

基于多孔介质模型的指尖密封 泄漏流动分析

白花蕾, 王伟, 张振生, 胡广阳

(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: 将指尖密封处理为多孔介质, 把压力梯度作为多孔介质动量方程中的源项, 根据试验结果确定了源项中的系数, 结合指尖密封的结构参数提出了用于指尖密封泄漏的多孔介质模型, 利用该模型计算结果与试验结果吻合较好, 证明利用该模型模拟指尖密封泄漏是可行的. 流场计算结果表明: 指尖密封与转子接触部分的孔隙率对泄漏影响比较大, 指尖密封的承压部分主要为后挡板内径以下区域.

关 键 词: 密封装置; 指尖密封; 多孔介质; 泄漏流动; 数值模型

中图分类号: V231; TB42

文献标志码: A

Analysis of leakage flow through finger seal based on porous medium

BAI Hua-lei, WANG wei, ZHANG Zhen-sheng, HU Guang-yang

(Shenyang Engine Design and Research Institute,

Aviation Industry Corporation of China, Shenyang 110015, China)

Abstract: The finger seal was treated as porous medium. The pressure gradient was regarded as the source term of momentum equation. The coefficient in source term was confirmed by experimental results. A porous medium model for the leakage through finger seal was put forward by combining with the finger seal configuration. The computational results showed a good agreement with the experimental results, the model was proved to be practicable for simulating the leakage of finger seal. Flow field computational results show that the influence of the porosity of finger contact pad on leakage is great, and the pressure grads in the finger seal are mainly distributed below the inner diameter of aft cover plate.

Key words: seal device; finger seal; porous medium; leakage flow; numerical model

指尖密封是新发展起来的一种新型密封技术, 主要用于航空发动机中的压气机和涡轮的级间气路密封, 同时也可以用于主轴承腔的润滑油密封. 国外试验结果表明^[1-2], 指尖密封的泄漏量为4齿篦齿密封的10%~20%; 和刷式密封相比, 在相近的密封效果下, 指尖密封的制造成本仅为刷式密封的40~50%, 而且可以避免刷式密封的断丝在油封(例如主轴承腔的润滑油密封)中造成的严重磨损问题. 正是相比较于刷式密封和篦

齿密封而具有良好的“性价比”, 近年来国内外学者对指尖密封都已展开了研究工作^[3-5].

在泄漏特性的数值研究方面, 国内外的研究多为动压型非接触式指尖密封. 由于指尖密封在实际工作中为交错排列, 其内部的流动难以模拟, Braun等^[6]首次对动压型非接触式指尖密封泄漏进行了数值计算, 对计算模型进行了简化, 对一组顺排的指尖密封进行数值模拟. Hendricks等^[7]第1次对接触式指尖密封进行了数值计算, 文中

使用的计算模型与 Braun, Hendricks 等^[8-9]针对刷式密封提出的计算模型相似, 计算结果与两层指尖密封片的试验结果比较吻合. 国内也主要是研究了浮升力垫片与转子之间的间隙对泄漏的影响^[10-12]. 对于接触式指尖密封, 张延超等^[13]研究了由于迟滞和磨损引起的间隙对泄漏的影响. 对于指尖密封中“指”之间的间隙对泄漏量的影响还未见报道. 指尖密封在实际工作时, 由于过盈量和转子径向变形指尖会出现翘曲, 造成沿“指”之间的间隙泄漏. 白花蕾等^[14]试验研究了指梁之间间隙对泄漏的影响比较大. 本文把指尖密封作为多孔介质模型, 考虑了接触式指尖密封指梁之间的间隙以及指尖密封与转子之间的间隙对泄漏的影响, 对指尖密封进行了泄漏特性的数值分析.

1 指尖密封基本结构

如图1所示, 典型的指尖密封结构是由前挡板、隔片、指尖密封片和后挡板通过铆钉联结而成. 指尖密封片是在一个薄片圆环上按一定的曲线和分布规律切割出许多小缝隙, 形成一个个细长条, 这些细长条在根部相连在一起, 宛如一个个“手指”, 其自由端(指尖靴)与密封圆周面根据需要形成间隙或过盈配合, 起到密封作用.

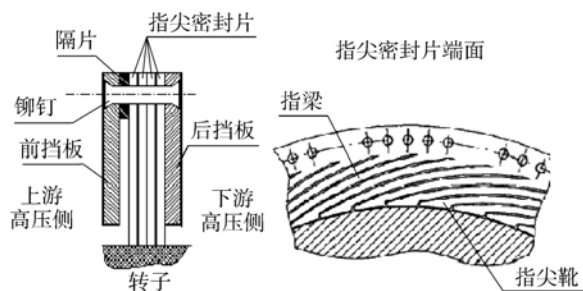


图1 指尖密封结构

Fig. 1 Finger seal structure

2 多孔介质模型的建立

2.1 多孔介质处理

指尖密封与刷式密封结构相似, 只不过是排列整齐的“刷片”代替杂乱无章的刷丝而已, 将刷式密封处理为多孔介质的研究已经很多^[15-17], 而指尖密封中“指”之间的间隙类似于多孔介质中孔隙, 指尖密封的泄漏具有多孔介质渗透流的特点, 因此可以把指尖密封当作多孔介质来处理.

对于指尖密封的多孔介质模型, 把泄漏气体

作为理想可压缩气体, 满足以下稳态的控制方程^[18-20].

连续方程

$$\operatorname{div}(\rho \epsilon_s \mathbf{V}) = 0 \quad (1)$$

动量方程

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

理想气体状态方程

$$p = \rho RT \quad (3)$$

式中 ρ 为气体密度; ϵ_s 为多孔介质的面孔隙率; $\mathbf{V}$ 为速度矢量; p 为气体压力; μ 为流体黏度; S_v 为其他没有包括的黏性项之和, 或称广义源项; S_i 为多孔介质附加的动量源项; R 为气体常数; T 为温度.

在 j 方向上的广义源项表达式为

$$S_{vj} = \operatorname{grad} \left[\mu \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial x_j} \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (\lambda \operatorname{div} \mathbf{V}) \quad (4)$$

式中 λ 为平均黏度.

多孔介质附加的源项由两部分组成, 一部分是黏性损失项, 另一部分是内部损失项^[18], 即

$$S_i = - \left[\frac{\mu}{\alpha} \mathbf{V} + \frac{1}{2} C_2 \rho |\mathbf{V}| \mathbf{V} \right] \quad (5)$$

式中, 等号右边第1项为黏性损失项, 第2项为内部损失项, $1/\alpha$ 为多孔介质的黏性损失系数, C_2 为多孔介质的内部损失系数.

文献[21]提出了适用于刷式密封结构的压力梯度公式

$$\frac{dp}{dz} = - \left[5m \frac{S^2}{\epsilon^3} \mu \mathbf{V} + \frac{n}{8} \cdot \frac{S}{\epsilon^3} \rho |\mathbf{V}| \mathbf{V} \right] \quad (6)$$

在文献[18]中提到在多孔介质单元中, 动量源项对于压力梯度的贡献比较大, 鉴于式(5)和式(6)的相似性, 对比这两个公式, 把式(6)中的压力梯度作为式(5)中的源项, 可以得出

$$\begin{cases} \frac{1}{\alpha} = 5m \frac{S^2}{\epsilon^3} \\ C_2 = \frac{n}{8} \cdot \frac{S}{\epsilon^3} \end{cases} \quad (7)$$

式中 ϵ 为孔隙率, S 为单位体积的润湿面积, m 和 n 为系数, 由试验确定.

在多孔介质中, 孔隙率 ϵ 表示多孔介质中空隙所占份额的相对大小. 体积孔隙率 ϵ_v 为多孔介质中空隙容积 V_v 与多孔介质总容积 V_t 之比, 面孔隙率 ϵ_s 为指在垂直某方向的截面上, 空隙截面积与总截面积之比, 故一般又称定向面孔隙率. 一般来说, 作为一级近似, 可认为 $\epsilon = \epsilon_v = \epsilon_s$.

2.2 孔隙率和润湿面积的确定

由于指尖密封在实际应用中会发生变形, 很

难确定其实际孔隙率,但是理想孔隙率比较容易求得,本文就用理想孔隙率代替实际孔隙率,误差可以由 m 和 n 两个系数通过试验结果与计算结果对比来修正. 结合指尖密封的结构特点,可以推导指尖密封的理想孔隙率 ϵ 和单位体积的润湿面积 S ,理想孔隙率 ϵ 和单位体积的润湿面积 S 根据试验件的设计方法不同,计算公式也不同,概括的公式如下:

$$\epsilon = \frac{(V_f + V_p) \cdot N}{V_{fs}} \quad (8)$$

$$S = \frac{S_f \cdot N}{V_{fs}} \quad (9)$$

式中 V_f 为两个“指”之间间隙的体积; V_p 为由于指尖变形而形成的间隙,本文只考虑了指尖靴部由于过盈和转子径向变形造成间隙的体积; N 为单个指尖密封片上指的个数; V_{fs} 为单个指尖密封片的体积; S_f 为 1 个指的表面积.

为了用试验结果对计算结果进行修订,本文研究中的指尖密封结构与文献[14]中试验所用指尖密封结构相同. 指尖密封片轴向为 4 片,每片上有 72 个指,单片厚度为 0.3 mm,“指”之间的间隙尺寸见图 2 和表 1,其中指尖密封 F1, F2 和 F3 指梁之间的间隙不同.

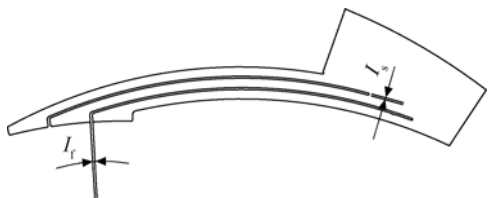


图 2 指尖密封示意图

Fig. 2 Sketch map of finger seal

表 1 指尖密封间隙尺寸

Table 1 Clearance of finger seal

类型	间隙 I_s/mm	角度 $I_f/(\circ)$
F1	0.3	0.2
F2	0.3	0.3
F3	0.4	0.3

在过盈配合时指尖靴由于前后变形不一致会形成泄漏通道,变形可通过 ANSYS 软件给定过盈量计算得出,见图 3. 在本文研究中,根据转子跳动量选取过盈量为 0.1 mm,指尖靴前端最大变形为 0.02 mm,将指尖靴部的变形间隙近似为三角形即可计算出变形间隙的体积.

在计算时,把指梁部分和指尖靴部的孔隙率 ϵ 和单位体积的润湿面积 S 分开计算,其中指尖靴部的空隙包括由于过盈而产生的间隙.

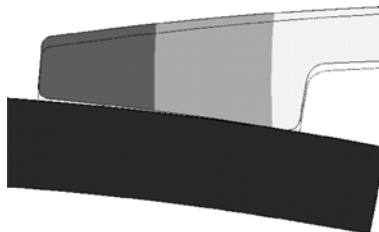


图 3 指尖靴部的变形

Fig. 3 Finger contact pad displacement

3 计算模型

指尖密封的计算模型主要分为两个区域,指尖密封区域和指尖密封以外的区域. 指尖密封以外的区域采用传统的 CFD 技术进行处理,对于指尖密封区域,采用 FLUENT 软件中的多孔介质模型. 在 FLUENT 软件中,多孔介质时在动量方程中增加了附加的动量源项 S_v ,而源项中的黏性损失系数 $1/\alpha$ 和内部损失系数 C_2 是使用多孔介质模型计算的关键.

3.1 计算域的选取

指尖密封数值计算模型是根据文献[14]中试验条件的真实模型建立的. 图 4 和图 5 分别为试验结构模型和计算模型(流体域)的示意图. 如图 4 所示,计算域包括夹板、薄垫板、前挡板、隔片、后挡板和厚垫板以下的流体通道和指尖密封部分. 指尖密封为周向旋转对称结构,为减小计算工作量,在用多孔介质模型计算时假设各个方向阻力均匀,所以可用二维轴对称旋转模型进行计算.

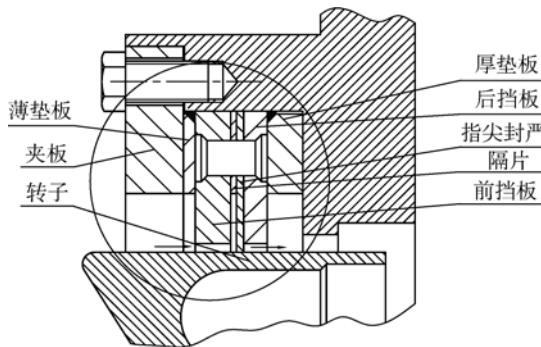


图 4 试验结构模型

Fig. 4 Model of finger seal test

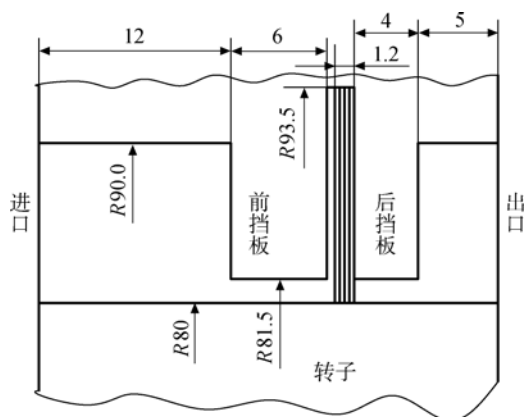


图5 计算模型(单位:mm)

Fig. 5 Computational model (unit:mm)

3.2 网格划分和边界条件

如图6所示,计算网格在轴向和径向疏密程度不同.在径向位置上,旋转表面附近的网格密度比较大,其他部分相对较稀疏;在轴向位置上,指尖密封部分网格最密,后挡板保护高度区域内网格密度比前挡板保护高度内网格密度稍大,出口处比进口处密度稍大.在计算时采用了网格自适应调整,网格经过独立性验证,数量约为4万左右.

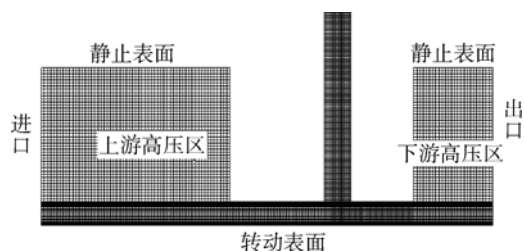


图6 计算网格

Fig. 6 Computational grid

根据指尖密封的实际工作情况,可设边界条件如下:进口边界压力 $p = p_{\text{inlet}}$; 出口边界压力 $p = p_{\text{outlet}}$; 与旋转轴接触表面为速变边界条件; 固体壁面采用无滑移边界条件,即在壁面处速度 $V = 0 \text{ m/s}$.

4 计算模型中系数的确定

在前面提到 $1/\alpha$ 和 C_2 的确定是使用多孔介质计算的关键,根据式(7),还需要确定系数 m 和 n , m 和 n 主要是通过试验与计算对比来确定,通过调整 m 和 n 来使计算和试验得到最大的吻合.本文是根据文献[14]中的试验结果来确定系数的,计算条件与试验一致,压差 Δp 取 $0 \sim 0.3$

MPa, 转速 ω 取 $0 \sim 3000 \text{ r/min}$. 通过试验与计算对比确定3组不同间隙试验件的 m, n 值如表2所示.

表2 系数 m, n 值确定Table 2 Result of m, n

参数	不同指梁间隙指尖密封类型		
	F1	F2	F3
m	0.1	0.1	0.1
n	0.15	0.17	0.08

本文选用了 renormalization group (RNG) $k-\epsilon$ 模型. 计算得到3组不同试验件的计算与试验结果对比如图7所示,由图中可以看出,在压差较低时,试验结果和计算结果吻合的比较好,在压差较大时,试验结果比计算结果稍大一些,而且随着压差的增大,这种差异越明显.分析其原因,主要是因为随着压差的增大,泄漏量越来越大,指尖密封在流体压力下发生轴向变形,变形量越大,泄漏量越大,这是一个流固耦合的过程.

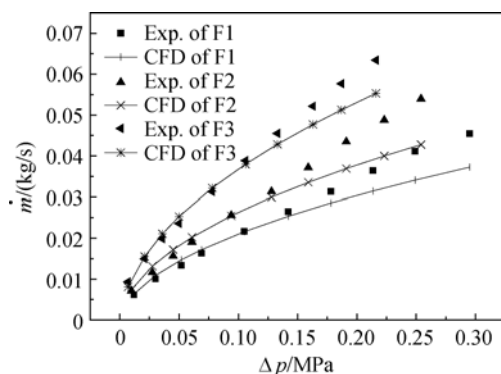


图7 计算与实验结果对比图

Fig. 7 Computational results compare with experimental results

因而就得寻求在不同压差下的 m, n 值来使计算值尽可能接近试验值.以F3为例,先确定常数 $m = 0.1$,以试验结果为依据,找出不同压差下的 n 值,即找出 n 与 Δp 之间的关系,通过非线性拟合,得到以下关系式,该式为对数正态函数:

$$n = n_0 + \frac{A}{\sqrt{2\pi} \omega \cdot \Delta p} \cdot \exp \left\{ \left[-\ln(\Delta p / \Delta p_c) \right] / 2\omega^2 \right\} \quad (10)$$

式中 $n_0 = 0.03343$, $\Delta p_c = 0.1728$, $\omega = 1.20224$, $A = 0.01549$. 采用拟合后的 n 值来计算指尖密封的泄漏量,图8为F3的试验与计算结果对比,可以看出采用拟合后的 n 值所得的计算结果可以和试验结果很好的吻合.

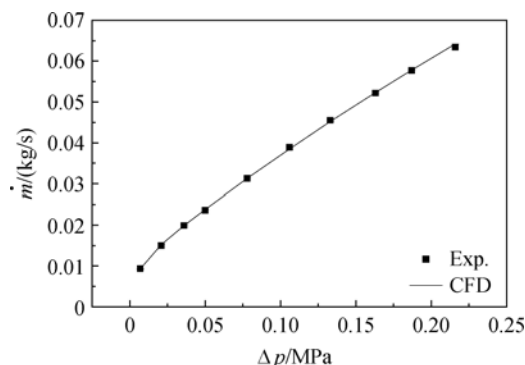


图8 修正后计算与实验对比

Fig. 8 Computational results with correction compare with experimental results

5 流场分析

图9~图11是指尖密封F3在压差为0.2 MPa,转子转速为2 500 r/min,常温下的流动情况。

5.1 指尖密封泄漏流动的速度场

图9和图10分别为用多孔介质模型计算的指尖密封结构泄漏流动的速度矢量和流线图。由图9和图10可以看出,在进口区域,即流体在进入前挡板以前速度比较均匀,也比较规则。在进入前挡板后,由于流动通道突缩,在前挡板的前拐角处出现旋涡,在隔片区域,流道突扩,速度突增,但是在指尖密封区域,由于流动阻力比较大,所以速度比较小,在指尖密封上部区域,速度几乎为零。进入后挡板以后,由于压力降低以及流道收缩,流体速度突然增大并在后挡板的前拐角处达到最大值。下游流场由于流动突然扩张而存在明显的回流。由速度场还可以看出,流体主要通过指尖密封区域的下半部泄漏,所以在设计时可考虑尽量减小指尖密封与转子接触部分的孔隙率。

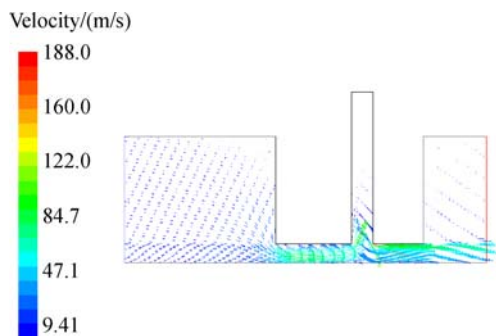


图9 泄漏流动速度矢量图

Fig. 9 Velocity of leakage flow

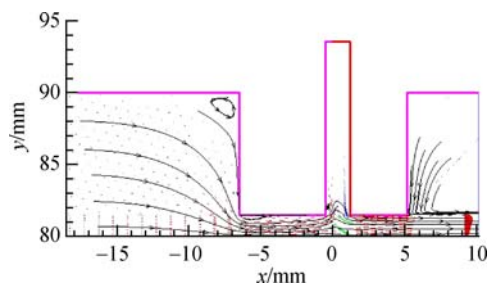


图10 泄漏流动流线图

Fig. 10 Track of leakage flow

5.2 指尖密封泄漏流动的压力场

图11为指尖密封泄漏流动中的压力分布图,图中压力为总压。

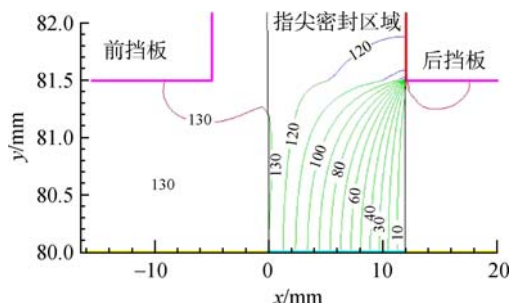


图11 泄漏流动压力分布图(单位:kPa)

Fig. 11 Pressure of leakage flow (unit: kPa)

6 结论

由于指尖密封内部的微缝流动很难模拟,本文根据指尖密封与刷式密封在结构和密封原理上的相似性,采用了适用于刷式密封的多孔介质模型,并结合指尖密封的结构参数,对指尖密封的泄漏特性进行了数值模拟,得出以下结论:

1) 利用文中提出的多孔介质模型可以有效的模拟指尖密封的泄漏,为工程应用时评估指尖密封的泄漏量提供了参考。

2) 指尖密封的泄漏和压降主要发生在下半部分,在设计时可以考虑减小下半部的孔隙率和后挡板的内径以减小泄漏。

参考文献:

- [1] Arora G K, Proctor M P, Steinetz B M, et al. Pressure balanced, low hysteresis, finger seal test results[R]. Los Angeles, USA: 35th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 1999.
- [2] Proctor M P, Delgado I R. Leakage and power loss test results for competing turbine seals[R]. NASA-2004-213049, 2004.
- [3] Steinetz B M, Hendricks R C. Advanced seal technology in

- meeting next generation turbine engine goal[R]. NASA/TM-1998-06961, 1998.
- [4] Steinefz B M, Hendricks R C. Engine seal technology requirements to meet NASA's advanced subsonic technology program goals[R]. AIAA 94-2698, 1994.
- [5] 苏华, 陈国定. 指尖密封型线形成的研究[J]. 机械科学与技术, 2003, 22(6): 876-878.
- SU Hua, CHEN Guoding. Study of the shape-curve of finger seal[J]. Mechanical Science and Technology, 2003, 22(6): 876-878. (in Chinese)
- [6] Braun M J, Steinetz B M. Two and three dimensional numerical experiments representing two limiting cases of an in line pair of finger seal components[J]. International Journal of Rotating Machinery, 2003, 9(3): 171-179.
- [7] Hendricks R C, O'Halloran B, Arora G, et al. Advances in contact sealing[R]. NASA CP-3282, 1994.
- [8] Braun M J, Hendricks R C, Canacci V A. Non-intrusive qualitative and quantitative flow characterization and bulk flow model for brush seals[R]. Nagoya: Japan Incorporated Tribology Conference, 1990.
- [9] Hendricks R C, Schlumberger S, Braun M J, et al. A bulk flow model of a brush seal system[R]. ASME Paper 91-GT-325, 1991.
- [10] 王旭, 张文平, 来亮, 等. 指尖密封泄漏流动的数值仿真分析[J]. 航空动力学报, 2005, 20(4): 590-594.
- WANG Xu, ZHANG Wenping, LAI Liang, et al. Numerical simulation and analysis of a finger seal leakage flow[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(4): 590-594. (in Chinese)
- [11] 李国见, 李建华, 陈国定, 等. 动压型指尖密封泄漏特性的分析[J]. 科学技术与工程, 2007, 7(13): 3157-3159.
- LI Guojian, LI Jianhua, CHEN Guoding, et al. Analysis to the leakage patterns of hydrodynamic pressure finger seal[J]. Science Technology and Engineering, 2007, 7(13): 3157-3159. (in Chinese)
- [12] 马晓琳, 陈国定. 基于等效模型的流体动压指尖密封动力学及泄漏量分析[J]. 航空学报, 2008, 29(5): 1356-1363.
- MA Xiaolin, CHEN Guoding. Dynamics and leakage analysis of padded finger seal based on equivalent model[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(5): 1356-1363. (in Chinese)
- [13] 张延超, 陈国定, 申晓龙. 指尖密封动态性能分析与泄漏量计算[J]. 航空学报, 2009, 30(11): 2193-2199.
- ZHANG Yanchao, CHEN Guoding, SHEN Xiaolong. Analysis of dynamic performance and leakage for finger seal[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(11): 2193-2199. (in Chinese)
- [14] 白花蕾, 吉洪湖, 纪国剑, 等. 指式密封泄漏特性的试验研究[J]. 航空动力学报, 2009, 24(3): 532-536.
- BAI Hualei, JI Honghu, JI Guojian, et al. Experimental investigation on leakage characteristics of finger seal[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(3): 532-536. (in Chinese)
- [15] Chew J W, Hogg S I. Porosity modeling of brush seals[J]. Journal of Tribology, 1997, 119(4): 769-775.
- [16] 黄学民, 史伟, 王洪铭. 刷式密封中泄漏流动的多孔介质数值模型[J]. 航空动力学报, 2000, 15(1): 55-58.
- HUANG Xuemin, SHI Wei, WANG Hongming. Porous medium leakage flow model of brush seal[J]. Journal of Aerospace Power, 2000, 15(1): 55-58. (in Chinese)
- [17] 曹广州, 吉洪湖, 袁艳平. 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.
- CAO Guangzhou, JI Honghu, YUAN Yanping. A porous medium model for simulating leakage flows through brush seals[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(3): 443-447. (in Chinese)
- [18] Fluent Incorporated. FLUENT user's guide[M]. [S. l.]: Fluent Incorporated, 2003.
- [19] 林瑞泰. 多孔介质传热传质引论[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [20] 潘阳, 许国良, 中山颢, 等. 计算传热学理论及其在多孔介质中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [21] Cieslewicz S M. CFD-simulations for advanced turbomachinery sealing technologies: brush seals[D]. Vienna: Mechanical Engineering Technical University, 2004.

(编辑: 叶 青)