

刷式密封流动传热特性数值方法

李浩, 孙丹, 赵欢, 张国臣, 冯毓钟

(沈阳航空航天大学 辽宁省航空推进系统先进测试技术重点实验室, 沈阳 110136)

摘 要: 开展了刷式密封流动传热特性数值方法研究, 分别建立了刷式密封多孔介质、稳态实体与瞬态流固热耦合求解模型, 设计搭建了刷式密封泄漏流动特性实验装置, 在实验验证数值方法准确性基础上, 对比分析了3种数值方法的差异性, 研究了刷式密封流动传热特性, 揭示了刷式密封的封严与传热机理。研究结果表明: 在研究工况下, 刷式密封多孔介质、稳态实体、瞬态流固热耦合模型泄漏量计算值与实验值的对比误差分别为9.8%~17.1%、8.1%~10%、6.92%~9.01%。刷式密封多孔介质模型计算速度较快, 但需通过实验修正孔隙率, 湍流模型对稳态实体模型流动传热特性结果影响较大, 瞬态流固热耦合模型考虑了流场、刷丝及摩擦热三者间相互耦合作用, 计算精度较高, 但所需计算时间较长; 同一压比下刷丝束温度从上游至下游逐渐增加, 刷丝束最高温度随压比的增加而增大。气流流经刷丝间隙形成的节流效应致使泄漏气流能量耗散是刷式密封封严的主要原因, 泄漏气流与刷丝表面间的对流换热是刷式密封摩擦热耗散的主要形式。

关 键 词: 刷式密封; 流动传热特性; 多孔介质模型; 稳态实体模型; 瞬态流固热耦合模型

中图分类号: V233; TK263.2

文献标志码: A

Numerical method of flow and heat transfer characteristics of brush seals

LI Hao, SUN Dan, ZHAO Huan, ZHANG Guochen, FENG Yuzhong

(Key Laboratory of Advanced Measurement and Test Technique for
Aviation Propulsion System, Liaoning Province,
Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: Numerical methods for the flow and heat transfer characteristics of brush seals were studied, and the porous media, steady-state solid and transient fluid-solid-heat coupling models of brush seals were established respectively. An experimental device for leakage flow characteristics of brush seals was designed and built. On the basis of verifying the accuracy of the numerical method by experiment, the differences of three numerical methods were compared and analyzed, the flow and heat transfer characteristics of brush seals were studied. The sealing and heat transfer mechanism of brush seals was revealed. The research results showed that: under the working conditions, the error between the leakage calculated by brush seals porous media, steady-state solid and transient fluid-solid-heat coupling model and the experimental values was 9.8%—17.1%, 8.1%—10%, 6.92%—9.01%, respectively. The calculation speed of brush

收稿日期: 2020-10-24

基金项目: 国家自然科学基金(52075346, 51675351); 中国博士后科学基金(2018M633572); 辽宁省自然科学基金(2019-ZD-0236)

作者简介: 李浩(1997—), 男, 硕士生, 主要从事刷式密封摩擦热效应研究。

通信作者: 孙丹(1981—), 男, 教授, 博士, 主要从事透平机械先进密封技术研究。E-mail: phd_sundan@163.com

引用格式: 李浩, 孙丹, 赵欢, 等. 刷式密封流动传热特性数值方法[J]. 航空动力学报, 2021, 36(9): 1826-1838. LI Hao, SUN Dan, ZHAO Huan, et al. Numerical method of flow and heat transfer characteristics of brush seals[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(9): 1826-1838.

seals porous media model was faster, but experiment was required for correction of the porosity; the turbulence model had great influence on the flow and heat transfer characteristics of steady-state solid model; the transient fluid-solid-heat coupling model considered the interaction among flow, bristle and frictional heat, and the calculation accuracy was high, but the calculation time was longer. At the same pressure ratio, the temperature of bristle pack gradually increased from upstream to downstream, and the highest temperature of bristle pack increased with the increase of pressure ratio. The main reason for sealing of brush seals was attributable to the throttle effect of air flow through brush wire gap resulting in energy dissipation of leakage air flow, and the convective heat transfer between the leakage gas flow and the brush wire surface was the main form of friction heat dissipation of brush seals.

Key words: brush seals; flow and heat transfer characteristics; porous media model; steady-state solid model; transient fluid-solid-thermal coupling model

刷式密封是一种具有优良密封性能的接触式动密封,常在航空发动机等透平机械中得到应用。工作时刷丝束内部流动传热过程复杂,准确计算刷式密封内部流动传热特性比较困难,开展刷式密封流动传热数值方法研究对准确分析刷式密封流动传热特性具有重要意义。

国内外学者对刷式密封流动传热数值方法进行了大量研究。早期研究者利用多孔介质模型对刷式密封展开了研究。Chew等^[1-3]基于非线性Darcian多孔介质模型研究了刷式密封泄漏量,并数值模拟了刷丝尖端区域流动换热过程。Dogu等^[4-8]采用改进非线性Darcian多孔介质模型,研究了不同密封间隙、不同后挡板结构参数下的刷式密封流场特性与泄漏特性以及不同压差、不同热流密度下刷式密封温度分布情况。邱波和李军^[9-10]求解基于non-Darcian多孔介质模型的RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes)方程,数值研究了不同压比、转速、干涉量以及刷式密封的几何结构参数对刷式密封泄漏流动、温度及传热特性的影响规律。随着计算机科学技术发展,研究人员根据实际结构参数开展了刷式密封三维实体模型研究。Chew等^[3]建立了刷丝束尖端区域的三维模型,研究了刷丝尖端区域的流动传热特性。Franceschini等^[11]建立了1列4根完整刷丝和2列8根半排刷丝的三维模型,研究了刷丝间的流动,分析了数值计算结果并与实验结果进行了比较。Lelli等^[12]建立了5根刷丝的三维模型,研究了气流力和刷丝的变形。黄首清等^[13]建立了三维叉排管束模型,研究了刷丝排数与工况参数对其流场与温度场的影响规律。孙丹、李国勤等^[14-15]基于三维实体建模方法,建立了考虑刷丝变形的刷式密

封流固耦合理论模型,研究了不同结构参数对密封泄漏量和不同压比、转速、干涉量、热流密度对刷丝最高温度的影响规律。邱波等^[16]采用CFD与FEM(finite element method)相结合的方法,数值研究了压差和干涉量对刷式密封传热特性的影响规律。马登骞等^[17]采用基于非线性Darcian多孔介质模型的三维RANS方程耦合有限元分析方法数值研究了考虑刷丝变形时改变后挡板结构对刷式密封流场及传热特性的耦合影响。综上所述,现有文献多数利用多孔介质模型进行刷式密封流动传热特性数值计算,对流体、刷丝、摩擦热三者之间相互耦合作用的研究较为匮乏,关于刷式密封流动传热特性的研究方法较为单一,鲜有关于不同数值方法比较分析的文献报道。

本文分别建立了刷式密封多孔介质模型、稳态实体模型和瞬态流固热耦合模型,设计搭建了刷式密封泄漏流动特性实验装置,实验研究了压比对泄漏量的影响,在此基础上,验证了3种数值模型的准确性,数值研究了刷式密封流动传热特性,分析了刷式密封泄漏特性、流动特性、流场温度及刷丝域温度分布结果,揭示了刷式密封密封机理与传热机理,综合分析了刷式密封多孔介质模型、稳态实体模型和瞬态流固热耦合模型的流动传热特性数值结果,对比分析了不同数值方法的差异性,旨在为准确计算刷式密封内部流动传热特性提供计算方法。

1 刷式密封流动传热特性数值方法

1.1 多孔介质模型

1.1.1 多孔介质模型流体控制方程

刷式密封刷丝排列紧凑,气流在流经刷丝束

区域时,只能通过刷丝之间的微小间隙流动,将刷丝束看做多孔介质模型进行数值计算。由于流体存在黏性以及刷丝对流体的阻碍作用,在刷丝束内部的流体流动受到黏性阻力和惯性阻力的影响,在RANS方程的动量方程中增加黏性损失项和惯性损失项,分别代表刷丝对流体的黏性阻力和惯性阻力^[18]。

$$\frac{\partial(\phi\rho_i)}{\partial t} + \text{div}(\rho_i U_i) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho_i u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + F_i \\ F_i = -A_i \eta u_i - \frac{1}{2} B_i \rho_i |u_i| u_i \end{cases} \quad (2)$$

其中div表示散度;下标*i, j*代表*x, y, z*方向,且*i*≠*j*; *x, y, z*分别定义为轴向方向、周向方向、径向方向; ϕ 为孔隙率; *t*为时间; ρ_i 为流体密度; *p*为流体压力; U_i 为流体速度矢量, u_i, u_j 为 U_i 在*i, j*方向上的速度分量; F_i 为*i*方向上的动量方程阻力源项; A_i 与 B_i 是分别黏性阻力系数和惯性阻力系数; τ 为切向应力; η 为流体动力黏度。

利用Eugrn方程推导刷丝束多孔介质区域的黏性阻力系数与惯性阻力系数,将轴向、周向和径向黏性阻力系数分别定义为 a_x, a_y 和 a_z , 惯性阻力系数分别定义为 b_x, b_y 和 b_z , 推导出阻力系数计算公式如下^[18]:

$$\begin{cases} a_x = a_y = \frac{66.67(1-\phi)^2}{D^2 \phi^3} \\ a_z = 0.4 \phi a_y \\ b_x = b_y = \frac{2.33(1-\phi)}{D \phi^3} \\ b_z = 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中孔隙率 ϕ 是指刷丝束多孔介质内的微小空隙的体积与刷丝束多孔介质区域总体积的比值。它是影响刷丝束内流体传输性能的重要参数。根据刷丝束的几何结构得出孔隙率随刷式密封径向高度的变化关系:

$$\phi = 1 - \frac{V_s}{V} = 1 - \frac{\pi D^2 N}{4\omega \sin \varphi} \quad (4)$$

其中 V_s 与 V 分别为刷丝体积与刷丝束多孔介质区域总体积; N 为刷丝束密度; D 为刷丝直径; ω 为刷丝束轴向厚度; φ 为刷丝束倾斜角。

1.1.2 多孔介质模型传热控制方程

刷式密封多孔介质模型将刷丝束区域看做多孔介质,热量在多孔介质内的热传导发生在固体相,实际中热量是在圆柱形刷丝内进行传导,固体

相的占比受到孔隙率的影响,需要对多孔介质固体相的导热系数与实际刷丝导热系数进行拟合,在多孔介质中引入有效导热系数来考虑刷丝束内随机分布的孔隙对固体相导热的影响。刷丝束多孔介质具有不同的物质相,刷丝间相互平行,摩擦热量由刷丝自由端传递至固定端,方向平行于刷丝,与孔隙来流垂直,其有效导热系数为^[19]

$$\frac{1}{\lambda_{\text{eff}}} = \frac{1-\phi}{\lambda_s} + \frac{\phi}{\lambda_f} \quad (5)$$

其中 λ_{eff} 有效导热系数; λ_s 为刷丝导热系数; λ_f 为流体导热系数。

固体相与流体相之间存在强制对流换热,此时为局部非热平衡模型,在平均容积法基础上,建立固体相能量方程:

$$(1-\phi)\rho_s c_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = (1-\phi)\text{div}(\lambda_s \nabla T_s) + \alpha(T_s - T_f) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \phi \rho_f c_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + (\rho_f c_f) U_f \cdot \nabla T_f = \\ \phi \text{div}(\lambda_f \nabla T_f) + \alpha(T_f - T_s) \end{aligned} \quad (7)$$

其中 ∇ 为梯度算子; c_s 为刷丝比热容; c_f 为气体比热容; ρ_s 为刷丝密度; α 为表面传热系数; T_s, T_f 分别表示固体相温度和流体相温度; λ 为导热系数,下标 *s, f* 分别表示固体相和流体相。

1.1.3 多孔介质模型流动传热计算流程

如图1所示为刷式密封多孔介质模型计算流程图,给定刷式密封多孔介质模型气相及固相物性参数和初始计算所需边界条件,输入刷式密封多孔介质模型孔隙率、黏性损失系数及惯性阻力

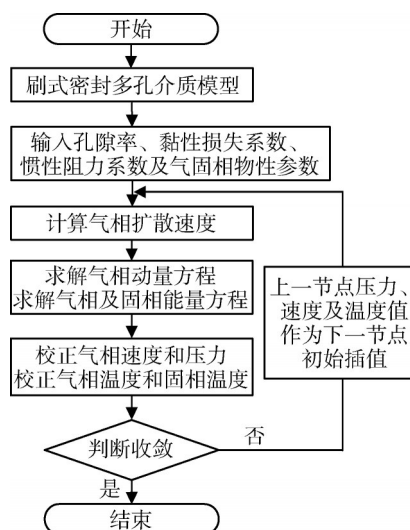


图1 刷式密封多孔介质模型流动传热计算流程
Fig.1 Flow and heat transfer calculation process of
brush seal porous media model

系数,根据上述所给条件及系数计算气相在多孔介质模型中的扩散速度,求解动量方程和能量方程,校正初始条件下的速度、压力及温度,判断速度、压力及温度在迭代过程是否收敛,否则重复上述过程。

1.2 稳态实体模型

1.2.1 稳态实体模型流体控制方程

根据刷式密封实际结构参数进行实体建模,构建刷式密封实际流场与刷丝束结构域,稳态实体模型采用真实结构参数进行建模,对流场与刷丝束结构域最小循环单元进行稳态过程计算,具有更高的计算精度。在刷式密封不同工况的稳态计算过程中,流体域湍流流动守恒方程包含连续方程和动量守恒方程^[20]。

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_i U_i) = 0 \quad (8)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial(\rho_i u)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_i U_i u) = \operatorname{div}(\Gamma_{\text{avg}} \operatorname{grad} u) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_u \\ \frac{\partial(\rho_i v)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_i U_i v) = \operatorname{div}(\Gamma_{\text{avg}} \operatorname{grad} v) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_v \\ \frac{\partial(\rho_i w)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_i U_i w) = \operatorname{div}(\Gamma_{\text{avg}} \operatorname{grad} w) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_w \end{array} \right. \quad (9)$$

其中 u, v, w 为 U_i 在 x, y, z 方向上的速度分量; Γ_{avg} 为平均有效扩散率; S_u, S_v, S_w 为动量守恒方程的广义源项分量。

由于刷丝束区域流场特性较为复杂,流场的湍流度和黏度呈各向异性,需要对标准 $k-\epsilon$ 湍流模型进行修正,修正后的 RNG (renormalization group) $k-\epsilon$ 模型公式为^[20]

$$\frac{\partial(\rho_i k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_i u_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\mu_i}{\sigma_k} \cdot \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G - \rho \epsilon \quad (10)$$

$$\frac{\partial(\rho_i \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_i u_j \epsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\mu_i}{\sigma_k} \cdot \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_{\epsilon 1} G \frac{\epsilon}{k} - \rho C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (11)$$

其中 $G = \mu_i \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$; μ_i 为湍流黏度, $\mu_i = \rho C_{\mu} (k^2/\epsilon)$; k 为湍动能; ϵ 为湍流耗散率。该模型的拟合常数为 $C_{\epsilon 1} = 1.44, C_{\epsilon 2} = 1.92, C_{\mu} = 0.99, \sigma_k =$

1.0, $\sigma_{\epsilon} = 1.3$ 。

1.2.2 稳态实体模型传热控制方程

刷式密封传热控制方程包括流体域的流动传热控制方程与刷丝束区域的固体导热方程。其中,流体域流动传热控制方程为^[21]

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \left[\rho_i \left(E + \frac{U_i^2}{2} \right) U_i \right] &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial x} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial y} \right) &+ \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial z} \right) - \frac{\partial(u p)}{\partial x} - \frac{\partial(v p)}{\partial y} - \\ \frac{\partial(w p)}{\partial z} &+ \frac{\partial(u \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u \tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u \tau_{zx})}{\partial z} + \\ \frac{\partial(v \tau_{xy})}{\partial x} &+ \frac{\partial(v \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v \tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w \tau_{xz})}{\partial x} + \\ \frac{\partial(v \tau_{yz})}{\partial y} &+ \frac{\partial(w \tau_{zx})}{\partial z} \end{aligned} \quad (12)$$

其中 E 为总能量。

刷丝材料为 Haynes 25, 其固体导热控制方程为^[22]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial z} \right) = 0 \quad (13)$$

刷丝与转子摩擦产生的热量通过刷丝内部及相互间传导,同时又被上游高压来流气体带至下游低压区域,需要确定刷丝与泄漏气流间的表面传热系数。刷丝相互交叉排列在泄漏流动气流中,可将其考虑为流体横掠叉排管束的流动模型,可确定出流体与刷丝表面传热系数 α ,公式如下^[22]:

$$\left\{ \begin{array}{l} Nu_d = \frac{\alpha D}{\lambda_f} = C_2 C_1 Re_{d, \max}^{0.4} Pr^{0.36} \left(\frac{Pr_f}{Pr_s} \right)^{0.25} \\ Re_{d, \max}^{0.4} = \frac{\rho U_{f, \max} D}{\eta} \end{array} \right. \quad (14)$$

其中 $U_{f, \max}$ 是流体最大速度值; C_2 为叉排管束修正系数; C_1 为根据雷诺数和管束排列方式选取修正系数; Pr_f 是管束进出口流体平均速度来确定的普朗特数; Pr_s 是根据管束平均表面温度所确定的普朗特数; $Re_{d, \max}$ 是根据叉排管束中最小截面处的最大流速所确定的雷诺数。

1.2.3 稳态实体模型流动传热计算流程

如图2为刷式密封稳态实体模型流动传热计算流程,初始化流体和固体区域温度场,更新流场后单独对流体区域稳态流场进行求解,即将流体与刷丝对流换热交界面设为固定温度边界,联立

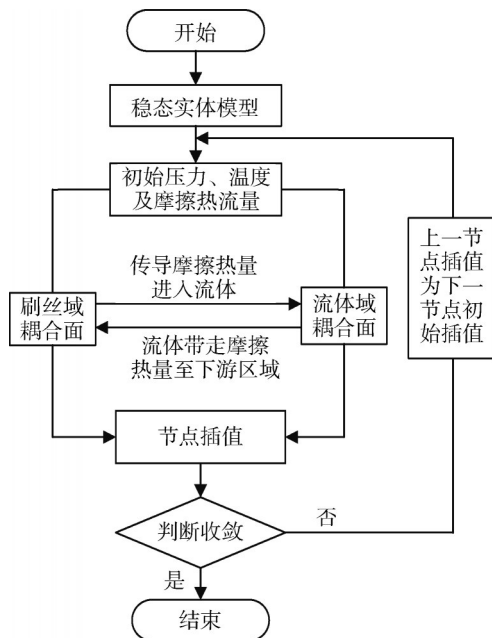


图2 刷式密封稳态实体模型流动传热计算流程

Fig.2 Flow and heat transfer calculation process of brush seals steady-state solid model

求解流体区域稳态动量、湍流及能量方程,获得稳态流场,同时对流体区域和刷丝区域进行传热计算,获得温度场分布情况,判断此时节点上压力、速度及温度是否收敛,交替进行流场更新和温度场计算,直至计算结束。

1.3 瞬态流固热耦合模型

1.3.1 瞬态流固热耦合模型 ALE 算法运动描述

刷式密封工作过程是一个流固热耦合作用的过程,流体、刷丝与摩擦热三者间相互耦合作用,刷丝在流体以及热应力作用下变形较大,刷丝的变形进而影响流场的分布以及刷丝与转子接触力。如果在对刷式密封流固热耦合进行数值计算时采用常用的 Euler 算法或者 Lagrange 算法,刷丝的大变形会使模型网格畸变严重,从而引起严重的局部误差或者使计算中止的问题。

针对 Euler 算法或者 Lagrange 算法下的模型网格畸变所带来的问题,对刷式密封流固热耦合采用 ALE (arbitrary Lagrange-Euler) 算法, ALE 算法提出的参考构型在空间中的运动形式是任意的,其在 Lagrange 坐标系和 Euler 坐标系之间运动。当网格的运动速度与物体的运动速度相等时即为 Lagrange 描述,当网格固定在空间不动时即为 Euler 描述。ALE 算法既能保证合理的网格形状,又能准确地描述刷丝接触变形的边界,因此对刷式密封瞬态流固热耦合模

型采用 ALE 算法进行计算可解决网格畸变严重的问题。

假设连续体在初始时刻 t_0 时的初始构形为 Ω_x , t 时刻的当前构型或空间构形为 Ω_x 。为描述各物质点的位置,引入 Lagrange 坐标系 $OX_1X_2X_3$, Euler 坐标系 $ox_1x_2x_3$,故可将物质点由初始构型映射到空间构型,其运动可以描述为^[23]

$$x_i = x_i(X, t) \quad (15)$$

ALE 描述引入了一个独立于初始构型和空间构型的参考构型 Ω_ξ ,应用参考构型来描述网格的运动,并独立于物质运动。引入 ALE 坐标系 $o\xi_1\xi_2\xi_3$,故可将参考点映射到空间构型,即网格运动可以描述为

$$x_i = x_i(\xi, t) \quad (16)$$

参考点映射到初始构型可以描述为

$$X_i = X_i(\xi, t) \quad (17)$$

参考点在空间构型中的速度可以描述为

$$\hat{v}_i = \frac{\partial x_i(\xi, t)}{\partial t} \quad (18)$$

物质点在参考构型中的速度可以描述为

$$w_i = \frac{\partial \xi_i(X, t)}{\partial t} \quad (19)$$

物质点的运动可以理解网格运动及 ALE 映射的复合,因此物质点在空间构型中的速度可以描述为

$$v_i = \frac{\partial x_i(X, t)}{\partial t} = \hat{v}_i + \frac{\partial x_i(\xi, t)}{\partial \xi_j} w_j \quad (20)$$

物质点相对于网格点的速度(对流速度)可以描述为^[23]

$$v_{\text{rel}, i} = v_i - \hat{v}_i = \frac{\partial x_i(\xi, t)}{\partial \xi_j} w_j \quad (21)$$

1.3.2 瞬态流固热耦合模型刷丝动力学控制方程

刷丝运动在 t 时刻的动力学方程可表示为^[23]

$$M\ddot{U}_s + C\dot{U}_s + F_{\text{int}} = F_{\text{ext}} \quad (22)$$

其中 M 为质量矩阵; C 为阻尼矩阵; F_{int} 为内力向量; F_{ext} 为外力向量; U_s 为刷丝的运动速度。

内力向量由单元等效节点力和单元接触力组成,可描述为^[23]

$$F_{\text{int}} = \sum \int H^T \sigma dV + F_{\text{con}} \quad (23)$$

其中 H 为应变位移矩阵; σ 为刷丝间接触应变; F_{con} 为单元接触力向量。

1.3.3 瞬态流固热耦合模型流体控制方程

刷式密封流体域控制方程采用的 ALE 算法描述下的控制方程,其在空间坐标系下质量守恒

方程为^[23]

$$\left.\frac{\partial \rho_i}{\partial t}\right|_{\xi} + \mathbf{v}_{\text{rel},i} \frac{\partial \rho_i}{\partial x_i} + \rho_i \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0 \quad (24)$$

动量守恒方程为

$$\rho_i \left.\frac{\partial v_i}{\partial t}\right|_{\xi} + \rho_i \mathbf{v}_{\text{rel},i} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho_i f_i \quad (25)$$

其中 ξ 为参考坐标系; σ_{ij} 为柯西应力张量分量; f_i 为流体微元体积力。

1.3.4 瞬态流固热耦合模型传热控制方程

刷式密封瞬态流固热耦合温度场可将其看作无数个连续准稳态温度场进行处理,则在 $[t_n, t_{n+1}]$ 时间段内流场准稳态温度控制方程为^[24]

$$\frac{\partial(\rho_i T_i)}{\partial t} + \text{div}(\rho_i \mathbf{U}_i T_i) = \text{div}(\Gamma \nabla T_i) + S \quad (26)$$

式中 Γ 为各变量广义扩散系数; S 为各变量源项。

刷丝束固体区域准稳态导热方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_s h) = \nabla \cdot (\lambda_s \nabla T_s) + Q \quad (27)$$

其中 h 为显焓; Q 为摩擦热源。式(27)等号左边表示刷丝能量随时间的变化,等号右边第1、2项分别表示传导引起的热流以及刷丝尖端的摩擦热源。

1.3.5 瞬态流固热耦合模型流动传热计算流程

如图3为刷式密封瞬态流固热耦合模型流动

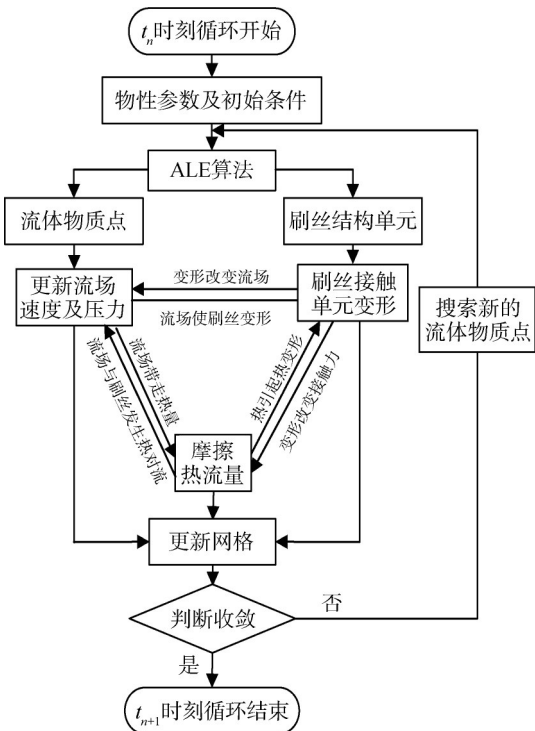


图3 刷式密封瞬态流固热耦合模型流动传热计算流程
Fig.3 Flow and heat transfer calculation process of brush seals transient fluid-solid-heat coupling model

传热计算流程图,整体离散的模型包括了耦合的非线性方程,其耦合关系如下: t_n 时刻流体通过与刷丝接触界面对固体施加应力,引起刷丝变形,界面的热流用于求解固体温度场;固体位移定义了流体区域的几何变化,可将其看作流体、刷丝和摩擦热三者之间的耦合过程,当相邻步之间刷丝变形量相对误差不超过0.5%,认为计算收敛,则在 t_{n+1} 结束计算循环。

2 刷式密封数值求解模型

2.1 求解模型

图4给出了刷式密封结构及工作示意图,刷式密封结构参数如表1所示,刷丝材料为Haynes 25,弹性模量为213.7 GPa,泊松比为0.29。对多孔介质模型选取前挡板以下区域作为建模区域,为了与稳态实体模型、瞬态流固热耦合模型进行泄漏量、流场、温度场比较分析,对多孔介质模型采用与实体模型等厚度建模,对刷式密封稳态实体模型与瞬态流固热耦合模型同样选取前挡板以

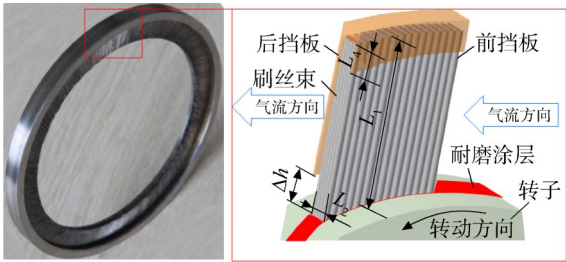


图4 刷式密封结构及工作示意图
Fig.4 Brush seals structure and working diagram

表 1 刷式密封结构参数	
Table 1 Structural parameters of brush seals	
主要结构参数	数值
刷丝直径/mm	0.08
刷丝束厚度/mm	1.80
刷丝长度/mm	11.0
刷丝排列间隙/mm	0.008
后挡板厚度/mm	0.50
转子直径/mm	129
干涉量/mm	0.20
后挡板保护高度/mm	3.00
末排刷丝与后挡板轴向间隙/mm	0
前挡板高度/mm	1.00

下区域作为建模区域,以1个完整排,2个半排作为刷式密封最小周期循环单元建立数值模型,完整刷丝轴向排数为20排,半刷丝轴向排数为19排。

2.2 网格划分

图5给出了刷式密封不同求解模型的网格划分示意图,图5(a)为刷式密封多孔介质模型,刷丝束区域流体流动较复杂,对其进行网格加密,经网格无关性验证后,最终确定网格单元数为114万。图5(b)为稳态实体求解模型,网格划分时在流体区域采用六面体网格,在流动情况较为复杂

的刷丝束与流体域交界区域和刷丝域采用四面体网格,并对刷丝束区域网格进行了加密。考虑到计算效率及结果的准确性,经网格无关性验证后,将网格单元数确定为305万。图5(c)为瞬态流固热耦合模型进行网格划分,刷丝束与后挡板固体域采用Lagrange单元,流体域采用Euler单元,刷丝和后挡板外表面为流固耦合面,采用ALE算法计算流固耦合区域。为提高计算精度并考虑计算成本,本文对流固耦合附近区域的网格进行局部加密处理,流体网格向转子表面逐渐加密,验证网格无关性后,确定网格数量为312万。

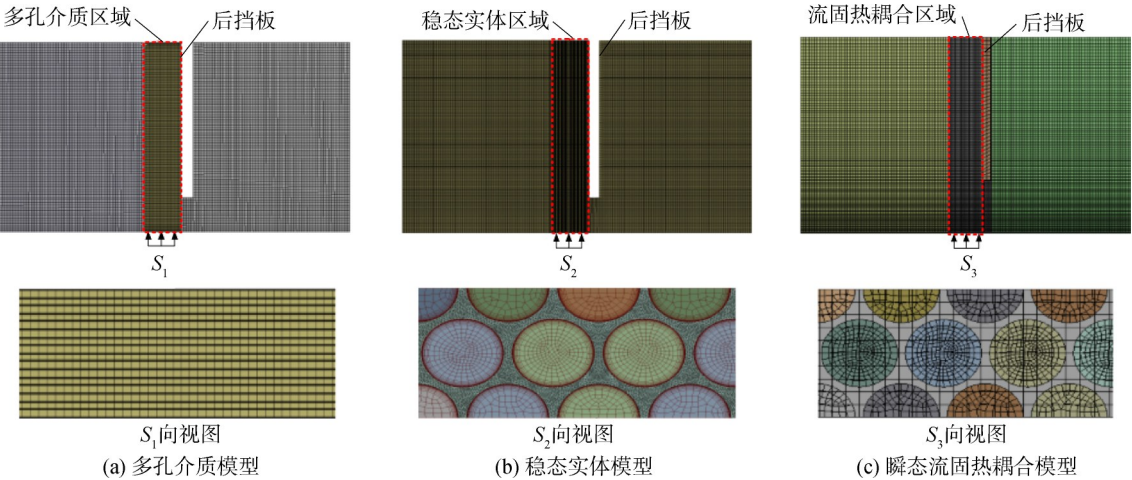


图5 刷式密封网格划分

Fig.5 Grid division of brush seals

2.3 边界条件

图6给出了刷式密封边界条件示意图。在刷式密封多孔介质模型中,刷丝束区域设置为多孔介质区域,在刷式密封多孔介质、稳态实体与瞬态流固热耦合模型中,通过泄漏量误差不超过5%。验证湍流模型无关性后,采用RNG $k-\epsilon$ 湍流模型,给定转子表面旋转速度和耦合传热边界,其中刷丝束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,流体进口采用总压与总温的边界条件,流体出口采用静压的边界条件,流体与刷丝之间以及流体与挡板之间均为流固耦合边界条件,固体域耦合面为刷丝的圆柱面和自由端底面,流体域耦合面为流体与固体耦合面接触的部分,表2为刷丝密封边界条件计算值。

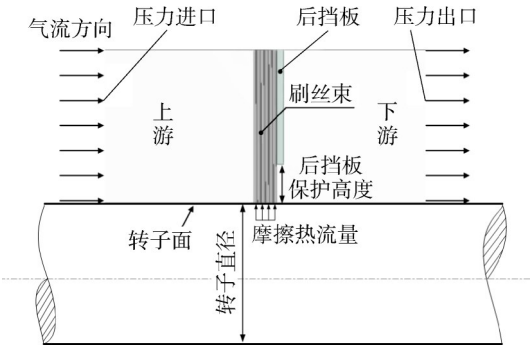


图6 刷式密封边界条件

Fig.6 Boundary condition of brush seals

表2 边界条件计算值

Table 2 Calculation value of boundary condition

边界名称	边界条件
进口总压	0.15~0.40
进口总温/K	290.0
出口静压/MPa	0.10
出口温度/K	300.0
进出口压比	1.5~4.0
热流密度/(kW/m ²)	836.15~4 968
转速/(r/min)	20 000
瞬态流固热耦合计算时长/ms	4.0

3 刷式密封数值方法实验验证

3.1 实验装置

图 7 给出了刷式密封泄漏流动特性实验装置实物图。实验中采用的气体来自空气压缩机向储气罐内充入的高压空气,其最高压力可以达到 1.0 MPa;气体经装有高精度流量计的管路流入实验气缸,其中主流量计为大量程流量计(量程范围(标准状况下):110~870 m³/h),副流量计为

小量程流量计(量程范围(标准状况下):20~150 m³/h),安装在下游分支气路,可以获得更加精确的实验数据。气缸上固定有多级刷式密封基座,用于装配实验件进行密封实验。在本文研究工况下,刷式密封与有机玻璃按照 0.2 mm 干涉量进行装配;气管用于将压力引入压差传感器进行测量;数字采集仪用于实时同步采集数据。密封腔室内的气体可通过压力输送管输送至压力表,可以测量密封腔室内的气体压力。

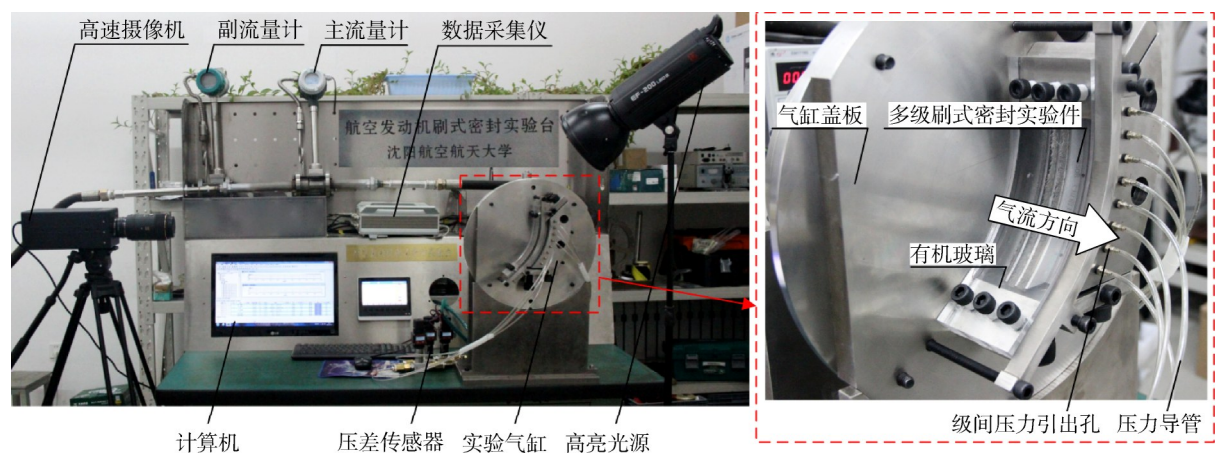


图 7 刷式密封泄漏流动实验装置
Fig.7 Brush seals leakage flow experimental device

3.2 实验结果与数值结果对比验证分析

图 8 给出了刷式密封实验测得的泄漏量与多孔介质模型、稳态实体模型、瞬态流固热耦合模型 3 种数值方法计算的泄漏量随压比的变化曲线。由图可以看出,刷式密封泄漏量随着压比的增大近似呈线性增大,瞬态流固热耦合模型所计算的泄漏量与实验所测得泄漏量误差为 6.92%~9.01%,稳态实体模型计算泄漏量与实验值误差为 8.1%~10%,多孔介质模型计算泄漏量与实验值误差为 9.8%~17.1%。

在本文中刷式密封多孔介质模型采用实验修正后刷丝束区域孔隙率,表 3 为多孔介质模型在不同压比下孔隙率修正。压比为 4.0 时刷式密封多孔介质初始孔隙率为 0.266,当孔隙率经实验修正后,其孔隙率减小为 0.231,由刷式密封多孔介质连续方程(式(1))中可以看出,孔隙率经实验修正减小后,渗透率减小,泄漏量也随之减小。

相对刷式密封多孔介质模型,在稳态实体连续方程(式(8))中则是根据实体模型来控制微元体对不同梯度方向上流动进行了计算控制,能更准确计算出控制体流进与流出的体积流量变化。

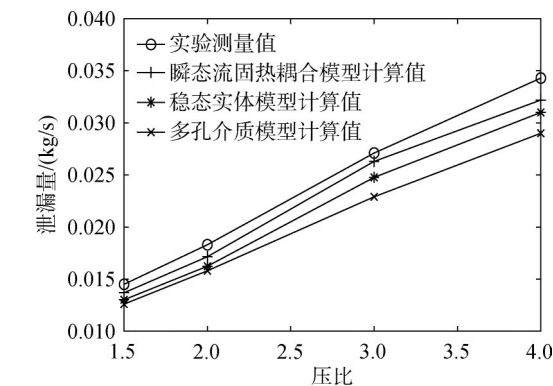


图 8 刷式密封泄漏量实验测量值与计算值对比
Fig.8 Comparative verification of brush seals experiment and numerical leakage

表 3 多孔介质模型孔隙率修正 Table 3 Porosity correction of porous media model		
压比	修正前孔隙率	修正后孔隙率
1.5	0.266	0.257
2.0	0.266	0.249
3.0	0.266	0.240
4.0	0.266	0.231

瞬态流固热耦合模型质量守恒方程(式(22))引入了参考坐标系与空间坐标系之间相对位置变化情况,在控制体移动过程中,通过相对参考坐标系来描述空间坐标系随时间的变化,计算精度较高。瞬态流固热耦合模型考虑了流体、刷丝及摩擦热三者间的耦合作用,所计算泄漏量与真实工况最为接近;稳态实体模型基于实体模型控制微元体不同梯度方向流动,所计算泄漏量较为准确;多孔介质模型通过孔隙率对流场进行控制,缺乏实体模型下的流体结构的控制,所计算泄漏量与实验测量值相差最大。

4 刷式密封流动传热特性分析

4.1 刷式密封流动特性分析

4.1.1 刷式密封压力分布特性分析

图9给出了压比为4.0时刷式密封在多孔介质模型、稳态实体模型及瞬态流固热耦合模型下压力分布云图。由图可以看出,刷式密封进口段流体与出口段流体压力基本保持不变,压力降主要发生在刷丝束区域,经过刷丝束区域压力逐渐递减,压力变化集中于刷式密封后挡板保护高度范围内。在轴向方向上的压降使刷丝束向下游方向摆动,刷丝之间以及刷丝与后挡板之间产生摩擦力,摩擦力的存在使刷丝的运动滞后于转子的跳动,导致刷丝自由端与转子表面产生间隙,使得泄漏量增大,这是产生“滞后效应”的主要原因。在刷丝束区域径向方向同样产生压降,径向压差使刷丝在径向方向上产生径向压力,将刷丝吹向转子,会加快刷丝的磨损,导致刷式密封使用寿命大大降低,这是产生“吹下效应”的主要原因。

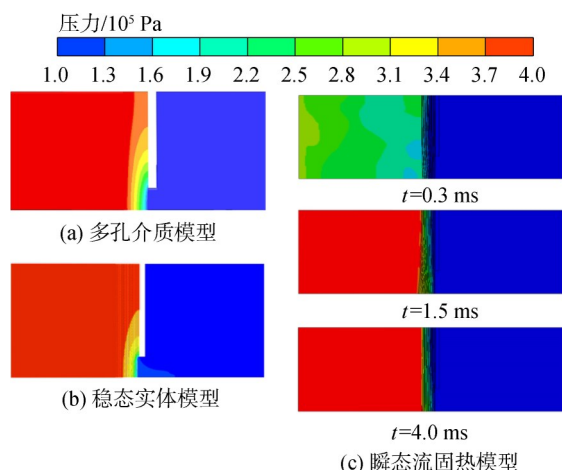


图9 刷式密封不同数值模型压力分布云图

Fig.9 Pressure distribution cloud images of brush seals with different numerical models

由图9还可以看出,刷式密封多孔介质模型与稳态实体模型在刷丝束区域的压力变化开始位置不同,结合刷式密封稳态实体模型动量方程(式(9))可以看出,动量方程是对N-S(Navier-Stokes)方程做时间平均,并且通过补充方程(式(10)~式(11))的 $k-\epsilon$ 湍流方程来反映稳态实体模型在 x 、 y 、 z 三个方向的流动,求解实体模型下的流场动量方程,更接近真实工况。在瞬态流固热耦合模型4.0 ms时刻,高压气流稳定,刷丝变形稳定。由瞬态流固热耦合模型动量方程(式(25))可以看出,柯西应力在不同方向上产生分量,可反映刷丝大变形下所产生的应力,由动量守恒定律可知,在 t 时刻参考坐标系 ξ 下的控制微元体压力等于此时的柯西应力,瞬态流固热耦合模型能反映出刷丝变形不同时刻的流体域压力变化。

4.1.2 刷式密封速度分布特性分析

图10给出了压比为4.0时刷式密封多孔介质模型、稳态实体模型及瞬态流固热耦合模型下速度分布云图,由图10可以看出,3种数值模型进出口段流体速度变化不大,速度变化集中于刷丝束区域,主要发生在刷丝束自由端位置,刷丝固定端位置的速度变化基本保持不变,在轴向方向上的速度大于径向方向的速度,最大速度均出现在末排刷丝与后挡板交界处,泄漏气流最终呈射流状流出,且在下游区域出现旋涡流,这是由于泄漏气流被后挡板阻碍形成绕流出现的涡街现象。

由图10还可以看出刷式密封多孔介质模型最大速度为331.0 m/s,稳态实体模型最大速度为413.5 m/s,瞬态流固热耦合模型最大速度为

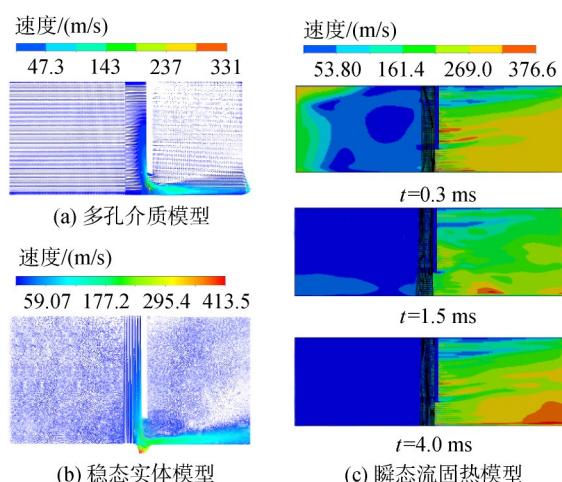


图10 刷式密封不同数值模型速度分布云图

Fig.10 Velocity distribution cloud images of brush seal with different numerical models

376.6 m/s。结合刷式密封多孔介质模型动量方程(式(2))看出速度项受到压力项、阻力源项的影响,阻力源项随刷式密封多孔介质孔隙率减小而增大。由稳态实体模型动量方程(式(9))、湍流模型方程(式(10)~式(11))可以看出速度项受广义源项、压力项、平均扩散率以及湍流黏度影响,未考虑实际过程刷丝变形带来的刷丝间隙减小引起的广义源项、湍流黏度的减小,其泄漏气流速度相较于刷式密封多孔介质模型更大;由瞬态流固热耦合模型动量方程(式(25))可看出速度受柯西应力和控制体体积力影响,刷丝在高压气流稳定后变形逐渐减小直至保持一定的变形量,其柯西应力也逐渐减小,速度项也随之减小。

4.1.3 刷式密封封严机理分析

结合图8的泄漏量对比分析、图9的不同数值方法下压力分布云图、图10的不同数值方法下速度分布云图的相同点及差异点,分析了刷丝束间隙的泄漏流动形式,得到了刷式密封封严机理,图11给出了刷丝束间隙中泄漏流动示意图。结合刷式密封压力分布特性图(图9)及速度分布特性图(图10)可以看出,压力在刷丝束区域呈阶梯状降低,流体从前排刷丝间隙流入刷丝束区域,并通过后挡板保护高度区域流出,这个过程泄漏流从刷丝稀疏区域流向刷丝密集区域,产生了同向流(图11(a));由图9(b)、图10(b)可以看出,在径向方向上同一刷丝间隙压力自上而下逐渐降低,压差导致气流在径向方向上流动,产生径向流(图11中(1b)),在轴向方向上,同一高度下的压力从前到后逐渐降低,压差使气流形成轴向流(图11中(2b)),两个方向的速度合成后流向刷丝密集的后挡板保护高度区域形成射流(图11(b));同向流与射流流动时会随机产生旋涡流(图11

(c)),同时,同向流和射流在流动时遇到排列紧密的刷丝,气流与刷丝表面碰撞,就会改变运动方向而变成与主流方向垂直的横向流动,即横向流(图11(d))。正是由于刷丝呈圆柱状,刷丝之间的间隙类似于节流阀,同向流、射流、旋涡流及横向流在刷丝间隙流动,气流流经间隙处产生节流效应,同时对刷丝做功导致刷丝产生扰动,根据热力学第一定律可知泄漏流内能降低,经过多排刷丝间隙后,泄漏流内能被大量耗散,达到了封严的效果。

4.2 刷式密封传热特性分析

4.2.1 刷式密封流场温度分布特性分析

图12给出了压比为4.0,干涉量为0.2 mm,转速为20 000 r/min时刷式密封在多孔介质模型、稳态实体模型及瞬态流固热耦合模型下的流场温度分布云图。由图中可以看出,3种数值模型的上游区域流体温度基本保持不变。温度从刷丝自由端到刷丝固定端逐渐降低,且最高温度均分布在刷丝与转子表面接触区域,越靠近下游,温度越高。这是由于前排刷丝热量被气流带至下游刷丝,导致下游刷丝温度高于前排刷丝。在出口段流体受来流带走的热量影响,温度高于下游区域流体。

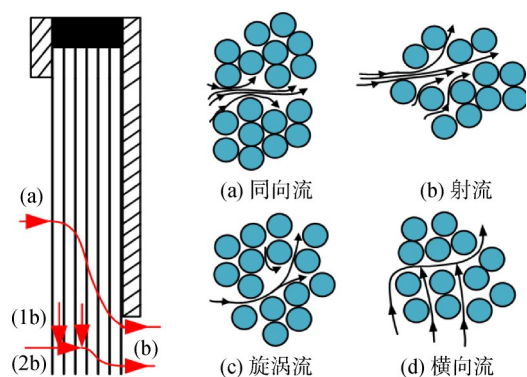


图11 刷丝束间隙中泄漏流动示意图

Fig.11 Schematic diagram of brush seals sealing mechanism

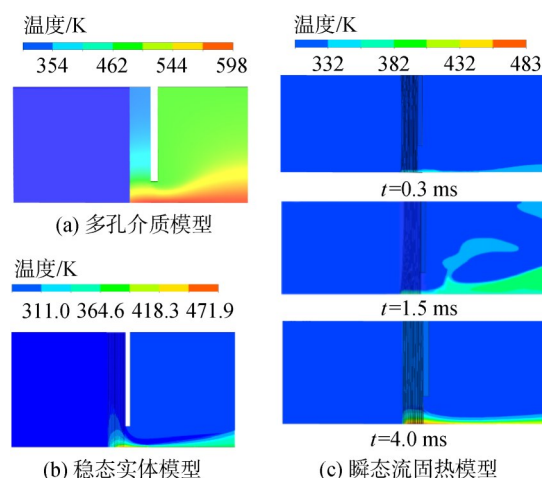


图12 刷式密封不同数值模型流场温度分布云图

Fig.12 Temperature distribution cloud images of brush seal with different numerical models

由图12还可以看出,不同模型所计算最高温度不同,刷式密封多孔介质模型最高温度为598.0 K,稳态实体模型最高温度为471.9 K,瞬态流固热耦合模型最高温度为483.0 K。多孔介质模型下游温度在整个下游腔体变化,稳态实体模型下游区域流体温度变化贴近转子表面,瞬态流

固热耦合模型下游区域流体温度则是从整个腔体内变化转为贴近转子面变化。结合刷式密封多孔介质传热控制方程(式(5)~式(7))可以看出多孔介质模型固相导热方程与流体相导热方程均受到孔隙率影响,有效导热系数增大,黏性阻力系数与惯性阻力系数增大,泄漏气流带走热量的能力降低,使同等工况下,刷式密封多孔介质模型最高温度高于稳态实体模型,瞬态流固热耦合模型考虑了刷丝随气流的变形,在刷丝稳定后,刷丝间隙减小,气流泄漏量降低,所带走热量相较于稳态实体模型较少,所以该模型计算最高温度比稳态实体模型高,同时瞬态流固热耦合模型将前一个准稳态温度场所计算的值作为下一个准稳态温度场计算的初值,从而计算出整个时间段内温度场变化。

4.2.2 刷式密封刷丝温度分布特性分析

图13给出了刷式密封在压比为4.0,干涉量为0.2 mm,转速为20 000 r/min时3种数值模型的刷丝域温度分布云图。由图可以看出,在轴向方向上,3种数值模型下的刷丝域最高温度逐渐升高,这是由于前排刷丝与转子相对运动产生的摩擦热被高速来流气体带到后排刷丝,且后排刷丝本身与转子产生的摩擦热导致后排刷丝温度高于前排刷丝。在径向方向上,温度从自由端至固定端呈阶梯状降低。3种数值模型下的刷丝域最高温度均出现在末排刷丝处。

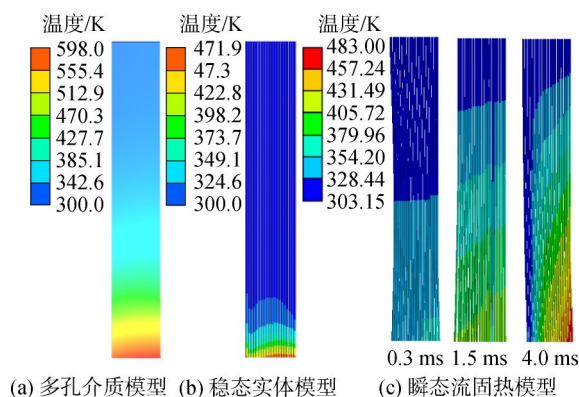


图13 刷式密封不同数值方法刷丝域温度分布云图

Fig.13 Temperature distribution cloud images of bristles domain for different numerical methods of brush seal

图14给出了刷式密封在干涉量为0.2 mm,转速为20 000 r/min时从第1排刷丝至末排刷丝最高温度随压比的变化曲线图。刷式密封第1排刷丝最高温度随压比变化较小,越靠近下游,刷丝最高温度随着压比的增大而变化较快,大压比下相同位置的刷丝最高温度远高于小压比下对应位

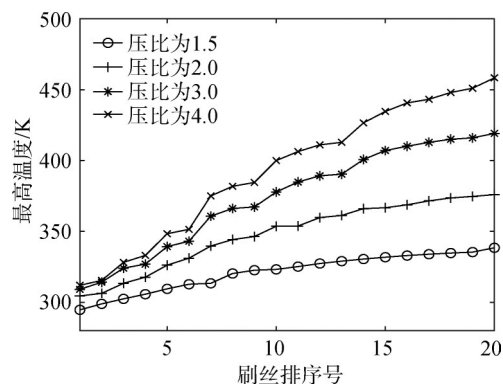


图14 刷式密封轴向不同位置刷丝最高温度

Fig.14 Bristle maximum temperature at different positions in axial direction of brush seals

置的刷丝最高温度,压比为4.0下的刷丝最高温度与压比为1.5下的刷丝最高温度相差119.8 K,这是由于随着压比的增大,高压气流与刷丝束产生“吹下效应”更为强烈,刷丝束变形更大,刷丝束与转子之间贴合更紧密,增大了刷丝与转子的接触力,刷丝束与转子间的摩擦热量增大,使相同位置的刷丝在不同压比下的最高温度相差较大。

4.2.3 刷式密封传热机理分析

刷式密封属于柔性接触式动密封,在工作时与转子接触,转子高速旋转,转子表面与刷丝自由端相互摩擦产生大量摩擦热量,综合上述流场温度分布分析及刷丝域温度分布分析得出刷式密封传热机理,图15给出了刷式密封传热机理示意图。由图可以看出摩擦热量一部分通过导热方式进入转子(1),该部分热量在转子内部进行热传导,包括:转子表面与刷丝内部流动的气流进行对流换热(3a),转子表面与刷丝束上下游处气流进行对流换热(3b)和转子与剩余热量在转子内部传向更远处(3c)。另一部分热量则沿着径向方向传导至刷丝(2),由刷式密封流场温度分布特性图12可以看出,该部分热量有两种传递路径:一是泄漏气流在刷丝束间隙与刷丝表面通过对流换热进行热量交换(4),同时泄漏气流与前排刷丝交换热量后将热量带至后排刷丝,气流与刷丝表面对流换热使热量进入刷丝(4a)。由刷式密封轴向不同位置刷丝温度图14可以看出,在距离转子表面相同高度时,后排刷丝温度高于前排刷丝。二是当刷丝束与后挡板之间发生接触时,热量会通过导热进入后挡板(5a),当存在间隙时,热量通过对流换热进入后挡板(5b),进入挡板的热量与下游气流进行对流换热(6)。结合刷式密封不同数值模型速度分布特性图(图10(c))、刷式密封温度

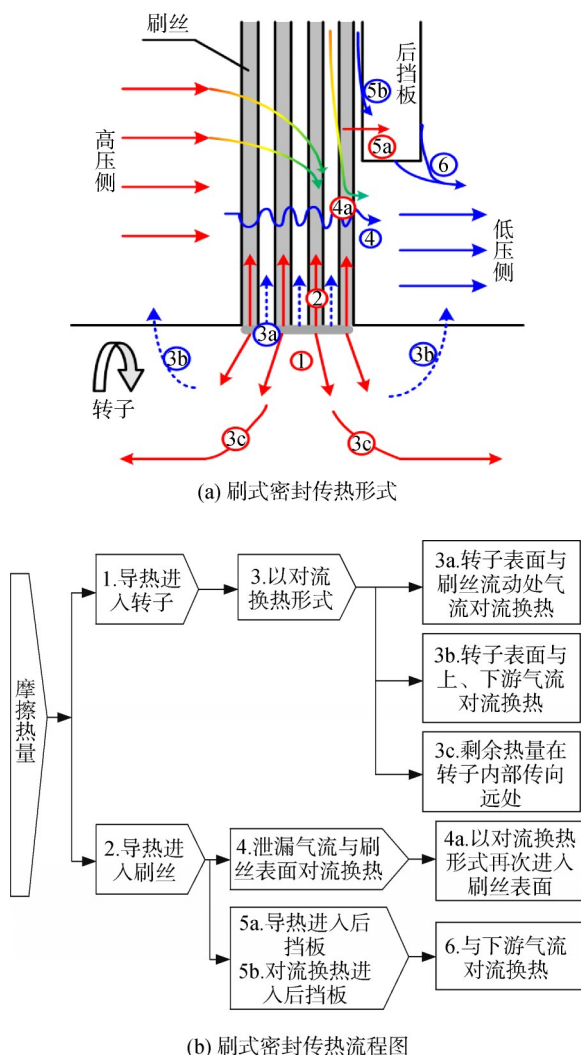


图15 刷式密封传热机理示意图

Fig.15 Schematic diagram of heat transfer mechanism of brush seals

分布特性图(图12(c))可以看出,由于泄漏气流的速度较大,热量很难传导进入后挡板区域,导致后挡板温度较低。从上分析可以看出,刷式密封与转子摩擦产生摩擦热量传导进各自内部后均再通过各自表面与泄漏气流进行对流换热,将热量带至下游,这是刷式密封摩擦生热后热量耗散的主要方式。

5 结论

本文通过对刷式密封流动传热理论分析,建立了刷式密封多孔介质模型、稳态实体模型、瞬态流固热耦合模型,基于刷式密封泄漏特性实验台研究了不同压比下的刷式密封泄漏特性,验证了刷式密封3种流动传热特性数值方法的准确性,在此基础上数值研究了刷式密封流场特性及温度

分布特性,综合实验与数值分析得出如下结论:

1) 在本文研究工况下,刷式密封多孔介质模型、稳态实体模型、瞬态流固热耦合模型计算泄漏量与实验值误差分别为9.8%~17.1%、8.1%~10%、6.92%~9.01%。

2) 刷式密封多孔介质模型计算速度较快,需通过实验修正孔隙率获得较为准确的流场及温度场分布;稳态实体模型流场流动受湍流模型影响较大;瞬态流固热耦合模型考虑流场、刷丝及摩擦热三者间相互耦合作用,计算精度较高,但所需计算时间较长。

3) 同一压比下刷丝最高温度在轴向方向上逐渐增加,刷丝束最高温度随压比增加而增大,刷丝位置越靠近下游,最高温度的差值越大。

4) 泄漏气流流经刷丝间隙产生节流效应导致泄漏气流内能被耗散是刷式密封封严的主要原因;泄漏气流流经刷丝间隙与刷丝表面间的对流换热是刷式密封摩擦热耗散的主要方式。

参考文献:

- [1] CHEW J W, LAPWORTH B L, MILLENER P J. Mathematical modeling of brush seals[J]. International Journal of Heat Fluid Flow, 1995, 16(6):493-500.
- [2] CHEW J W, HOGG S L. Porosity modeling of brush seals[J]. Journal of Tribology, 1997, 119(10):769-775.
- [3] CHEW J W, GUARDINO C. Simulation of flow and heat transfer in the tip region of a brush seal[J]. International Journal of Heat Fluid Flow, 2004, 25(4):649-658.
- [4] DOGU Y. Investigation of brush seal flow characteristics using bulk porous medium approach[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2005, 127(1):136-144.
- [5] DOGU Y, AKSIT M F. Effects of geometry on brush seal pressure and flow fields: Part I front plate configurations[J]. Journal of Turbomachinery, 2006, 128(1):367-378.
- [6] DOGU Y, AKSIT M F. Effects of geometry on brush seal pressure and flow fields: Part II backing plate and configurations[J]. Journal of Turbomachinery, 2006, 128(1):379-389.
- [7] DOGU Y, AKSIT M F. Brush seal temperature distribution analysis[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2006, 128(3):599-609.
- [8] DOGU Y, AKIST M F, DEMIROGLU M, et al. Evaluation of flow behavior for clearance brush seals[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2008, 130(1):1-9.
- [9] 邱波, 李军. 基于多孔介质局部非平衡方法的刷式密封耦合传热特性[J]. 航空动力学报, 2015, 30(5):1067-1075.
QIU Bo, LI Jun. Conjugate heat transfer characteristics of brush seal based on local thermal non-equilibrium porous medium approach[J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(5): 1067-1075. (in Chinese)

- [10] 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.
QIU Bo, LI Jun. Investigation on the heat transfer characteristics of brush seals[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(9):94-100. (in Chinese)
- [11] FRANCESCHINI G, JONES T V, GILLESPIE D R H. Improved understanding of blow-down in filament seals[R]. ASME Paper GT2008-51197, 2008.
- [12] LELLI D, CHEW J W, COOPER P. Combined three dimensional fluid dynamics and mechanical modeling of brush seals [J]. Journal of Turbomachinery, 2006, 128(1):188-195.
- [13] 黄首清, 索双富, 李永健, 等. 刷式密封流场和温度场的3维数值计算[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2014, 54(6): 805-810.
HUANG Shouqing, SUO Shuangfu, LI Yongjian, et al. Numerical predictions of the flow and temperature distribution in a three-dimensional brush seal model[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2014, 54(6):805-810. (in Chinese)
- [14] 孙丹, 刘宁宁, 胡广阳, 等. 考虑刷丝变形的刷式密封流场特性与力学特性流固耦合研究[J]. 航空动力学报, 2016, 31(10):2544-2553.
SUN Dan, LIU Ningning, HU Guangyang, et al. Fluid-structure interaction investigation on the flow field and mechanical characteristic in brush seals with bristle deflections[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(10):2544-2553. (in Chinese)
- [15] 李国勤, 孙丹, 刘永泉, 等. 基于ALE流固耦合方法的刷式密封泄漏特性理论与实验研究[J]. 推进技术, 2020, 41(8): 1850-1860.
LI Guoqin, SUN Dan, LIU Yongquan, et al. Theoretical and experimental study on leakage characteristics of brush seal based on ALE fluid-structure interaction[J]. Journal of Propulsion Technology, 2020, 41(8):1850-1860. (in Chinese)
- [16] 邱波, 李军, 陈春新, 等. 基于CFD和FEM方法的刷式密封传热特性研究[J]. 工程热物理学报, 2012, 33(12):2067-2071.
QIU Bo, LI Jun, CHEN Chunxin, et al. Investigations on the heat transfer characteristics of brush seals based on computational fluid dynamics and finite element analysis[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2012, 33(12):2067-2071. (in Chinese)
- [17] 马登骞, 张元桥, 李军, 等. 考虑刷丝变形的后夹板结构对刷式密封泄漏和传热特性影响的研究[J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(9):15-25.
MA Dengqian, ZHANG Yuanqiao, LI Jun, et al. Effects of backing plate structure on leakage and heat transfer characteristics of brush seals considering bristle pack deformation [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(9):15-25. (in Chinese)
- [18] LI Jun, QIU Bo, FENG Zhenping. Experimental and numerical investigations on the leakage flow characteristics of the labyrinth brush seal[J]. Journal of Engineering, 2012, 134(10):102509.1-102509.9.
- [19] 刘伟, 范爱武, 黄晓明. 多孔介质传热传质理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [20] YAKHOT V. Renormalization group analysis of turbulence: I basic theory[J]. Journal of Scientific Computing, 1986, 1(1):3-51.
- [21] 孙丹, 李国勤, 艾延廷, 等. 基于三维实体建模的刷式密封传热机理数值研究[J]. 航空动力学报, 2019, 34(8):1633-1643.
SUN Dan, LI Guoqin, AI Yanting, et al. Numerical study on heat transfer mechanism of brush seal based on three dimensional solid modeling[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(8):1633-1643. (in Chinese)
- [22] BERGMAN T L, LAVINE A S, INCROPERA F P, et al. Introduction to heat transfer[M]. Hoboken, US: John Wiley & Sons, 2011.
- [23] 张雄, 王天舒, 刘岩. 计算动力学[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2015.
- [24] 孟繁超, 董素君, 江鸿升, 等. 长时间流固耦合传热过程的快速算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(6):1224-1230.
MENG Fanchao, DONG Sujun, JIANG Hongsheng, et al. A fast algorithm for long-term fluid-solid conjugate heat transfer process[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43(6):1224-1230. (in Chinese)

(编辑: 陈越)