

文章编号: 1000-8055(2024)12-20220989-15

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220989

基于压差-刷丝厚度试验修正的刷式密封多孔介质模型

李根宏^{1, 5}, 马英群^{1, 3}, 王兴果^{1, 2}, 张迪⁵, 赵巍^{1, 2, 3}, 赵庆军^{1, 2, 3, 4}

- (1. 中国科学院工程热物理研究所, 北京 100190;
2. 中国科学院大学航空宇航学院, 北京 100049;
3. 中国科学院轻型动力创新研究院, 北京 100190;
4. 中国科学院工程热物理研究所分布式冷热电联供系统北京市重点实验室, 北京 100190;
5. 内蒙古工业大学能源与动力工程学院, 呼和浩特 010080)

摘 要: 建立了三级刷式密封稳态切片式三维实体管束模型和基于试验数据修正的稳态单级、三级刷式密封多孔介质模型, 搭建了中速耐久刷式密封试验台, 研究了单级、三级刷式密封压降对出口泄漏量的影响规律, 对比分析了两种数值模型在泄漏量方面的准确性。通过试验修正的多孔介质方法研究了三级刷式密封在不同压差工况下的封严泄漏特性, 分析了三级刷式密封中每一级刷丝束内部轴向与径向在不同表面的压力分布特性。研究结果表明: 基于试验数据修正的多孔介质模型比稳态切片式三维实体模型管束求解精度显著提高, 单级、三级多孔介质模型修正后的数值与试验结果误差分别小于 5%、20%。刷丝束围栏高度及周围区域存在较大的轴向与径向压力梯度, 通过流阻效应达到良好的密封效果。

关 键 词: 三级刷式密封; 稳态切片式三维实体管束模型; 多孔介质模型; 泄漏特性; 压力分布

中图分类号: V233.5

文献标志码: A

Brush seal porous media model based on test corrections of differential pressure-brush wire thickness

LI Genhong^{1, 5}, MA Yingqun^{1, 3}, WANG Xinggao^{1, 2}, ZHANG Di⁵,
ZHAO Wei^{1, 2, 3}, ZHAO Qingjun^{1, 2, 3, 4}

- (1. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. School of Aeronautics and Astronautics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Innovation Academy for Light-duty Gas Turbine, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
4. Beijing Key Laboratory of Distributed Combined Cooling Heating and Power System, Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
5. College of Energy and Power Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Huhehaote 010080, China)

收稿日期: 2022-12-28

基金项目: 国家科技重大专项(J2019-II-0011-0031, 2017-III-0011-0037); “1912”项目

作者简介: 李根宏(1996—), 男, 硕士生, 主要从事刷式密封流场特性仿真及试验技术研究。E-mail: 119834028028@163.com

通信作者: 赵庆军(1977—), 男, 研究员、博士生导师, 博士, 主要从事航空发动机气动热力学研究。E-mail: zhaqingjun@iet.cn

引用格式: 李根宏, 马英群, 王兴果, 等. 基于压差-刷丝厚度试验修正的刷式密封多孔介质模型[J]. 航空动力学报, 2024, 39(12): 20220989. LI Genhong, MA Yingqun, WANG Xinggao, et al. Brush seal porous media model based on test corrections of differential pressure-brush wire thickness[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(12): 20220989.

Abstract: A steady-state clip type three-dimensional solid model of the three-stage brush seal and a porous media model of the single-stage brush seal and three-stage brush seal based on the test data modification were established, a brush seal leakage medium-speed durable characteristic experiment device was designed and built, the influence of pressure drop on leakage characteristics of single-stage and three-stage brush seals was studied, and the advantages and disadvantages of the two numerical methods were analyzed and compared. The modified porous media model was used to study the flow field characteristics of the three-stage brush seal, and the axial and radial pressure distribution characteristics inside the brush bundle were analyzed. The results showed that the porous media model modified based on experimental data had higher solution accuracy than the steady-state three-dimensional forked tube bundle model and was closer to the experimental results, the error between the corrected values and the test results of single-stage and three-stage porous media models was less than 5% and 20%, respectively, which was in good agreement with the experimental results. There were large axial and radial pressure gradients in the height and surrounding area of the brush wire bundle fence, and good sealing effect was achieved through the flow resistance effect.

Keywords: three-stage brush seal; steady-state sliced 3D solid bundle model; porous media model; leakage characteristics; pressure distribution

刷式密封是一种具有优良封严性能的接触式动密封技术, 它的封严泄漏量相当于迷宫密封的 $1/5 \sim 1/10$ ^[1], 具有良好的密封性能。随着先进高推质比航空发动机涡轮进口总温、总压不断提高, 对涡轮侧封严能力和泄漏量提出了更高要求, 单级刷式密封承压能力与封严能力有限, 可采取多级刷式密封替代单级刷式密封的方法。多级刷式密封刷丝束区域排列无规则且内部流场复杂, 刷丝间、刷丝与挡板间及刷丝与封严气间作用复杂, 单纯依靠数值仿真难以准确评估多级刷式密封流场特性。多级刷式密封试验研究及其成果相对较少, 对准确获取其封严性能缺少必要的试验验证^[2-3]。

数值研究方面, 国内外研究学者提出了不同种刷式密封泄漏特性的数值方法, 主要包括多孔介质模型、三维叉排管束实体模型与刷式密封流固耦合求解模型。Bayley 和 Long^[4] 对刷式密封采用多孔介质方法进行求解计算, 仅仅考虑增加黏性阻力来计算单级刷式密封的泄漏量并分析其泄漏特性; Chew 等^[5] 采用 Non-Darcian 多孔介质刷式密封数值方法, 同时考虑增加刷丝束黏性阻力和惯性阻力来建立单级刷式密封封严泄漏特性流动规律的数值模型; 黄学民等^[6] 使用多孔介质方法对单级刷式密封的封严泄漏特性进行了数值研究与理论分析; Huang 等^[7] 建立了单级刷式密封三维切片式叉排管束模型, 分析研究了压力、流速、刷丝尖端摩擦力以及温度分布对刷式密封的泄漏特性的影响。马登骞等^[8] 以三维叉排管束

模型为基础开展研究了进出口压差、刷丝与转子之间间隙、刷丝之间密封间隙等对单级刷式密封泄漏特性影响规律, 但在刷式密封实际运行过程中, 刷丝束会受到轴向、径向等不同方向下气动力的作用发生变形接触从而影响计算精度。李国勤等^[9] 采用 ALE(arbitrary Lagrange-Euler) 方法解决了在大压差条件下因刷丝发生较大变形接触导致网格畸变失效而难以计算的问题。孙丹等^[10] 分别采用多孔介质模型和瞬态三维流固耦合模型研究两级刷式密封的泄漏流动特性, 研究发现刷式密封瞬态三维流固耦合模型比多孔介质模型求解精度高更符合刷式密封实际运行情况。Pugachev 等^[11] 采用多孔介质方法研究了多级刷式密封的泄漏特性, 提出三级刷式密封因刷丝束区域的复杂性需考虑开展试验研究对刷式密封数值仿真进行验证与分析; 大部分研究学者都是针对单级刷式密封开展了不同数值方法的研究, 针对三级刷式密封数值研究较少, 且大多基于多孔介质模型, 未进行试验研究来修正多孔介质模型, 存在一定的误差。

试验研究方面, Hendricks 等^[12] 对两级刷式密封开展了试验研究, 研究发现压降等因素对两级刷式密封的泄漏量影响较小; 国内曹广州等^[13-14] 将刷丝束区域处理为多孔介质模型, 且经试验修正后该模型很好地吻合于试验数据; 邱波等^[15] 采用试验测量方法开展了两级刷式密封的封严泄漏特性研究; 赵欢等^[16] 搭建了多级刷式密封试验台,

研究了不同工况参数对多级刷式密封压降分配的影响规律; 现有文献对三级刷式密封试验研究较少, 且鲜有文献研究通过试验来修正三级刷式密封的多孔介质模型。

综上, 刷式密封数值计算大致分为 3 种分别为三维稳态切片式叉排管束模型、多孔介质模型、流固耦合模型。稳态切片式叉排管束模型可以模拟密封介质在刷丝间隙中的流动状态, 但难以真实考虑到刷丝因压差变形接触, 造成计算结果不准确及求解精度较低。多孔介质模型计算刷丝束得到的是刷丝束压力、速度等效值虽不能够真实准确模拟刷丝束内部的实际流动情况, 但结构相对简单, 求解计算较快节省计算资源, 同时也可以通过试验数据对孔隙率和阻力系数进行修正提高求解精度, 但鲜有文献研究多级刷式密封试验来修正多孔介质模型。流固耦合模型可以计算刷丝束内部流场细节分布情况, 且求解计算结果与实际刷式密封流动相接近, 但由于考虑因素较多使得求解复杂计算时间变长而导致计算过程中常会发生难以收敛的状况, 在单级/多级刷式密封性能及结构设计迭代优化过程中效率较低。

本文针对三级刷式密封泄漏特性在数值与试验方面开展研究, 建立了稳态切片式三维实体管束模型和基于试验数据修正的单级、三级多孔介质模型, 搭建了中速耐久刷式密封试验台, 分析研究了上下游处进出口压差对三级刷式密封泄漏特性的影响规律, 对比分析了两种数值模型在出口泄漏量方面的准确性, 并对三级刷式密封的流场分布特性开展研究, 为预测三级刷式密封密封特性提供技术方法。

1 刷式密封数值计算方法

1.1 多孔介质模型

刷式密封中的刷丝束是由排列紧密且无规则的刷丝组成, 气流主要通过刷丝间细小间隙泄漏通过且刷丝之间的流动十分复杂, 与多孔介质内部流动较为相似, 图 1 给出了三级、单级刷式密封结构示意图, 可以直观了解流体域、固体域与刷丝束之间的结构关系。目前模拟刷式密封内部流动特性比较有效的方法是采用 Non-Darcian 多孔介质模型, 即在动量方程中增加黏性和惯性阻力项来体现多孔介质模型, 分别代表刷丝对流体产生的黏性阻力和惯性阻力^[17], 刷式密封多孔介质模型图如图 2 所示。

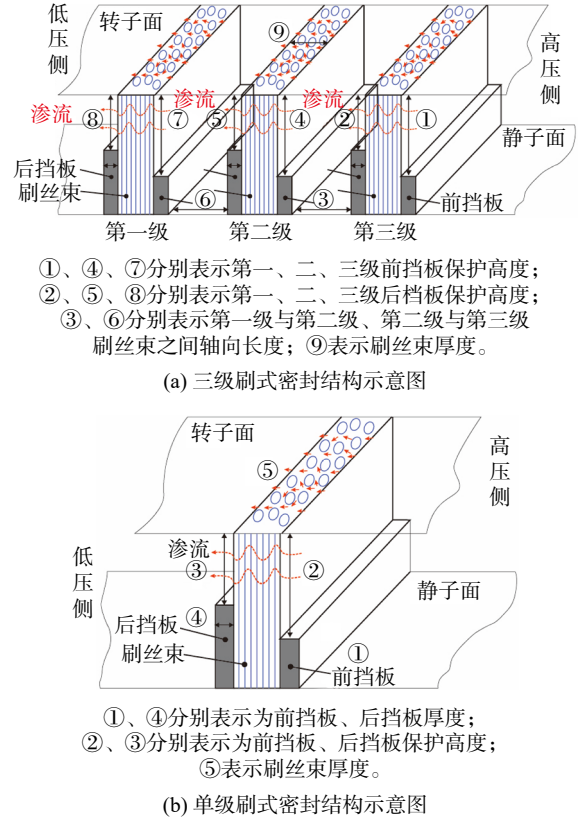


图 1 单级、三级刷式密封结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of single-stage and three-stage brush seal structure

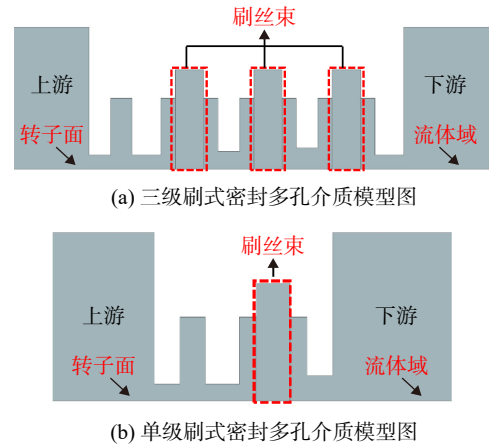


图 2 刷式密封多孔介质模型图

Fig. 2 Brush seal porous medium model diagram

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + F_i \quad (1)$$

$$S = -A\mu U - \frac{1}{2}B\rho|U|U \quad (2)$$

式(1)为动量方程, F_i 表示刷丝束对流体附加的阻力源项即 $F_i = [S_z, S_n, S_s]^T$; 式(2)中: μ 和 ρ 分别表示流体动力黏度和密度; $U = [u_z, u_n, u_s]^T$ 为速

度向量, $\mathbf{A} = \text{diag}\{a_z, a_n, a_s\}$ 和 $\mathbf{B} = \text{diag}\{b_z, b_n, b_s\}$ 分别表示刷丝束多孔介质区域的黏性阻力系数矩阵和惯性阻力系数矩阵; 下标 z 、 n 、 s 分别表示刷丝轴向方向、垂直刷丝周向方向与沿着刷丝径向方向。

刷丝束内部区域的流动状态与流体流过填充床时的渗透流动较为相似, 本文采用 Ergun 方程来计算刷丝束多孔介质区域的阻力系数, 推导计算过程以及验证见文献 [2-5]。Ergun 方程详细介绍了流体通过多孔介质模型时压降与孔隙率之间的关系^[18], 通过半经验公式来表示流体流过圆柱形颗粒的填充床, 即

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{\alpha \cdot \mu (1 - \varepsilon)^2}{D_p^2 \varepsilon^3} V + \frac{\beta \cdot \rho (1 - \varepsilon)}{D_p \varepsilon^3} V^2 \quad (3)$$

式中 α 与 β 为 Ergun 方程的经验系数, 且经过试验验证 $\alpha = 150$ 和 $\beta = 1.75$ 时适用于常见的雷诺数范围; D_p 为填充床内的平均颗粒直径 (即当量球直径, 圆柱体或刷毛直径 d 相关的等效球体直径), ε 为刷丝束孔隙率, L 为填充床厚度 (即流体实际沿刷丝束轴向流动长度), V 为流体表观速度 (即流体流过刷丝表面平均速度)。

$$D_p = 6/a_v = 1.5d \quad (4)$$

对于刷丝束内圆柱形颗粒比表面积表示为:

$$a_v = \frac{V_{\text{bristle}}}{V_{\text{total}}} = \frac{\pi d l}{(\pi d^2/4) l} = \frac{4}{d} \quad (5)$$

式中 V_{bristle} 与 V_{total} 分别表示单根刷丝表面积与刷丝体积, d 为刷丝直径; l 为刷丝自由长度。通过式 (2)~式 (4) 推算出轴向和垂直于刷丝方向的黏性阻力系数 a_z 、 a_n 与惯性阻力系数 b_z 、 b_n , a_s 和 b_s 分别表示沿着刷丝方向的黏性和惯性阻力系数, 见式 (6)。

$$\begin{cases} a_z = a_n = \frac{66.67(1 - \varepsilon)^2}{d^2 \varepsilon^3} \\ a_s = 0.4\varepsilon \cdot a_n \\ b_z = b_n = \frac{2.33(1 - \varepsilon)}{d \varepsilon^3} \\ b_s = 0 \end{cases} \quad (6)$$

孔隙率 ε 定义为刷丝束内孔隙的体积与刷丝束总体积之比, 它是影响刷丝束内流体流动的重要参数, 根据刷丝束的几何结构可知, 刷丝束在靠近转子面近端的排列比远端较为稀疏。刷丝束孔隙率会随着密封半径的增大而减小, 而刷丝的阻力系数则会随着孔隙率的减小而增大, 增大流动阻力提高密封性能。刷丝束孔隙率的推导过程

如下^[19]。

$$\varepsilon = \frac{V_{\text{total}} - V_{\text{bristle}}}{V_{\text{total}}} = 1 - \frac{V_{\text{bristle}}}{V_{\text{total}}} \quad (7)$$

如图 3 所示, 径向高度为 r 时, 微元段 Δr 内, 刷丝固体相总体积 (多孔介质区域内总刷丝束体积) V_{bristle} 可以表示为:

$$V_{\text{bristle}} = N\pi D \cdot L_b \cdot (\pi d^2/4) \quad (8)$$

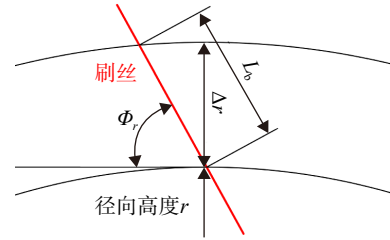


图 3 刷丝示意图

Fig. 3 Brush sketch

刷丝束总体积 V_{total} 可以表示为

$$V_{\text{total}} = [\pi(r + \Delta r)^2 - \pi r^2] \cdot B \quad (9)$$

式中 D 为刷环直径最小处的内径; N 为刷丝束周向 1 mm 内的刷丝根数 (即刷丝密度); B 为标准状态下刷丝束轴向厚度; L_b 为微元段内单根刷丝长度, 满足式 (10)。

$$L_b = \sqrt{(r + \Delta r)^2 - r^2 + r^2 \sin^2 \Phi_r} \quad (10)$$

当 Δr 趋近于 0 时, 由式 (7)~式 (10) 得到沿径向变化的孔隙率 ε 公式。

$$\varepsilon = 1 - \frac{V_{\text{bristle}}}{V_{\text{total}}} = 1 - \frac{N\pi D d^2}{8Br \sin \Phi_r} \quad (11)$$

式中 Φ_r 为径向高度为 r 时的刷丝倾斜角, 即刷丝与切向的夹角。

1.2 稳态切片式三维实体管束模型

图 4 所示为切片式三维实体管束流体计算模型, 取周向 1 排完整刷丝, 轴向上包含各排刷丝 (即三级刷封每一级刷丝束区域轴向都包含 18 排完整刷丝结构) 构建计算模型, 且黄首清^[20] 计算证明周向仅为 1 排刷丝与周向包含多排刷丝的计算结果误差非常小, 因此本文也采用此方法对三级刷式密封开展数值研究同时假设刷丝不会发生移动和变形, 这样可以减少三级刷式密封的计算量。

在刷式密封切片式实体管束模型计算中, 流体域满足连续方程和动量方程如下^[21-22]:

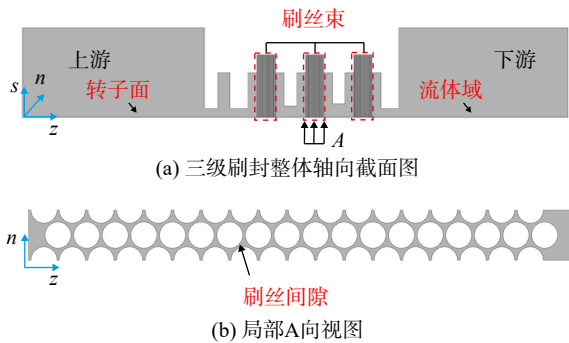


图 4 刷式密封切片式三维实体管束模型及局部放大图

Fig. 4 Brush seal slice 3D solid tube bundle model and local enlarged view

$$\operatorname{div}(\rho \mathbf{V})=0 \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{div}(\rho u \mathbf{V}) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \\ \operatorname{div}(\rho v \mathbf{V}) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \\ \operatorname{div}(\rho w \mathbf{V}) &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \end{aligned} \quad (13)$$

式中 ρ 为上下游空气气体密度; div 为散度算符; u 、 v 、 w 分别表示 x 、 y 、 z 这 3 个不同方向的流速; $\mathbf{V}$ 为流速矢量; p 为流体压力; τ 为切应力。

在标准状况下, 当刷式密封上下游压差 Δp 为 0.25 MPa 时, 刷丝束内部流动的最大速度 $v_{\max}$ 约为 260 m/s。本文以刷丝直径 $d=0.1 \text{ mm}$ 估算 Reynolds 数。

$$Re = \frac{v_{\max} \times \delta \times 10^{-3}}{\gamma} = \frac{260 \times 0.1 \times 10^{-3}}{1.48 \times 10^{-5}} \approx 1756 \quad (14)$$

式中 γ 为标准状况下空气的动力黏度, 根据 Reynolds 数判断刷式密封为层流流动。

1.3 边界条件

采用 ANSYS-CFX 数值研究三级刷式密封的泄漏流动封严特性。采用有限体积法离散控制方程, 针对刷丝束多孔介质模型, 选用 SST(shear stress transport)湍流模型来计算刷丝束区域以外的流体部分, 对流项选用 2 阶迎风格式, 扩散项选用中心差分格式; 而在刷丝束内部由于气体流速较低, 雷诺数相对较小, 故采用层流模型来模拟刷丝束多孔介质区域内的流动。工质选用可压缩理想空气。进口边界条件按照所模拟工况的压差给定总压及总温, 出口按照试验所测大气压给定静压。对于稳态切片式三维实体管束模型, 利用 ANSYS-CFX 计算流场(稳态求解器, 2 阶迎风差

分格式, RNG(重整化群) k -epsilon(k - ϵ)模型), 转子壁面设置为无滑移壁面绝热壁面。边界条件具体的取值见表 1。

表 1 刷式密封计算域边界条件

Table 1 Boundary conditions of brush seal computational domain

参数	数值及详情
固体壁面	无滑移
进口温度 T_i/K	278.15
封严压比 R_p	1.4~3.6
出口压力 $p_{\text{out}}/\text{kPa}$	100
转子转速 $n/(\text{r/min})$	0

1.4 网格划分与网格独立性验证

在刷式密封多孔介质模型中, 由于刷式密封的结构和流动在周向上呈现周期性, 因此可以选择一部分弧段作为数值计算对象, 弧段的两侧部分设置为旋转周期边界。计算模型网格的疏密程度因流动位置有所区别, 在沿转子轴向位置上, 刷丝束区域和后挡板围栏保护高度区域内及转角附近的密度较大, 上下游区域对密封流动影响较小故密度设置较小; 在径向位置上, 需要加密转子壁面附近的网格来满足壁面流体带来的剪切力变化对数值计算的影响。本文将采用 ANSYS Mesh 生成流体计算区域的结构化六面体网格, 以进出口泄漏量为判断依据当进出口泄漏量不再发生变化时认为计算结束且稳定对计算结果影响较小, 经网格独立性验证, 三级、单级刷式密封计算网格总量分别约为 177 万、62 万时对计算结果影响较小且进出口泄漏量不再随网格数量的增加而发生变化, 网格沿周向的角度为 1° 。图 5 给出了三级、单级刷式密封结构化网格示意图。为了保证刷式密封中泄漏流动的充分发展不影响计算精度, 对计算区域的上下游腔室进行了一定的延伸。并对壁面区域网格进行局部加密处理, 经计算 y^+ 值小于 5, 满足湍流模型计算要求。

在稳态切片式三维实体管束模型中, 由于刷丝束区域刷丝自由长度较长, 但刷丝直径较短导致间隙部位长细比很大, 为了提高刷丝间隙的网格质量, 本文采用混合组合网格形式来对刷式密封网格进行划分, 上下游流体区域几何结构比较规则简单, 使用结构化六面体网格对其进行划分, 而刷丝束间隙部分几何结构形状复杂, 使用非结构化四面体网格对其进行划分。由于是三级刷式

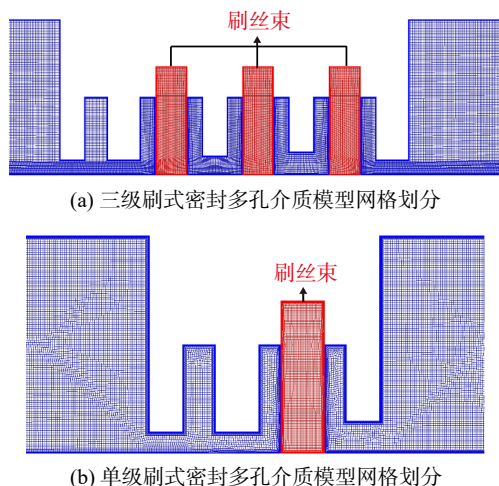


图 5 刷式密封多孔介质模型网格划分示意图

Fig. 5 Grid division diagram of porous media model with brush seals meshing

密封, 整体网格数量比较大且刷丝间隙处网格需要加密保证求解精度, 网格的局部细节划分如图 6 所示, 三级刷封整个计算模型网格数量约有 1 200 万。同时为了保证求解计算精度, 至少需要在刷丝束相邻刷丝之间间隙处划分两个单元数量网格。以上文提到的将进出口泄漏量为判断依据来进行网格无关性测试, 结果表明, 更多的网格数量对数值计算结果影响较小, 因此本文选取三级刷封 1 200 万网格进行模型数值计算。

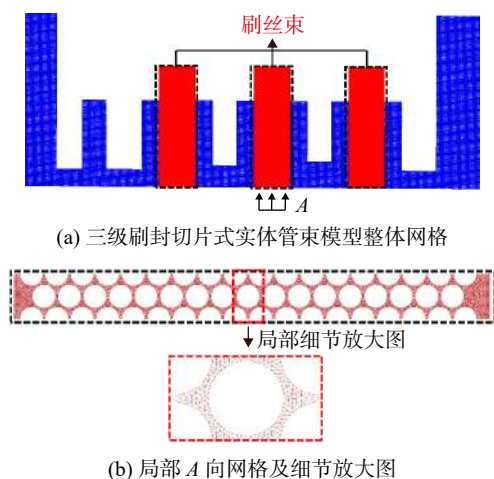
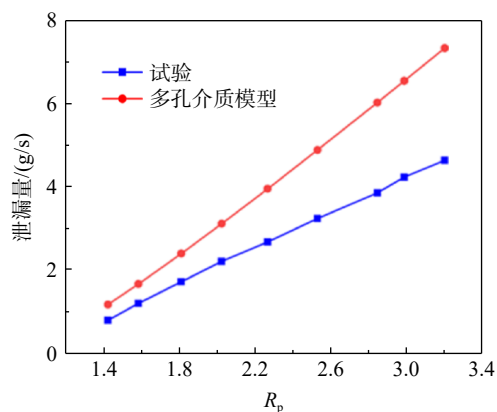


图 6 三级刷封切片式实体管束模型网格划分及局部示意图

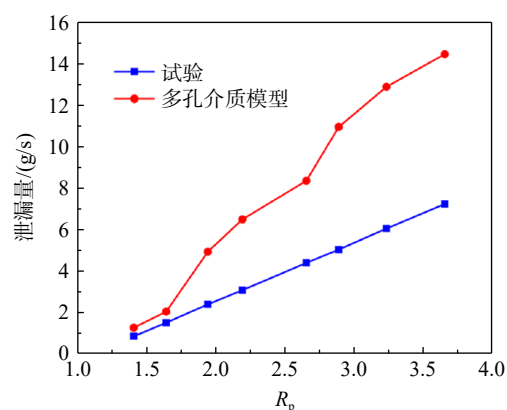
Fig. 6 Grid division and local diagram of three stage brush seal and slice solid tube bundle model

1.5 多孔介质模型结果分析

刷丝自由端与转子密封间隙为 0 mm, 图 7 给出了试验测得的出口泄漏量与三级、单级多孔介质方法计算的泄漏量随压比 R_p 的变化曲线。由图可知三级刷式密封在封严压比小于 2.2 时, 计



(a) 三级刷封多孔介质模型数值与试验泄漏量对比图



(b) 单级刷封多孔介质模型数值与试验泄漏量对比图

图 7 多孔介质模型数值与试验泄漏量对比图

Fig. 7 Comparison diagram of porous media model numerical and experimental leakage

算结果与试验结果差距较小, 当压比大于 2.2 时误差变大, 而单级刷式密封在封严压比大于 1.6 时误差已经很大, 其主要原因是三级刷封承压能力强于单级刷封, 刚开始使用时封严效果三级优于单级刷封, 与试验数据误差较小。但在实际刷封运行过程中, 随着上下游压差的增大, 刷丝束受到的上下游轴向压降逐渐增大, 刷丝排列状态趋于紧密, 导致刷丝间隙变小, 孔隙率变小阻力系数变大导致部分流道甚至关闭。刷封实际泄漏量会随着上下游压差的增大呈线性增长。随着上下游压差的增大, 试验泄漏量与多孔介质模型计算得到的泄漏量误差越来越大, 其原因是在上下游压差不断增大时, 实际刷丝束厚度发生变化而多孔介质模型计算时孔隙率未发生变化设置为定值, 导致存在一定的误差, 因此需要不断调整孔隙率和阻力系数来校正吻合试验数据。

由于单级、三级刷式密封试验在不同压差工况下进行的, 单级、三级刷封在结构参数上有一

定的区别,不能用泄漏量来对单级、三级封严能力进行统一准确判断,且泄漏量是一个绝对量,受到工况条件及结构影响较大。因此,需要引入泄漏系数^[23]对单级、三级刷封泄漏水平进行对比,其表达式如下:

$$\phi = \frac{m \times \sqrt{T}}{p_u \times D_i} \quad (15)$$

式中 D_i 表示为封严内径, m; p_u 表示刷封上游压力, MPa; T 表示刷封入口温度, K; m 为出口泄漏量, kg/s。

图 8 给出了单级、三级刷封泄漏系数的变化对比图,从图中可以看到三级刷封的封严能力强于单级刷封,随着上下游压差的增大,单级、三级刷封的泄漏系数趋于稳定变化,单级、三级刷封没有出现急剧上升的现象说明刷封均没有发生失效,因此泄漏量在压差的作用下会呈线性增长的趋势。

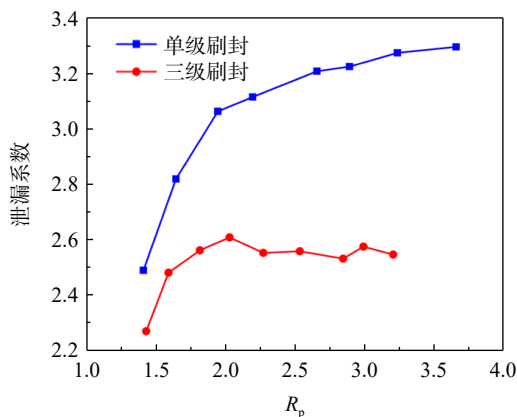


图 8 单级、三级刷封泄漏系数变化对比图

Fig. 8 Comparison of leakage coefficient of single and three stage brush seals

1.6 稳态切片式三维实体管束模型结果分析

刷丝自由端与转子密封间隙为 0 mm, 图 9 给

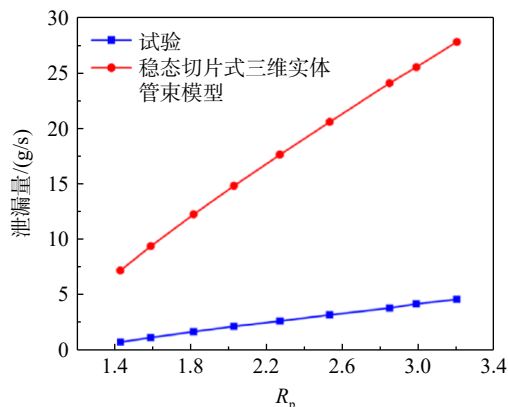


图 9 稳态切片式三维实体管束模型数值与试验泄漏量对比图

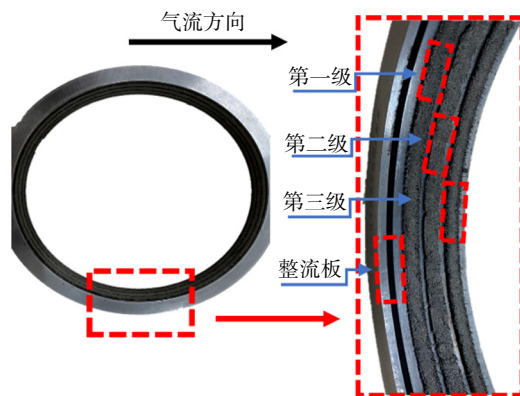
Fig. 9 Comparison diagram of steady-state sliced three-dimensional solid bundle model value and test leakage

出了试验测得的出口泄漏量与稳态切片式三维实体管束模型数值方法计算得到的泄漏量随压差的变化对比曲线。从图中可以看出,试验测得与切片式三维实体管束方法计算得到的刷式密封泄漏量之间存在较大的误差,其原因是随着压差的不断增大,刷丝束受到的轴向压差会急剧增大,导致排列趋于紧密,刷丝之间的间隙变小。但本文稳态切片式三维实体管束模型中假设刷丝不会发生移动和变形,没有考虑因上下游压差改变会导致密封间隙变小从而使泄漏量急剧增大,与多孔介质模型相比存在较大的误差。

2 刷式密封泄漏特性试验研究

2.1 试验对象介绍

图 10 给出了三级刷式密封试验件实物图与刷式密封结构参数及其对应关系,其安装于直径为 138 mm 的转子及静子件上,刷丝束的详细结构参数由表 2 给出。



(a) 试验件实物图

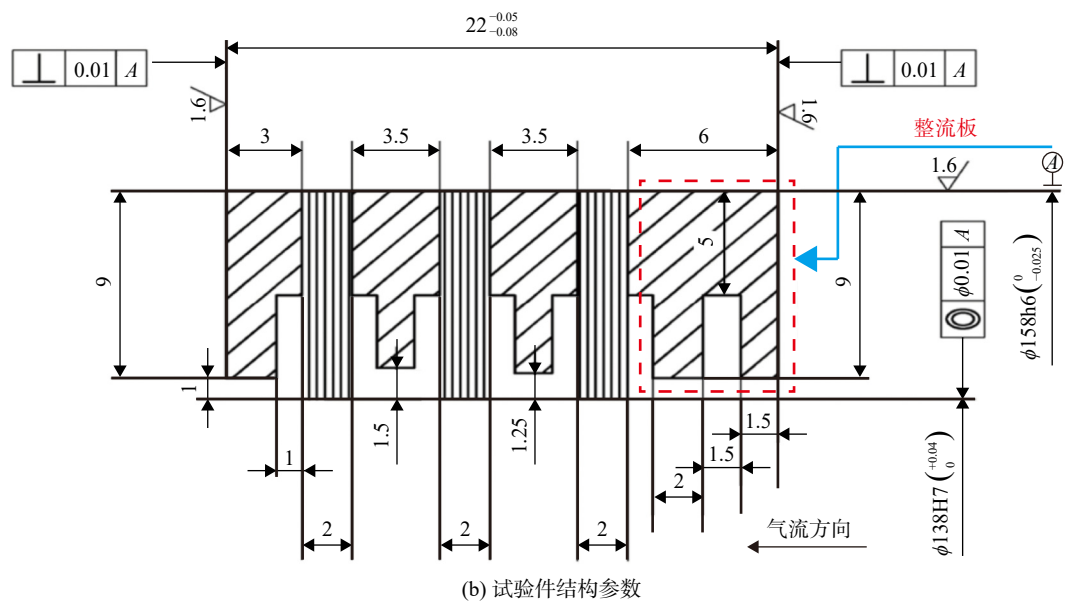


图 10 三级刷式密封试验件实物图与结构参数及其对应关系(单位: mm)

Fig. 10 Physical drawing and structural parameters of three-stage brush seal test piece and their corresponding relations (unit: mm)

表 2 刷式密封结构参数	
Table 2 Brush seal structure parameters	
几何参数	数值
刷丝直径 d/mm	0.1
刷丝倾斜角 $\phi_r/(\text{^\circ})$	45
刷丝束自由高度 l/mm	7
刷丝束干涉量 Δ/mm	0.0
刷丝间隙 δ/mm	0.01
刷丝密度 $N/(\text{根}/\text{mm})$	160
外环直径 D_o/mm	158
内环直径 D_i/mm	138
第一级刷丝束厚度 B_{w1}/mm	2
第二级刷丝束厚度 B_{w2}/mm	2
第三级刷丝束厚度 B_{w3}/mm	2
第一级刷封后挡板保护高度 H_{f1}/mm	1.25
第二级刷封后挡板保护高度 H_{f2}/mm	1.5
第三级刷封后挡板保护高度 H_{f3}/mm	1

2.2 试验设备

图 11 给出了中速刷式密封耐久试验装置实物图。试验中选用由空气压缩机产生的高压空气,其压力最高可以达到 1.0 MPa;压力通过若干支压力变送器收集,流量通过高精度的质量流量计采集,信号通过 NI/PCI6255 采集板传输到采集系统;温度参数采用 K 型热电偶收集并通过 ADAM4118 采集模块实时记录;在低压腔出口加装小量程高

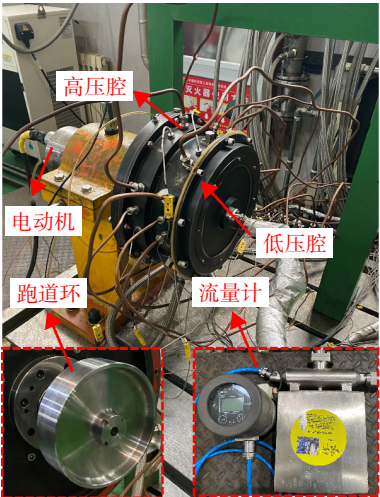


图 11 刷式密封中速密封耐久试验装置实物图

Fig. 11 Brush seal medium speed seal durability test device physical picture

精度质量流量计(标况条件下,量程范围为 0~50 g/s),记录不同工况下的泄漏量。

2.3 试验测试原理

刷式密封试验将在中速密封耐久试验台上进行,其试验原理图如图 12。试验装置由电动机驱动(最高转速为 18 500 r/min),带动试验台架上的转子运行。在进行刷式密封静态试验时,空气系统能够提供高压气体,来模拟密封试验件内上下游不同压差工况;电动机冷却系统中的水冷机能够保证转子运行时以安全的运行温度工作;测试系统能够测量采集出口处泄漏量数据;润滑系统

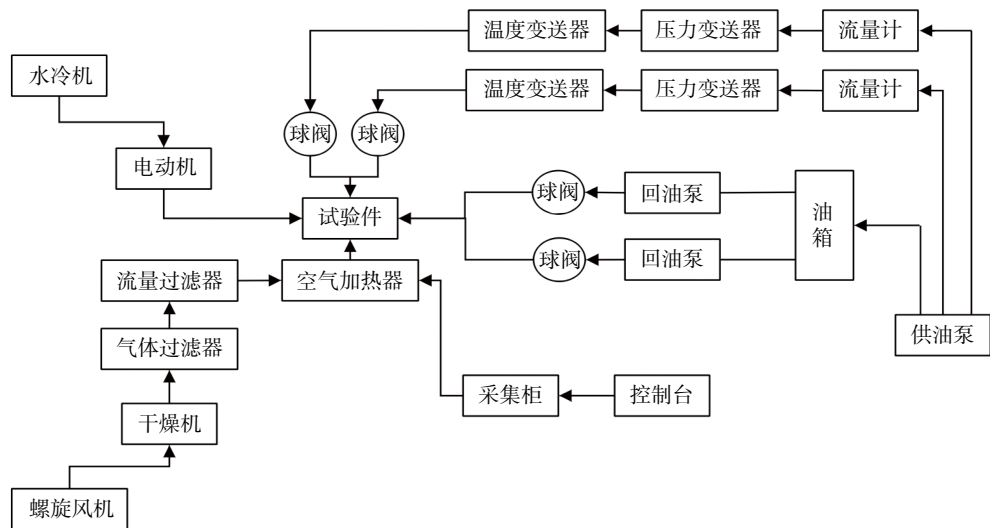


图 12 试验台测试原理图

Fig. 12 Test bench test schematics brush seal

通过调节供油泵来保证转子正常运行防止出现转子碰磨发生故障。试验中测量了三级、单级刷式密封在不同压比条件下的泄漏量,详细工况参数由表 3 给出。

表 3 刷式密封的工作压比

Table 3 Working pressure ratio of brush seal

工况	R_p	
	三级刷式密封	单级刷式密封
1	1.426	1.397
2	1.586	1.595
3	1.822	1.795
4	2.024	1.917
5	2.267	2.159
6	2.529	2.403
7	2.845	2.606
8	2.986	2.829
9	3.199	3.169
10		3.586

3 多孔介质模型修正方法

3.1 基于试验数据修正的多孔介质模型

在刷式密封数值研究方面,对刷丝束复杂区域的处理设置是模型准确的重要因素,研究人员都将刷丝束区域处理为多孔介质来进行数值计算,且刷丝束孔隙率的取值将直接影响到计算结果。因此需要对刷丝束孔隙率与阻力系数开展研究,并根据试验结果确定孔隙率与压差之间的关系。

由式(11)得到,刷丝束的孔隙率主要由 N 、 D 、 d 、 Φ_r 、 r 和 B 等参数决定,在刷式密封结构确定

后, N 、 D 、 d 、 Φ_r 和 r 等参数就被确定了,不会因压差、温度等工况而发生改变。刷丝束厚度 B 成为改变孔隙率变化的唯一参数。刷丝束厚度 B 会受刷丝直径 d 、刷丝层数 i 、刷丝排列状态等因素的影响,但刷丝直径 d 、刷丝层数 i 在试验之前已被确定,只需研究刷丝排列状态即可。因此,本文将从刷丝排列状态开展研究,通过试验结果来确定刷丝束在不同压差条件下的厚度大小,最终确定刷丝束的孔隙率。曹广州、吉洪湖等^[13] 分析了刷丝束孔隙率的确定方法并依据试验结果修正了多孔介质模型的孔隙率,经数值计算,修正后的多孔介质计算结果与试验数据吻合良好。但上述方法是针对某一工作压比下确定的 k 值并以此对其他压比开展计算进行拟合修正,该方法没有考虑刷丝束在压差的作用下会导致刷丝束厚度发生变化,不能获得刷丝束厚度在不同压差下的经验公式。本文也将采用上述方法并对该方法进一步完善与改进,对单级、三级刷式密封多孔介质模型进行多点修正^[14],即对单级、三级刷封中的每一级压降在试验不同工况点处依次进行修正拟合得到 k 值随压降的变化曲线,从而提高数值计算的可靠性与准确性。

在刷式密封实际运行过程中,在刷环结构确定后,孔隙率主要会受到刷丝束厚度的影响,刷丝束厚度与刷封实际运行中的排列状态相关。如图 13 所示为刷丝的 3 种排列方式分别为紧密顺排 B_2 、实际状态 B 、紧密叉排 B_1 ,其中紧密顺排与紧密叉排是刷丝理想排列方式,而在实际运行过程中刷丝排列处于紧密叉排和紧密顺排之间。理

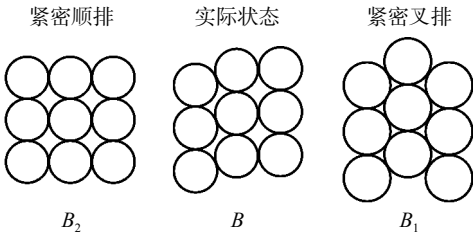


图 13 刷丝排列方式与刷丝束厚度的关系
Fig. 13 Relationship between the arrangement of brush wire and the thickness of brush bundle

想状态下的紧密顺排与紧密叉排分别表示为^[13]:

$$B_1 = d + \frac{\sqrt{3}d}{2} (i - 1) \tag{16}$$

$$B_2 = d \times i \tag{17}$$

由于本文刷丝初始状态排列比较紧密且刷丝密度 N 比较大, 试验所用的刷丝材料是钴基高温合金, 刷丝直径为 0.1 mm。从图 14 可以看出, 刷丝实际运行时的试验泄漏量处于紧密顺排与紧密叉排方式下计算得到的泄漏量之间。

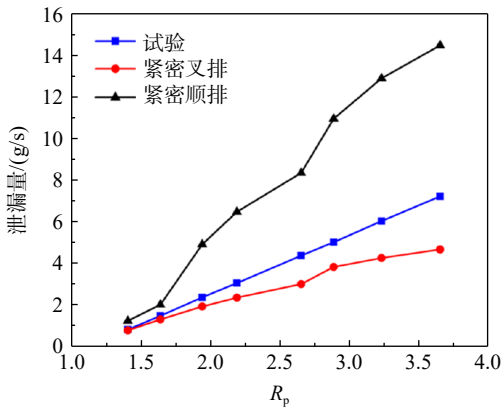


图 14 单级刷封多孔介质模型下不同排列方式的泄漏量数值与试验结果对比图
Fig. 14 Comparison of leakage values and test results of a single stage brush sealed porous media model

因此, 为了使多孔介质模型数值计算结果更接近实际刷式密封工况运行情况, 将刷式密封性能稳定之后的刷丝束厚度处理为

$$B = B_1 + k (B_2 - B_1) \tag{18}$$

本文通过多点修正方法对修正系数 k 值进行修正, 即在每个工况下选取不同的 k 值来调节刷丝束厚度, 得到刷式密封不同工况下的孔隙率进而计算得到刷封出口泄漏量, 显示了单级刷式密封在不同压比下部分 k 值选取与误差对比图, 将多孔介质模型计算结果与试验结果进行比较, 选

取误差较小的 k 值作为修正值, 从表 4 中发现随着刷式密封压比的不断增大, 需要在不同的试验工况点处不断减小 k 值才能使计算结果与试验结果相吻合, 也说明随着刷式密封轴向压降的增加, 刷丝束在压力的作用下会被不断压紧减小刷丝束厚度, 且通过修正后的刷丝束密度与试验件试验后的测量的刷丝束密度一致。

表 4 刷式密封部分 k 值选取与误差对比
Table 4 Comparison of k value selection and error of brush seal

R_p	k	误差/%
1.397	0.61	13.12
	0.6	7.61
	0.59	3.5
1.595	0.59	8.15
	0.58	6.81
	0.575	1.52
1.795	0.57	16.15
	0.565	9.47
	0.56	1.67
1.917	0.56	14.56
	0.555	1.94
	0.55	13.59
2.159	0.55	14.21
	0.545	3.82
	0.54	8.83
2.403	0.54	10.41
	0.535	6.63
	0.534	4.11
2.606	0.534	9.31
	0.532	5.81
	0.53	3.41
2.829	0.53	14.31
	0.525	9.96
	0.52	3.26

注: 加粗处表示误差较小时的变化量与 k 值的选取。

为了获得刷丝束在不同压降 Δp 下的变化取值规律, 本文对单级刷式密封前 8 个试验工况数据(表 3 单级工况 1~工况 8), 并通过选取表 4 中误差较小的 k 值进行拟合修正。工况 9 和工况 10 未进行拟合修正用来验证得到的拟合曲线能否很好地与该工况试验数据相吻合, 验证该方法准确性和可行性。在不同的试验工况点处, 依次对 k 值进行线性插值得到变化曲线并对其进行

拟合, 如图 15 所示。其中在图中误差表示为 $(|m_{\text{exp}} - m_k|)/m_{\text{exp}} \times 100\%$, m_{exp} 为试验泄漏量, m_k 为 k 值计算的数值泄漏量。

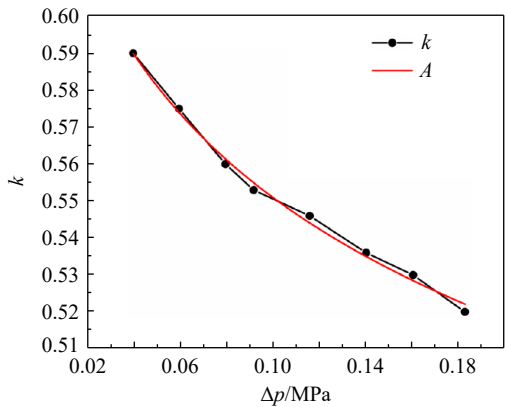


图 15 k 值拟合曲线
Fig. 15 k value fitting curve

$$k = (a + b \cdot \Delta p)^{-\frac{1}{c}} \quad (19)$$

拟合结果为 $a=4.063\ 6$ 、 $b=13.582\ 71$ 、 $c=2.870\ 41$ 。图 15 中曲线 A 表示针对修正系数 k 值的拟合趋势变化。

本文通过对单级刷式密封压降修正参数来间接调控三级刷式密封中每一级的级间压降。研究表明: 相同结构的三级刷式密封各级压降占比分别为 21%~27%、27%~32%、41%~52%^[16], 因此, 本文取它们的平均值依次为 24%、29.5%、46.5% 作为它们每一级的压降差进行计算, 三级刷封级间压降分配及部分 k 值选取见表 5。

3.2 试验修正后单级、三级刷封结果分析

通过式(19)拟合的曲线来验证试验中压比为 3.169、3.586 工况下泄漏量与试验对比情况如图 16, 其中 4.927%、1.933% 为压比 3.169、3.286 下的泄漏量误差。从图中可以看出, 单级刷式密封修正后的计算结果与试验结果较好吻合。且经计算, 在大部分压比范围内, 两者偏差都小于 5%, 这说明采用多点修正的方法是可行的, 同时也表明刷式密封多孔介质模型可以准确预测刷式封严的泄漏量。针对三级刷式密封的试验修正采用各级压降不同分配来修正 k 值, 得到的对比结果如图 17 所示, 从图中可以看到, 三级刷封试验修正的多孔介质模型主要分为 3 部分, 分别在压比为 1.5~2.0、2.0~3.0、3.0~3.25 之间, 压比在 1.5~2.0 时多孔介质模型与试验数据误差较小, 主要原因是在低压差条件下(总压比小于 2.1), 各级压降

表 5 三级刷式密封级间压降分配及部分 k 值选取
Table 5 Distribution of pressure drop between three-stage brush seal stages and selection of partial k value

总压差/kPa	压差/kPa	k
42.6	10.22(第一级压差)	
	12.48(第二级压差)	
	19.81(第三级压差)	
58.67	14.08(第一级压差)	
	17.19(第二级压差)	
	27.28(第三级压差)	
81.22	19.49(第一级压差)	
	23.79(第二级压差)	
	37.76(第三级压差)	
102.49	24.59(第一级压差)	
	30.02(第二级压差)	
	47.65(第三级压差)	
126.75	30.42(第一级压差)	0.576
	37.13(第二级压差)	
	58.93(第三级压差)	
152.97	36.71(第一级压差)	0.569
	44.82(第二级压差)	
	71.13(第三级压差)	
184.05	44.172(第一级压差)	0.562
	53.92(第二级压差)	
	85.58(第三级压差)	
198.62	47.66(第一级压差)	0.576
	58.19(第二级压差)	
	92.35(第三级压差)	0.558
219.97	52.79(第一级压差)	0.573
	64.45(第二级压差)	
	102.28(第三级压差)	0.553

注: k 表示各级刷封压差下计算得到的修正值。

分配较小(各级压差均小于 40 kPa)可以忽略压降对 k 值产生的影响, 计算得到数据与试验吻合良好; 压比在 2.0~3.0 时多孔介质模型与试验数据误差最大但随着压比的增大误差在不断减小, 其主要原因是第三级级间压降较大(大部分压差大于 60 kPa), 从图 14 可以看到, 当单级刷封在压比大于 1.6 后多孔介质模型计算结果与试验误差较大, 需要对孔隙率进行修正。表 5 详细给出了不同压差下 k 值的修正及选取, 并对各级压差在 60 kPa 附近进行了修正。因此, 本文对第三级刷丝束进行了修正, 由于三级刷封初期各级刷丝密度比较大, 较小的气动力对三级刷封各级刷丝束

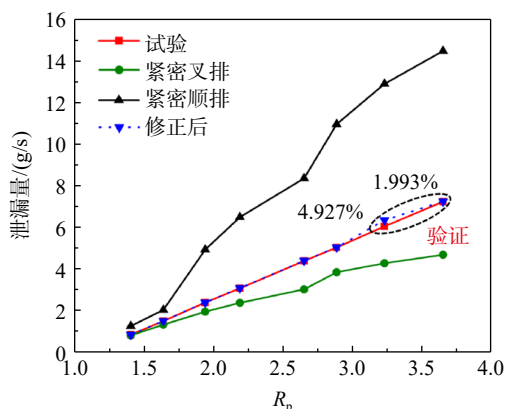


图 16 单级刷式密封多孔介质模型修正后计算结果与试验结果的对比

Fig. 16 Comparison between modified calculation results and experimental results of single stage brush seal porous media model

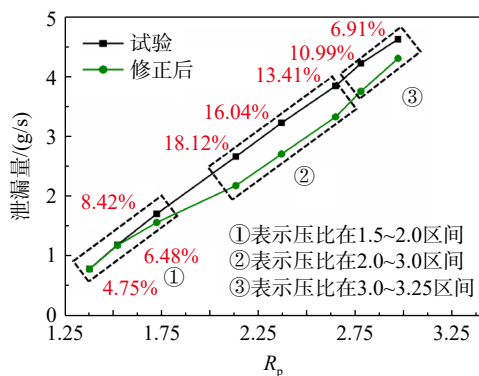


图 17 三级刷式密封多孔介质模型修正后计算结果与试验结果的对比

Fig. 17 Comparison between modified calculation results and experimental results of three-stage brush seal porous media model

厚度影响较小,对第三级刷丝束 k 值突然修正容易造成刷丝束孔隙率急剧减小导致计算得到的泄漏量与试验产生较大的误差,但随着压比的不断增大,刷丝束会被上下游压差的作用下不断压紧,需要修正 k 值且修正后计算的泄漏量与试验误差不断减小,验证了该方法的合理性;压比在 $3.0 \sim 3.25$ 时多孔介质模型与试验数据误差小于压比在 $2.0 \sim 3.0$ 之间,其原因是随着上下游总压差的不断增大,三级刷封中各级压降分配均很大,尤其是第二级、第三级,因此,本文对这两级压降进行了修正,虽然对第二级刷丝束 k 值修正进行了在压比 $2.0 \sim 3.0$ 时同样的操作,但整体上修正后计算得到的泄漏量与试验数据误差仍呈现不断减小的趋势,其主要原因是在小压差条件下三级刷式密封中末级刷封承担着主要的封严作用。

整体而言,修正后的结果与试验吻合良好,验证了多孔介质方法修正三级刷封的可行性与准确性,可以很好地预测刷式封严泄漏量。

4 刷式密封流场特性分析

4.1 流场分布及压力分配

通过上述对三级刷式密封多孔介质孔隙率的修正,设置三级刷式密封上下游不同压比,计算刷式密封工作稳定后的出口泄漏量,使用修正后的多孔介质方法来分别计算模拟压比为 1.5 、 2.0 、 2.5 、 3.0 时三级刷式密封的压力分布情况,如图 18 所示。

从图 18 中可以看出,在不同压比条件下,流动在整流板及前挡板迎风面附近均径向向内,除

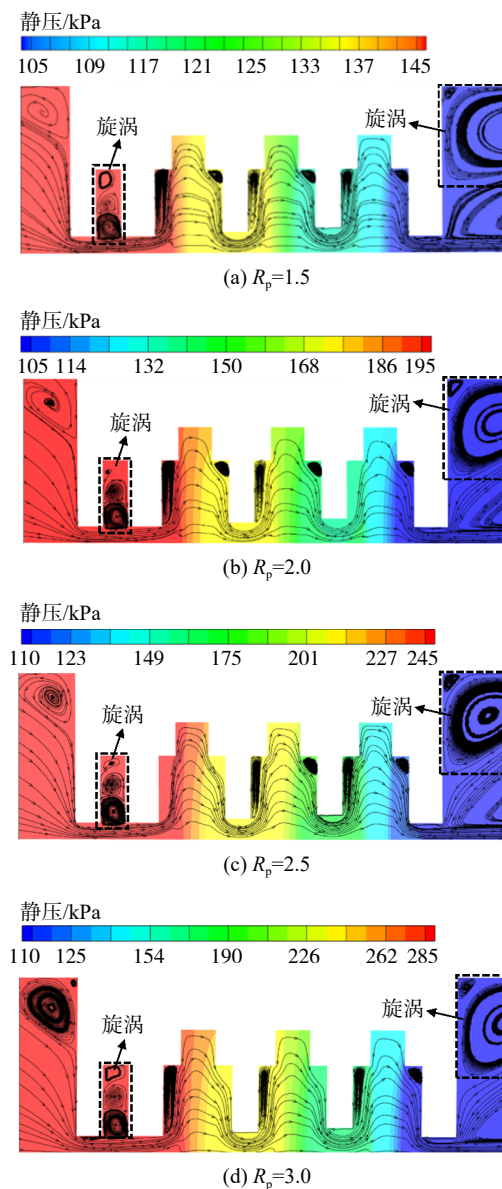


图 18 静压云图及流线分布

Fig. 18 Contours of pressure and streamline distribution

了板的黏性作用外,这种向下的径向流动在很大程度上是无摩擦的,将遵循自由涡流规则。气流主要分两部分进入刷丝束,一部分气流沿着转子轴向方向进入刷丝束区域,且刷丝束底部孔隙率较大,对泄漏气流的阻碍作用较弱,大部分气流主要通过此区域泄漏到下游,另一部分气流是沿着刷丝方向远离转子径向方向运动,进入孔隙率较小的刷丝束上部并在上方流线呈抛物线轨迹流动。在刷丝束上游区域附近,气流离心运动较弱,但这部分气流很快在整流板与前挡板的阻碍作用下发生转折并且向心流动,在整流板的空腔中产生旋涡消耗一小部分能量起到降压效果,但此区域压降变化很小可以忽略不计,增加整流板主要目的是防止上游气流直接对刷丝造成冲击,对刷丝起到一定保护作用。在刷丝束下游区域附近,气流向心运动明显,尤其是在后挡板底部区域,向心运动非常剧烈。在后挡板底部区域,存在明显的低压区域,低压区卷吸下游气流,形成旋涡。同时各个腔室的角区也都形成了旋涡。

4.2 压力分布特性

图 19 为三级刷式密封某一级的刷丝束上游面、下游面、上表面和下表面示意图。上、下游面的压力分布对应刷丝束受到的轴向压差,上、下表面的压力分布对应刷丝束受到的径向压差。通过试验数据修正的多孔介质模型来开展计算研究,选取试验数据中的近似 4 种不同压比(1.42、2.02、2.52、3.0)开展数值分析研究,分别提取各表面压力分布并绘制曲线图可以清晰显示不同压比等运行工况对刷丝束刚化效应以及闭合效应的影响规律。

从图 20 可以看出,随着级数的增加,每一级

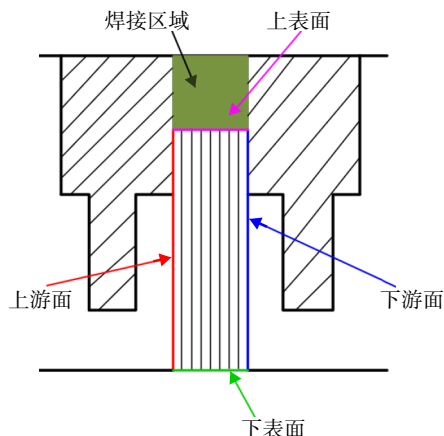


图 19 刷式密封各表面示意图

Fig. 19 Schematic diagram of each surface of brush seal

刷丝束在不同压比条件下上下表面的压力呈现线性增大的趋势,而同一级刷丝束在不同压比的情况下上下表面的压力分布区别较小。沿转子轴向方向,刷丝束上表面静压在两侧靠近上下游面处下降缓慢。而刷丝束下表面静压沿轴向方向近似线性减小,靠近下游面压力下降趋势变大。在刷丝束左半部分,上表面静压小于下表面,这样会使刷丝略微抬起朝着刷丝径向方向移动,从而会增大刷丝束与转子之间的径向密封间隙,增加刷式密封的泄漏量。而刷丝束右半部分则相反,上表面和下表面之间较大的径向压差会使靠近刷丝束下游面的刷丝改变倾角,向转子紧密贴合,增强闭合效应,从而形成良好的密封作用。这也说明了每一级刷丝束的各个位置的刷丝受到的径向气动力大小和方向均有所差异。流线分布可以很清晰地显示这一点:刷丝束左半部分的气流具有远离转子的径向分速度,此区域的刷丝阻碍气流的径向运动会受到远离转子的径向气动力,右半

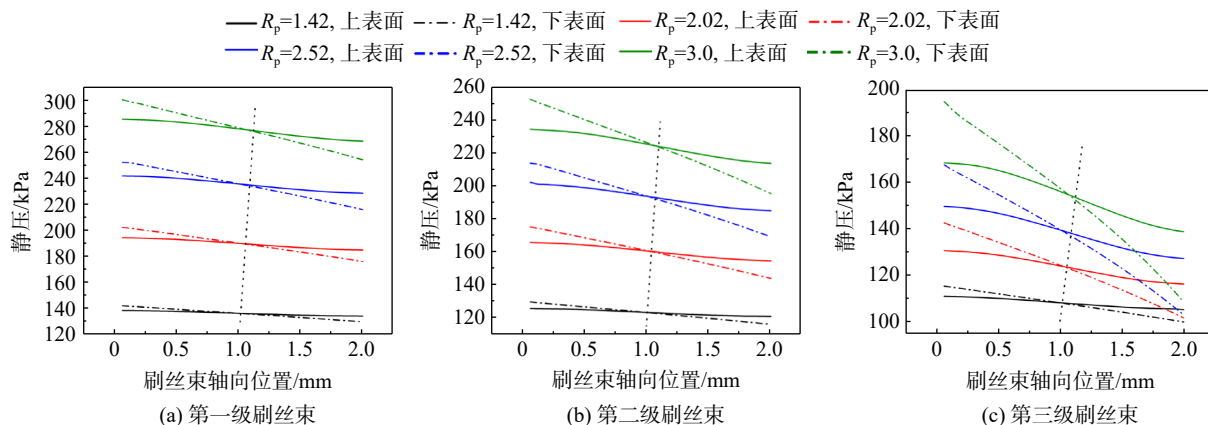


图 20 每一级刷丝束上表面与下表面轴向压力分布

Fig. 20 Axial pressure distribution on the upper and lower surfaces of each brush bundle

部分则相反。

从图 21 可以看出, 围栏高度区域以内每一级刷丝束的上游面静压近似为刷封上游压力, 没有发生明显的变化。在刷丝束围栏高度区域以外, 刷丝束上游面的静压沿刷丝径向远离转子方向逐渐下降, 围栏高度区域上方存在较大的径向压力梯度。围栏高度以下区域刷丝束上游面以及下游面静压分布均匀, 与相连上下游腔室的压力相同。

随着三级刷式密封上下游压比的增大, 每一级刷式密封围栏高度区域以内的静压逐渐变大且末级刷丝束静压差距达到最大, 说明刷丝束受到的轴向压力下降主要集中在刷丝束围栏高度以内及周围部分区域, 主要原因是泄漏气流在该位置处加速和膨胀, 并沿着后挡板向下移动到转子并与轴向气流汇合形成射流最终泄漏到下游区域部分且在下流部分区域产生负压形成涡流。

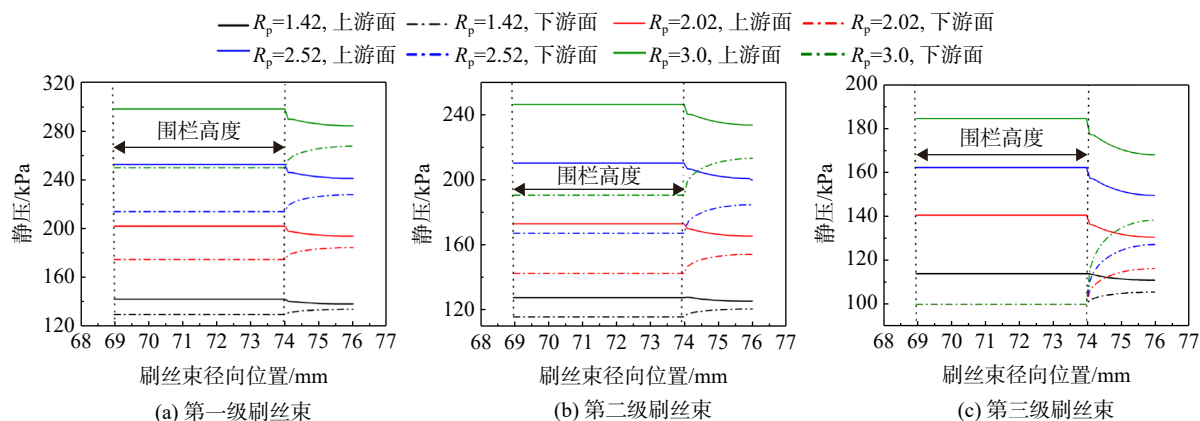


图 21 每一级刷丝束上游面与下游面径向压力分布

Fig. 21 Radial pressure distribution on the upstream and downstream surfaces of each brush bundle

5 结 论

本文建立了稳态切片式三维实体管束模型和基于试验数据修正的单级、三级刷式密封多孔介质模型, 搭建了中速刷式密封耐久试验台, 研究了上下游不同压比工况下对刷式密封泄漏特性的影响规律, 对比分析了两种数值模型在泄漏量方面的准确性, 在修正后的多孔介质方法的基础上, 研究了三级刷式密封的流场分布特性, 得到如下结论:

1) 多孔介质模型是预测密封泄漏特性最有效并且应用最广泛的模型, 但使用多孔介质模型时需要试验数据进行修正。本文根据试验结果分析了单级刷式密封压降与孔隙率之间的关系, 建立了刷式密封流动的多孔介质模型。对模型的计算结果做进一步的修正后, 单级刷式密封数值模拟与试验结果误差小于 5%, 可以很好地与试验结果相吻合。

2) 基于单级刷式密封试验修正的多孔介质方法, 得到压降与刷丝束孔隙率之间的关系, 进而间接对相同结构的三级刷式密封级间压降进行了修正, 且修正后的三级刷式密封数值模拟与试验结果误差小于 20%, 与试验结果相吻合, 验证了

通过单级刷封来修正三级刷封多孔介质修正方法的合理性。

3) 刷丝束围栏高度及周围区域存在较大的轴向与径向压力梯度, 主要是由于气流通过刷丝束在此区域内发生膨胀、加速现象, 导致压力值迅速下降至刷丝束下游值。同时上下游压差的增大会使刷丝束上游面与下游面之间产生较大的轴向压差, 会使刷丝束沿着转子轴向方向发生变形, 刷丝之间相互挤压变形, 排列趋于更加紧密, 导致刷丝刚度增加, 容易产生刚化效应, 不利于刷式密封形成良好的封严环境。

参考文献:

- [1] 李军, 李志刚, 张元桥, 等. 刷式密封技术的研究进展[J]. 航空发动机, 2019, 45(2): 74-84.
LI Jun, LI Zhigang, ZHANG Yuanqiao, et al. Research progress of brush seal technology[J]. Aeroengine, 2019, 45(2): 74-84. (in Chinese)
- [2] LI Jun, QIU Bo, FENG Zhenping. Experimental and numerical investigations on the leakage flow characteristics of the labyrinth brush seal[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2012, 134(10): 102509.
- [3] DINC S, DEMIROGLU M, TURNQUIST N, et al. Fundamental design issues of brush seals for industrial applications[J]. Journal of Turbomachinery, 2002, 124(2): 293-300.
- [4] BAYLEY F J, LONG C A. A combined experimental and theoretic

- cal study of flow and pressure distributions in a brush seal[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1993, 115(2): 404-410.
- [5] CHEW J W, HOGG S I. Porosity modeling of brush seals[J]. *Journal of Tribology*, 1997, 119(4): 769-775.
- [6] 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)
- [7] HUANG Shouqing, SUO Shuangfu, LI Yongjian, et al. Theoretical and experimental investigation on tip forces and temperature distributions of the brush seal coupled aerodynamic force[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2014, 136(5): 052502.
- [8] 马登骞, 张元桥, 李志刚, 等. 采用三维叉排管束模型的刷式密封泄漏特性研究[J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(9): 72-80.
MA Dengqian, ZHANG Yuanqiao, LI Zhigang, et al. Investigating leakage flow characteristics of brush seals via three-dimensional staggered tube bundle model[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2020, 54(9): 72-80. (in Chinese)
- [9] 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 coupled methodology[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(8): 1850-1860. (in Chinese)
- [10] 孙丹, 丁海洋, 李国勤, 等. 刷式密封泄漏特性数值方法与实验验证[J]. 热力透平, 2009, 48(1): 6-13.
SUN Dan, DING Haiyang, LI Guoqin, et al. Numerical method and experimental verification of brush seal leakage characteristics [J]. *Thermal Turbine*, 2009, 48(1): 6-13. (in Chinese)
- [11] PUGACHEV A O, DECKNER M. Experimental and theoretical rotordynamic stiffness coefficients for a three-stage brush seal[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2012, 31: 143-154.
- [12] HENDRICKS R C, GRIFFIN T A, KLINE T R, et al. Relative performance comparison between baseline labyrinth and dual brush compressor discharge seals in a T-700 engine test[C]//Proceedings of ASME 1994 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition. Hague, Netherlands: ASME, 2015: 136-157.
- [13] 曹广州, 吉洪湖, 袁艳平. 模拟刷式密封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)
- [14] 曹广州. 刷式密封结构的泄漏特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.
CAO Guangzhou. Investigation on leakage characteristics of brush seals[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006. (in Chinese)
- [15] 邱波, 李军, 冯增国, 等. 两级刷式密封泄漏特性的实验与数值研究[J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(7): 7-12.
QIU Bo, LI Jun, FENG Zengguo, et al. Experimental and numerical investigations of the leakage characteristics of two-stage brush seal[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2013, 47(7): 7-12. (in Chinese)
- [16] 赵欢, 焦忠泽, 孙丹, 等. 多级刷式密封级间压降分配影响因素数值与实验研究[J]. 航空学报, 2020, 41(10): 123544.
ZHAO Huan, JIAO Zhongze, SUN Dan, et al. Numerical and experimental research on interstage pressure drop distribution affecting factors of multi-stage brush seals[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(10): 123544. (in Chinese)
- [17] 李军, 晏鑫, 丰镇平, 等. 基于多孔介质模型的刷式密封泄漏流动特性研究[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(7): 768-771, 779.
LI Jun, YAN Xin, FENG Zhenping, et al. Study on the leakage flow characteristics of brush seal based on porous medium model[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2007, 41(7): 768-771, 779. (in Chinese)
- [18] ERGUN S. Fluid flow through packed columns[J]. *Chemical Engineering Progress*, 1952, 48(2): 89-94.
- [19] 邱波, 李军. 基于多孔介质局部非热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)
- [20] 黄首清. 刷式密封的介质流动及刷丝尖端接触传热特性研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
HUANG Shouqing. Research on the flow field and bristles tip contact heat transfer characteristics of brush seals[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015. (in Chinese)
- [21] YAKHOT V, ORSZAG S A. Renormalization group analysis of turbulence: I basic theory[J]. *Journal of Scientific Computing*, 1986, 1(1): 3-51.
- [22] 王福军. 计算流体动力学分析: CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
WANG Fujun. Computational fluid dynamics analysis: principle and application of CFD software[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese)
- [23] ARORA G K, PROCTOR M P. JTAGG II brush seal test results: AIAA1997-2632 [R]. Seattle: AIAA, 1997.

(编辑: 王碧珺)