilon_a)}{d \varepsilon_a^3} \quad (14)$$

数值计算时,采用 Fluent 自带的 UDF(User define function)功能对多孔介质模型的体孔隙率、不同方向的粘性损失系数和内部损失系数进行赋值。体孔隙率根据公式(5)计算;粘性损失系数 $1/\alpha$ 和内部损失系数 C_2 根据公式(11)、(12)计算,式中的面孔隙率与方向有关。

2.4 网格划分与网格独立性验证

图4为本文数值计算模型网格图。计算模型网格的密度因位置不同而不同,在轴向位置上,刷束区域和后挡板保护高度区域的密度最大,上下游区域的密度次之;在径向位置上,加密了转子壁面附近的网格。网格经过独立性验证,网格总量约为4万左右。

2.5 用正交试验法制定的计算方案

影响刷式封严的因素主要有9个,每个参数的变

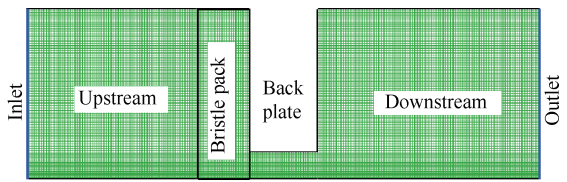


Fig. 4 Meshes of computing model

化范围: $D_o=119 \sim 139\text{mm}$; $D_i=94 \sim 114\text{mm}$; $d=0.07 \sim 0.15\text{mm}$; $\beta=40^\circ \sim 60^\circ$; $B=0.9 \sim 1.5\text{m}$; $H_f=0.8 \sim 2\text{mm}$; $\Delta p=0 \sim 0.3\text{MPa}$; $N=20.9 \sim 45\text{kr/min}$; $T=350 \sim 550^\circ\text{C}$ 。以泄漏量 m 为试验指标,研究上述因素对刷式封严泄漏特性的影响。每个因素选取4个水平,详见表1。

根据选定的影响参数,若是进行全面试验,需要 $4^9=242144$ 个数值计算模型,计算量非常大。现在采用正交试验法,选择正交表 $L_{32}(4^9)$ (表2中的方案1~32),则每次试验方案对应的数值计算模型由9个因素的水平共同确定,整个试验只需研究32个数值计算模型,大大降低了计算成本,节约了时间^[19]。

3 计算结果分析

本文的数值计算方案是依据正交试验原理设计的,试验结果也应采用正交试验典型的分析方法:直观分析法和方差分析法。

3.1 泄漏流动流场分析

如图5所示为刷式封严结构泄漏流动的压力分布,由图可知,整个刷式封严中的压降主要发生在刷束靠近转子表面区域,从轴向来,前半部分的压力梯度较小,后半部分压力梯度较大。从径向看,刷束区域的压力沿径向升高。

如图6所示为刷式封严结构泄漏流动的速度场,由图可知刷束区域的流动阻力较大,所以速度较小,刷束上部区域几乎没有流体流动,流体逐渐向刷束靠近转子表面区域流动。流体从后挡板保护高度区域流向下游低压区域会由于突扩而存在明显的回流。由图可见,流体主要通过后挡板与转子之间的间隙区域泄漏。

Table 1 Levels of factors

Levels	Outer diameter	Inner diameter	Bristle diameter	Bristle lay angle	Bristle pack width	Fench height	Temperature	Pressure difference	Rotor speed
	D_o/mm	D_i/mm	d/mm	$\beta/(^\circ)$	B/mm	H_f/mm	$T/^\circ\text{C}$	$\Delta p/\text{MPa}$	$N/(r/\text{min})$
1	122	94	0.09	40	0.9	0.8	400	0.05	20900
2	124	104	0.11	45	1.1	1.0	450	0.10	24035
3	130	110	0.13	50	1.3	1.2	500	0.20	38000
4	136	112	0.15	55	1.5	1.5	550	0.30	45000

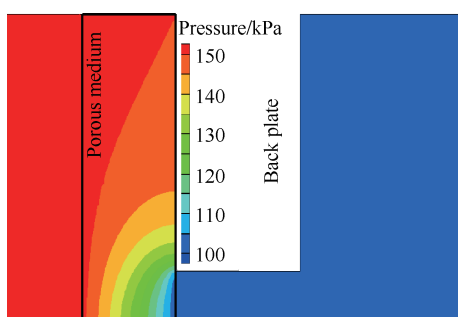


Fig. 5 Distribution of pressure

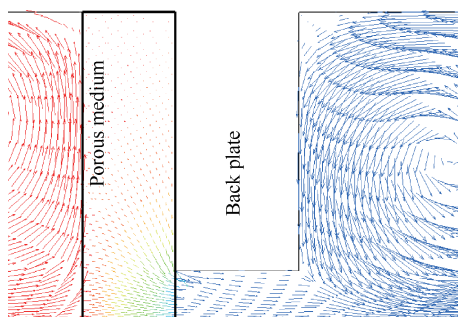


Fig. 6 Velocity vector of leakage

3.2 泄漏特性直观分析

表2~4给出了32个正交试验方案的数值计算结果和直观分析结果。现在,以直观分析法对数值计算结果作进一步的分析。

首先,需要计算每个因素不同水平下试验指标的平均值 K ,其定义式如下

$$K_i^{(X)} = \frac{\sum_{j=1}^n m_j^{(X)}}{n} \quad (15)$$

式中 X 代表某一因素; i 为因素的水平数, $i=1,2,3,4$; $K_i^{(X)}$ 为因素 X 取第 i 个水平时,试验指标的平均值; $m_j^{(X)}$ 为因素 X 取第 i 个水平时,数值计算所得到的泄漏量; n 为因素 X 取第 i 个水平时所有正交试验方案的个数。

然后根据得到的 K 值,以泄漏量 m 为纵坐标,每个因素的水平值为横坐标,得到泄漏量随各因素水平变化的趋势图,如图7所示。

观察图7可以发现,每个因素水平变化对泄漏量的影响趋势具有明显的区别。

(1)随着刷环外径的增大,刷式封严的泄漏量总体呈增大的趋势,这是因为刷环外径增大,由公式(6)~(9)可知多孔介质模型的孔隙率有所变大。

(2)随着刷环内径的增大,刷式封严的泄漏量也会随之减小。这是因为刷环内径增大,由公式(6)~(9)可知多孔介质模型的孔隙率有所变小。

(3)随着后挡板保护高度的增大,泄漏流体的流

通面积增大,刷式封严的泄漏量也会随之增大。

(4)随着刷丝直径的增大,刷式封严的泄漏量总体呈增大的趋势,这是因为刷丝直径增大,由公式(9)可知其他条件不变时,刷丝总根数是减小的,根据公式(6)~(8)可知多孔介质模型的孔隙率会有所增加。

(5)随着刷式排列角度的增加,刷式封严泄漏量也会随之减小。这是因为刷丝排列角度增大,由公式(9)可知其他条件不变时,刷丝总根数是减小的,由公式(6)~(8)可知多孔介质模型的孔隙率有所减小。

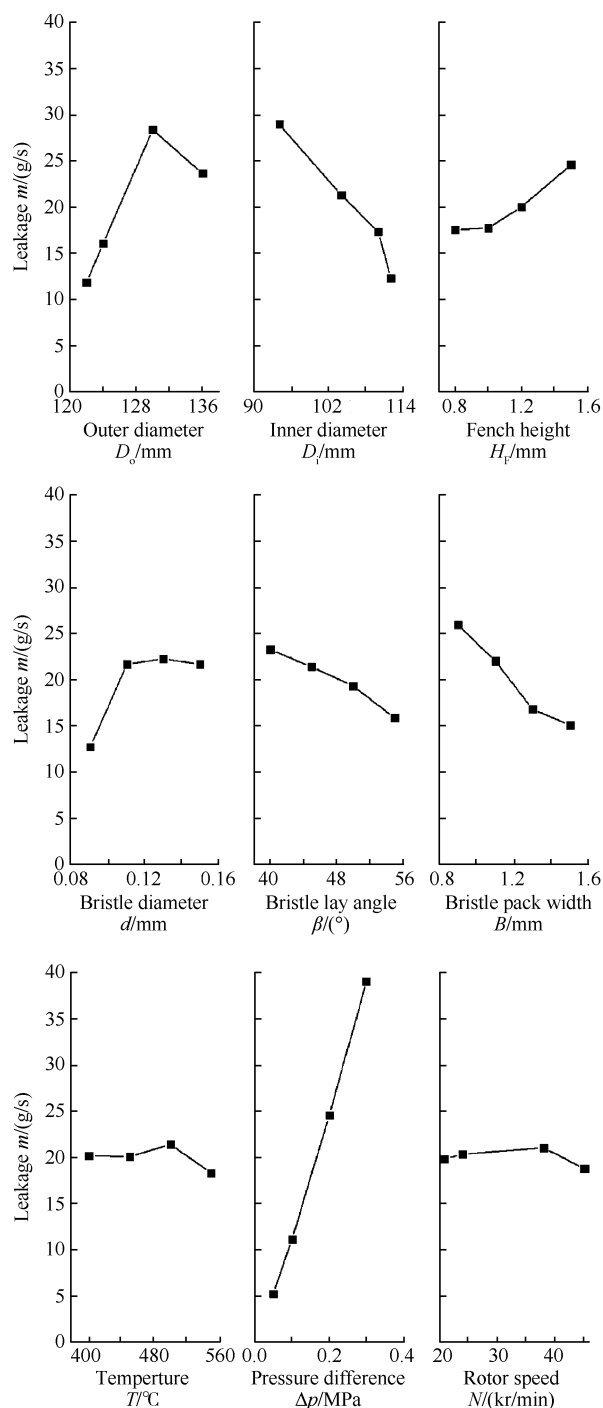


Fig. 7 Variation of leakage with changes in the level of factors

Table 2 Results of orthogonal test

Cases	Geometry parameters					Aerodynamic parameters				Leakage
	D_o/mm	D_i/mm	d/mm	$\beta/(\text{^\circ})$	B/mm	H_f/mm	$T/\text{^\circ C}$	$\Delta p/\text{MPa}$	$N/(\text{r/min})$	$m/(\text{g/s})$
1	122	94	0.09	40	0.9	0.8	400	0.05	20900	5.04
2	122	104	0.11	45	1.1	1.0	450	0.10	24035	7.20
3	122	110	0.13	50	1.3	1.2	500	0.20	38000	14.27
4	122	112	0.15	55	1.5	1.5	550	0.30	45000	17.24
5	124	94	0.11	45	1.3	0.8	500	0.30	45000	41.69
6	124	104	0.09	40	1.5	1.0	550	0.20	38000	9.93
7	124	110	0.15	55	0.9	1.2	400	0.10	24035	8.53
8	124	112	0.13	50	1.1	1.5	450	0.05	20900	1.63
9	130	94	0.13	55	0.9	1.0	450	0.20	45000	40.10
10	130	104	0.15	50	1.1	0.8	400	0.30	38000	48.02
11	130	110	0.09	45	1.3	1.5	550	0.05	24035	2.48
12	130	112	0.11	40	1.5	1.2	500	0.10	20900	10.58
13	136	94	0.15	50	1.3	1.0	550	0.10	20900	21.18
14	136	104	0.13	55	1.5	0.8	500	0.05	24035	6.46
15	136	110	0.11	40	0.9	1.5	450	0.30	38000	60.36
16	136	112	0.09	45	1.1	1.2	400	0.20	45000	19.12
17	122	94	0.09	55	1.1	1.5	500	0.10	38000	10.92
18	122	104	0.11	50	0.9	1.2	550	0.05	45000	3.99
19	122	110	0.13	45	1.5	1.0	400	0.30	20900	26.15
20	122	112	0.15	40	1.3	0.8	450	0.20	24035	9.95
21	124	94	0.11	50	1.5	1.5	400	0.20	24035	32.04
22	124	104	0.09	55	1.3	1.2	450	0.30	20900	22.82
23	124	110	0.15	40	1.1	1.0	500	0.05	45000	4.63
24	124	112	0.13	45	0.9	0.8	550	0.10	38000	7.16
25	130	94	0.13	40	1.1	1.2	550	0.30	24035	66.35
26	130	104	0.15	45	0.9	1.5	500	0.20	20900	52.87
27	130	110	0.09	50	1.5	0.8	450	0.10	45000	3.92
28	130	112	0.11	55	1.3	1.0	400	0.05	38000	2.99
29	136	94	0.15	45	1.5	1.2	450	0.05	38000	14.69
30	136	104	0.13	40	1.3	1.5	400	0.10	45000	19.39
31	136	110	0.11	55	1.1	0.8	550	0.20	20900	18.23
32	136	112	0.09	50	0.9	1.0	500	0.30	24035	29.79
33	122	112	0.09	55	1.5	0.8	550	0.05	45000	1.31

Table 3 Level's intuitive analysis of leakage

Levels	Factors								
	$K^{(D_o)}$	$K^{(D_i)}$	$K^{(d)}$	$K^{(\beta)}$	$K^{(B)}$	$K^{(H_f)}$	$K^{(T)}$	$K^{(\Delta p)}$	$K^{(N)}$
1	0.01184	0.02900	0.01300	0.02290	0.02598	0.01756	0.02016	0.00524	0.01981
2	0.01605	0.02133	0.02213	0.02142	0.02201	0.01775	0.02008	0.01111	0.02035
3	0.02841	0.01732	0.02268	0.01935	0.01685	0.02004	0.02140	0.02456	0.02104
4	0.02365	0.01231	0.02214	0.01591	0.01513	0.02462	0.01832	0.03905	0.01878

Table 4 Range analysis of leakage

$R^{(D_o)}$	$R^{(D_i)}$	$R^{(d)}$	$R^{(\beta)}$	$R^{(B)}$	$R^{(H_f)}$	$R^{(T)}$	$R^{(\Delta p)}$	$R^{(N)}$
0.01657	0.01669	0.00968	0.00699	0.01085	0.00706	0.00308	0.03381	0.00226

(6)随着刷束厚度的增加,刷式封严的泄漏量也会减小。这是因为刷束厚度的增大,由公式(9)可知其他条件不变时,刷丝总根数是增大的,由公式(6)~(8)可知多孔介质模型的孔隙率有所减小。

(7)随着环境温度的升高,刷式封严泄漏量总体呈减小的趋势,这是因为数值计算时,泄漏流体的密度发生了变化。

(8)随着上下游压差的增大,刷式封严泄漏量明显增加。

(9)随着转子转速的增大,刷式封严泄漏量总体上呈减小的趋势。

上述关于因素对泄漏量的影响趋势分析与曹广州等^[16]的研究结果总体上是一致的,但由于研究方法不同,变化的具体形式不一样。从图6可以看出 $(D_o)_1, (D_i)_4, H_F, d_1, \beta_4, B_4, T_4, \Delta p_1, N_4$ (该处各参数的数字下标表示参数所取得水平数,例如 d_1 表示 d 因素取第一个水平,下同)的泄漏量是最小的,因此依据正交试验分析理论可以推断出泄漏量最小的结构和气动参数组合为: $D_o=122\text{mm}; D_i=112\text{mm}; H_F=0.8\text{mm}; d=0.09\text{mm}; \beta=55^\circ; B=1.5\text{mm}; T=550^\circ\text{C}; \Delta p=0.05\text{MPa}; N=45\text{kr/min}$ 。

表2中的方案33就是根据以上推断的几何和气动参数组合设计的算例,其计算的刷式封严泄漏量为 1.31g/s ,与表2中其他方案的泄漏量相比确实最小,表明以上推断是合理的。

如表3所示为泄漏量水平直观分析表。在直观分析法中,因素的极差 R 是反映该因素对试验指标影响程度的重要指标,其定义如下

$$R=\max\{K_i^{(x)}\}-\min\{K_i^{(x)}\} \quad i=1,2,3,4 \quad (16)$$

一般情况下,每个因素的极差是不相等的,这也说明每个因素对试验指标的影响程度是不一样的。 R 的大小也就反映了因素对试验指标的影响程度, R

值越大说明该因素对试验指标的影响越大。

表4则给出了各因素的极差大小,由表中数据可以很直观地看出: $R^{(\Delta p)} > R^{(D_i)} > R^{(D_o)} > R^{(B)} > R^{(d)} > R^{(H_F)} > R^{(\beta)} > R^{(T)} > R^{(N)}$,因此各因素水平变化对泄漏量的影响程度由大到小的顺序依次为 $\Delta p \rightarrow D_i \rightarrow D_o \rightarrow B \rightarrow d \rightarrow H_F \rightarrow \beta \rightarrow T \rightarrow N$ 。

图8为通过Isight正交分析软件得到的各因素对泄漏量的影响程度分布图。图中蓝色代表泄漏量随因素的增大而增大,红色代表泄漏量随着因素的增大而减小。因素对泄漏量的影响程度以及影响规律的分析与前面一致。图中可知压差对泄漏量影响最大,因为压差是流动的主要驱动力;从图6可以看出气流主要通过刷束靠近转子表面的区域泄漏,刷束上部区域仅有少量气流流动,所以刷环内径对泄漏量的影响要大于刷环外径。

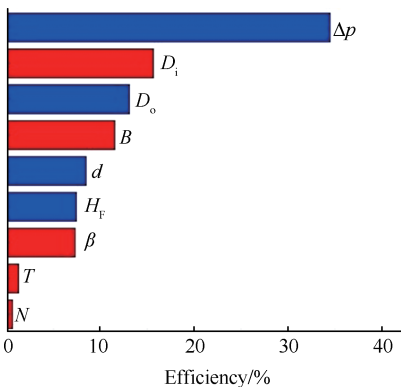


Fig. 8 Distribution of factors influence on leakage

3.3 泄漏特性方差分析

本文依据正交试验分析原理,以均方差最小的因素 N 为基准(由上面分析可认为 N 是对泄漏量影响不显著的因素),采用方差分析法,对其他因素进行显著性检验^[20],结果如表5所示,表中 SS 表示偏差平方和, df 表示自由度, MS 表示均方差, F 表示统计量,

Table 5 Variance analysis of leakage

Parameters	SS	df	MS	F	Significance
D_o	0.155448	3	0.005149	1.20374	Significant
D_i	0.015175	3	0.005058	1.182498	Significant
H_F	0.013306	3	0.004435	1.036854	General
d	0.013834	3	0.004611	1.077974	General
β	0.013267	3	0.004422	1.033811	General
B	0.013965	3	0.004655	1.088177	General
T	0.012866	3	0.004289	1.002537	General
Δp	0.023681	3	0.007894	1.845287	Very significant
N	0.012833	3	0.004278	—	—
e	0.012833	3	0.004278	—	—

Significance 表示因素对泄漏量的影响程度,从表中可知各因素对泄漏量的显著性影响程度不同,因素 Δp 影响非常显著,因素 D_i 、 D_o 影响显著,因素 B 、 d 、 H_f 、 β 、 T 的影响一般,因素 N 影响不显著,这与图 8 的分析一致。

4 结 论

本文通过正交试验法,设计 32 个刷式封严结构对刷式封严的泄漏特性进行了数值研究,分析了几何参数以及气动参数对刷式封严泄漏量的影响规律,得到如下结论:

(1) 刷式封严几何参数和气动参数对泄漏量的影响趋势有明显区别。几何参数中,随着 D_o 、 d 、 H_f 的增大,泄漏量总体上逐渐增大;随着 D_i 、 β 、 B 的增大,泄漏量总体上逐渐减小。气动参数中,随着 Δp 的增大,泄漏量明显增加;随着 N 、 T 的增大,泄漏量总体上呈减小趋势。

(2) 根据正交试验法的直观分析原理,泄漏量最小的刷式封严结构为: $D_o=122\text{mm}$; $D_i=114\text{mm}$; $H_f=0.8\text{mm}$; $d=0.09\text{mm}$; $\beta=55^\circ$; $B=1.5\text{mm}$ 。

(3) 根据极差分析和显著性检验分析,可知各因素水平变化对泄漏量的影响程度不同。几何参数对泄漏量的影响由主到次的顺序为: $D_i \rightarrow D_o \rightarrow B \rightarrow d \rightarrow H_f \rightarrow \beta$, 刷环内径 D_i 和刷环外径 D_o 对泄漏量有显著影响,刷束厚度 B , 刷丝直径 d , 后挡板保护高度 H_f , 刷丝排列角度 β 对泄漏量的影响一般;气动参数对泄漏量的影响由主到次的顺序为: $\Delta p \rightarrow T \rightarrow N$, 上下游压差 Δp 的影响非常显著,环境温度 T 影响一般,转子转速 N 的影响最小。

参考文献:

- [1] 《航空发动机设计手册》总编委会. 航空发动机设计手册: 第十二册[M]. 北京: 航空工业出版社, 2002: 190, 300-306.
- [2] 何立东, 袁 新, 尹 新. 刷式密封结构研究的进展[J]. 中国电机工程学报. 2001, 21(12): 28-32.
- [3] 胡广阳. 航空发动机密封技术应用研究[J]. 航空发动机, 2012, 38(3): 1-4.
- [4] Dinc S, Demiroglu M, Turnquist N. Fundamental Design Issues of Brush Seals for Industrial Application[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2002, 124: 293-300.
- [5] Chupp R E, Holle G F. Generalizing Circular Brush Seal Leakage Through a Randomly Distributed Bristle Bed[J]. *Journal of Turbomachinery*, 1996, 118: 153-161.
- [6] Chew J W, Hogg S I. Porosity Modeling of Brush Seals[J]. *ASME Journal of Tribology*, 1997, 119: 769-775.
- [7] Bayley F J, Long C A. A Combined Experimental and Theroretical-Study of Flow and Pressure Distributions in a Brush seal[J]. *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1993, 115(2): 404-410.
- [8] Dogu Y. Investigation of Brush Seal Flow Characteristics Using Bulk Porous Medium Approach[J]. *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2005, 127(1): 136-144.
- [9] Chew J W, Lapwortg B L, Millener P J. Mathematical Modeling of Brush Seals[J]. *Int.J. Heat Fluid Flow*, 1995, 16(6): 493-500.
- [10] 丁水汀, 陶 智, 徐国强. 刷式封严流动和换热的数值模拟[J]. 推进技术, 1999, 20(1): 65-67. (DING Shui-ting, TAO Zhi, XU Guo-qiang. Numerical Simulation on Fluid Flow and Heat Transfer of a Brush Seal Configuration [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1999, 20(1): 65-67.)
- [11] 邱 波, 李 军. 刷式密封流动与换热及力学特性的研究进展[J]. 热力透平, 2013, 42(3): 141-149.
- [12] LI J, QIU B. Experimental and Numerical Investigations on the Leakage Flow Characteristics of the Labyrinth Brush Seal[R]. *ASME GT 2012-69293*.
- [13] 邱 波, 李 军. 刷式密封传热特性研究[J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(9): 94-100.
- [14] 曹广州, 吉洪湖, 纪国剑. 刷式封严初期使用特性的实验和数值研究[J]. 推进技术, 2010, 31(4): 478-482. (CAO Guang-zhou, JI Hong-hu, JI Guo-jian. Experimental and Numerical Study on the Leakage Characteristics of Brush Seals at the Early Stage of Operating [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2010, 31(4): 478-482.)
- [15] 白花蕾, 王 伟, 信 琦. 刷式封严结构泄漏特性的数值研究[J]. 航空发动机, 2013, 39(5): 34-36.
- [16] 林瑞泰. 多孔介质传热传质引论[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [17] 曹广州. 模拟刷式封严泄漏流动的多孔介质模型[J]. 航空动力学报, 2008, 23(3): 443-447.
- [18] FLUENT User'Guide[Z]. *Fluent Inc.*, 2003.
- [19] 李云雁, 胡传荣. 试验设计与数据处理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [20] 张 勃, 吉洪湖, 杜发青. 基于正交法的直通篦齿封严齿形几何参数对换热特性影响的试验研究[J]. 机械工程学报, 2013, 49(4): 134-139.

(编辑: 史亚红)