

基于多孔介质的指尖密封各向异性传热模型

王 强, 胡娅萍, 吉洪湖

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 在指尖密封多孔介质流动模型的基础上,将指尖密封片之间的接触传热附加于固体导热之中,之后通过对密封固体结构与结构内流体的耦合各向异性传热进行理论分析,建立了指尖密封各向异性传热数学模型;基于商业软件 Fluent 中的用户自定义标量(UDS)方程功能,开发了多孔介质各向异性传热数值计算模块,并数值模拟了指尖密封结构内的流动与传热特性。结果表明:指梁与指尖靴区域各向异性有效导热系数张量与孔隙率、径向和周向位置以及轴向接触热阻等因素相关;指尖密封最高温度出现在指尖靴与转子接触面的略下游处;与各向同性传热模型相比,采用各向异性传热模型时,指梁下部和指尖靴区域沿径向和轴向存在较大温度梯度,但温度沿周向的变化两者均很小;泄漏量随着压差的增加逐渐增大,随着转子转速的增加基本不变;指尖密封最高温度值随着压差的增加逐渐减小,随着转子转速的增加逐渐增大。

关 键 词: 指尖密封; 自定义标量 (UDS); 多孔介质; 各向异性传热; 温度场

中图分类号: V231.1; TB42

文献标志码: A

Anisotropic heat transfer model of finger seal based on porous media

WANG Qiang, HU Yaping, JI Honghu

(College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: An anisotropic heat transfer model was built by theoretically analyzing the contact and anisotropic heat transfer characteristics coupled finger seal and fluid flow within the structure on the basis of porous model. Then, an anisotropic heat transfer numerical calculation model was developed on the basis of user-defined scalar (UDS) function of commercial software Fluent, and the heat transfer and flow characteristics of finger seal were simulated. Results showed that the effective thermal conductivity tensor of finger beam and finger foot was related to the factors of porosity, radial and circumferential position, and axial contact resistance. The highest temperature of finger seal appeared slightly downstream the contact surface between finger foot and rotor. Besides, compared with isotropic heat transfer model, the temperature decreased greatly at radial and axial directions in finger foot and lower part of finger beam zones while using anisotropic heat transfer model, however, it remained unchanged in circumference both of them. Seal leakage increased with the increasing pressure differential but kept stable with the increasing rotation speed. The height temperature decreased with the increasing pressure differential but increased with the increasing rotation speed.

收稿日期: 2016-04-21

基金项目: 国家自然科学基金(51106072); 航空科学基金(2014ZB52027);

江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(KYLX16_0398); 中央高校基本科研业务费专项资金

作者简介: 王强(1990—),男,博士生,主要从事航空发动机先进密封装置流动传热性能研究。

引用格式: 王强,胡娅萍,吉洪湖. 基于多孔介质的指尖密封各向异性传热模型[J]. 航空动力学报,2017,32(11):2585-2595. WANG Qiang, HU Yaping, JI Honghu. Anisotropic heat transfer model of finger seal based on porous media[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(11): 2585-2595.

Key words: finger seal; user-defined scalar (UDS); porous media; anisotropic heat transfer; temperature field

指尖密封是一种具有广泛应用前景的先进、高效密封装置,可用于航空发动机静态与动态的气路密封以及轴端密封和轴承腔的油封,具有泄漏量小、制造成本低、使用寿命长等优点。

国内外学者已经在指尖密封结构对其性能的影响方面做了较为详尽的数值计算和试验研究。其中,Arora 等^[1]和 Proctor 等^[2-3]对各类指尖密封均进行了初步的泄漏试验研究;申晓龙等^[4]、郎达学等^[5]和张海等^[6]均针对带浮升力垫片型指尖密封垫片结构对密封性能的影响进行了数值计算。然而,指尖密封的性能不仅与其结构有关,还与结构内的流动和传热特性密不可分。在流动的模拟方面,由于指尖密封结构比较复杂,包含多层交错排列的密封片以及前后挡板等部件,很难对其结构内部完整的泄漏流动进行模拟。因此,目前国内外主要针对带浮升力垫片型指尖密封垫片与转子之间的间隙流场的流动特性开展了研究,比如 Fleming^[7]和 Cioc 等^[8]分别采用附加阻力项的雷诺方程和采用时空守恒格式的流动方程对间隙流场进行了数值分析;Braun 等^[9-10]、李国见等^[11]、Yue 等^[12]和 Zhang 等^[13]均采用流固耦合的方法在考虑垫片变形的情况下对间隙流场的泄漏流动进行了分析。王旭等^[14]则针对指尖密封单个指梁间隙内的流场建立了简化的稳态流动模型,对间隙流场以外的区域进行了流动的数值模拟。在传热的模拟方面,Braun 等^[15]在对间隙流场的数值分析中首次加入能量方程,得到了不同工况下间隙流场的温度分布情况;苏华等^[16]则针对指单元建立了热分析模型,并进行了指单元固体导热数值计算,获得了不同工况条件下指尖密封的温度场分布。

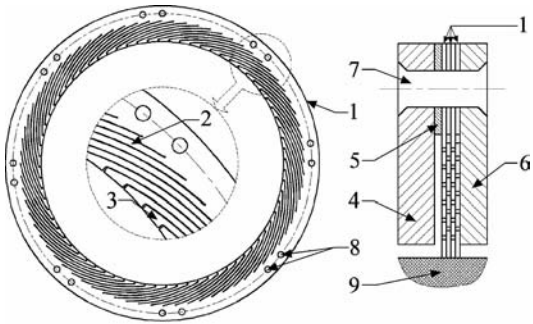
由于指尖密封通常在航空发动机内高温和高压差的条件下工作,故其密封结构内存在复杂的传热现象,尤其是对于基本型指尖密封,其通常与转子形成过盈配合,当转子高速转动时,密封端面与转子表面之间会产生摩擦热,还会导致显著的热应力以及变形。所以在研究指尖密封的性能时,除了结构特性和流动特性外,其传热特性也是一个不可忽略的问题。然而,迄今为止,国内外关于指尖密封的数值模拟和试验研究工作绝大部分是针对结构设计和泄漏流动两方面开展的。在传热特性方面,国外仅限于 Braun 等^[15]对垫片与转子间

隙内流体温度场的数值模拟,除此之外几乎没有公开的相关研究文献;在国内也仅限于苏华等^[16]在没有模拟流体流动的情况下对指单元固体导热进行的数值计算研究。因此,在流体流动的基础上开展指尖密封传热特性的研究是十分有必要的。

事实上,直接对指尖密封实体结构内的流动和传热进行模拟很困难。但对于与指尖密封结构和性能相似的刷式密封,Braun 等^[17]和 Hendricks 等^[18]将多孔介质模型成功应用于其理论分析及试验研究中,并获得了良好的效果。鉴于此研究成果,白花蕾等^[19]将多孔介质模型应用于指尖密封泄漏流动的数值模拟。在此基础上,曹静等^[20]采用多孔介质模型对指尖密封二维模型进行了各向同性的传热数值模拟。考虑到指尖密封传热过程的复杂性和热传导的方向性等问题,本文在指尖密封多孔介质流动模型的基础上,首先将指尖密封片之间的接触传热附加于固体导热之中,之后通过对指尖密封的各向异性传热进行理论分析,建立基于多孔介质的指尖密封各向异性传热数学模型,再利用商业软件 Fluent 的用户自定义标量方程(UDS)功能,开发多孔介质各向异性传热计算模块,并对指尖密封结构内流动传热特性进行数值分析。

1 物理模型

指尖密封结构由前挡板、隔片、若干层指尖密封片和后挡板通过铆钉联接而成,其中指尖密封片由沿周向均匀排布的柔性指梁构成,指梁的自由端称为指尖靴,如图 1 所示。指尖靴通常与密封圆周



1 指尖密封片; 2 指梁; 3 指尖靴; 4 前挡板; 5 隔片; 6 后挡板; 7 铆钉; 8 联接孔; 9 旋转轴。

图 1 指尖密封结构

Fig. 1 Structure of finger seal

面形成间隙或过盈配合从而起到密封作用。此外,由于指尖密封片交错布置,使得指梁之间的间隙被相邻密封片上的指梁所遮挡,可以减少泄漏。

本文研究采用的指尖密封结构与文献[19]所述一致,包含 4 层具有圆弧型线指单元的指尖密封片。具体的端面结构参数如图 2 和表 1 所示。

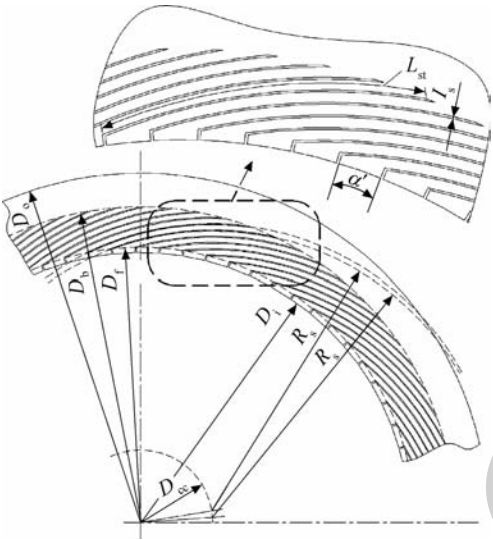


图 2 指尖密封结构参数示意图

Fig. 2 Schematic diagram of structural parameters of finger seal

表 1 指尖密封结构参数表

Table 1 List of structural parameters of finger seal

参数	数值
基圆直径 D_{cc}/mm	43
密封件外径 D_o/mm	207
指根圆直径 D_b/mm	187
指尖靴上端部直径 D_t/mm	163
密封件内径 D_i/mm	160
指梁圆弧半径 R_s/mm	85
指梁之间的间隙宽度 I_s/mm	0.3
指梁弧长 L_{st}/mm	53.5
指尖密封片厚度 b/mm	0.3
指尖靴周向角度 $\alpha'/(^{\circ})$	4.7
指单元周向角度 $\alpha/(^{\circ})$	5

2 指尖密封多孔介质各向异性传热模型

2.1 基本假设与简化

指尖密封片沿周向是周期性循环排列的指单

元结构,相邻指单元之间存在相同间隙,而且沿轴向相邻的密封片规则地交错布置。鉴于此,将图 1 所示指尖密封结构中指梁和指尖靴区域处理为多孔介质,采用多孔介质模型来模拟其流动和传热特性,并作如下简化假设:

- 1) 忽略指梁和指尖靴结构对流体湍流产生率和耗散率的影响,即假设指尖密封多孔介质区域内的流动状态为层流。
- 2) 由于密封结构润湿面积与体积之比很大,换热能力强,因此应用多孔介质局部热平衡假设,假设密封结构内部流体与固体的温度相同。
- 3) 忽略由气动力和热应力等造成的指梁和指尖靴的结构变形,认为多孔介质指梁和指尖靴区域的孔隙率均为定值。
- 4) 假设指尖密封结构的材料为钢,流体为空气。忽略材料物性参数随压力和温度的变化,采用常温常压下的物性参数进行计算。

2.2 流动与传热控制方程

指尖密封多孔介质区域的流动与传热计算采用以下稳态控制方程:

连续方程

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

动量方程

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + S_i \tag{2}$$

能量方程

$$\frac{\partial(\rho c_p u_i T)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\kappa_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \tag{3}$$

式中 ρ 为多孔介质区域内流体相的密度, u_i 为直角坐标系 $i(i=1,2,3)$ 方向上流体的表观速度, p 为压力, μ 为流体动力黏度, S_i 为 i 方向上由指梁或指尖靴结构对流体阻滞作用引起的在多孔介质流动计算方程中附加的动量损失源项;式(3)左端为由流体流动引起的对流换热项,右端为流体和固体自身的导热项,且 c_p 为流体的比定压热容, T 为温度, κ_{eff} 为不包含湍流导热的有效导热系数。

动量损失源项 S_i 包括黏性损失项和惯性损失项两部分,即

$$S_i = - \left(\frac{\mu}{\alpha} u_i + \frac{1}{2} C_2 \rho |u| u_i \right) \tag{4}$$

式中 $\frac{1}{\alpha}$ 为多孔介质黏性损失系数, C_2 为多孔介质

惯性损失系数。文献[19]通过对比刷式密封动量损失源项公式得到

$$\begin{cases} \frac{1}{\alpha} = 5m \frac{S^2}{\epsilon^3} \\ C_2 = \frac{n}{4} \cdot \frac{S}{\epsilon^3} \end{cases} \quad (5)$$

式中 S 为单位体积的润湿面积; ϵ 为指尖密封多孔介质区域的孔隙率; m 和 n 为由试验数据拟合得到的常数, 且

$$\begin{cases} m = 0.1 \\ n = 0.03343 + \frac{0.0155}{3.0136\Delta p} e^{\frac{-(\ln \frac{\Delta p}{0.1728})^2}{2.8908}} \end{cases} \quad (6)$$

式中 Δp 为密封件上下游压差。

有效导热系数 k_{eff} 耦合了指尖密封多孔介质区域内流体与指梁或指尖靴固体结构的导热作用。对于单层指尖密封片而言, 沿指梁型线方向与垂直于指梁型线方向的导热系数显然不同; 此外, 对于多层指尖密封片而言, 沿轴向的导热系数与沿指梁型线方向和垂直于指梁型线方向的导热系数也各不相同。因此, 指尖密封多孔介质区域内的耦合导热是各向异性的, 此时有效导热系数 k_{eff} 不再是标量, 需要根据指尖密封的结构来建立各向异性有效导热系数张量的数学模型。

2.3 表征体元及孔隙率

本文采用宏观水平方法研究指尖密封多孔介质区域, 这就需要首先选取表征体元。根据文献[21]所述原则选取指尖密封多孔介质区域的表征体元并计算其孔隙率。孔隙率的定义为表征体元内孔隙所占体积 V_v 与表征体元总体积 V_t 之比, 即

$$\epsilon = \frac{V_v}{V_t} \quad (7)$$

对于指尖密封多孔介质区域而言, 由于指梁和指尖靴的设计方法不同, 因此在选取表征体元时将两者分开来考虑。

图3所示为依据指梁结构选取的指梁区域表征体元, 其尺寸沿指梁型线切线方向 (ξ) 为微元量 $d\xi$, 并假设其曲率为零, 沿垂直于指梁型线切线方向 (η) 取 I_b 与 I_s 之和, 沿轴向 (x) 取4层指尖密封片厚度之和。根据定义可得指梁区域的孔隙率和润湿面积分别为

$$\epsilon_b = \frac{I_s \cdot 4b \cdot d\xi}{(I_s + I_b) \cdot 4b \cdot d\xi} = \frac{I_s}{I_s + I_b} \quad (8)$$

$$S_b = \frac{4(2I_b \cdot d\xi + 2b \cdot d\xi)}{(I_s + I_b) \cdot 4b \cdot d\xi} = \frac{2I_b + 2b}{(I_s + I_b) \cdot b} \quad (9)$$

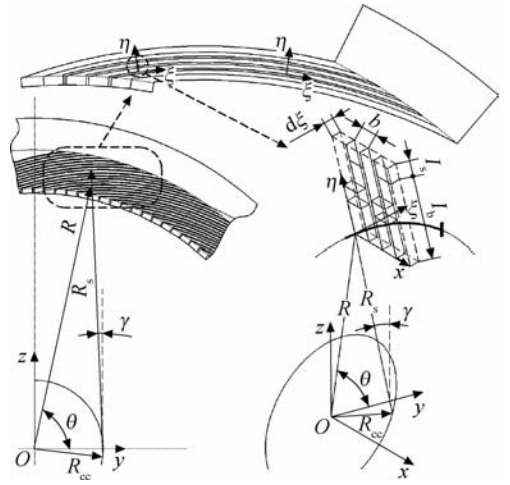


图3 指梁区域表征体元

Fig. 3 Representative macro volume of finger beam

当忽略指梁宽度沿型线方向的变化时有

$$I_b = \frac{\pi(D_b^2 - D_f^2)}{4N \cdot L_{\text{st}}} - I_s \quad (10)$$

式中 N 为单片指尖密封片上指单元的个数。

图4所示为依据指尖靴结构选取的指尖靴区域表征体元, 其尺寸沿半径方向 (r) 为微元量 dr , 沿圆周方向 (φ) 取一个指单元所占的周向角 α , 并忽略指尖靴弧长沿径向的变化, 沿轴向 (x) 取4层指尖密封片的厚度之和。类似的, 可得指尖靴区域的孔隙率和润湿面积分别为

$$\epsilon_f = \frac{\frac{(\alpha - \alpha')\pi D_i}{360} \cdot 4b \cdot dr}{\frac{\alpha \pi D_i}{360} \cdot 4b \cdot dr} = 1 - \frac{\alpha'}{\alpha} \quad (11)$$

$$S_f = \frac{4\left(2 \frac{\alpha' \pi D_i}{360} \cdot dr + 2b \cdot dr\right)}{\frac{\alpha \pi D_i}{360} \cdot 4b \cdot dr} = \frac{2\alpha' \pi D_i + 720b}{\alpha \pi D_i \cdot b} \quad (12)$$

2.4 有效导热系数张量

各向异性导热介质存在导热主轴方向, 该方向上热流密度只与温度梯度有关, 且主轴坐标系与一般坐标系下的导热系数张量可通过下式进行坐标转换^[22], 即

$$\mathbf{K}^* = \mathbf{C}^T \mathbf{K} \mathbf{C} \quad (13)$$

式中 $\mathbf{C}$ 为主轴坐标系与一般坐标系的转换矩阵, 即

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中矩阵元素 c_{ij} 表示主轴 Ox_i^* 与一般坐标系轴

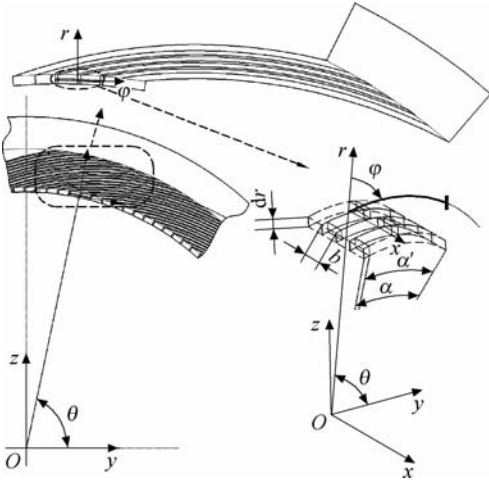


图 4 指尖靴区域表征体元

Fig. 4 Representative macro volume of finger foot

Ox_i 之间夹角的余弦, 即 $c_{ij} = \cos(\hat{x}_i^*, x_j)$ 。此外, 旋转变换矩阵 C 是实正交矩阵, 有 $C^T = C^{-1}$ 。

通常商业 CFD 软件使用的计算坐标系为全局笛卡儿直角坐标系, 而由指尖密封的结构可知其导热系数主轴所在坐标系与计算坐标系并不重合。因此, 本文将先分别求解指梁和指尖靴区域表征体元主轴方向的导热系数, 再通过坐标转换得到计算坐标系对应的导热系数张量。在导热系数张量的推到过程中, 热量传递的各个环节可简单的划分为串联或并联的网络, 串联热阻相加, 并联热导相加。

2.4.1 指梁区域

由结构可知指梁区域的 3 个导热系数主轴分别为: 指梁型线切线方向 (ξ)、垂直于指梁型线切线方向 (η) 和轴向 (x), 且主轴方向 (ξ 和 η) 沿指梁型线变化, 如图 3 所示。

由图 3 及热阻原理可得指梁区域轴向导热热阻为

$$R_{b,x} = \frac{3}{\frac{1}{R_{bx,s}} + \frac{1}{R_{tc}}} + \frac{1}{\frac{1}{R_{bx,s}} + \frac{1}{R_{bx,f}}} \quad (15)$$

由热阻定义及指梁区域表征体元的几何结构可得

$$R_{b,x} = \frac{4b}{\kappa_{b,x} \cdot (I_s + I_b) \cdot d\xi} \quad (16)$$

$$R_{bx,s} = \frac{b}{\kappa_s \cdot I_b \cdot d\xi} \quad (17)$$

$$R_{bx,f} = \frac{b}{\kappa_f \cdot I_s \cdot d\xi} \quad (18)$$

式中 κ_s 为指梁固体结构的导热系数; κ_f 为泄漏流

体的导热系数; R_{tc} 为指尖密封片之间的接触热阻, 本文将其附加于固体的导热热阻之中, 其计算方法是在 Cooper 等^[23]提出的塑性接触模型的基础上经过 Milanez 等^[24]和王峰等^[25]的修正后得到的。修正后的计算公式为

$$R_{tc} = \frac{\left(1 - \sqrt{\frac{A_r}{A_a}}\right)^{1.5}}{2\kappa_{tc} n a A_a} \quad (19)$$

式中 κ_{tc} 为两接触面材料耦合的等效导热系数, 本文取 $\kappa_{tc} = \kappa_s$; A_r 为实际接触面积; A_a 为名义接触面积, 此处有 $A_a = (I_b - I_s) \cdot d\xi$; n 为接触点密度; a 为接触点平均半径。

由此并结合式(8)可得指梁区域轴向导热系数为

$$\kappa_{b,x} = \frac{4bE^2(1 - 2\epsilon_b) + 4K_{tc}E\kappa_f\epsilon_b(1 - \epsilon_b)}{4bE(1 - 2\epsilon_b) + K_{tc}(3E + \kappa_f\epsilon_b)(1 - \epsilon_b)} \quad (20)$$

式中 $E = \kappa_s(1 - \epsilon_b) + \kappa_f\epsilon_b$; $K_{tc} = R_{tc} \cdot \kappa_{tc} \cdot A_a$ 。

同理可得指梁区域沿指梁型线切线方向和垂直于指梁型线切线方向的导热系数分别为

$$\kappa_{b,\xi} = \kappa_s(1 - \epsilon_b) + \kappa_f\epsilon_b = E \quad (21)$$

$$\kappa_{b,\eta} = \frac{\kappa_s(\kappa_s + \kappa_f)}{\kappa_s(1 + 2\epsilon_b) + \kappa_f(1 - 2\epsilon_b)} = F \quad (22)$$

综上可得指梁区域主轴导热系数张量的矩阵形式为

$$\mathbf{K}_b^* = \begin{bmatrix} \frac{4bE^2(1 - 2\epsilon_b) + 4K_{tc}E\kappa_f\epsilon_b(1 - \epsilon_b)}{4bE(1 - 2\epsilon_b) + K_{tc}(3E + \kappa_f\epsilon_b)(1 - \epsilon_b)} & 0 & 0 \\ 0 & E & 0 \\ 0 & 0 & F \end{bmatrix} \quad (23)$$

相应的坐标转换矩阵为

$$\mathbf{C}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & \sin \gamma \\ 0 & -\sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (24)$$

式中 γ 为垂直于指梁型线切线方向与计算坐标系 z 轴的夹角, 如图 3 所示, 由几何关系可得

$$\gamma = \arccos\left(\frac{R^2 + R_s^2 - R_{cc}^2}{2RR_s}\right) + \theta - \frac{\pi}{2} \quad (25)$$

其中 R 为指梁区域任一位置 (y_b, z_b) 的半径, 且 $R = \sqrt{y_b^2 + z_b^2}$; θ 为该位置对应的周向角度, 且 $\theta = \arctan(z_b/y_b)$ 。

将式(23)与式(24)代入式(13)可得计算坐标系下指梁区域各向异性有效导热系数张量的矩阵形式为

$$\mathbf{K}_b = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} \quad (26)$$

式中

$$\begin{aligned} b_{11} &= \frac{4bE^2(1-2\epsilon_b) + 4K_{tc}E\kappa_f\epsilon_b^2}{4bE(1-2\epsilon_b) + K_{tc}(3E + \kappa_f\epsilon_b)\epsilon_b} \\ b_{22} &= E\cos^2\gamma + F\sin^2\gamma \\ b_{23} &= b_{32} = (F-E)\sin\gamma\cos\gamma \\ b_{33} &= E\sin^2\gamma + F\cos^2\gamma \\ b_{12} &= b_{13} = b_{21} = b_{31} = 0 \end{aligned}$$

由式(26)可知,指梁区域各向异性有效导热系数张量与孔隙率、径向和周向位置以及轴向接触热阻等因素相关。

2.4.2 指尖靴区域

由结构可知指尖靴区域的 3 个导热系数主轴方向分别为:径向(r)、周向(φ)和轴向(x),如图 4 所示。

采用与指梁区域类似的方法可得指尖靴区域 3 个主轴方向的导热系数分别为

$$\kappa_{f,x} = \frac{4bP^2(1-2\epsilon_f) + 4K_{tc}P\kappa_f\epsilon_f(1-\epsilon_f)}{4bP(1-2\epsilon_f) + K_{tc}(3P + \kappa_f\epsilon_f)(1-\epsilon_f)} \quad (27)$$

$$\kappa_{f,r} = \kappa_s(1-\epsilon_f) + \kappa_f\epsilon_f = P \quad (28)$$

$$\kappa_{f,\varphi} = \frac{\kappa_s(\kappa_s + \kappa_f)}{\kappa_s(1+2\epsilon_f) + \kappa_f(1-2\epsilon_f)} = Q \quad (29)$$

此处接触热阻 R_{tc} 中名义接触面积为

$$A_a = \frac{(2\alpha' - \alpha)\pi D_i}{360} \cdot dr$$

综上可得指尖靴区域主轴导热系数张量的矩阵形式为

$$\mathbf{K}_f^* = \begin{bmatrix} \frac{4bP^2(1-2\epsilon_f) + 4K_{tc}P\kappa_f\epsilon_f(1-\epsilon_f)}{4bP(1-2\epsilon_f) + K_{tc}(3P + \kappa_f\epsilon_f)(1-\epsilon_f)} & 0 & 0 \\ 0 & P & 0 \\ 0 & 0 & Q \end{bmatrix} \quad (30)$$

相应的坐标转换矩阵为

$$\mathbf{C}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sin\theta & -\cos\theta \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta \end{bmatrix} \quad (31)$$

式中 θ 为指尖靴区域任一位置(y_f, z_f)对应的周向角度,且 $\theta = \arctan(z_f/y_f)$ 。

将式(30)与式(31)代入式(13)可得计算坐标系下指尖靴区域各向异性有效导热系数张量的矩阵形式为

$$\mathbf{K}_f = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} \end{bmatrix} \quad (32)$$

式中

$$\begin{aligned} f_{11} &= \frac{4bP^2(1-2\epsilon_f) + 4K_{tc}P\kappa_f\epsilon_f(1-\epsilon_f)}{4bP(1-2\epsilon_f) + K_{tc}(3P + \kappa_f\epsilon_f)(1-\epsilon_f)} \\ f_{22} &= P\sin^2\theta + Q\cos^2\theta \\ f_{23} &= f_{32} = (P-Q)\sin\theta\cos\theta \\ f_{33} &= P\cos^2\theta + Q\sin^2\theta \\ f_{12} &= f_{13} = f_{21} = f_{31} = 0 \end{aligned}$$

由式(32)可知,指尖靴区域各向异性有效导热系数张量与孔隙率、周向位置以及轴向接触热阻等因素相关。

2.4.3 有效导热系数张量计算方法

由于指尖密封区域的有效导热系数是 2 阶张量的形式,且其为固体结构与流体的耦合导热,因此无法通过直接修改固体或流体的导热系数来实现有效导热系数张量的计算。基于上述原因,本文把计算模型各个部分的有效导热系数张量按 UDF(user-defined functions)程序的格式编写成 DEFINE_ANISOTROPIC_DIFFUSIVITY() 函数,并将其应用于文中第 3 节所述 UDS 方程中,从而实现有效导热系数的计算和应用。

3 各向异性传热数值计算方法

本文的数值模拟采用 Fluent 软件,Fluent 虽然具备各向异性导热系数张量模块,但仅限于张量元素为常数或同类函数。由文中第 2.4 节可知,指尖密封导热系数张量的非零元素大多为坐标的函数,因此无法在 Fluent 中直接输入。考虑到 Fluent 的 UDS 输运方程中的扩散系数可通过用户自定义函数(UDF)自由添加,故本文添加如下式所示的稳态 UDS 方程,以代替能量方程

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[\rho u_i \phi - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\kappa_{ij}}{c_p} \cdot \phi \right) \right] = 0 \quad (33)$$

式中标量 ϕ 即为温度 T ; κ_{ij} 为导热系数,对指梁和指尖靴区域而言,其矩阵表达式分别为式(26)和式(32)。

为了将各向异性传热数学模型应用到指尖密封的传热数值分析中,首先按照文中第 2.4.3 节中给出的有效导热系数张量的计算方法构成 UDS 方程中的扩散项系数;其次将包含 UDS 方程扩散项系数和相应边界条件的 UDF 程序编译到 Fluent 软件中;然后在 Fluent 中添加 UDS 方程,选取方程的求解区域,定义方程的对流项和扩

散项系数,并为方程求解域的所有边界指定相应的传热边界条件;最后用新添加的 UDS 方程替换能量方程,并完成多孔介质指尖密封的各向异性传热数值计算。

需要特别说明的是,由于指尖密封流场出口边界可能存在回流现象,计算中还需要设置回流边界总温,同样也是通过开发 UDF 程序实现的。

4 计算模型与边界条件

本算例的计算模型是将指尖密封二维轴对称结构绕转轴旋转 α 角得到的,如图 5 所示。

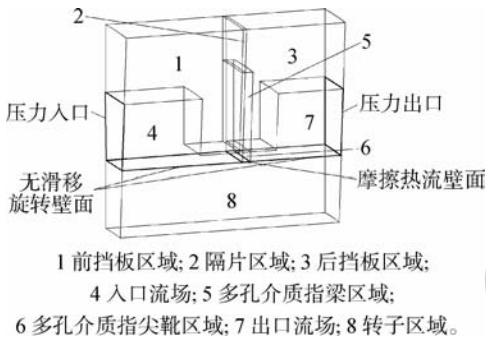


图 5 计算模型
Fig. 5 Computational model

针对图 5 所示计算模型的边界条件设置如下:压力入口边界给定入口力(由上下游压差决定)和入口流体总温 573 K;压力出口边界给定出口压力为 0.1 MPa,出口回流总温为 573 K;无滑移旋转壁面给定表面旋转速度和耦合传热边界,其中,指尖靴与转子的接触表面由于过盈配合会产生大量的摩擦热,因此设置为热流边界,其热流密度的计算公式如下^[20]:

$$q = \frac{fV k_i s}{2A_i}$$
 (34)

式中 f 为指尖靴与转子之间的摩擦因数,本文取 0.2; V 为转子表面线速度; k_i 为单个指单元的刚度,根据指单元结构计算可得 $k_i = 551 \text{ N/m}$; s 为安装过盈量; A_i 为指单元与转子之间的接触面积,根据指单元结构计算可得 $A_i = 1.97 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ 。

此外,由于指尖密封为循环对称结构,因而法向为周向的面设置为周期性边界;流体与固体区域交界面给定耦合传热边界;其他表面设置为无滑移绝热壁面。

5 网格划分及独立性验证

采用 GAMBIT 软件对计算模型进行结构化

网格的划分,并在多孔介质指梁和指尖靴区域及其附近进行适当的网格加密,如图 6 所示。

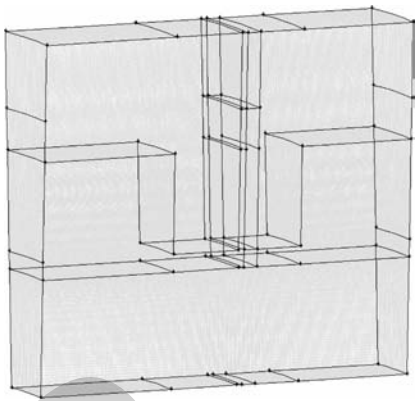


图 6 计算模型网格
Fig. 6 Grid of computational model

为了确保计算时网格的独立性。本文选取泄漏量和指尖密封区域最高温度作为参考量来验证。当上下游压差为 0.3 MPa、安装过盈量为 0.1 mm、转子转速为 36 000 r/min 时,泄漏量和指尖密封区域最高温度随网格数量的变化规律如图 7 所示。由图可知,当网格数量超过 193 万时泄漏量和指尖密封最高温度都趋于稳定,这表明当网格数量超过 193 万时计算结果将不再受网格密度的影响。

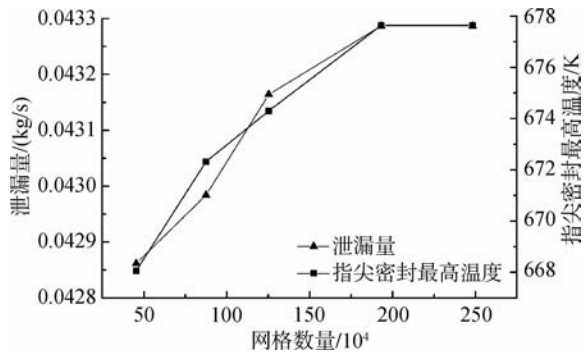


图 7 网格独立性验证
Fig. 7 Grid independence verification

本文进行的指尖密封流动和各向异性传热数值计算均采用上述满足网格独立性要求的数量为 193 万的网格进行,其次数值计算采用的 CFD 软件是得到广泛认可和应用的 Fluent,因此本文所得数值计算结果的准确性有所保障。此外,本文采用的指尖密封多孔介质流动数值计算方法已经在文献[19]中得到试验验证且结果表明该数值计算方法具有较高的准确度。

6 计算结果与分析

图 8~图 11 分别给出了在上下游压差为 0.3 MPa、安装过盈量为 0.1 mm、转子转速为 36 000 r/min 的工况下进行的流动与传热数值计算的压力分布、流动和温度分布结果。其中图 8 和图 9 所示分别为流体区域周期边界面泄漏流动的压力云图和流线图。由图 8 可以看出,上游进口流场域的压力保持几乎与进口压力一致,前挡板保护高度区域、隔片下部区域以及大部分指梁区域相对于进口压力稍有下降,后挡板保护高度区域及其下游流场域则保持几乎与出口压力一致,压力的剧烈变化仅局限于指梁区域的底部以及指尖靴区域,所以指尖密封的承压部分主要为后挡板保护高度以下的部分。由图 9 可以看出,流体在进入前挡板保护高度区域之前流动比较均匀;当进入前挡板保护高度区域内时,由于流道的突缩,在前挡板前拐角处出现旋涡,在隔片下部区域,流道又突扩,速度减小并在前挡板后拐点附近形成旋涡;当流体进入指尖密封区域时,由于流动阻力较大,所以指梁上部区域流动相对稳定,而流体的泄漏主要通过指梁下部和指尖靴区域;在进入后挡板保护高度区域后,由于压力下降及流道突缩,流体流速突然增大并在后挡板的前拐角处达到最大值;下游流场由于流道的突扩而存在明显的回流。

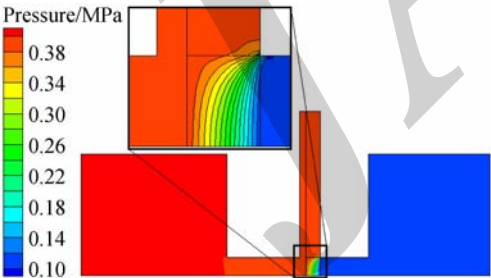


图 8 周期边界面的压力云图
Fig. 8 Pressure chart of periodic boundary

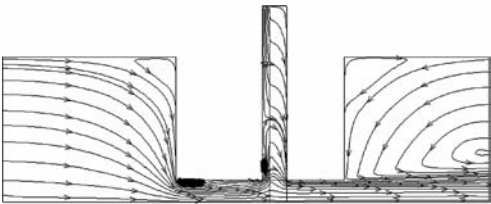


图 9 周期边界面的流线图
Fig. 9 Stream chart of periodic boundary

图 10 和图 11 所示为同样工况下分别采用各向异性和各向同性传热模型得到的计算模型周期边界面以及密封片端面的温度云图。由图 10 可见,由于在指尖靴与转子接触面上施加了均匀热

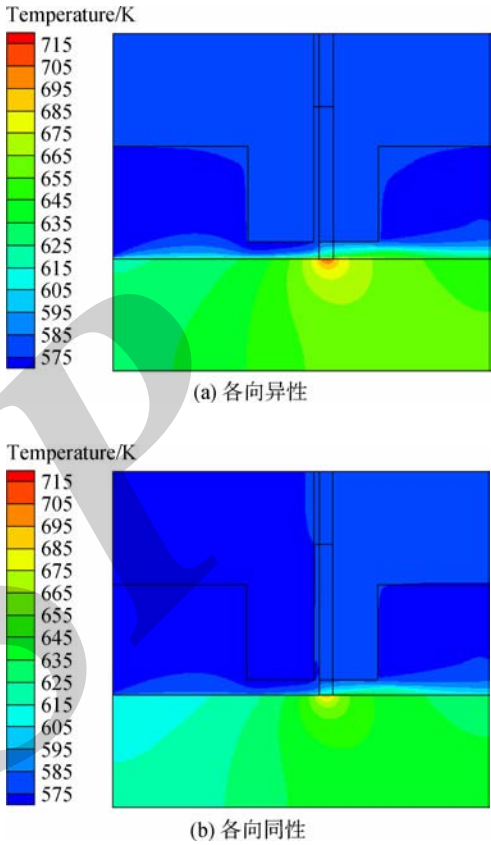


图 10 计算模型周期边界面温度云图
Fig. 10 Temperature chart of computational model periodic boundary

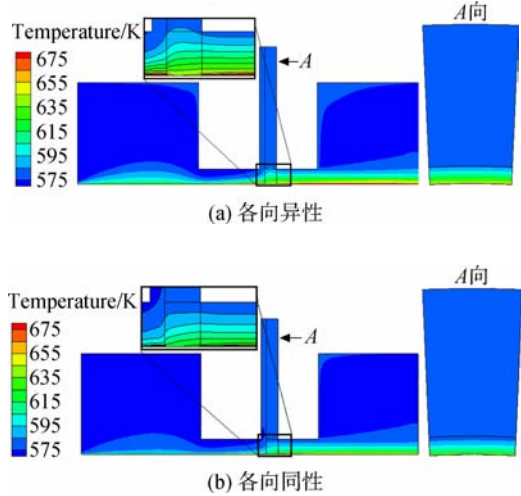


图 11 流体区域周期边界面以及密封片端面的温度云图
Fig. 11 Temperature chart of fluid domain periodic boundary and finger seal end

流,计算域温度均有所提升,但由于流体的流动使得大部分流体区域的温度较转子和前、后挡板等固体区域偏低,而流固交界面处流体因与固体区域对流换热,温度相对较高;此外,采用各向异性传热模型得到的温度结果大部分要高于各向同性模型。由图 11 可知,各向异性与各向同性传热模型计算结果的相同点是:指尖密封周期边界面上最高温度均出现在指尖靴与转子接触表面的略下游处,从此处温度沿径向和轴向开始降低,且温度的径向变化更为显著,这是因为流体的流动和转子的高速旋转使流体的换热加强;在指尖靴区域、后挡板保护高度区域及下游流场域底部,温度沿径向呈现阶梯状分布;指梁上部的温度分布则比较均匀,且略高于进口温度;在进口流场域、前挡板保护高度区域以及下游流场域的上部,温度几乎都保持与环境温度一致;而隔片下部区域由于与前挡板和指梁区域换热充分,其温度与指梁上部和前挡板区域温度一致;指尖密封区域温度沿周向变化很小,这是因为指尖密封结构具有循环对称性。两者的不同点是:在指尖靴区域,采用各向异性传热模型计算所得温度场中沿轴向的温度梯度要大于在各向同性传热模型下计算所得的,这是因为在上一模型中考虑了轴向接触热阻,使得温度沿轴向传递更加困难,温度梯度变大;在指梁区域的下部,采用各向异性传热模型得到的温度也存在明显的梯度,这是由于热量沿轴向传递受阻,使得径向热流增大导致的。

其他压差 (0.1、0.5、0.7 MPa) 及转速 (18000、27000、45000 r/min) 等工况下的压力分布、流动和温度分布结果均与图 8~图 11 所示 0.3 MPa、36000 r/min 工况下的结果相似,只是在数值上有所不同,因此限于篇幅不再逐一表述,但本文选取了不同工况下能够表征流动特性的泄漏量和能够表征传热特性的指尖密封区域最高温度作为结果对上述算例进行对比分析。

图 12 和图 13 所示分别为采用各向异性传热模型计算所得不同上下游压差和不同转子转速作用下密封件泄漏量和最高温度变化图。由图 12 可知,泄漏量随着上下游压差的增大而增大,这是因为压差驱动流体流动,压差越大,驱动力越大,使得泄漏量越大。指尖密封区域最高温度随着上下游压差的增大而减小,这是因为压差的增加导致泄漏量的增大从而带走更多的热量,此外泄漏流速的增加也会增强泄漏流体与指尖密封固体结构以及转子之间的对流换热,使得更多的热量传

给流体并被带走,使得指尖密封区域最高温度降低。由图 13 可知,泄漏量基本不随着转速的变化而变化,这是因为转速的增加只是提高了转子表面附近的区域的周向速度,这对于指尖密封的轴向泄漏几乎没有影响。指尖密封区域最高温度随着转速的增大而增大,这是因为转速的增大直接导致摩擦热量的增加,进而使得指尖密封区域最高温度升高。

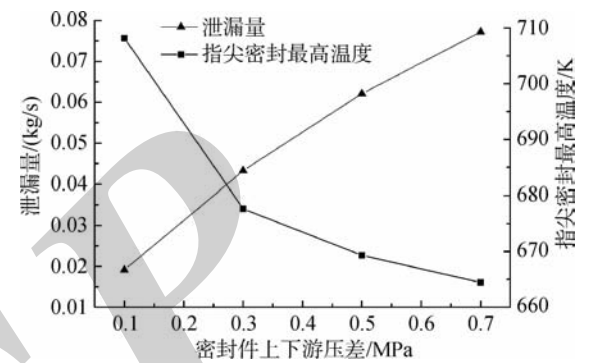


图 12 不同压差下泄漏量和指尖密封区域最高温度
Fig. 12 Leakage and highest temperature of finger seal in different pressure differences

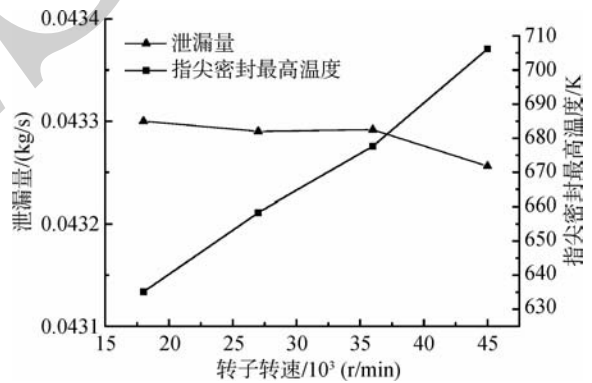


图 13 不同转速下泄漏量和指尖密封区域最高温度
Fig. 13 Leakage and highest temperature of finger seal in different rotational speeds

7 结 论

本文针对指尖密封结构引入多孔介质表征体元和孔隙率的概念,并依据各向异性介质导热理论在表征体元内推导得到孔隙率和有效导热系数张量,由此建立了指尖密封结构内各向异性传热的数学模型。之后利用商业软件 Fluent 中的 UDS 开发功能完成各向异性传热数学模型的数值应用,并对指尖密封结构内的流动与传热特性进行了数值分析。主要研究结论如下:

1) 指梁和指尖靴区域的各向异性有效导热系数张量随着结构参数、径向和周向位置以及轴向接触热阻等因素的变化而变化。

2) 压力的剧烈变化仅局限于指梁区域的底部以及指尖靴区域,即指尖密封的承压部分主要为后挡板保护高度以下的部分。

3) 指尖密封的最高温度出现在指尖靴与转子接触面的略下游处。

4) 与各向同性传热模型相比,采用各向异性传热模型时指梁下部和指尖靴区域沿径向和轴向存在较大温度梯度,但温度沿周向的变化两者均很小。

5) 随着指尖密封结构上下游压差的增加,泄漏量逐渐增大,而指尖密封区域最高温度值逐渐减小;随着转子转速的增加,泄漏量基本不变,而指尖密封区域最高温度值逐渐增大。

参考文献:

[1] ARORA G K, PROCTOR M P, STEINETZ B M, et al. Pressure balanced, low hysteresis, seal test results[R]. Cleveland, USA: NASA Glenn Research Center, 1999.

[2] PROCTOR M P, KUMAR A, DELGADO I R. High-speed, high-temperature finger seal test results[J]. Journal of Propulsion and Power, 2004, 20(2): 312-318.

[3] PROCTOR M P, DELGADO I R. Preliminary test results of a non-contacting finger seal on a herringbone-grooved rotor[R]. AIAA-2008-4506, 2008.

[4] 申晓龙, 陈国定, 苏华. 结构及工况对入字型指尖气浮密封的性能影响[J]. 航空动力学报, 2011, 26(2): 416-421.

SHEN Xiaolong, CHEN Guoding, SU Hua. Sealing performances analysis for a herringbone-grooved finger gas seal structure and working parameter[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(2): 416-421. (in Chinese)

[5] 郎达学, 苏华. 表面织构靴底流体动压指尖密封的性能分析[J]. 航空学报, 2012, 33(8): 1540-1546.

LANG Daxue, SU Hua. Performance analysis of surface texture padded finger seal[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(8): 1540-1546. (in Chinese)

[6] ZHANG H, ZHENG Q, YUE G, et al. Unsteady numerical analysis of a whole ring of finger seal with grooves on finger pads[R]. ASME Paper GT2013-94514, 2013.

[7] FLEMING D P. Approximate solution for choked flow in gas seal pads[R]. Cleveland, USA: NASA Glenn Research Center, 2004.

[8] CIOCI S, FLEMING D P, KEITH T G, et al. Numerical investigation of choked flow in padded finger seals[R]. World Tribology Congress, WTC-2005-64006, 2005.

[9] BRAUN M J, KUDRIAVTSEV V V, STEINETZ B M, et al. 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.

[10] BRAUN M J, LI H. An integrated numerical fluid-solid interaction model for finger seals with a padded low-pressure laminate[R]. San Diego, California USA: ASME/STLE International Joint Tribology Conference, 2007.

[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 seals[J]. Science Technology and Engineering, 2007, 7(13): 3157-3159. (in Chinese)

[12] YUE G, ZHENG Q, ZHU R. Numerical simulation of a padded finger seal[R]. ASME Paper GT2008-50997, 2008.

[13] ZHANG H, ZHENG Q, YUE G. Study on the leakage and deformation characteristics of the finger seals by using numerical simulation[R]. ASME Paper GT20101-23194, 2010.

[14] 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)

[15] BRAUN M J, PIERSON H M, DENG D. Thermofluids considerations and the dynamic behavior a finger seal assembly[J]. Tribology Transactions, 2005, 48(4): 531-547.

[16] 苏华, 陈国定. 指尖密封的温度场及热结构耦合分析[J]. 航空动力学报, 2009, 24(1): 196-203.

SU Hua, CHEN Guoding. Analysis of temperature field and coupled thermal and structure for finger seal[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(1): 196-203. (in Chinese)

[17] 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: International Tribology Conference, 1990.

[18] HENDRICKS R C, SCHLUMBERGER J, BRAUN M J. A bulk flow model of a brush seal system[R]. Orlando, USA: International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, 1991.

[19] 白花蕾. 指式封严泄漏特性的实验研究和数值模拟[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.

BAI Hualei. Experimental and numerical study on leakage characteristics of finger seal[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008. (in Chinese)

[20] 曹静, 吉洪湖, 金峰, 等. 指式封严结构中气流流动与传热特性分析[J]. 航空发动机, 2011, 37(4): 33-36.

CAO Jing, JI Honghu, JIN Feng, et al. Analysis of air flow and heat transfer characteristics in finger seal structure[J]. Aeroengine, 2011, 37(4): 33-36. (in Chinese)

[21] 林瑞泰. 多孔介质传热传质引论[M]. 北京: 科学出版社, 1995.

[22] 张洪济. 热传导[M]. 北京: 高等教育出版社, 1992.

[23]

COOPER M G,MIKIC B B,YOVANOVICH M M. Thermal contact conductance[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,1969,12(3):279-300.

[24]

MILANEZ F H,YOVANOVICH M M,CULHAM J R. Effect of surface asperity truncation on thermal contact conductance[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies,2003,26(1):48-54.

[25]

王峰,陈国定,余承涛. 基于粗糙接触的指尖密封热分析[J]. 机械科学与技术,2007,26(7):893-896.
WANGFeng,CHEN Guoding,YU Chengtao. Thermal analysis of the finger seal system with rough contact[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering,2007,26(7):893-896. (in Chinese)

(编辑:王碧琚)