

基于流固耦合的刷式密封泄漏特性 理论与实验

孙 丹¹, 丁海洋², 李国勤¹, 刘长胜³, 刘 斌³, 智 强³

(1. 沈阳航空航天大学 航空发动机学院

辽宁省航空推进系统先进测试技术重点实验室, 沈阳 110136;

2. 中国航空发动机集团有限公司 北京航科发动机控制系统科技有限公司, 北京 102200;

3. 沈阳鼓风机集团股份有限公司 辽宁重大装备制造协同创新中心, 沈阳 110142)

摘 要: 从理论与实验两方面研究了刷式密封泄漏流动特性及影响因素。建立了考虑刷丝变形的刷式密封泄漏流动特性流固耦合理论模型, 实验研究了刷式密封泄漏量随进出口压比和转速等的变化规律, 并与理论求解模型对比验证。在此基础上, 运用理论模型分析了不同结构参数对密封泄漏量的影响规律, 验证了构造的刷式密封泄漏量理论计算公式的准确性。研究结果表明: 径向间隙一定时, 刷式密封泄漏量随压比的增大而近似线性增加, 转速对刷式密封的泄漏量影响不大; 刷丝直径和刷丝间隙通过影响气体在刷丝束区域有效流通面积来影响泄漏量, 有效流通面积越小, 泄漏量越小; 反之, 则越大; 随着刷丝直径、刷丝轴向排数的增大, 刷式密封泄漏量逐渐降低; 随着刷丝间隙的增大, 泄漏量逐渐增大; 随着后挡板保护高度、刷丝与后挡板轴向间隙的增大, 泄漏量先显著增大后缓慢增加, 最后趋于稳定; 所构造的泄漏量理论公式可以准确预测刷式密封的泄漏量, 为刷式密封结构优化设计提供理论依据。

关 键 词: 刷式密封; 流固耦合; 泄漏特性实验; 流场特性; 公式构造

中图分类号: V233.4

文献标志码: A

Theory and experiment on the leakage characteristics of brush seals based on fluid-structure interaction

SUN Dan¹, DING Haiyang², LI Guoqin¹,

LIU Changsheng³, LIU Bin³, ZHI Qiang³

(1. Key Laboratory of Advanced Measurement and Test Technique for
Aviation Propulsion System, Liaoning Province, School of Aero-engine,
Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;

2. Beijing Aerospace Engine Control System Technology Company, Limited,
Aero Engine Corporation of China, Beijing 102200, China;

3. Collaborative Innovation Center of Major Machine Manufacturing in Liaoning,
Shenyang Blower Works Group Company Limited, Shenyang 110142, China)

Abstract: The leakage flow characteristics and the influencing factors of the brush seals were studied both theoretically and experimentally. A fluid-structure interaction theoretical

收稿日期: 2018-12-01

基金项目: 国家自然科学基金(51675351); 中国博士后科学基金(2018M633572);

辽宁省高等学校创新人才支持计划项目(LR2016033)

作者简介: 孙丹(1981—), 男, 教授, 博士, 主要从事透平机械先进密封技术研究。

引用格式: 孙丹, 丁海洋, 李国勤, 等. 基于流固耦合的刷式密封泄漏特性理论与实验[J]. 航空动力学报, 2019, 34(7): 1519-1529.

SUN Dan, DING Haiyang, LI Guoqin, et al. Theory and experiment on the leakage characteristics of brush seals based on fluid-structure interaction[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(7): 1519-1529.

model was established to analyze the leakage flow characteristics of brush seals. Experiments were presented to test the leakage quantity of brush seals with different pressure ratios and rotational speeds and compared with the theory solution model to verify. Based on the accuracy of the theory computational model, the effect law of the brush seal leakage quantity in different structural parameters was analyzed, and the formula for predicting the leakage quantity of brush seals was constructed. The results showed that, the leakage quantity of the brush seals increased approximately linearly with the increase of the pressure ratio when the radial clearance was fixed. The rotational speed had little influence on the leakage quantity of the brush seals. Bristles diameter and the clearance of the bristles affected the leakage quantity through affecting the effective flow area of the gas in the brush area, the smaller effective flow area led to the smaller leakage quantity. With the increase of the bristles diameter and the axial rows of the bristles, the leakage quantity of the brush seals decreased gradually. The leakage quantity increased with the increase of the bristles clearances. As the backing plate fence height and the axial clearance between the last row bristles and the backing plate fence increased, the leakage quantity firstly increased rapidly, and finally became stable. The constructed theoretical formula of leakage quantity can accurately predict the leakage quantity of brush seals and provide a theoretical basis for the optimization design of brush seals structure.

Key words: brush seal; fluid-structure interaction; leakage characteristic experiment; flow field characteristics; formula constructed

刷式密封是继篦齿密封之后发展起来的一种新型密封技术,由于其有着优越的封严性能,在透平机械中被广泛地应用^[1-3],刷式密封泄漏特性研究具有重要意义。

在刷式密封泄漏特性方面,国内外学者进行了大量研究。在理论分析方面,国外 Dogu 等^[4]将刷丝束处理为多孔介质,采用可压缩湍流流动模型,详细研究了刷丝束厚度及后挡板高度等几何参数对刷式密封泄漏特性的影响。Chew 等^[5]建立了考虑刷丝对流体的黏性阻力和惯性阻力的多孔介质模型,研究了刷式密封泄漏流动特性并与实验结果相对比。国内黄学民等^[6]建立了定常稳态求解的多孔介质模型,理论研究了不同结构参数对刷式密封泄漏特性的影响规律。张元桥等^[7]分析了摩擦热在不同工况条件下对刷式密封泄漏量的影响。孙丹等^[8]基于流固耦合理论研究了刷丝的弯曲变形规律。在实验研究方面,国外 Conner 等^[9]实验研究了不同压比和转速对刷式密封泄漏特性的影响。曹广州等^[10]通过实验获得了刷式密封多孔介质模型的渗透率,在考虑源项的条件下数值研究了刷式密封的泄漏特性。邱波等^[11]实验研究结果表明,刷丝与流体之间的相互作用是典型的流固耦合问题,多孔介质模型相关参数难以确定,且计算精度较低^[12-13],不同结构

参数对刷式密封泄漏流动特性影响较为复杂^[14-15]。上述文献分别从理论和实验两方面对刷式密封泄漏特性进行研究,大多研究基于多孔介质模型,因此开展刷式密封流固耦合理论与实验相结合的研究对刷式密封的封严性能和使用寿命研究具有重要的理论与实际意义。

本文实验研究了刷式密封泄漏量随进出口压比和转速等的变化规律,建立了刷式密封流固耦合求解模型,在验证数值模型的基础上,理论研究了刷式密封几何参数对其泄漏特性的影响规律。在此基础上,构造了不同工况参数和结构参数下,能够准确预测刷式密封泄漏量的理论计算公式,对刷式密封结构优化设计具有重要意义。

1 刷式密封流固耦合理论分析

1.1 流固耦合理论模型

刷式密封三维模型如图 1 所示,刷丝束在沿转子的周向方向具有一定的倾角,在转子高速运转时,刷丝的柔性使其能够跟随转子进行运动,从而大大提升其密封性能。研究表明,在高速气流作用下,刷丝与流体之间的相互作用是典型的流固耦合问题。

1.1.1 流体动力学模型

本文流固耦合模型满足守恒方程^[16]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \text{div}(\rho \mathbf{U}) \tag{1}$$

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{U}u) = \text{div}(\Gamma \text{grad}u) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_u \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{U}v) = \text{div}(\Gamma \text{grad}v) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_v \\ \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{U}w) = \text{div}(\Gamma \text{grad}w) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_w \end{cases} \tag{2}$$

式中 ρ 为密度; t 为时间; p 为流体微元体上的压力; $\mathbf{U}$ 为速度矢量; u, v, w 在 x, y, z 方向的速度分量; Γ 为扩散率; S_u, S_v, S_w 为广义源项, 为

$$\begin{cases} S_u = F_x + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \\ \quad \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (\lambda \text{div} \mathbf{U}) \\ S_v = F_y + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \\ \quad \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} (\lambda \text{div} \mathbf{U}) \\ S_w = F_z + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \\ \quad \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda \text{div} \mathbf{U}) \end{cases} \tag{3}$$

式中 F_x, F_y, F_z 为流体微元体上的体力, 若体力只有重力, 且 z 轴竖直向上为正向方向, 则 $F_x = 0, F_y = 0, F_z = -\rho g$; μ 为动力黏度。

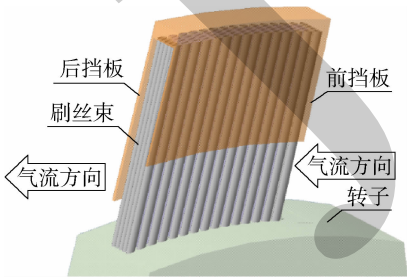


图 1 刷式密封三维模型

Fig. 1 Three-dimensional model of brush seal

由于气流在刷丝间隙中流动较为复杂, 流场的湍流度和黏度体现出各项异性, 需要对标准 $k-\epsilon$ 模型进行修正^[17], 修正模型 RNG (renormalization group) $k-\epsilon$ 模型为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v k)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \cdot \frac{\partial k}{\partial y} \right) + G - \rho \epsilon \tag{4}$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v \epsilon)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \cdot \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right) +$$

$$C_{\epsilon 1} G \frac{\epsilon}{k} - \rho C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} \tag{5}$$

式中 $G = \mu_t \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \frac{\partial u}{\partial y}$; μ_t 为湍流黏度, $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$, k 为湍动能, ϵ 为耗散率。该模型的拟合常数 $C_{\epsilon 1} = 1.44$; $C_{\epsilon 2} = 1.92$; $C_\mu = 0.99$; $\sigma_k = 1.0$; $\sigma_\epsilon = 1.3$ ^[18]。

1.1.2 结构动力学模型

刷式密封刷丝气流量作用下瞬态响应的结构动力学方程可表示为^[8,19]

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{Q}(t) \tag{6}$$

即

$$\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & \cdots & m_{1n} \\ m_{21} & m_{22} & \cdots & m_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ m_{n1} & m_{n2} & \cdots & m_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \vdots \\ \ddot{x}_n \end{bmatrix} + \mathbf{C} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \cdots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \cdots & k_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} & \cdots & k_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_1(t) \\ Q_2(t) \\ \vdots \\ Q_n(t) \end{bmatrix} \tag{7}$$

式中 $\mathbf{M}$ 为质量矩阵, 其中元素 m_{ij} 表示刷丝仅在第 j 个坐标上产生单位加速度而相应于第 i 个坐标上所需施加的力; $\mathbf{K}$ 为刚度矩阵, 其中元素 k_{ij} 表示刷丝仅在第 j 个坐标上产生单位位移而相应于第 i 个坐标上所需施加的力。为保持系统平衡所需要加的外力; $\ddot{\mathbf{x}}, \dot{\mathbf{x}}, \mathbf{x}$ 分别为刷丝的加速度、速度、位移; $\mathbf{Q}(t)$ 为载荷向量; $\mathbf{C}$ 为阻尼矩阵, 应用中多采用比例阻尼, 即

$$\mathbf{C} = a\mathbf{M} + b\mathbf{K} \tag{8}$$

式中质量阻尼系数 a 和刚度阻尼系数 b 与常用的黏性比例阻尼系数 ξ 之间有如下关系

$$a/(2\omega) + b\omega/2 = \xi \tag{9}$$

对于固定的 ξ 值, a 和 b 随频率 ω 变化。作为一种近似, 可以在某频率段内将频率上限和下限代入式(9), 联立方程

$$\begin{cases} a/(2\omega_1) + b\omega_1/2 = \xi \\ a/(2\omega_2) + b\omega_2/2 = \xi \end{cases} \tag{10}$$

解为

$$\begin{cases} a = 2\omega_1^* \omega_2^* \xi / (\omega_1 + \omega_2) \\ b = 2\xi / (\omega_1 + \omega_2) \end{cases} \tag{11}$$

但在大多数情况下常忽略了质量阻尼系数 a , 仅采用由滞后造成的刚度阻尼系数 b , 且在数值仿真中常取经验值, 本文刚度阻尼系数取 0.001 ^[20]。

1.1.3 双向流固耦合理论

本文刷式密封双向流固耦合求解采用双重循环迭代方法^[21],如图 2 所示,从 t_n 时刻开始循环,设定初始条件,通过采用刷丝变形与流场分布相互耦合作用求解器,进行多次计算直至残差收敛到设定值,将此刻流场分布信息通过流固耦合面传递给刷丝耦合面,刷丝产生的变形对流体反作用信息传递给流体域流固耦合面,实现了流体域与固体域的信息双向传递。当完成一次循环时,可将 t_n 时刻得计算结果作为 t_{n+1} 时刻循环的初始值。该方法可研究任意瞬时刷式密封的流场分布特性以及刷丝的运动变形轨迹,同时流体域和固体域按照顺序求解的方式有助于在不同的物理场条件下选择合适的计算方法,可以保证计算结果的精确性。

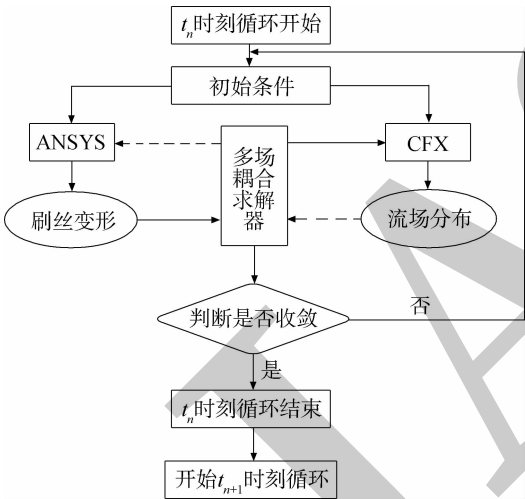


图 2 双向流固耦合流程图

Fig. 2 Flow chart of bidirectional fluid-structure interaction

为保证计算精度,本文采用守恒差值法,该方法可完成刷丝网格与流场网格位移之间的转换,刷丝网格位移为 $\mathbf{X}_s$,通过传递函数 $\mathbf{T}_f$ 将刷丝网格位移转换为流场的网格位移 $\mathbf{X}_f$ 完成^[22]

$$\mathbf{X}_f = \mathbf{T}_f \mathbf{X}_s \tag{12}$$

流体和刷丝的耦合面处能量传递守恒,即

$$\mathbf{F}_f^T \mathbf{X}_f = \mathbf{F}_s^T \mathbf{X}_s = \mathbf{F}_f^T \mathbf{T}_f \mathbf{X}_s \tag{13}$$

物理场间的传递关系为

$$\mathbf{F}_s = \mathbf{T}_f^T \mathbf{F}_f \tag{14}$$

式中 $\mathbf{F}_f$ 、 $\mathbf{F}_s$ 分别为两物理场耦合面上的载荷。

1.2 刷式密封流场特性数值模型

1.2.1 求解模型

本文建立了迷宫与刷式混合式密封流固耦合

瞬态求解三维模型。为简化计算,选取转子与迷宫密封齿根之间流体域建模求解,本文研究的刷式密封二维结构示意图如图 3 所示,刷丝材料为镍基高温合金,弹性模量为 213.7 GPa,泊松比为 0.29。刷式密封的主要几何尺寸如表 1 所示。

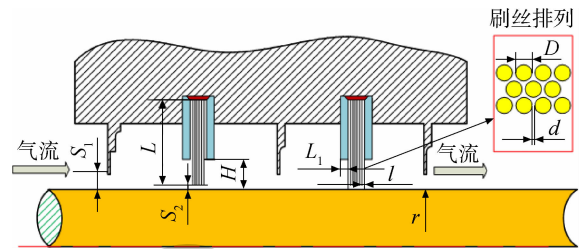


图 3 刷式密封二维结构示意图

Fig. 3 Diagram of two-dimensional structure of brush seal

表 1 刷式密封件主要几何尺寸

Table 1 Main geometric dimensions of brush seals

参数	数值
刷丝直径 D/mm	0.15
刷丝间隙 d/mm	0.015
刷丝排数 $n/\text{排}$	18
刷丝与后挡板轴向距离 l/mm	0.3
后挡板保护高度 H/mm	2
迷宫密封齿与转子面径向间隙 S_1/mm	1.2
刷丝自由端与转子面径向间隙 S_2/mm	0, 0.2
刷丝长度 L/mm	7
转子半径 r/mm	80
挡板轴向厚度 L_1/mm	0.9

1.2.2 求解模型的网格划分

图 4 为求解模型的网格示意图,流体域处采用六面体网格,由于刷丝束区域的流动较为复杂,采用四面体网格。表 2 给出了网格无关性验证结果,可以看出当流体网格数量达到300万,固体网

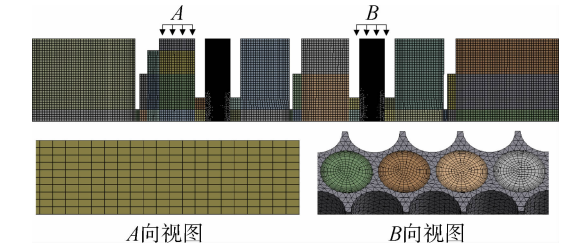


图 4 网格划分示意图

Fig. 4 Grid partitioning diagram

表 2 网格无关性验证

Table 2 Grid-independent validation

流体网格/万	固体体网格/万	泄漏量误差/%
150	3.0	6.23
192	5.5	4.03
268	8.0	2.36
300	10.0	1.72
345	12.2	1.72

格数为 10 万时,泄漏量误差为 1.72%,且增大网格数量,泄漏量误差不再发生变化,最终确定本求解模型流体域和固体域网格分别为 300 万和 10 万。

1.2.3 边界条件

图 5 给出了刷式密封流固耦合求解模型的边界条件,采用最小周期性建模方法。采用理想气体进行计算,进出口均采用压力边界条件,刷丝与流体接触区域采用流固耦合边界条件,转子面采用无滑移边界条件。表 3 给出了密封模型的工况参数。

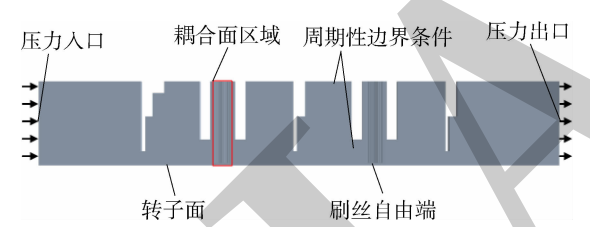


图 5 刷式密封流固耦合求解模型边界条件示意图

Fig. 5 Diagram of boundary conditions of brush seal model with fluid-structure interaction

表 3 密封模型工况参数

Table 3 Working condition parameters of seal model

参数	数值及说明
流体	理想气体
湍流模型	RNG $k-\epsilon$ 模型
转速/(r/min)	0
入口压力/MPa	0.2~0.6
出口压力/MPa	0.1
入口温度/K	298.15

1.3 刷式密封流场特性分析

1.3.1 压力分布特性分析

图 6 给出了压比 $\pi=5$,密封间隙为 0.2 mm

时的刷式密封压力分布图。从图中可以看出,压降主要发生在刷丝束区域,压降逐渐降低。从径向方向看,刷丝束径向压降沿轴向分布不均匀,且靠近下游区径向压力梯度较大,径向压降的存在是刷丝产生“吹闭效应”的重要原因。由压力分布可以发现,刷式密封中的刷丝束对降低密封的泄漏量起到了关键作用。

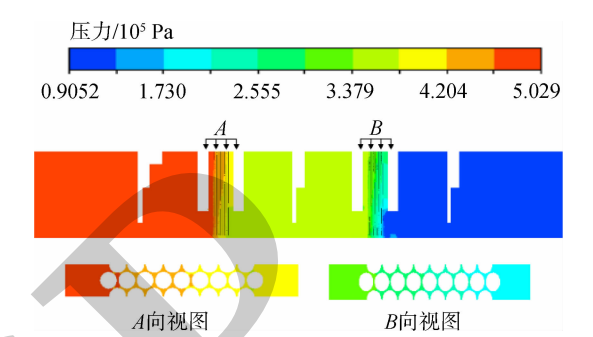


图 6 刷式密封压力分布特性($\pi=5$)

Fig. 6 Pressure distribution characteristics of brush seal ($\pi=5$)

1.3.2 速度分布特性分析

图 7 给出了压比为 5,密封间隙为 0.2 mm 时的速度矢量分布图。由图可以看出,对于迷宫密封,上游气流在迷宫密封齿尖与转子之间的密封间隙处因节流而使流速增大,一部分气流在密封腔内形成旋涡,使气流速度的轴向分量转化为周向分量,消耗了气流的轴向动能,有效降低泄漏量;另一部分气流紧贴转子面,以较大速度流经密封间隙进入下一个密封腔。

对于刷丝束区域,上游气流经迷宫密封齿流速增加,刷丝束区域对气流有一定的阻挡作用,在刷丝根部速度较低,刷丝自由端位置速度较大,由于刷丝束位置存在轴向压降,经过刷丝束区域速度增大。此外,靠近后挡板附近,气流速度的轴向和径向分量急剧增大,导致气流大致与径向成 45°角以射流状射出。

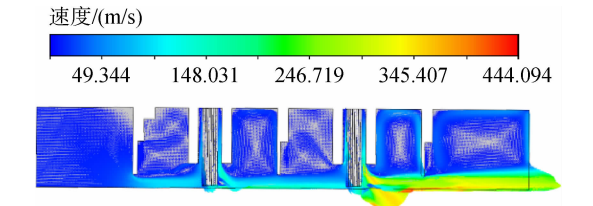


图 7 刷式密封速度矢量分布特性($\pi=5$)

Fig. 7 Speed vector distribution characteristics of brush seal ($\pi=5$)

2 刷式密封泄漏特性实验研究

2.1 密封实验装置

本文搭建的刷式密封泄漏特性实验台如图 8 所示。该实验台主要包括供气系统、密封系统、传动系统和润滑系统四部分。供气系统主要是通过压缩机压缩空气并储存在储气罐中，四个进气孔可同时供气，最大供气压力为 1 MPa。密封系统主要是迷宫与刷式混合式密封实验件，如图 9 所示。传动系统主要包括滑动轴承、转子、增速齿轮箱、联轴器及电动机等。本文研究了刷丝与转子之间间隙分别为 0 mm 和 0.2 mm 时不同压比条件下的迷宫与刷式混合式密封的泄漏特性。

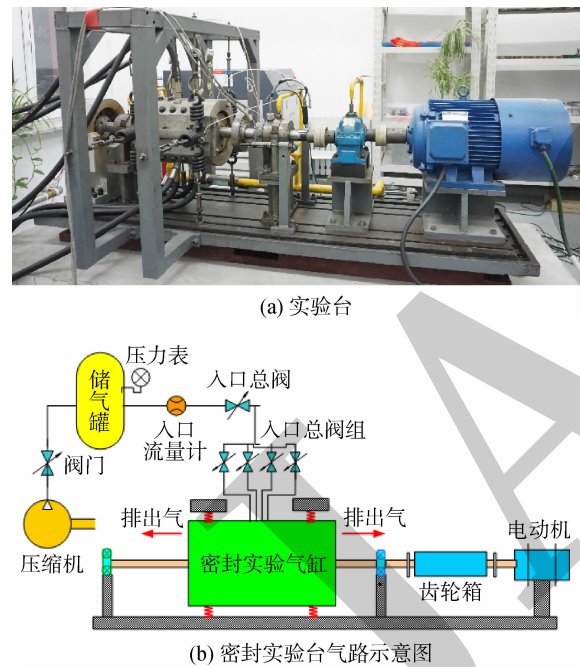


图 8 多功能密封性能实验装置

Fig. 8 Experimental device for multi-function sealing performance

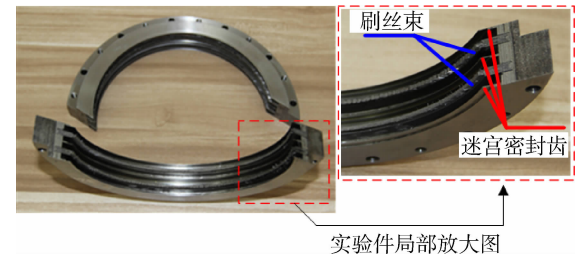


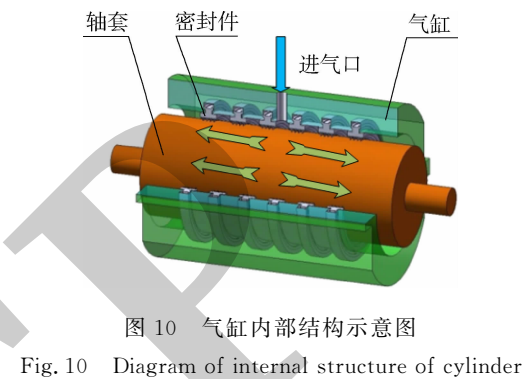
图 9 密封实验件

Fig. 9 Sealed experimental parts

2.2 刷式密封泄漏特性测试原理

为了保证进气均匀和抵消气流所产生的轴向

力,本实验采用中间进气、两端出气的方式,这样可以有效地减小实验产生的测量等误差,提高实验的精确度。如图 10 所示,刷式密封实验件安装在气缸的燕尾槽内,沿气缸周向均布三个压力传感器,用来测量气缸内部的平均压力,采用高精度涡街流量传感器测量不同时刻气缸内部压力对应的进气口处的气体流量,从而计算得到刷式密封不同压比下的泄漏量。



2.3 实验结果及误差分析

由图 11 可以看出不同压比(π)条件下,刷丝与转子面间隙 $S_2=0.2, 0\text{ mm}$, 两种条件下的刷式密封的泄漏量均随压比的增大而增大,刷丝与转子之间间隙为 0.2 mm 的泄漏量明显大于间隙为 0 mm 时的泄漏量。图 12 给出了 $S_2=0\text{ mm}$ 时,不同压比下泄漏量随转速的变化曲线,由图 12 可以看出,转速对刷式密封的密封性能没有显著影响。由图 11 可以看出,理论计算结果略小于实验测量结果,且在大压比下误差较明显,一方面是因为有少部分气体会从实验气缸的中分面泄漏,且压比越大,误差越明显;另一方面,高压比实验时,维持高压状态的时间较短,数据采集略微滞后,导致理论与实验存在一定误差。整体吻合较好,从

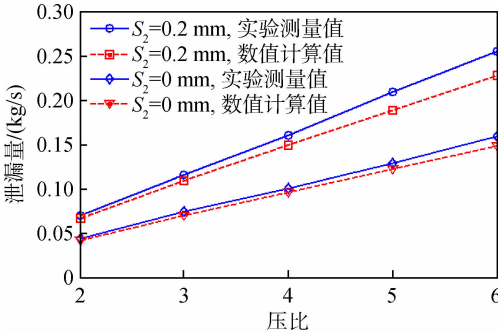


图 11 不同密封间隙泄漏量随压比的变化

Fig. 11 Variation of leakage quantity with pressure ratio of different sealing gap

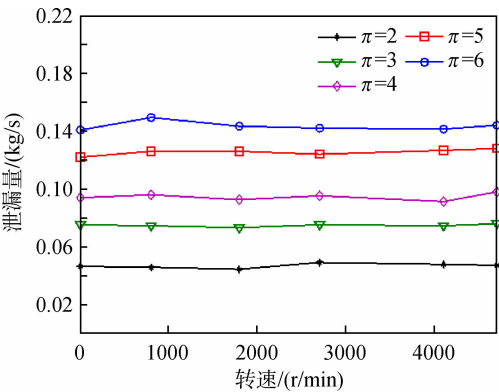


图 12 泄漏量随转速的变化 ($S_2=0\text{ mm}$)

Fig. 12 Leakage quantity varying with speed ($S_2=0\text{ mm}$)

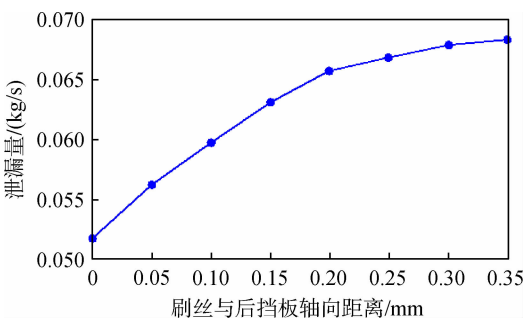


图 14 末排刷丝与后挡板轴向距离对泄漏量的影响

Fig. 14 Effect of axial distance between the last row bristles and the backing plate fence on leakage quantity

而验证了本文求解模型的准确性。

3 刷式密封泄漏特性影响因素

3.1 后挡板保护高度对刷式密封泄漏量的影响

图 13 给出了在不同后挡板保护高度对刷式密封泄漏特性的影响规律。由图可知,随着后挡板保护高度的增大刷式密封的泄漏量不断增大;当后挡板保护高度大于 2 mm 时,泄漏量趋于稳定。这是由于后挡板起着承受轴向气流压力的作用,在一定压比下,气体流经后挡板保护高度较小的刷式密封时,后挡板阻碍刷丝自由端的轴向变形。而当后挡板保护高度增大时,刷丝自由端在一定压力下变形量逐渐趋于稳定,使得泄漏量趋于平稳。

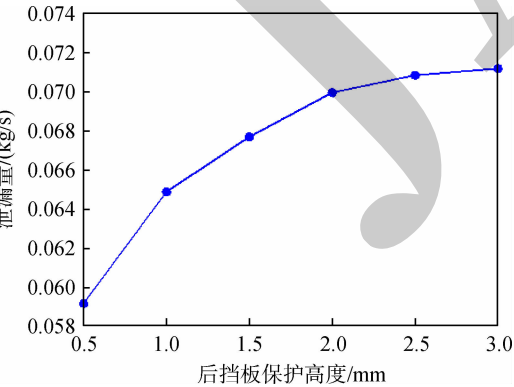


图 13 后挡板保护高度对泄漏量的影响

Fig. 13 Effect backing plate fence height on leakage quantity

3.2 末排刷丝与后挡板间的轴向距离对刷式密封泄漏量的影响

图 14 给出了刷式密封泄漏量随末排刷丝与后挡板间的轴向距离的变化规律。由图可以看出,轴向距离在 0~0.2 mm 范围时,泄漏量随轴

向距离的增大显著增大;当轴向距离大于 0.2 mm 时,泄漏量增加缓慢,逐渐趋于平稳。这是因为轴向距离较小时,刷丝在轴向压降的作用下产生变形,后挡板的存在有效抑制了刷丝的变形量,从而降低了刷丝自由端与转子的密封间隙。当轴向距离继续增大,在相同压比下,后挡板对刷丝变形量的抑制作用减弱,刷丝变形量趋于稳定,导致泄漏量增大趋势减缓。

3.3 刷丝间隙对刷式密封泄漏量的影响

图 15 给出了泄漏量随刷丝间隙的变化曲线。由图可以看出,泄漏量随着刷丝间隙的增大而增大,同时刷丝对流体的阻滞作用降低,减小了流体的动能损耗,使泄漏量变大。

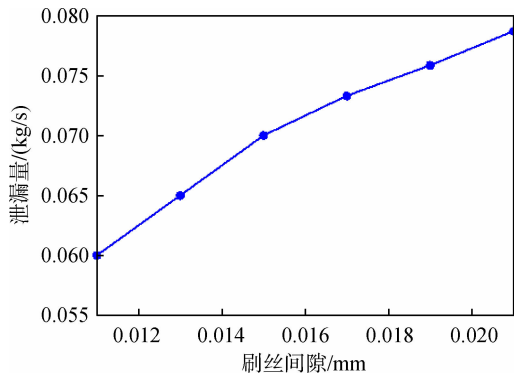


图 15 刷丝间隙对泄漏量的影响

Fig. 15 Effect of brush wire clearance on leakage quantity

3.4 刷丝直径对刷式密封泄漏特性的影响

图 16 给出了刷式密封泄漏量随刷丝直径的变化曲线。由图中可以看出,刷丝直径在 0.09~0.25 mm 范围变化时,随着刷丝直径的增大,刷式密封的泄漏量逐渐降低,一方面是由于刷丝直径增大,使刷丝刚度变大,在压比不变的情况下,变

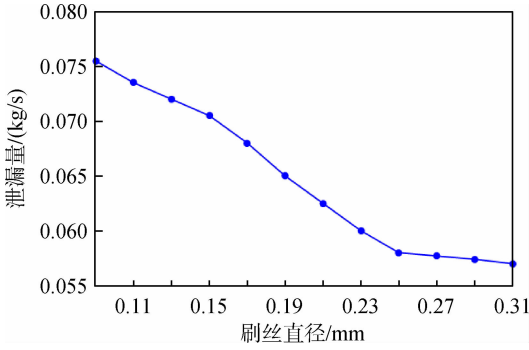


图 16 刷丝直径对泄漏量的影响

Fig. 16 Effect of bristle diameter on leakage quantity

形减小,减小了刷丝端部与转子间的密封间隙,泄漏面积减小;另一方面是由于刷丝直径的增大,沿周向的最小周期数减小,使刷丝间隙的周向循环数减小,从而降低了泄漏量。刷丝直径大于 0.25 mm 后,泄漏量降低速度减缓,说明在本文研究模型下,刷丝直径大于 0.25 mm 时,对泄漏特性影响不大。

3.5 刷丝排数对刷式密封泄漏量的影响

图 17 给出了刷式密封泄漏量随刷丝排数的变化曲线。由图可以看出,泄漏量随着刷丝排数的增大而减小,这是因为刷丝轴向厚度增加,对气流的阻碍作用增强,气流的泄漏阻力增大,增大了流体的能量耗散,使流体压降变大,从而使泄漏量减小。

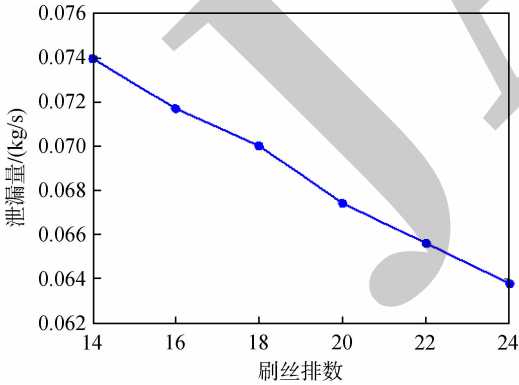


图 17 刷丝排数对泄漏量的影响

Fig. 17 Effect of bristle row on leakage quantity

4 刷式密封泄漏量公式构造

4.1 泄漏量理论计算公式构造

为满足实际工程应用需要,降低计算成本,在理想流动下经典 Egli^[23] 泄漏量理论公式的基础上,通过构造修正系数 α ,同时考虑结构参数,得到了刷式密封的泄漏量理论计算公式:

$$\dot{m} = \alpha \dot{m}_i \quad (15)$$

式中 $\dot{m}$ 为实验测试或 CFD 数值计算得到的泄漏量; $\dot{m}_i$ 为基于 Egli 泄漏量理论计算公式提出的等温流动时刷式密封泄漏量理论公式:

$$\dot{m}_i = \frac{p_{\text{tot},\text{in}} A \beta}{\sqrt{RT_{\text{tot},\text{in}}}} \quad (16)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{p_{\text{sta},\text{out}}}{p_{\text{tot},\text{in}}}\right)^2}{n + \ln\left(\frac{p_{\text{tot},\text{in}}}{p_{\text{sta},\text{out}}}\right)}} \quad (17)$$

式中 $p_{\text{tot},\text{in}}$ 为密封进口总压; $p_{\text{sta},\text{out}}$ 为出口静压; $T_{\text{tot},\text{in}}$ 为气体进口总温; R 为理想气体常数; n 为刷丝排数, $n=10\sim30$; β 为流量系数; A 为考虑刷丝变形后密封间隙处迎气面积, $A = 2\pi r_{\text{ave}} \cdot \left\{ L \left[1 - \cos\left(\frac{qL^3}{6EI}\right) \right] + S_0 \right\}^{[24]}$; r_{ave} 为密封间隙处平均半径; S_0 为刷丝未变形时密封间隙; q 为作用在刷丝上的载荷集度; L 为刷丝长度,取 5~15 mm; E 为弹性模量; I 为刷丝惯性矩。

4.2 修正系数 α 公式构造

在不同工况下,考虑刷式密封结构参数的条件下,得出刷式密封实际泄漏量与修正系数 α 的关系表达式如下:

$$\alpha = \frac{\dot{m} \sqrt{RT_{\text{tot},\text{in}}}}{A p_{\text{tot},\text{in}} \beta} \quad (18)$$

为了能将不同于本文工况和结构参数计算得到的刷式密封泄漏量与本文进行比较,在不考虑温度、压力和几何因素的条件,本文提出的泄漏系数是一个更能有效评价刷式密封泄漏特性的无量纲参数,定义式为^[25]

$$\varphi = \frac{\dot{m} \sqrt{RT_{\text{tot},\text{in}}}}{A p_{\text{tot},\text{in}}} \quad (19)$$

比较式(18)和式(19)发现,泄漏系数 φ 、流量系数 β 与修正系数 α 存在如下关系:

$$\alpha = \frac{\varphi}{\beta} \quad (20)$$

φ 和 β 通过数值计算得出, α 由上式关系得到。

后挡板保护高度 $H=0.5\sim3$ mm;刷丝束与后挡板轴向距离 $l=0\sim0.4$ mm;刷丝间隙 $d=0.01\sim0.03$ mm;刷丝直径 $D=0.05\sim0.025$ mm;刷丝排数 n 是影响刷式密封泄漏量的主要参数。 α 与各结构参数之的表达式为

$$\alpha = \frac{f_1(H) f_2(l) f_3(d)}{f_4(D) f_5(n)} \quad (21)$$

在经过大量数值计算后,采用最小二乘法进行多次拟合后可得到修正系数 α 与刷式密封结构参数的关系:

$$\begin{cases} f_1(H) = 13.3055H^3 - 95.5065H^2 + \\ 250.6819H + 624.3465 \\ f_2(l) = -368.8316l^3 + 45.1167l^2 + \\ 83.9136l + 58.0551 \\ f_3(d) = 513.0681d^3 - 57.0828d^2 + \\ 2.1995d + 0.0072 \\ f_4(D) = -31.1918D^3 + 20.9816D^2 - \\ 2.1399D + 1.0874 \\ f_5(n) = -0.0011n^3 + 0.2312n^2 - \\ 11.2653n + 470.2319 \end{cases} \quad (22)$$

4.3 计算结果比较

图 18 为刷式密封泄漏量 CFD 计算结果与式 (15) 的计算结果比较,由图可以看出两者吻合程度较好,验证了式 (15) 的准确性。由表 4 可以看出,两者计算误差小于 2%,满足实际工程误差范围^[26],说明在实际工程应用中,可以应用本文构造的刷式密封泄漏量理论公式计算得到可靠的刷式密封的泄漏量,为刷式密封的结构优化设计提供参考。

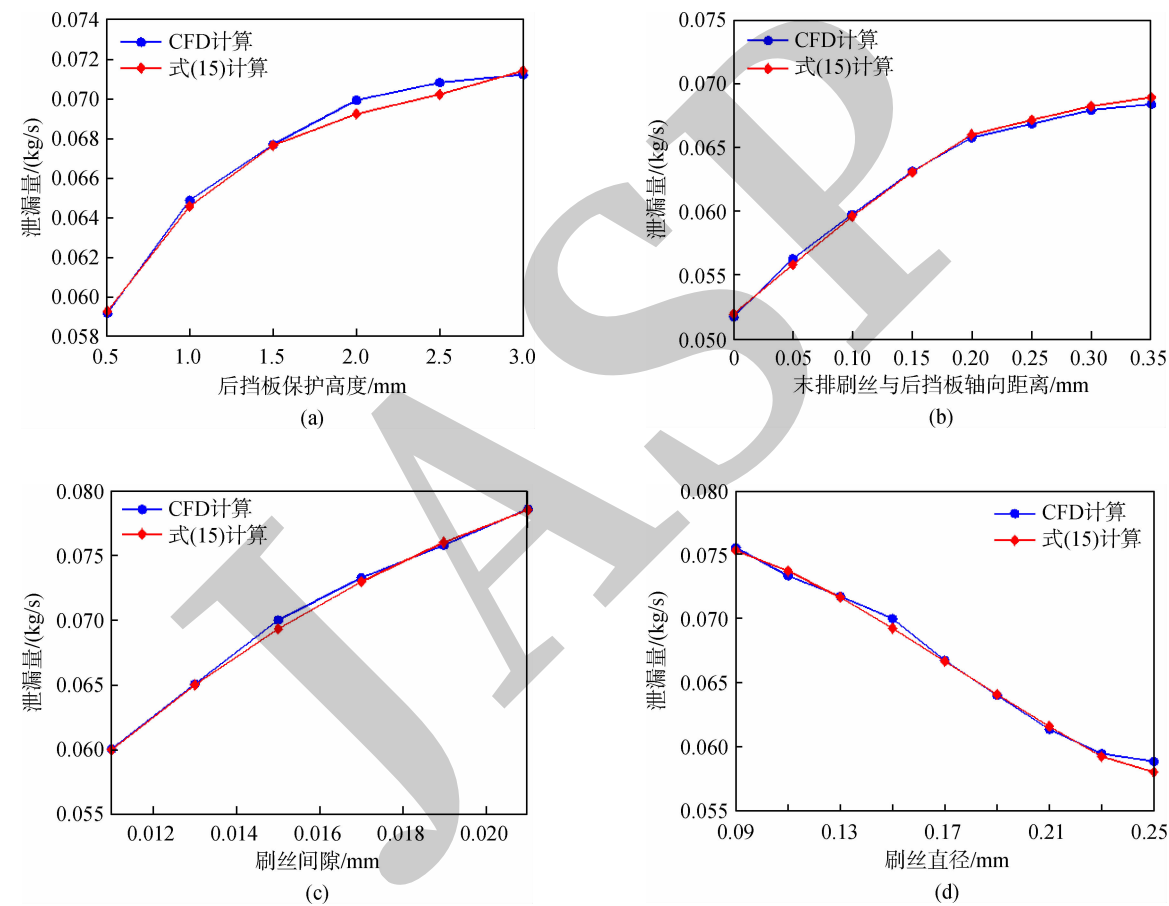


图 18 公式计算与数值计算结果比较

Fig. 18 Comparison of formula calculation and numerical calculation results

表 4 公式计算与数值计算误差

Table 4 Formula calculation and numerical calculation error

结构参数	平均误差/%
后挡板保护高度 H	0.56
刷丝与后挡板轴向距离 l	0.44
刷丝间隙 d	0.54
刷丝直径 D	1.54
刷丝排数 n	0.56

5 结 论

- 1) 本文建立了刷式密封双向流固耦合理论求解模型,分析了刷式密封泄漏流动特性,结果表明,沿轴向压力逐渐降低,径向压降沿刷丝轴向分布不均且靠近下游径向压降较大,这是产生“吹闭效应”的重要原因。刷丝束根部区域速度最小,下游刷丝与转子面间隙处气流速度最大。
- 2) 本文设计搭建了刷式密封泄漏特性实验

台,将实验结果与理论模型计算结果对比验证。研究表明,刷式密封的泄漏量随压比的增大近似线性增加,且密封间隙越大,泄漏量越大。转速对刷式密封的密封性能没有明显影响。

3) 本文实验结果证明了流固耦合理论求解模型的准确性,结果表明刷丝直径和刷丝排数的增大会使密封性能提高;泄漏量随着刷丝间隙、后挡板保护高度、末排刷丝与后挡板间的轴向间隙的增大,密封性能逐渐降低。

4) 在理论分析与实验研究的基础上,本文构造的刷式密封泄漏量理论公式预测了不同结构参数和工况参数下刷式密封的泄漏量,满足实际工程误差范围。

参考文献:

- [1] CONNER K J, CHILDS D W. Rotordynamic coefficient test results for a four-stage brush seal[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2015, 9(3): 462-465.
- [2] DOGU Y, AKSIT 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): 012507. 1-012507. 9.
- [3] 胡广阳. 航空发动机密封技术应用研究[J]. *航空发动机*, 2012, 38(3): 1-4.
HU Guangyang. Application research of seal technologies for aeroengine[J]. *Aeroengine*, 2012, 38(3): 1-4. (in Chinese)
- [4] DOGU Y, BAHAR A S, SERTÇAKAN M C, et al. Computational fluid dynamics investigation of brush seal leakage performance depending on geometric dimensions and operating conditions[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2016, 138(3): 032506. 1-032506. 13.
- [5] CHEW J W, LAPWORTH B L, MILLENER P J. Mathematical modeling of brush seals[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 1995, 16(6): 493-500.
- [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] 张元桥, 闫嘉超, 李军. 刷式密封泄漏和传热特性影响因素的数值研究[J]. *推进技术*, 2018, 39(1): 116-124.
ZHANG Yuanqiao, YAN Jiachao, LI Jun. Numerical investigations on influence factors of leakage flow and heat transfer characteristics of brush seal[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2018, 39(1): 116-124. (in Chinese)
- [8] 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)
- [9] CONNER K J, CHILDS D W. Rotordynamic and leakage characteristics of a 4-stage brush seal[D]. College Station, Texas, US: The Agricultural and Mechanical College of Texas, 1990.
- [10] 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)
- [11] 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)
- [12] 吕坤, 张荻, 谢永慧. 不同来流下薄平板流固耦合特性分析[J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(26): 76-82.
LÜ Kun, ZHANG Di, XIE Yonghui. Fluid-structure interaction for thin plate with different flow parameters[J]. *Proceedings of CSEE*, 2011, 31(26): 76-82. (in Chinese)
- [13] 权凌霄, 孔祥东, 俞滨, 等. 液压管路流固耦合振动机理及控制研究现状与发展[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(18): 175-183.
QUAN Lingxiao, KONG Xiangdong, YU Bin, et al. Research status and trends on fluid-structure interaction vibration mechanism and control of hydraulic pipeline[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(18): 175-183. (in Chinese)
- [14] 张艾萍, 张帅, 李相通, 等. 低滞后刷式密封泄漏流动数值模拟及结构优化[J]. *润滑与密封*, 2015, 40(2): 67-72.
ZHANG Aiping, ZHANG Shuai, LI Xiangtong, et al. Numerical simulation on leakage flow characteristics and optimization on structure of low hysteresis brush seal[J]. *Lubrication Engineering*, 2015, 40(2): 67-72. (in Chinese)
- [15] 李军, 晏鑫, 丰镇平. 刷式密封泄漏流动特性影响因素的研究[J]. *热能动力工程*, 2007, 22(3): 250-254.
LI Jun, YAN Xin, FENG Zhenping. A study of the influence of brush-type seals on leaking steam flow characteristics[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2007, 22(3): 250-254. (in Chinese)
- [16] 孔繁余, 陈浩, 王婷, 等. 基于流固耦合的减压塔底泵泵体强度分析[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(2): 159-164.
KONG Fanyu, CHEN Hao, WANG Ting, et al. Strength analysis of decompression tower bottom pump's pump casing based on fluid-solid coupling[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(2): 159-164. (in Chinese)
- [17] YAKHOT V, ORSZAG S A. Renormalization group analysis of turbulence: I basic theory[J]. *Journal of Scientific Computing*, 1986, 1(1): 3-51.
- [18] LAUDER B E, SPALDING D B. Lectures in mathematical

models of turbulence[R]. London:Academic Press,1972.

[19] 张小伟,王延荣,张潇,等. 涡轮机械叶片的流固耦合数值计算方法[J]. 航空动力学报,2009,24(7):1622-1626.
ZHANG Xiaowei, WANG Yanrong, ZHANG Xiao, et al. Numerical method for fluid-structure interaction in turbo-machinery bladings[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(7):1622-1626. (in Chinese)

[20] 李方硕,陈前,周俊辉. 双腔液固混合介质隔振器刚度阻尼特性分析[J]. 振动与冲击,2016,35(10):91-95.
LI Fangshuo, CHEN Qian, ZHOU Junhui. Stiffness and damping properties of dual-chamber liquid and solid mixture vibration isolator[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(10):91-95. (in Chinese)

[21] 钱若军,董石麟,袁行飞. 流固耦合理论研究进展[J]. 空间结构,2008,14(1):6-18.
QIAN Ruojun, DONG Shilin, YUAN Xingfei. Advances in research on fluid-structure interaction theory[J]. Spatial Structures, 2008, 14(1):6-18. (in Chinese)

[22] 陶海亮,朱阳历,郭宝亭,等. 压气机叶片流固耦合数值计算[J]. 航空动力学报,2012,27(5):1054-1060.
TAO Hailiang, ZHU Yangli, GUO Baoting, et al. Numerical simulation of aeroelastic response in compressor based on fluid-structure coupling[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(5):1054-1060. (in Chinese)

[23] EGLI A. A general method for correlating labyrinth-seal leak-rate data[J]. Journal of Fluids Engineering, 1960, 82(2):265-270.

[24] 刘宁宁. 基于流固耦合的刷式密封流场特性与力学特性研究[D]. 沈阳:沈阳航空航天大学,2017.
LIU Ningning. Study of flow and mechanical characteristics of brush seal based on fluid-structure interaction[D]. Shenyang:Shenyang Aerospace University, 2017. (in Chinese)

[25] GAMAL A J M, VANCE J M. Labyrinth seal leakage tests: tooth profile, tooth thickness, and eccentricity effects [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2008, 130(1):012510. 1-012510. 11.

[26] 李志刚,李军,丰镇平. 蜂窝密封流动特性的数值研究和泄漏量计算公式的构造[J]. 机械工程学报,2011,47(2):142-148.
LI Zhigang, LI Jun, FENG Zhenping. Numerical investigation on discharge behavior and predication formula establishment of leakage flow rate of honeycomb seal[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(2):142-148. (in Chinese)

(编辑:陈 越)