

燃气轮机轴承腔处刷式密封设计与优化

尹 易¹, 朱维兵¹, 胡峻瑞¹, 颜招强², 王和顺¹

(1. 西华大学 机械工程学院, 成都 610039; 2. 自贡兆强密封制品实业有限公司, 自贡 643000)

Design and Optimization of Brush Seal in Gas Turbine Bearing Cavity

YIN Yi¹, ZHU Weibing¹, HU Junrui¹, YAN Zhaoqiang², WANG Heshun¹

(1. School of Mechanical Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China; 2. Zigong Zhaoqiang Sealing Products Industrial Co., Ltd., Zigong 643000, China)

Abstract: Aiming at the sealing problem of the gas turbine bearing cavity, a two-stage staggered brush seal structure was designed. A porous media model was used to analyze the pressure and velocity distribution of the seal under specific working conditions. The effects of structural parameters on the sealing performance of the brush seal, such as the fiber diameter, the thickness of the bristle and the inclination angle of the brush, were investigated by using the finite element analysis method. Orthogonal test method was used to analyze the leakage of different combinations of structural parameters. The structural parameters that have effects on the sealing performance from the strongest effects to the least effects are fiber diameter, back baffle gap, bristle thickness, cant angle of brush and front baffle gap. Combined with the actual processing capability, the structural parameters were optimized. The preferred structural parameters include fiber diameter 0.005 mm, bristle thickness 3 mm, cant angle of brush 20°, front baffle gap 1.6 mm and back baffle gap 0.6 mm. The mass flow rate of the optimized structure is 11.24 g/s, and the sealing performance of the optimized structure is improved by 62.51% compared with that before optimization.

摘要: 针对燃气轮机轴承腔处密封问题,设计了一种二级错列式刷式密封结构。运用多孔介质模型,分析该种密封装置在特定工况条件下的压力与速度分布。利用有限元分析方法研究刷式密封的刷丝直径、刷丝束厚度、刷丝倾斜角等结构参数对密封性能的影响情况。采用正交试验法,分析不同结构参数组合下的泄漏情况,得到结构参数对密封性能的影响由强至弱依次为:刷丝直径、后挡板间隙、刷丝厚度、刷丝倾斜角、前挡板间隙。结合实际加工能力,对结构参数进行优选。优选结构参数为:刷丝直径 0.005 mm,刷丝厚度 3 mm,刷丝倾斜角 20°,前挡板间隙 1.6 mm,后挡板间隙 0.6 mm。该结构参数下泄漏率为 11.24 g/s,封严性能较优化前提高 62.51%。

关键词: 刷式密封; 正交试验; 多孔介质; 流场分析

Key words: brush seal; orthogonal experiment; porous media; flow field analysis

DOI: 10.13949/j.cnki.njgc.2025.02.014

中图分类号: TH136

收稿日期: 2024-08-27

修回日期: 2024-10-10

基金项目: 四川省国际港澳台科技创新合作项目(2024YFHZ0338)

Foundation Item: Sichuan International S&T Cooperation and Exchange R&D Project (2024YFHZ0338)

作者简介: 尹 易(2000—),男,硕士生,主要研究方向为流体密封技术,E-mail: 416063448@qq.com;

朱维兵(通信作者),E-mail: 2411716352@qq.com。

0 概述

随着燃气轮机技术的不断发展,密封技术已经成为影响其机械寿命与性能的重要因素。各国都在奋力研制热效率更高的燃气轮机,作为燃气轮机关键部件之一的轴承腔密封技术成为了提高机械性能的研究热点。虽然迷宫密封、圆周密封与机械密封已经用于轴承腔密封,但仍然存在一些问题:迷宫密封虽然结构简单,但泄漏量较大,且迷宫齿磨损后难以修复;圆周密封虽能适应高线速度和高转速的工作需求,但石墨环较脆易碎,在使用过程中存在断裂失效风险;机械密封能耐受较大的压力变化,但质量大,装配困难且适应轴的径向位移量较小^[1-2]。刷式密封作为新型密封装置具有泄漏量小、能够适应转轴径向偏移等优点,已广泛用于航空发动机、燃气轮机和汽轮机等透平机械^[3-4],为燃气轮机密封性能的改进提供了研究方向。

文献[5]中通过模拟试验研究刷式密封内部的介质流动情况,发现在介质流经时刷丝间不规则间隙会使介质产生涡流与射流,造成流体自密封效应。文献[6]中采用 Non-Darcian 多孔介质数值分析模型,通过在动量方程中添加黏性阻力系数和惯性阻力系数来描述刷式密封中介质的流动情况。文献[7]中设计了一种“L”型刷丝,并分析了在油气两相介质下刷丝的传热特性。文献[8]中利用多孔介质模型对二级迷宫刷式组合密封的泄漏特性进行分析,指出转子在高速旋转时产生的离心伸长效应对提升刷式密封的密封性能有积极作用。文献[9]中通过汽轮机试验台,比较了刷丝串联设计和二级刷式密封布置的性能差异,并研究了刷丝和涂层的磨损情况。文献[10]中研究了单级、三级刷式密封压降对出口泄漏量的影响规律,对比分析多孔介质与稳态切片式三维实体管束两种数值模型在泄漏量方面的优劣,发现依据试验数据修正后的多孔介质模型求解精度更高。文献[11]中测试了不同背板高度的刷式密封泄漏特性,发现更大的背板间隙会导致刷丝刚度降低,吹伏效应更加明显,从而增大刷式密封的发热情况和泄漏量。文献[12]中研究了刷式密封不同前后挡板结构对压力与流场的影响规律,总结了各种结构对刷式密封密封性能与寿命的影响。文献[13]中研究了低滞后型刷式密封各结构参数对密封性能的影响情况,并比较了非金属刷丝与金属刷丝的密封性能优劣。

因为燃气轮机轴承腔密封轴径较大,密封线速度较高,现有刷式密封结构难以实现转轴磨损小、低

介质泄漏率等要求。为解决上述难题,设计了一种新型二级错列式刷式密封结构。该种设计刷丝不与转轴直接接触,减轻了刷丝对转轴的磨损,且两级交错布置刷丝形成了“S”型泄漏通道,使得介质流过密封装置的路径延长,强化对介质流动的阻碍作用。利用有限元分析模型研究压力分布与速度分布情况,并探究结构参数对密封性能的影响情况,采用正交试验法对各参数进行优选,为解决燃气轮机轴承腔密封问题提供分析思路。

1 刷式密封结构设计

轴承腔相关参数如表 1 所示,二级错列式刷式密封结构如图 1 所示。该刷式密封装置由一正一反两级交错布置的刷丝束构成,每级刷丝拥有独立的前后挡板。刷丝束由挡板上的凸起夹紧。正向设置的刷丝固定在安装基座上,保持静止;反向设置的刷丝束安装于轴套上,跟随转轴一起旋转。依照安装尺寸进行结构尺寸初设,确定内密封直径 $D_1=266$ mm,外密封直径 $D_2=300$ mm。

表 1 轴承腔工况参数

Table 1 Bearing cavity design parameters

| 项目 | 参数 |
|--|-------|
| 轴径 D/mm | 256 |
| 转速 $\omega/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$ | 6 000 |
| 入口压力 p_i/MPa | 0.51 |
| 出口压力 p_o/MPa | 0.10 |
| 入口温度 $T_i/^\circ\text{C}$ | 211 |
| 出口温度 $T_o/^\circ\text{C}$ | 180 |
| 密封介质 | 空气 |

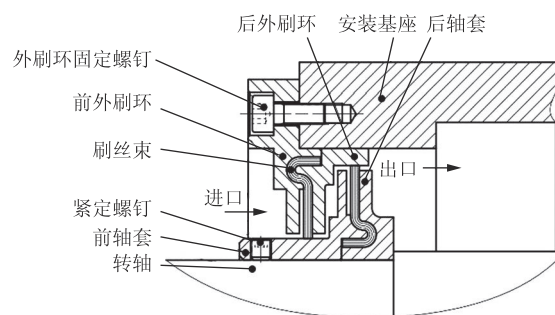


图 1 二级错列式刷式密封装置

Figure 1 Two-stage staggered brush seal structure

材料选择方面,刷丝常用材料为金属或碳纤维,考虑到密封部位为燃气轮机轴承腔,金属刷丝磨损后产生的微粒可能对轴承造成损害^[14],因而选用 T650 碳纤维作为刷丝材料,其极限工作温度为 370 ℃。前后轴套、外刷环等零件选用 304 不锈钢。

2 刷式密封多孔介质流动模型

刷式密封的刷丝束区域由数量众多且密集排列的刷丝构成,泄漏介质从刷丝间不规则的微小空隙中渗出,这与多孔介质中的流动类似,因此本文将刷丝束处理为多孔介质区域。为模拟刷丝束区域中的介质流动情况,在动量方程中添加第 i 方向阻力源项分量 S_i ,以体现刷丝对流体流动的阻碍作用,增添的阻力源项^[15]如式(1)所示。

$$S_i = -\left(\frac{\mu}{\alpha} \mathbf{u}_i + \frac{1}{2} C_2 \rho |\mathbf{u}_i| \mathbf{u}_i\right) \quad (1)$$

式中, μ 为流体黏度; α 为黏性阻力系数; C_2 为惯性阻力系数; \mathbf{u}_i 为速度矢量在第 i 方向的分量; ρ 为流体密度。

黏性阻力系数与惯性阻力系数可由经验公式推导求得^[15],如式(2)、式(3)所示。

$$\alpha = \frac{d_p^2 \epsilon_a^3}{150(1 - \epsilon_a)^2} \quad (2)$$

$$C_2 = \frac{3.5(1 - \epsilon_a)}{d_p \epsilon_a^3} \quad (3)$$

式中, d_p 为刷丝当量直径, mm; ϵ_a 为多孔介质面孔隙率。

在多孔介质区域计算时需要将非球形颗粒直径等效为球形颗粒,单根刷丝几何结构为圆柱形,故将碳纤维刷丝进行体积当量等效^[16],如式(4)所示。

$$d_p = \left(\frac{6V_p}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

式中, V_p 为多孔材料体积。

多孔介质的孔隙率包括体孔隙率与面孔隙率,其中体孔隙率 ϵ 表示孔隙体积与所占空间体积之比。对于零间隙刷式密封,由几何结构可以得到多孔介质区域体孔隙率公式,如式(6)所示。

$$\epsilon = 1 - \frac{d^2 n}{4(D + H)B \cos \theta} \quad (5)$$

式中, d 为刷丝直径, mm; n 为刷丝总根数; D 为转轴直径, mm; H 为刷丝径向高度, mm; B 为刷丝厚度, mm; θ 为刷丝倾斜角, rad。

面孔隙率是指多孔介质在垂直于某一方向的截面上孔隙面积和总截面面积之比,结合刷束特点,可以得到轴向、径向和周向 3 个方向的面孔隙率^[17],如式(6)~式(8)所示。

$$\epsilon_{ax} = 1 - \frac{d^2 n}{4(r_o + r_i)B \cos \theta} \quad (6)$$

$$\epsilon_{ar} = 1 - \frac{d^2 n}{8rB \cos \theta} \quad (7)$$

$$\epsilon_{a\theta} = 1 - \frac{d^2 n}{4(r_o + r_i)B \cos \theta} \quad (8)$$

式中, ϵ_{ax} 为轴向孔隙率; ϵ_{ar} 为径向孔隙率; $\epsilon_{a\theta}$ 为周向孔隙率; r_o 为刷丝自由端最大半径, mm; r_i 为刷丝自由端最小半径, mm; r 为刷丝从轴线开始的径向高度。

3 轴承腔刷式密封数值模型

3.1 分析模型及参数

本文中所研究的二级错列式刷式密封结构如图 2 所示,图中 D_1 为正向安装的刷丝束尖端与轴套接触的内密封直径, T_h 为前挡板与轴套的径向间隙, W_g 为刷丝束和前挡板的轴向间距, T_l 为后挡板与轴套的径向间隙, D_2 为反向安装刷丝束的外密封直径, B 为刷丝厚度, θ 为刷丝倾斜角。参考文献[18]并根据实际安装尺寸选择刷式密封结构参数初始数值,具体结构参数如表 2 所示。

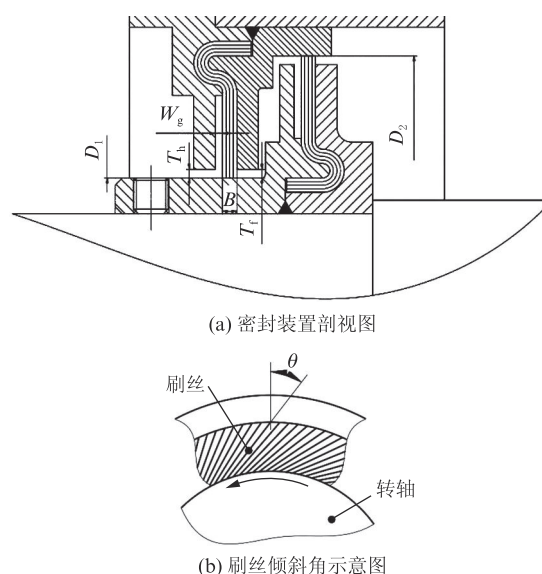


图 2 密封装置结构示意图

Figure 2 Schematic diagram of sealing device structure

表 2 密封装置主要结构参数

Table 2 The main structural parameters of brush seal

| 项目 | 参数 |
|--------------------------|-------|
| 内密封直径 D_1 /mm | 266 |
| 外密封直径 D_2 /mm | 300 |
| 前挡板间隙 T_h /mm | 1.2 |
| 前挡板间距 W_g /mm | 1.0 |
| 后挡板间隙 T_l /mm | 1.2 |
| 刷丝直径 d /mm | 0.012 |
| 刷丝倾斜角度 $\theta/(^\circ)$ | 45 |

3.2 计算域与边界条件

计算域选取为介质可以流动的区域,前后外刷环、轴套区域为实体区域,介质无法从中流过,因此该部分在计算域中设为空体。所研究的计算域如图3中实线区域所示,包括上游高压区、靠近上游高压区的前刷环处间隙区、刷丝束区、中间流体区、临近下游低压区的后轴套间隙区和下游低压区。

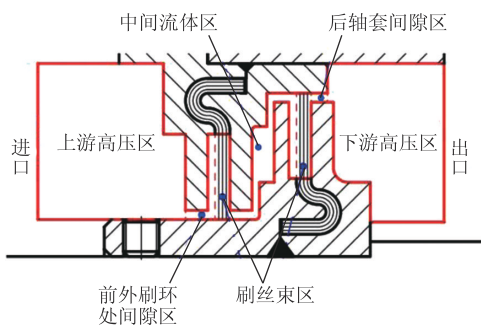


图3 计算域示意图

Figure 3 Schematic diagram of the computational domain

根据选取的计算域建立三维计算模型,为减小计算量,建立周向 1° 模型,边界条件设置如图4所示。采用有限元分析软件 Ansys Workbench 中的 Fluent 分析模块对泄漏流场进行数值分析。刷丝束以外的流体区域使用重整化群(re-normalization group, RNG) $k-\epsilon$ 湍流模型,采用压力耦合方程组的半隐式方法(semi-implicit method for pressure linked equations, SIMPLE)算法,流动介质为理想气体。刷丝束设置为多孔介质区域,并开启层流模型。前后表面设置为周期性边界,跟随转轴旋转的壁面设置为旋转壁面,其余壁面设为无滑移静止壁面边界,边界条件参数设置如表3所示。

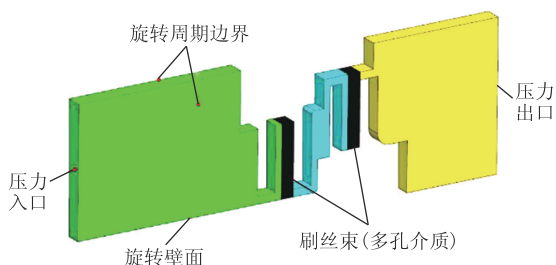


图4 边界条件示意图

Figure 4 Boundary condition schematic diagram

3.3 网格划分

使用 Fluent Meshing 进行网格划分,考虑到刷丝束区域流动情况复杂,前刷环处间隙区、刷丝束区、中间流体区、后轴套间隙区的结构尺寸较小,需要进行网格加密处理,图5给出了分析模型的网格分布示意图。在相同工况下进行网格无关性验证,比较网格数

表3 边界条件设置

Table 3 The setting of boundary conditions

| 项目 | 参数 |
|----------------------------|--------|
| 转速 $n/(r \cdot \min^{-1})$ | 6 000 |
| 入口压力 p_i/MPa | 0.51 |
| 出口压力 p_o/MPa | 0.10 |
| 入口温度 T_i/K | 484.15 |
| 出口温度 T_o/K | 453.15 |

量 688 374、1 210 028、1 531 670 的泄漏率,发现泄漏率变化不超过 0.91%,故认为计算结果通过网格无关性验证。

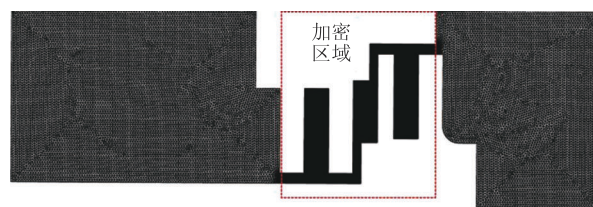


图5 网格划分示意图

Figure 5 Schematic diagram of meshing

3.4 数值模型验证

为验证本文求解模型设置的准确性,将数值计算泄漏率与文献[12]中对比,对比结果如图6所示。由图中可以看出,本文数值计算泄漏率与文献较为吻合,最大误差不超过 7.9%。计算设置的多孔介质的孔隙率与阻力系数和文献有一定的差异,导致了误差产生。

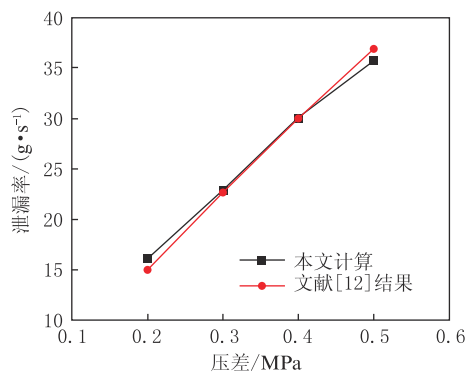


图6 泄漏率的对比验证

Figure 6 Comparison and verification of leakage

4 结果及分析

计算完成后得到刷式密封装置的压力分布云图与速度分布云图,分别如图7与图8所示。

由图7可知,在压差 0.41 MPa、转轴转速 6000 r/min 条件下,上游高压区、中间流体区和下游低压区内介质压力分布均匀,且介质压力经过两级刷式密封后

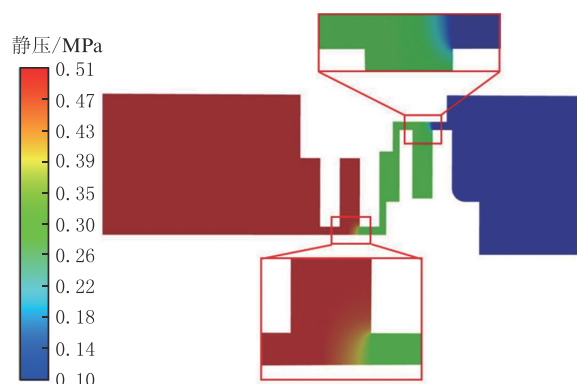


图7 压力分布云图

Figure 7 Pressure distribution nephogram

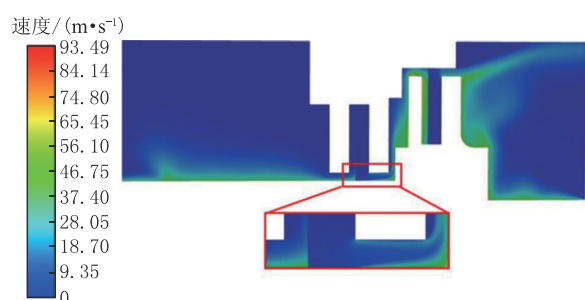


图8 速度分布云图

Figure 8 Velocity distribution nephogram

逐步降低。压降主要发生于后挡板转角处即刷丝束靠近下游一侧,且沿轴向与径向逐渐降低。

由图8可知,介质在贴近转轴表面速度较大,且在刷丝束靠近下游侧,后挡板间隙流体流速较高,流体在经过第二级刷丝密封后产生明显射流。通过计算得到密封装置泄漏率为29.98 g/s。通过将上述密封装置的压力与速度分布云图与文献[19-20]比较,发现分布规律相同,认为该数值计算模型与边界条件设置正确。

4.1 密封性能比较

为比较新型错列式刷式密封装置与现有刷式密封的性能差异,引入密封泄漏系数 ϕ 。该参数能够对不同操作条件和结构参数的刷式密封装置进行比较,其数值越低证明密封性能越优异。泄漏系数 ϕ 定义^[21]如式(9)所示。

$$\phi = \frac{W \sqrt{T_i}}{D_i p_i} \quad (9)$$

式中, W 为泄漏率,kg/s; D_i 为密封内径,mm,本文中计算时 $D_i = (D_1 + D_2)/2$ 。

使用有限元分析计算,得到二级错列式刷式密封装置在不同压差下的泄漏系数,并与文献[12]中的刷式密封结构进行比较,比较结果如图9所示。发现在0.05~0.30 MPa压差下,二级错列式刷式密

封的泄漏系数比传统刷式密封小0.0007~0.0290,这是因为二级错列式刷式密封选用了碳纤维作为刷丝材料,刷丝间的介质泄漏通道比由金属刷丝制成的传统刷式密封少,且跟随转轴旋转的刷式密封对介质流动产生阻碍作用,因此密封性能更好。

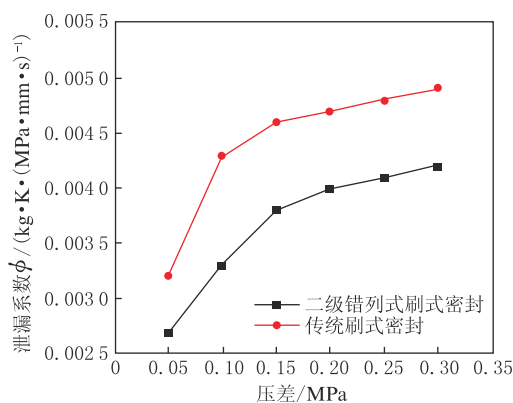


图9 密封性能比较

Figure 9 Comparison of sealing performance

4.2 单一结构参数对密封性能影响

为确定刷式密封的结构参数对于密封性能的影响情况,采用控制变量法分析前挡板间隙(T_h)、刷丝厚度(B)、后挡板间隙(T_l)、刷丝倾斜角(θ)、刷丝直径(d)等结构参数对密封装置的泄漏影响情况。

0.41 MPa压差、6 000 r/min时不同前挡板间隙下的泄漏量如图10所示。发现前挡板间隙变化对于泄漏率影响程度较小。究其原因,刷式密封压降发生在刷丝束靠近后挡板区域处,介质压降变化区域离前挡板较远,前挡板对刷丝束影响程度较小,进而对介质流动的阻碍因素影响较小,故对泄漏率影响较小。在满足密封性能的前提下,为便于加工制造,前挡板间隙可以适当地选取较大值。综合考虑,前挡板间隙选取范围为1.0 mm~1.6 mm。

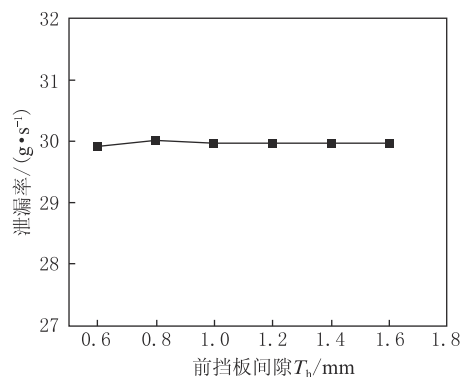


图10 泄漏率随前挡板间隙的变化

Figure 10 Variation of leakage rates with front baffle gaps

图 11 显示了在 0.41 MPa 压差、转速 6 000 r/min 条件下刷丝厚度对泄漏率的影响。随着刷丝厚度的增加,密封装置的泄漏率降低,这是因为刷丝厚度增大,刷丝对流体的流动阻碍作用增强,使泄漏率降低。但在刷丝厚度大于 2.5 mm 后,泄漏率减小速率放缓。考虑到制造工艺要求,过厚的刷丝束难以夹持,故刷丝厚度在 1.5 mm~3.0 mm 范围中选择。

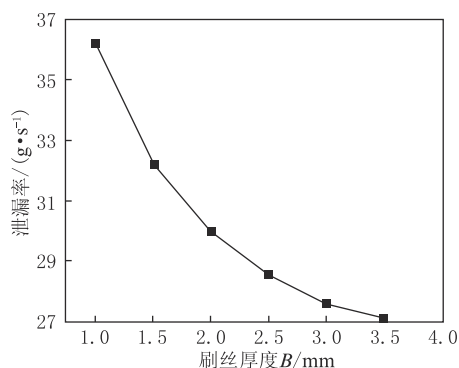


图 11 泄漏率随刷丝厚度的变化

Figure 11 Variation of leakage rates with bristle thicknesses

图 12 展示了在压差 0.41 MPa、转速 6 000 r/min 条件下,后挡板间隙变化对泄漏率的影响。随着后挡板间隙的增加,密封装置的泄漏率线性增长。这是因为随着后挡板间隙的增大,刷丝与下游低压区接触区域增大,潜在泄漏通道增加,导致通过刷丝区的介质增加,从而泄漏率上升。为保证密封性能要求,后挡板间隙在 0.4 mm~1.0 mm 范围内选择。

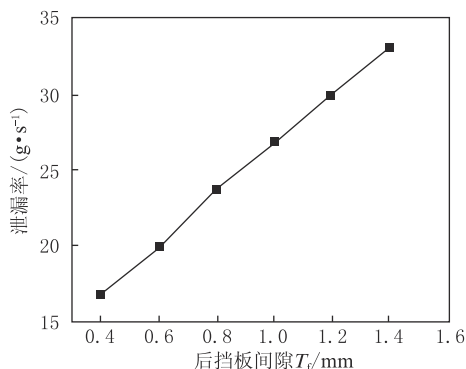


图 12 泄漏率随后挡板间隙的变化

Figure 12 Variation of leakage rates with backboard gaps

图 13 展示了在压差 0.41 MPa、转速 6 000 r/min 条件下的密封装置泄漏率随倾斜角变化情况。可以发现泄漏率不仅随着刷丝倾斜角的增大而增大,而且增长幅度也随之增加。当刷丝倾斜角在 $10^\circ\sim 30^\circ$ 时泄漏率增长较为平缓, 30° 后泄漏率增长幅度较大。造成这种变化是因为刷丝倾斜角的增加,导致了刷丝束区域的三个不同方向的孔隙率增大,黏性阻力

与惯性阻力系数减小,造成了泄漏率增大。考虑到过小的刷丝倾斜角将导致刷丝适应转轴径向跳动的能力降低,故倾斜角在 $20^\circ\sim 50^\circ$ 范围内选择。

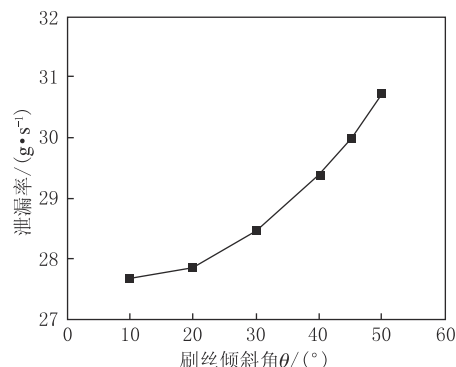


图 13 泄漏率随刷丝倾斜角的变化

Figure 13 Variation of leakage rates with brush inclination angles

图 14 显示了在压差 0.41 MPa、转速 6 000 r/min 条件下刷丝直径对泄漏率的影响。发现随着刷丝直径的增大,泄漏率也逐渐增大。这是因为由式(2)~式(4)可知,刷丝直径增大使得刷丝间的间隙和刷丝当量体积增大,黏性阻力系数与惯性阻力系数减小,刷丝对流体的阻碍作用降低,从而导致了泄漏率的增加。综合考虑,刷丝直径应在 0.005 mm~0.012 mm 内选择。

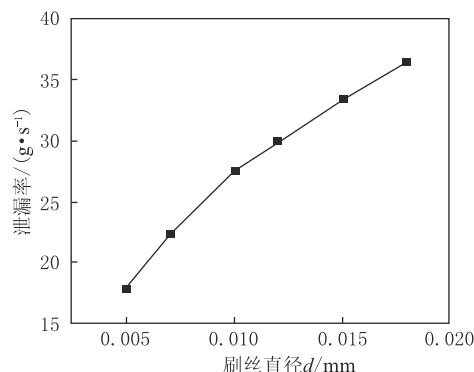


图 14 泄漏率随刷丝直径的变化

Figure 14 Variation of leakage rates with brush diameters

4.3 结构参数优化分析

通过上文分析可以得到各单一因素对泄漏率的影响情况,为了得到密封性能更加优异的结构,现采用正交试验对上述结构参数进行组合优化。需要进行正交试验的参数因素有:刷丝直径 d 、刷丝厚度 B 、刷丝倾斜角 θ 、后挡板间隙 T_b 、前挡板间隙 T_h 。结合文献与上文分析结果,每个参数在选择范围内选取 4 个水平值,构建因素水平表,如表 4 所示。按照 5 因素 4 水平,设置 $L_{16}(4^5)$ 正交试验表,对不同结构参数的组合进行分析,共有 16 种方案。每种方案的泄漏率如表

5 所示。表中方案号中的 A、B、C、D、E 分别表示刷丝直径、刷丝厚度、刷丝倾斜角、后挡板间隙、前挡板间隙这几个因素,其后的数字表示取该水平的参数。

表 4 因素水平表
Table 4 Factor level table

| 水平 | d/mm | B/mm | $\theta/(^{\circ})$ | T_t/mm | T_h/mm |
|----|---------------|---------------|---------------------|-----------------|-----------------|
| 1 | 0.005 | 1.5 | 20 | 0.4 | 1.0 |
| 2 | 0.007 | 2.0 | 30 | 0.6 | 1.2 |
| 3 | 0.010 | 2.5 | 40 | 0.8 | 1.4 |
| 4 | 0.012 | 3.0 | 50 | 1.0 | 1.6 |

在正交试验中,对正交试验结果进行因素极差分析,能够快速得到不同因素对于评价指标的影响程度,并得到因素组合的最优解。每个因素不同水平值下的评价指标求和(K)、平均值(K_{avg})与极差(R)如表 6 所示。其中极差值 R 反映了因素对于评价指标的影响程度,该值为对应因素的最大水平平均值(K_{avgmax})和最小水平平均值(K_{avgmin})之差,值越大表示该因素对评价指标的影响程度越强。对于泄漏率而言,各因素的影响程度由强至弱依次为:刷丝

表 5 正交试验表

Table 5 Table of orthogonal experiments

| 试验号 | 方案号 | 泄漏率/($\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$) |
|-----|------------|--------------------------------------|
| 1 | A1B1C1D1E1 | 9.48 |
| 2 | A1B2C2D2E2 | 11.03 |
| 3 | A1B3C3D3E3 | 12.66 |
| 4 | A1B4C4D4E4 | 14.65 |
| 5 | A2B1C2D3E4 | 17.37 |
| 6 | A2B2C1D4E3 | 18.10 |
| 7 | A2B3C4D1E2 | 11.99 |
| 8 | A2B4C3D2E1 | 13.29 |
| 9 | A3B1C3D4E2 | 25.46 |
| 10 | A3B2C4D3E1 | 21.84 |
| 11 | A3B3C1D2E4 | 16.34 |
| 12 | A3B4C2D1E3 | 13.44 |
| 13 | A4B1C4D2E3 | 21.26 |
| 14 | A4B2C3D1E4 | 15.81 |
| 15 | A4B3C2D4E1 | 24.30 |
| 16 | A4B4C1D3E2 | 20.54 |

直径(d)、后挡板间隙(T_t)、刷丝厚度(B)、刷丝倾斜角(θ)、前挡板间隙(T_h)。

表 6 正交试验结果分析表
Table 6 Orthogonal experiment result analysis

| 项目 | 泄漏率/($\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$) | | | | | | | | | | R |
|------|--------------------------------------|----------|----------|----------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|------|
| | K 水平 1 | K 水平 2 | K 水平 3 | K 水平 4 | K_{avg} 水平 1 | K_{avg} 水平 2 | K_{avg} 水平 3 | K_{avg} 水平 4 | K_{avgmax} | K_{avgmin} | |
| 因素 A | 47.82 | 60.75 | 77.07 | 81.91 | 11.96 | 15.19 | 19.27 | 20.48 | 20.48 | 11.96 | 8.52 |
| 因素 B | 73.57 | 66.78 | 65.28 | 61.92 | 18.39 | 16.90 | 16.32 | 15.48 | 18.39 | 15.48 | 2.91 |
| 因素 C | 64.46 | 66.13 | 67.22 | 69.74 | 16.12 | 16.53 | 16.81 | 17.44 | 17.44 | 16.12 | 1.32 |
| 因素 D | 50.72 | 61.92 | 72.40 | 82.51 | 12.68 | 15.48 | 18.10 | 20.63 | 20.63 | 12.68 | 7.95 |
| 因素 E | 68.91 | 69.01 | 65.46 | 64.17 | 17.23 | 17.25 | 16.37 | 16.04 | 17.25 | 16.04 | 1.21 |

对加工能力要求较高的参数有前挡板间隙和后挡板间隙,加工难度随着结构参数数值的增大而减小,在满足密封性能条件下,上述两种参数应选择较大值。最终密封装置优化后结构参数为:刷丝直径 0.005 mm,刷丝厚度 3 mm,刷丝倾斜角 20° ,前挡板间隙 1.6 mm,后挡板间隙 0.6 mm。在相同条件下对结构参数优化前后的泄漏率进行对比,对比结果如图 15 所示。可以看出优化后的密封装置封严性能更加优异。密封性能的提高随着压差增大而降低,在 0.1 MPa 下密封性能提升比例最高,为 72.28%;优化后工况条件下(压差 0.41 MPa)泄漏率为 11.24 g/s,与优化前 29.98 g/s 的泄漏率相比,密封性能提高了 62.51%。

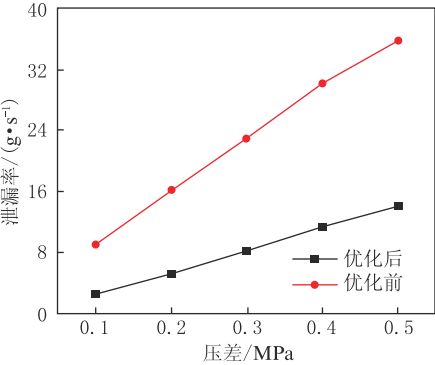


图 15 优化前后在不同压差下泄漏率对比
Figure 15 Comparison of leakage rates at different differential pressures before and after optimization

5 结论

(1) 针对轴承腔密封的特定工况,设计的新型二级错列式刷式密封装置与传统刷式密封装置相比具有转轴磨损小、泄漏率低的特点。

(2) 分析了结构参数对泄漏率的影响规律,为保证密封性能,前挡板间隙尺寸应在 1.0 mm~1.6 mm 范围内,刷丝厚度在 1.5 mm~3.0 mm 范围内,后挡板间隙在 0.4 mm~1.0 mm 范围内,刷丝倾斜角在 20°~50°范围内,刷丝直径应在 0.005 mm~0.012 mm 范围内。

(3) 结合正交试验与实际加工能力对密封结构进行优化,结构参数对泄漏率的影响程度依次为:刷丝直径(d)、后挡板间隙(T_f)、刷丝厚度(B)、刷丝倾斜角(θ)、前挡板间隙(T_h)。优化后的结构参数为:刷丝直径 0.005 mm,刷丝厚度 3 mm,刷丝倾斜角 20°,前挡板间隙 1.6 mm,后挡板间隙 0.6 mm。优化后泄漏率为 11.24 g/s,较优化前性能提高了 62.51%。

参考文献:

- [1] 刘平,涂川俊,宋延礼,等. 航空发动机用炭石墨密封材料的应用研究进展[J]. 航空动力学报,2024,40(2):311-327.
LIU P, TU C J, SONG Y L, et al. Research progress in the application of carbon graphite sealing materials for aeroengine [J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 40(2): 311-327.
- [2] 林基恕. 航空发动机设计手册:第12册 传动及润滑系统[M]. 北京:航空工业出版社,2001:305-350.
- [3] 何立东,袁新,尹新. 刷式密封研究的进展[J]. 中国电机工程学报,2001,21(12):28-32,53.
HE L D, YUAN X, YIN X. The advance in the investigation of brush seal [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(12): 28-32, 53.
- [4] DINC S, DEMIROGLU M, YURNQUIST N, et al. Fundamental design issues of brush seals for industrial applications[J]. Journal of Turbomachinery, 2002, 124(2): 293-300.
- [5] BRAUN M J, HENDRICKS R C, CANACCI V. Flow visualization in a single simulated brush seal [C]. Brussels: the ASME 1990 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, 1990.
- [6] CHEW J W, HOGG S I. Porosity modeling of brush seal[J]. Journal of Tribology, 1997, 119(4): 769-775.
- [7] 沙廉翔,李双喜,郑晓,等. 油气两相柔性丝刷封传热性能数值分析及试验研究[J]. 润滑与密封,2022,47(10):19-29.
SHA L X, LI S X, ZHENG R, et al. Numerical analysis and experimental research on heat transfer performance of oil-gas two-phase flexible bristle brush seal[J]. Lubrication Engineering, 2022, 47(10): 19-29.
- [8] 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 B, LI J, FENG Z G, 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.
- [9] RABEN M, FRIEDRICH S, HELMIS T, et al. Brush seals used in steam environments chronological wear development and the impact of different seal designs [J/OL]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2016, 138(5): 051901(2015-10-27) [2024-05-18]. DOI:10.1115/1.4031531.
- [10] 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):361-375.
LI G H, MA Y Q, WANG X G, 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): 361-375.
- [11] HILDEBRANDT M, SCHWARZ H, SCHWITZKE C, et al. Effects of the back plate inner diameter on the frictional heat input and general performance of brush seals [J/OL]. Aerospace, 2018, 5(2): 58(2018-05-25) [2024-05-18]. DOI:10.3390/aerospace5020058.
- [12] 李川,刘美红,宋晓磊,等. 挡板结构对刷式密封泄漏流动特性的影响[J]. 润滑与密封,2024,49(2):115-122.
LI C, LIU M H, SONG X L, et al. Research on the flow performance of brush seal based on front plate and back plate structure[J]. Lubrication Engineering, 2024, 49(2): 115-122.
- [13] 彭宁锦,万欣欣,刘美红,等. 低滞后碳纤维刷式密封泄漏特性的数值研究[J/OL]. 润滑与密封(2024-03-22) [2024-05-18]. <https://link.cnki.net/urlid/44.1260.TH.20240321.1745.040>.
PNEG N J, WAN X X, LIU M H, et al. Numerical study on leakage characteristics of low hysteresis carbon fiber brush seal [J/OL]. Lubrication Engineering (2024-03-22) [2024-05-18]. <https://link.cnki.net/urlid/44.1260.TH.20240321.1745.040>.
- [14] OUTIRBA B, HENDRICK P, NICOLAS K. Experimental characterization of carbon fibre brush seal leakage performance as a function of bristle pack geometrical parameters under dry conditions [J]. The Aeronautical Journal, 2017, 121(1245): 1627-1647.
- [15] ERGUN S. Fluid flow through packed columns [J]. Chemical Engineering Progress, 1952, 48: 89-94.
- [16] 张谦,许志美. 化学反应器分析[M]. 上海:华东理工大学出版社,2005:105-109.
- [17] 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 G Z. Investigation on leakage characteristics of brush seals [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006.
- [18] 胡广阳,孙丹,刘宁宁,等. 刷式密封泄漏及磨损特性实验研究[J]. 沈阳航空航天大学学报,2016,33(2):1-5.
HU G Y, SU D, LIU N N, et al. Experimental study on the performance of leakage and wear of brush seals [J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2016, 33(2): 1-5.
- [19] 柴保桐,傅行军. 刷式密封流场和温度场数值模拟[J]. 润滑与密封,2016,41(2):121-125,131.
CHAI B T, FU X J. Numerical simulation on flow and temperature distributions of brush seals [J]. Lubrication Engineering, 2016, 41(2): 121-125, 131.
- [20] 许焕泽,孙丹,胡广阳,等. 对转轴间碳纤维刷式密封泄漏流动特性数值研究[J/OL]. 航空动力学报,2024:20230829(2024-04-20) [2024-09-20]. DOI:10.13224/j.cnki.jasp.20230829.
XU H Z, SUN D, HU G Y, et al. Numerical study on leakage flow characteristics of carbon fiber brush seal between counter-rotating shafts [J/OL]. Journal of Aerospace Power, 2024: 20230829(2024-04-20) [2024-09-20]. DOI:10.13224/j.cnki.jasp.20230829.
- [21] 孙晓萍. 刷式密封性能和耐久性试验研究[J]. 航空发动机, 2002, 28(3): 37-41.
SU X P. Experimental investigation of performance and durability of brush seal [J]. Aeroengine, 2002, 28(3): 37-41.