

文章编号: 1000-8055(2024)12-20220308-13

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220308

多级刷式密封级间流动传热特性 数值与实验研究

李业隆¹, 赵欢¹, 孙丹¹, 慕伟^{2,3}, 马婷^{2,3}, 胡广阳^{2,3}

(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. 中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110015;

3. 中国航发沈阳发动机研究所 航空发动机动力传输航空科技重点实验室, 沈阳 110015)

摘 要: 理论分析了多级刷式密封级间流动传热特性, 设计加工了提高后挡板高度、减少刷丝束厚度两种各级差异化结构多级刷式密封实验件, 在高温静态、常温动态及高温动态工况下, 实验研究了其泄漏特性、级间温度分布特性。建立了三维实体多级刷式密封流动传热特性求解模型, 数值与实验对比验证, 研究了工况参数对两种各级差异化结构及各级相同结构多级刷式密封级间流动传热特性的影响规律。研究表明: 提高后挡板高度与减少刷丝束厚度两种各级差异化结构多级刷式密封, 各级间温度在高温静态与高温动态工况下随上下游压差的升高而增大, 在常温动态工况下随上下游压差的升高而减小, 高温动态工况下各级间温度整体上大于高温静态工况, 泄漏量整体上小于高温静态工况。3 种结构多级刷式密封第二级间温度均高于第一级间温度, 各级相同结构各级间温度最高, 减少刷丝束厚度结构最低, 各级相同结构末端刷丝束上下游压差最大, 压降分配均衡性最差。提高后挡板高度结构泄漏量最高, 减少刷丝束厚度结构次之, 各级相同结构最低。

关 键 词: 多级刷式密封; 级间流动传热特性; 高温动态; 三维实体建模; 温度分布

中图分类号: V233.5

文献标志码: A

Numerical and experimental investigation on flow and heat transfer characteristics between stages of multi-stage brush seals

LI Yelong¹, ZHAO Huan¹, SUN Dan¹, MU Wei^{2,3}, MA Ting^{2,3}, HU Guangyang^{2,3}

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

2. Shenyang Engine Research Institute,
Aero Engine Corporation of China, Shenyang 110115, China;

3. Key Lab for Power Transmission of Aero Engine,
Aero Engine Corporation of China, Shenyang 110115, China)

Abstract: The flow and heat transfer characteristics between stages of multi-stage brush seals were theoretically analyzed, and the experimental pieces of multistage brush seal with two different structures of raising the blacking plate height and reducing the thickness of brush bundle were designed and machined. The characteristics of leakage and temperature distribution between stages were experimentally studied

收稿日期: 2022-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(52075346, 51675351); 中国博士后科学基金(2018M633572)

作者简介: 李业隆(1997—), 男, 硕士生, 主要研究多级刷式密封级间流动传热与力学特性。

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

引用格式: 李业隆, 赵欢, 孙丹, 等. 多级刷式密封级间流动传热特性数值与实验研究[J]. 航空动力学报, 2024, 39(12): 20220308. LI Yelong, ZHAO Huan, SUN Dan, et al. Numerical and experimental investigation on flow and heat transfer characteristics between stages of multi-stage brush seals[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(12): 20220308.

under high temperature static, normal temperature dynamic and high temperature dynamic conditions. A solution model for the flow and heat transfer characteristics of three-dimensional solid multi-stage brush seals was established, and the influences of operating parameters on flow and heat transfer characteristics of two different structures and the same multi-stage brush seals were studied by numerical and experimental comparison. The research showed that there were two different types of multi-stage brush seals, i.e.: raising the blackplate height and reducing the thickness of brush bundle; their interstage temperature increased with the increase of upstream and downstream pressure difference under high temperature static and dynamic working conditions, and decreased with the increase of upstream and downstream pressure difference under normal temperature dynamic working conditions. In high temperature dynamic working conditions, the interstate temperature was generally larger than that under high temperature static working conditions, and the leakage was generally smaller than that under high temperature static working conditions. The temperature between the second stage of the multi-stage brush seals of the three structures was higher than that between the first stage, the temperature between each stage of the same structure was the highest, the structure of reducing the thickness of the brush bundle was the lowest, the pressure difference between the upstream and downstream of the last stage of the brush bundle of the same structure was the largest, and the pressure drop distribution was the worst. The structure of raising the blacking plate height had the highest leakage, followed by the structure of reducing the thickness of brush bundle, and the structure of the same level had the lowest leakage.

Keywords: multi-stage brush seals; flow and heat transfer characteristics between stages; high temperature dynamic; three-dimensional modeling; temperature distribution

刷式密封是一种广泛应用于透平机械中的优良接触式动密封^[1-3]。传统单级刷式密封承压能力有限,高压差下需要应用多级刷式密封。实际应用发现,多级刷式密封存在各级间压降分配不均衡性与摩擦热效应等流动传热问题,直接影响其密封性能及使用寿命^[4-8]。故研究多级刷式密封各级间的流动传热特性具有重要意义。

国内外学者对于多级刷式密封流动传热特性展开了相关研究。国外 Pugachev 等^[9]在常温工况下数值与实验研究了三级刷式密封泄漏流动特性,结果表明三级刷式密封相比迷宫密封泄漏量减少了 60%,前两级刷丝束上下游压力降较小,末级上下游压差较大。Dogu 等^[10]分析了不同刷丝刚度下的摩擦热流量情况,结果表明:刷丝尖端部位摩擦热量高,沿刷丝径向温度逐渐降低,流过刷丝束的气流会带走大量的摩擦热。国内李国勤等^[11]数值研究了两级和三级低滞后刷式密封压力分布与传热特性,研究表明:末级刷丝承压最大,且温度最高,压比对多级刷式密封各级压降占比影响不大。赵欢等^[12]在常温静态工况下研究了多级刷式密封流场特性及各级压力分配,分析了各级刷式密封上下游压力变化不均衡性产生机理;邱波、Li 等^[13-15]基于多孔介质模型,研究

了工况条件对刷式密封温度分布的影响;分析了双级刷式密封泄漏流动形态及压力分布规律。文龙等^[16]数值研究了两级刷式密封流场及压力分布,结果表明,改变各级刷丝安装角可在一定程度上均衡两级分压。综上可知,现有文献多是采用数值方法研究各级相同结构多级刷式密封的流场分布与传热特性,多级刷式密封实验研究较少,在高温高速工况下实验研究各级差异化结构多级刷式密封级间流动传热特性的文章鲜有发表。

本文理论分析了多级刷式密封级间流动传热特性,设计加工了各级差异化多级刷式密封实验件,建立了多级刷式密封三维实体传热求解模型,实验验证了数值模型的准确性。在高温静态、常温动态及高温动态工况下,研究了提高后挡板保护高度及减少刷丝束厚两种各级差异化结构及各级相同结构多级刷式密封的级间温度、最高温度及泄漏特性的影响规律。

1 多级刷式密封级间流动传热特性理论分析

1.1 多级刷式密封流动传热分析

相比单级刷式密封,多级刷式密封承压能力更强,泄漏量更低。现有多级刷式密封均为各级

相同结构(multistage brush seal, MBS), 如图 1 所示。图 2 给出了各级相同结构多刷式密封各级刷丝上下游压力变化图^[12], 可以看出 MBS 各级压降并不均衡, 各级压降逐级增大, 末级刷丝上下游压降最大。

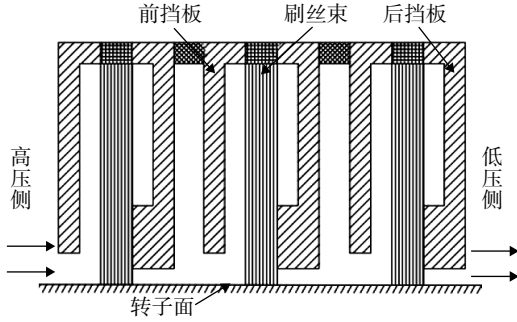


图 1 各级相同结构多刷式密封示意图

Fig. 1 Schematic diagram of multi-brush seals of the same structure at all levels

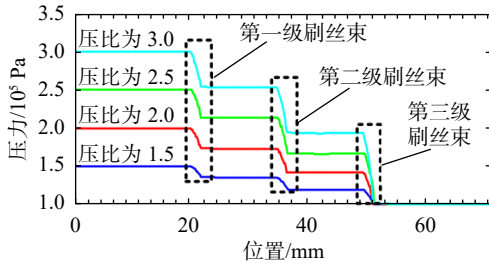


图 2 多刷式密封各级压力变化图^[12]

Fig. 2 Multi-brush seals pressure change diagram at all levels^[12]

末级刷丝承压较大产生的摩擦热较高, 对多级刷式密封使用寿命有较大的影响。各级刷丝与转子间的摩擦热一部分以导热方式传向转子, 另一部分从各刷丝端部即热源产生部位沿径向传往刷丝根部, 气流流过各级刷丝时还伴随着表面传热, 摩擦热具体传热路径如图 3 所示。由于各级相同结构多级刷式密封刷丝上下游压降逐级增大, 故刷丝与刷丝之间、刷丝与转子及挡板间的摩擦力逐级增大, 产生的摩擦热逐级升高^[11]。

文献 [17] 提出了各级差异化多级刷式密封结构图, 如图 4 所示。该结构各级密封单元后挡板高度依次提高、刷丝束厚度依次减小且刷丝与转

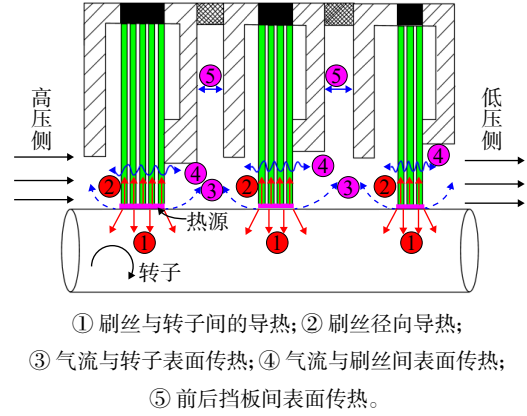


图 3 多刷式密封流动传热示意图

Fig. 3 Schematic diagram of flow heat transfer of multi-brush seals

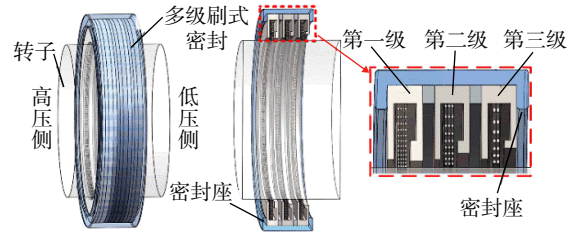


图 4 各级差异化多刷式密封示意图

Fig. 4 Schematic diagram of differentiated multi-brush seals at all levels

子间隙依次增大。相较于各级相同结构多级刷式密封, 其增大了下游级流道面积, 各级刷丝上下游压力变化更均衡, 末级刷丝上下游压差较小, 产生的摩擦热也更少。

1.2 多级刷式密封流动传热控制方程

本文基于下述控制方程求解计算温度场及流场(稳态求解, 一阶梯高精度迎风格式), 多级刷式密封流体域流动传热控制方程为:

$$\text{div}(\rho_a U) = 0 \quad (1)$$

$$\text{div}(\rho_a u U) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}$$

$$\text{div}(\rho_a v U) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \quad (2)$$

$$\text{div}(\rho_a w U) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z}$$

$$\begin{aligned} \text{div} \left[\rho_a \left(e + \frac{U^2}{2} \right) U \right] &= \frac{\partial}{\partial x} \left(K_a \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_a \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_a \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \\ &\frac{\partial (up)}{\partial x} - \frac{\partial (vp)}{\partial y} - \frac{\partial (wp)}{\partial z} + \frac{\partial (u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial (u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial (u\tau_{zx})}{\partial z} + \\ &\frac{\partial (v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial (v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial (v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial (w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial (w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial (w\tau_{zz})}{\partial z} \end{aligned} \quad (3)$$

式中 div 表示散度, ρ_a 为流体介质(空气)密度, T 为温度, τ 为切应力, e 为能量, K_a 为空气导热系数, U 速度, p 为压力, u 、 v 、 w 分别为 x 、 y 、 z 上的速度。
其中 K_a 为^[5]

$$K_a = 0.024\,4 + 5.63 \times 10^{-5} (T - 273)$$

(4)

理想空气温度与黏度的变化关系为

$$\mu = \frac{\mu_0 [T/T_0]^{3/2} (T_0 + S)}{T + S}$$

(5)

式中 μ_0 为 273.15 K 时空气黏度, $\mu_0=1.716 \times 10^{-5}$ kg/(m·s); 特征温度 $S=116$ K; $T_0=273$ K。
刷丝固体域传热控制方程为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_b \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_b \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_b \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0$$

(6)

式中 K_b 为刷丝导热系数。本文刷丝材料为 Haynes25, 其比热容为 $C_b=385.204$ J/(kg·K), K_b 与温度关系^[18] 为

$$K_b = 8.84 + 0.02 (T - 273)$$

(7)

傅里叶定律传导的热流量为 $q_w = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0}$,
由热平衡可知, 流体在物体壁面处的导热热流量与对流热流量相等, 即 $q_w=q_c$, 故可得流固换热公式

$$q_c = \partial (T_w - T_\infty) = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0}$$

(8)

1.3 多级刷式密封摩擦热计算

本文数值仿真多级刷式密封级间流动传热特性, 需确定单位面积摩擦热流密度 q , 其计算公式为^[8,10]:

$$q = \mu \cdot \Delta r \cdot k_b \cdot v$$

(9)

式中 μ 为摩擦因数, Δr 刷丝与转子初始安装干涉量(本文干涉量 Δr 为 0.06 mm), k_b 为刷丝硬度, k_b 取值参考文献^[18-20], v 为转子表面线速度。本文实验件刷丝材料为 Haynes25, 摩擦因数 μ 取值为 0.3^[21-22]。表 1 给出了本文 4 种压力工况下对应的多级刷式密封单位热流密度值 q 。

表 1 单位摩擦热流量计算

Table 1 Unit friction heat flow calculation

序号	$\Delta p/\text{MPa}$	$k_b/(\text{MPa/m})$	$v/(\text{m/s})$	$q/(\text{kW/s}^2)$
1	0.05	135.73	75.4	184.21
2	0.10	271.45	103.7	506.69
3	0.15	407.13	131.9	966.61
4	0.20	542.91	160.2	1 565.54

2 多级刷式密封级间流动传热特性实验研究

2.1 实验装置

如图 5 所示, 多级刷式刷式密封实验装置由主体部件、传动部件, 空气系统(含稳压及加温系统), 滑油系统, 液压加载系统, 电气和测控系统(含数据采集及处理系统、控制系统), 通风、消音和消防系统等部分组成。在实验中主要进行多级刷式密封各级上下游压力、各级温度、出口压力、出口泄漏量和主轴实际转速等测量。该实验台能够进行大尺寸、高密封气体温度、高压差、高转速下的多级刷式密封性能实验测试。

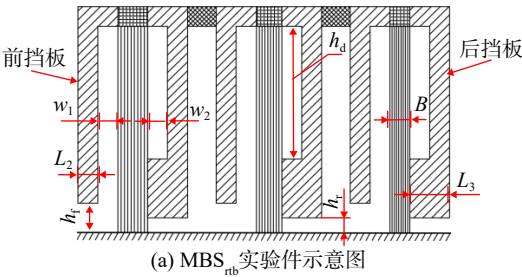


图 5 刷式密封实验装置实物图

Fig. 5 Actual drawing of brush seal experimental device

2.2 实验件设计

如图 6 所示, 本文设计加工了两种各级差异化多级刷式密封(三级), 分别为提高后挡板高度多级刷式密封(multistage brush seal with raising the blackplate height, MBS_{rbh})与减少刷丝束厚度多级刷式密封(multistage brush seal with reducing thick-



(b) 实验件实物图

图 6 各级差异化多级刷式密封实验件

Fig. 6 Different levels of multistage brush seal experimental piece

ness of the brush bundle, MBS_{rb}), 刷丝与转轴间采用干涉量 Δr 为 0.06 mm 的过盈配合安装。本文各级差异化结构的设计理念旨在增大下游级即第二、三级流道面积, 平衡各级压降, 增强表面传热减少热量积聚。 MBS_{rbh} 与 MBS_{rb} 第一级为结构参数相同的基本型结构, 如表 2 所示; 第二、三级结构参数不同(h_r 和 B), 如表 3 所示, 其他结构参数同表 1。

表 2 第一级刷式密封实验件结构参数

Table 2 Structural parameters of the first stage brush seal experimental piece	
主要结构参数	数值
前挡板与刷束间间隙 w_1/mm	1.0
前挡板高度 h_t/mm	1.9
刷束厚度 B/mm	1.8
前挡板宽度 L_2/mm	1.0
后挡板高度 h_r/mm	1.5
后挡板宽度 L_3/mm	2.5
减压腔高度 h_d/mm	3.0
减压腔宽度 w_2/mm	1.0
刷丝直径 d/mm	0.08
刷丝排列间隙 δ/mm	0.008
刷丝安装倾角 $\theta/(\circ)$	45

表 3 MBS_{rbh} 、 MBS_{rb} 实验件第二、三级结构参数

Table 3 MBS_{rbh} , MBS_{rb} experimental parts two, three structural parameters mm				
主要参数	MBS_{rbh}		MBS_{rb}	
	第二级	第三级	第二级	第三级
h_r	1.8	2.5	1.5	1.5
B	1.8	1.8	1.2	0.8

2.3 实验原理与实验方案

2.3.1 实验原理

如图 7 所示, 空气系统提供的稳定高温高压空气通过阀门控制进入密封腔室, 流经密封件后流出, 传动装置提供实验所需的转速要求。密封流路进出口安装有高精度热式流量计(精度等级为 1.0), 用于监测气体流量, 多级刷式密封实验件第一、二级间分别装有级间温度(精度等级为 0.35)与级间压力(精度等级为 0.2)探针用于监测气体温度与气体压力, 传感器采集的信号最终在计算机中储存。

2.3.2 实验方案

分别对两种各级差异化结构多级刷式密封

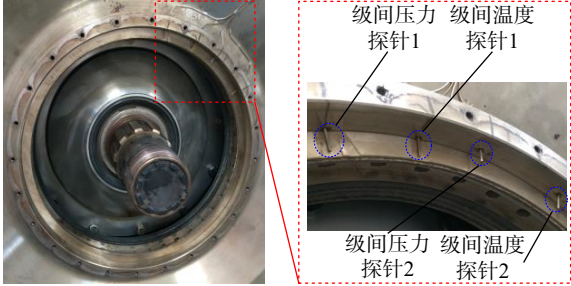


图 7 多级刷式密封级间温度探测图

Fig. 7 Multi-stage brush seals temperature detection diagram between sealing stages

MBS_{rbh} 与 MBS_{rb} 进行常温、高温下的动静态性能实验。研究刷式密封进口气流压力 p_{in} 、进口气流温度 T_{in} 和转速 n , 对 MBS_{rbh} 与 MBS_{rb} 级间温度分配和泄漏特性的影响。为了较全面地对比研究转速和温度对多级刷式密封级间温度分布与泄漏特性的影响规律, 对 MBS_{rbh} 与 MBS_{rb} 实验研究主要分为 3 个方面: 高温静态实验、常温动态实验和高温动态实验。每种实验工况进行 3 次实验, 动态实验中相同压差下转速从 4 000 r/min 上升到 8 500 r/min 后在降至 4 000 r/min, 所得级间温度与泄漏量取 3 次实验平均值。本文常温工况温度为 301 K, 具体实验研究方案如图 8 所示。

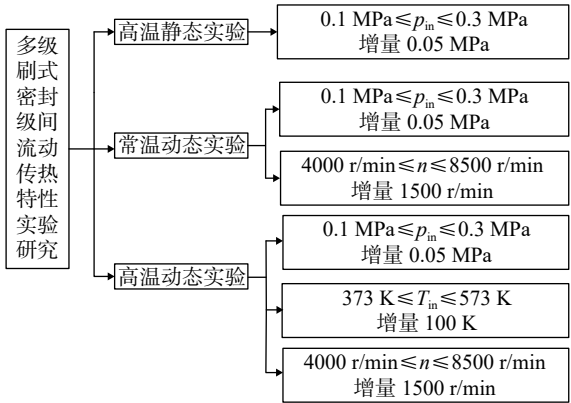


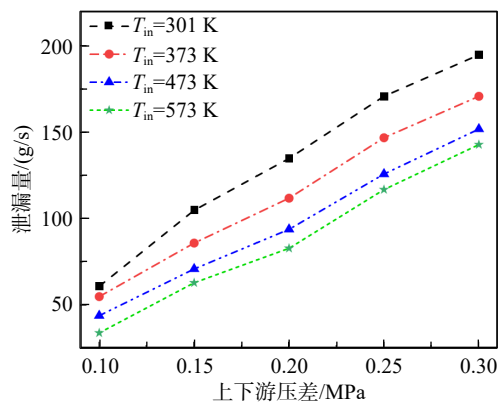
图 8 多级刷式密封级间流动传热特性实验方案

Fig. 8 Experimental scheme of flow and heat transfer characteristics between stages of multi-stage brush seals

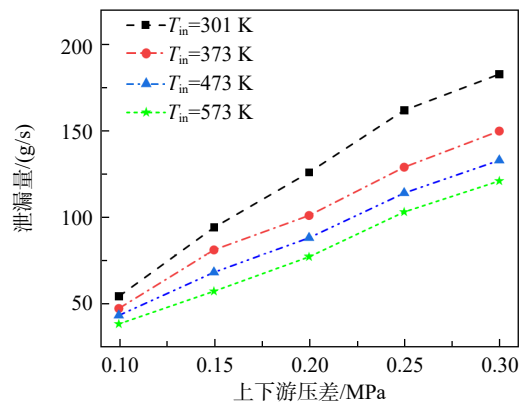
2.4 实验结果分析

2.4.1 多级刷式密封泄漏特性分析

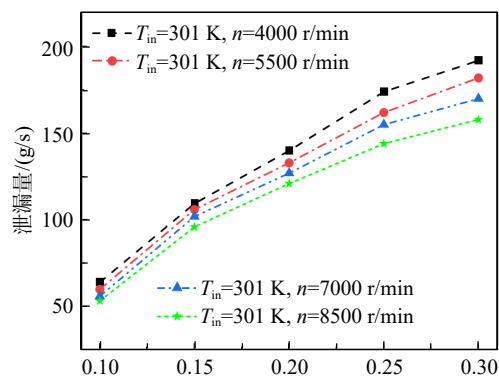
如图 9~图 10 所示, 在各工况条件下 MBS_{rbh} 和 MBS_{rb} 泄漏量均随上下游压差 Δp 的增加而增大。 Δp 一定时, 同转速下 MBS_{rbh} 与 MBS_{rb} 泄漏量随温度的升高而减小, 这是因为一方面气体密度随温度升高而减小, 气体的流速基本不变, 则单位时间内气流质量流量减小即泄漏量减小; 另



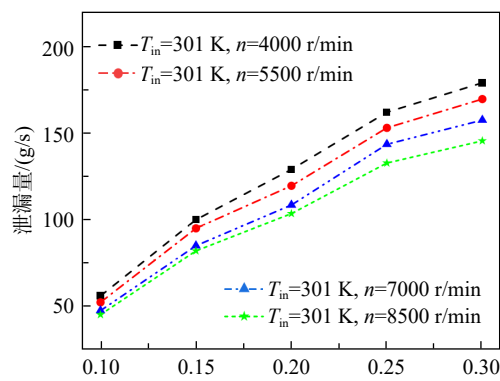
(a) 高温静态实验



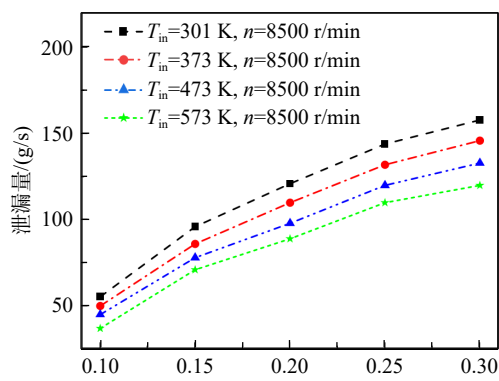
(a) 高温静态实验



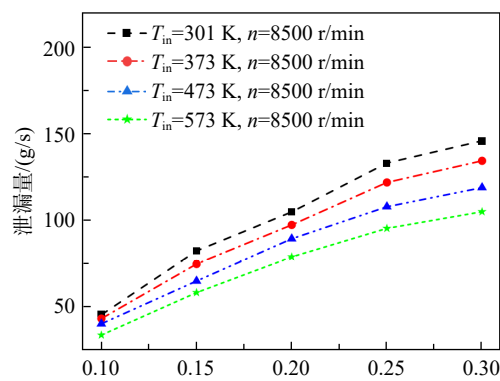
(b) 常温动态实验



(b) 常温动态实验



(c) 高温动态实验



(c) 高温动态实验

图 9 MBS_{rbh} 泄漏特性分析Fig. 9 Analysis of MBS_{rbh} leakage characteristics

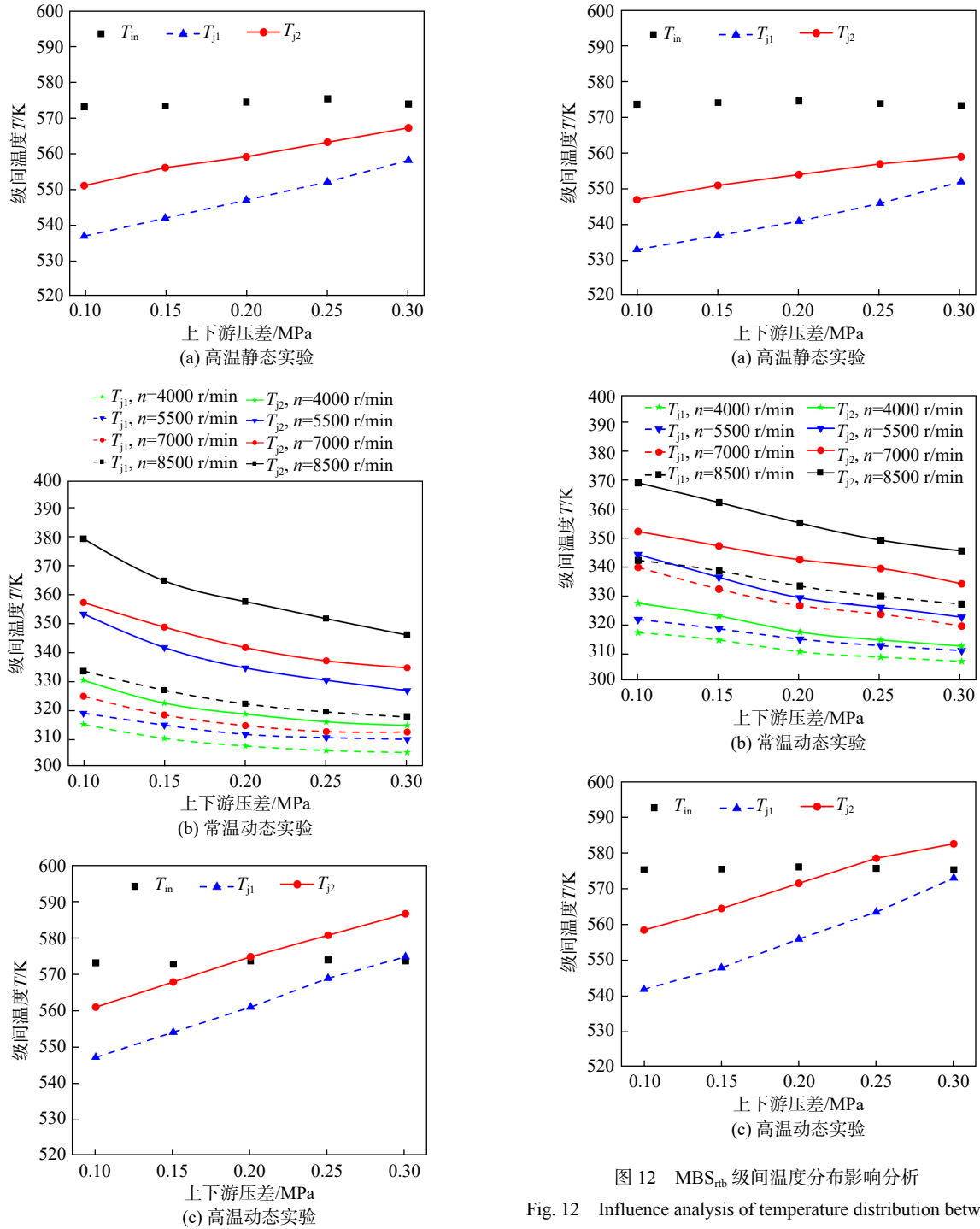
一方面, 温升会一定程度导致转子膨胀, 减小了密封间隙, 进而减小泄漏量。 T_{in} 、 Δp 一定时, 两种结构 MBS_{rbh} 与 MBS_{rtb} 泄漏量随转速的增大而减小, 这是由于转子转速的增大加剧了刷丝束与转子间的摩擦, 即增大了摩擦热进而降低了气体密度, 增大了气体黏性, 进而增大了刷丝束对气流的阻力, 从而降低了泄漏量; 随着转速升高, 增大了多级刷式密封级间腔室内气体旋涡流的强度, 增强了气流的黏性耗散作用, 使得气流部分动能转化为了热能, 降低了泄漏量。高温动态工况下

图 10 MBS_{rtb} 泄漏特性分析Fig. 10 Analysis of MBS_{rtb} leakage characteristics

两种结构 MBS_{rbh} 和 MBS_{rtb} 泄漏量整体低于高温静态工况。各工况条件下, MBS_{rtb} 泄漏量整体低于 MBS_{rbh}。

2.4.2 多级刷式密封级间温度分布特性分析

如图 11~图 12 所示, 高温静态工况下, 两种各级差异化结构多级刷式密封 MBS_{rbh} 和 MBS_{rtb} 各级间温度随上下游压差的增大而升高。在常温动态工况下, MBS_{rbh} 和 MBS_{rtb} 级间温度随上下游压差的增大而减小, 随转速的升高而增大, 且第二级间温度 T_{j2} 高于第一级间温度 T_{j1} 。这是由于

图 12 MBS_{rtb} 级间温度分布影响分析Fig. 12 Influence analysis of temperature distribution between MBS_{rtb} stages图 11 MBS_{rbh} 级间温度分布影响分析Fig. 11 Influence analysis of temperature distribution between MBS_{rbh} stages

多级刷式密封存在级间压降不平衡性, 末级压降较大, 第一级压降较小。因此, 一方面第二级刷丝束受到的上下游压差大于第一级刷丝束, 第二级刷丝与刷丝间、刷丝与后挡板之间的摩擦力大于第一级; 另一方面由于第二级刷丝上下游压差大, 故发生的刷丝吹下效应也更强^[23], 在这两方面影响下刷丝与转子间的摩擦热大于第一级, 故 T_{j2}

高于 T_{j1} 。高温动态工况下, MBS_{rbh} 和 MBS_{rtb} 级间温度随上下游压差的变化趋势同高温静态工况基本一致, 各级间温度均高于高温静态工况。这是由于动态工况下, 转子旋转与刷丝束产生摩擦热, 转速越高产生的摩擦热量就越大。

对比 MBS_{rbh} 和 MBS_{rtb} 各级级间温度可以发现, 高温静态、常温动态及高温动态工况条件下: MBS_{rbh} 各级级间温度整体上高于 MBS_{rtb}。这主要是由于 MBS_{rbh} 刷丝束与转子接触面积大于 MBS_{rtb},

产生的摩擦热量更高。

3 多级刷式密封级间流动传热特性数值研究

3.1 数值模型

本文建立的计算模型(以 MBS_{rb} 为例)中,刷丝弹性模量为 213.7 GPa,泊松比为 0.29,结构参数参数详见表 2 及表 3。虽然刷式密封结构并不复杂,但由于实际整周刷式密封刷丝数量巨大,数值计算整周模型较为困难,故本文对多级刷式密封数值模型进行了简化。每级刷式密封取中间一整排刷丝以及两侧半排刷丝作为最小循环周期单元建立数值计算模型^[12,23],如图 13 所示。由于本文数值模型为周期性简化模型,与实际整周模型泄漏量之间换算如下:

计算值泄漏量按照实验件尺寸进行换算^[24]:

$$L_t = \frac{c}{\sqrt{3}(d+\delta)} L_n \quad (10)$$

式中 L_t 为按照实验件尺寸换算后的泄漏量, L_n 为简化计算模型的泄漏量, c 为实验件周向长度(沿刷丝端部,本文实验件刷丝端部直径 360 mm)。

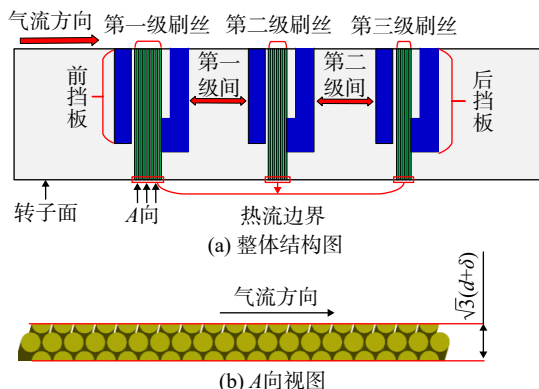


图 13 多级刷式密封结构示意图(MBS_{rb})

Fig. 13 Schematic diagram of multi-stage brush seal structure (MBS_{rb})

3.2 网格划分

刷丝束区域存在射流、漩涡流和横向流等流动,且流体流过刷丝与刷丝发生表面传热,此区域流动复杂且此区域尺寸狭小,采用四面体网格划分并进行加密处理,前后流体区域采用六面体网格,并进行周向分层处理,如图 14 所示。图 15 给出了不同工况条件下多级刷式密封(MBS_{rb})泄漏量随网格数量的变化情况,综合考虑网格质量和计算精度最终确定网格数为 730 万。

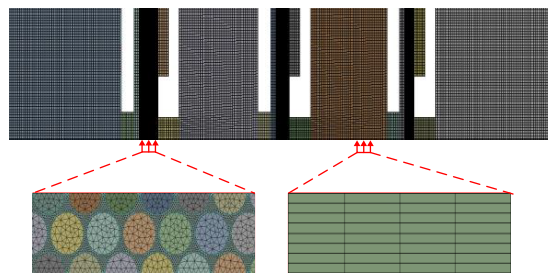


图 14 多级刷式密封(MBS_{rb})网格划分示意图

Fig. 14 Meshing diagram of multi-stage brush seals (MBS_{rb})

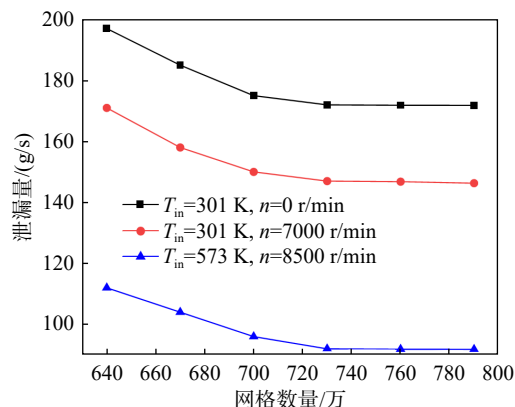


图 15 不同网格数量下 MBS_{rb} 泄漏量变化

Fig. 15 Variation of leakage amount of MBS_{rb} under different number of grids

3.3 边界条件

进口设置为压力及温度边界,出口为压力边界;考虑到计算模型周向对称性,故采用周期性边界条件,转子面及固体面设置为无滑移壁面;各级刷丝与流体接触的面为表面传热耦合面,固体刷丝与流体介质之间通过此耦合面进行热量交换;刷丝端部面设置为摩擦热流量边界,因刷丝自由端与转子接触摩擦生热,该热量一部分传入刷丝,一部分被转子吸收,设定 50% 的摩擦热流量传入刷丝束^[9];根据文中第 1.3 节分析,单位摩擦热流量 q 部分取值如表 1 所示,其余取值根据不同压力及速度工况由式(9)所得;收敛条件为能量、动量残差值低于 1×10^{-6} ,具体边界参数如表 4 所示。

3.4 数值与实验结果对比验证

如图 16 所示, MBS_{rb} 数值计算与实验测量结果泄漏量均随上下游压差的增大而增大。其泄漏量的计算值与测量值总体吻合良好,两者相对误差不超过 11.8%。本文模型为三维切片周期性简化模型,对刷丝束出口主气流温度进行多点提取均值处理作为级间温度值,即该级间温度为主气流在后挡板高度出口位置至转子面径向均匀取

表 4 边界条件
Table 4 Boundary conditions

参数	数值及属性
进口总压 p_{in}/MPa	0.1~0.4
出口静压 p_{out}/MPa	0.1
转速 $n/(\text{r/min})$	0~8 500
进口总温 T_{in}/K	301~573
湍流模型	RNG $k-\varepsilon$
壁面函数	Scalable
流体介质	Air ideal gas
迭代步数	3 000

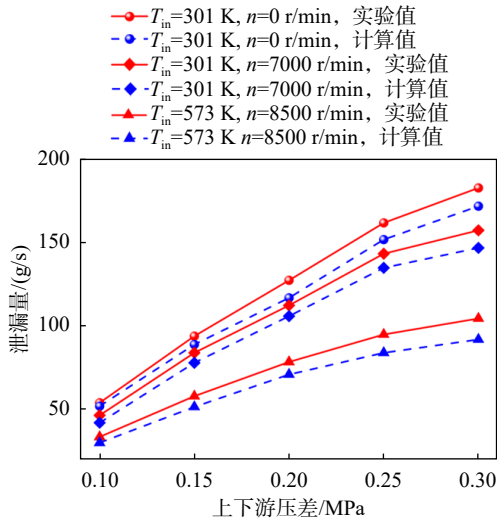


图 16 MBS_{rtb} 泄漏量数值与实验对比验证

Fig. 16 MBS_{rtb} leakage value and experimental verification

50 点温度的均值所得。如图 17 所示, MBS_{rtb} 第一、二级间温度随进出口压差的增大而减小, 数值计算值与实验测量值之间存在一定的误差, 最大误差不超过 4.2%。通过泄漏量与级间温度数值与实验对比分析验证了本文数值模型的准确性。产生上述误差主要因为: 第一, 数值模型为基于周期性的三维切片简化模型, 实验件为整周结构, 数值模型与实验件存在一定差异; 第二, 实际实验中很难确保每次实验气流温度都完全恒定在设计工况温度, 会产生有一定的偏差 ($\pm 278 \text{ K}$); 第三, 实验所用流量计、压力传感器及温度传感器由于自身精度原因产生一定误差。

3.5 数值结果分析

3.5.1 多级刷式密封压力和速度分布特性分析

如图 18 所示, MBS_{rtb} 与 MBS 气流压力逐级降低, 进出口流体区域及各级间区域气流压力较稳定, 压力变化主要发生在刷丝束靠近后挡板区域。这是因为高压气流流经刷丝束时遇到刷丝束

— T_{j1} , $n=4000 \text{ r/min}$, 实验值 — T_{j1} , $n=8500 \text{ r/min}$, 实验值
- - T_{j1} , $n=4000 \text{ r/min}$, 计算值 - - T_{j1} , $n=8500 \text{ r/min}$, 计算值
— T_{j2} , $n=4000 \text{ r/min}$, 实验值 — T_{j2} , $n=8500 \text{ r/min}$, 实验值
- - T_{j2} , $n=4000 \text{ r/min}$, 计算值 - - T_{j2} , $n=8500 \text{ r/min}$, 计算值

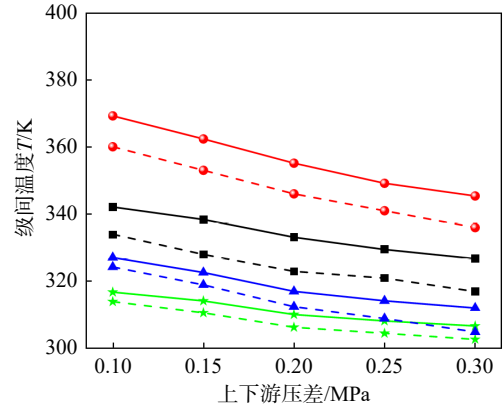
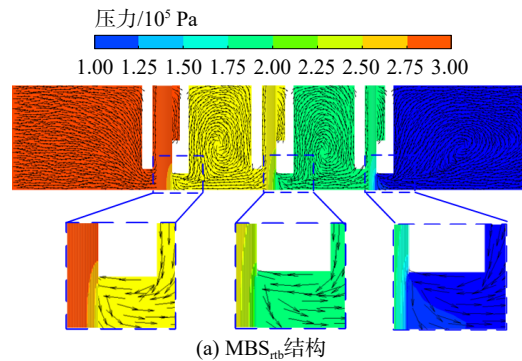
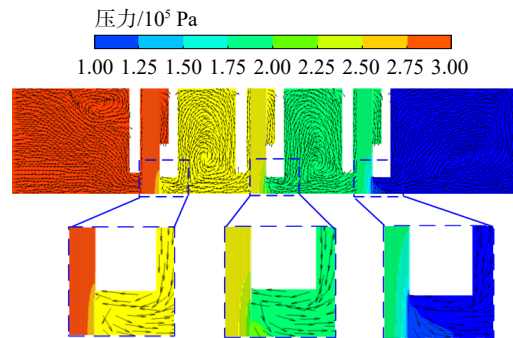


图 17 MBS_{rtb} 级间温度数值与实验对比验证 ($T_{in}=301 \text{ K}$)

Fig. 17 MBS_{rtb} interstage temperature numerical and experimental comparison verification ($T_{in}=301 \text{ K}$)



(a) MBS_{rtb} 结构



(b) MBS 结构

图 18 多级刷式密封压力与速度矢量分布图

($\Delta p=0.2 \text{ MPa}$, $n=8500 \text{ r/min}$, $T_{in}=301 \text{ K}$)

Fig. 18 multi-stage brush seals pressure and velocity vector distribution diagram ($\Delta p=0.2 \text{ MPa}$, $n=8500 \text{ r/min}$, $T_{in}=301 \text{ K}$)

的阻挡, 在刷丝间隙流动最终经后挡板以下区域高速射流喷出, 部分压力能转成了动能, 故压力降低气流流速增大。气流在各刷丝束级间腔室内有气流旋涡形成, 耗散了气流能量, 增强了密封性能。

如图 19 所示, 3 种结构多级刷式密封刷丝束

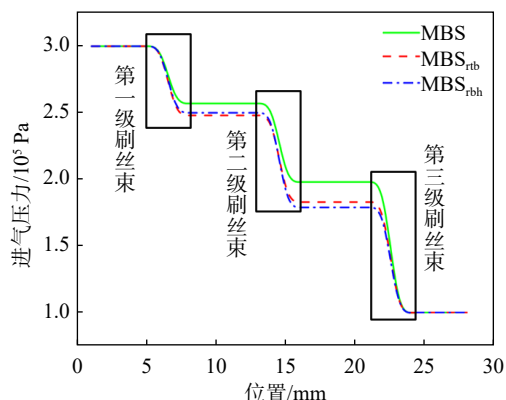


图 19 多级刷式密封轴向压力分布
($\Delta p=0.2$ MPa, $n=8\ 500$ r/min, $T_{in}=301$ K)

Fig. 19 multi-stage brush seals axial pressure distribution
($\Delta p=0.2$ MPa, $n=8\ 500$ r/min, $T_{in}=301$ K)

上下游压差逐级增大, MBS 末级刷丝上下游承受的压差最大, 刷丝间、刷丝与后挡板间及刷丝与转子间的摩擦力也更大, 最容易先失效, 进而导致整体失效。相比 MBS, 各级差异化结构 MBS_{rtb} 与 MBS_{rtb} 末级刷丝束承担的压差减小, 第一、二级刷丝束承担的压差升高, 各级压力分配较均衡。

3.5.2 多级刷式密封温度分布特性分析

如图 20~图 21 所示, 从整体分布云图可以看出, MBS_{rtb} 与 MBS 多级刷式密封流体域上游温度较低, 第二级间温度高于第一级间温度, 第三级出口处气流温度最高。各级刷丝束端部温度最高, 多级刷式密封热源主要来自于刷丝端部与转子的摩擦生热, 热量主要从刷丝端部沿径向传播, 刷丝根部温度较低。从刷丝束端部温度分布可以看

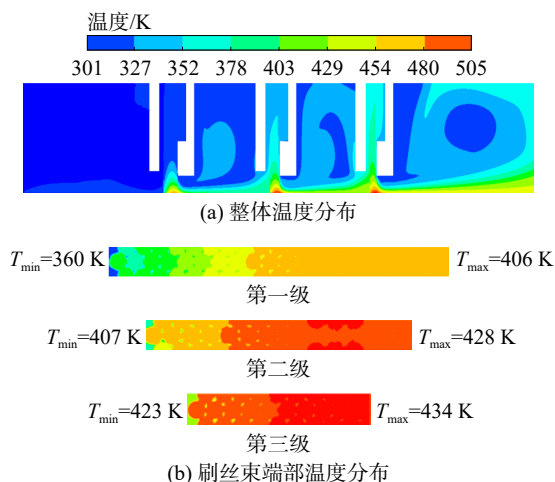


图 20 MBS_{rtb} 温度分布云图
($\Delta p=0.2$ MPa, $n=8\ 500$ r/min, $T_{in}=301$ K)

Fig. 20 MBS_{rtb} temperature distribution cloud image
($\Delta p=0.2$ MPa, $n=8\ 500$ r/min, $T_{in}=301$ K)

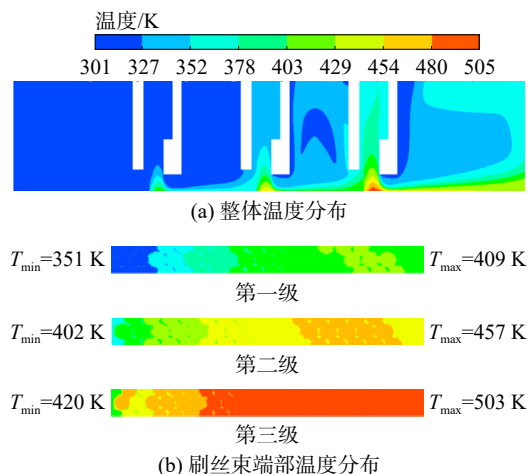


图 21 MBS 温度分布云图
($\Delta p=0.2$ MPa, $n=8\ 500$ r/min, $T_{in}=301$ K)

Fig. 21 MBS temperature distribution cloud image
($\Delta p=0.2$ MPa, $n=8\ 500$ r/min, $T_{in}=301$ K)

出, MBS_{rtb} 与 MBS 各级刷丝最高 (T_{max}) 与最低 (T_{min}) 温度逐级增大, 第三级刷丝束区域温度最高, MBS_{rtb} 各级最高温度分别为 406、428、434 K, MBS 各级最高温度分别为 409、457、503 K。由于各级刷丝束承受的压降逐级增大, 末级压降最大, 故各级刷丝间的摩擦、刷丝与后挡板间的摩擦也逐级增大产生的摩擦热也越多。此外, 各级刷丝上下游压差越大刷丝的吹下效应也越强, 加剧了刷丝与转子间的摩擦生热。

图 22 给出了 3 种结构级间温度随压力的变化, 从图中可以看出, 3 种结构多级刷式密封各级间温度随进口压力的增大而降低, 且各结构均第

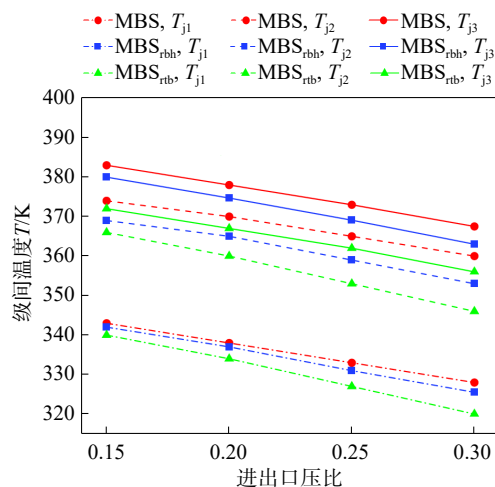


图 22 多级刷式密封级间温度随压力变化
($n=8\ 500$ r/min, $T_{in}=301$ K)

Fig. 22 Multi-stage brush seals temperature varies with pressure
($n=8\ 500$ r/min, $T_{in}=301$ K)

三级间温度 T_{j3} 最高, 第一级间温度 T_{j1} 最低; 同一级间温度下, 随着压力的升高各结构级间温度之差逐渐增大; 相同压比工况下, MBS 各级间温度最高, MBS_{rbh} 次之, MBS_{rtb} 最低。这是由于 MBS_{rbh} 与 MBS_{rtb} 多级刷式密封为逐级增大下游级流道面积结构, 各级间气流流量更大, 表面传热能力更强, 故各级间温度低于 MBS 结构。

3.5.3 进出口压比对多级刷式密封最高温度与泄漏量的影响

图 23 给出了转速为 8 500 r/min, 进气温度为 301 K 时不同进出口压比下多级刷式密封最高温度的变化规律。从图可看出, 当进出口压比增大时, 3 种结构多级刷式密封最高温度 T_{max} 随之增大。MBS、 MBS_{rbh} 与 MBS_{rtb} 最高温度 T_{max} 随进出口压比的增大, 最高分别增大了 15.9%、19.1%、15.3%。

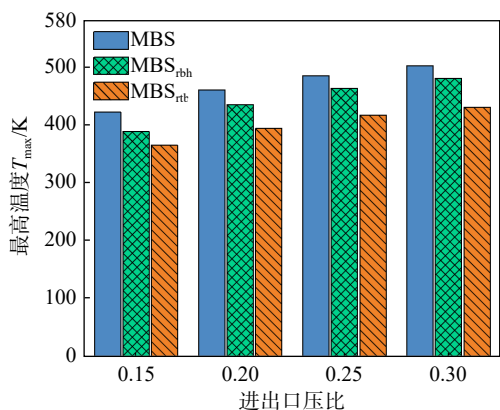


图 23 进出口压比对多级刷式密封最高温度影响

Fig. 23 Influence of inlet and outlet pressure ratio on the maximum temperature of multi-stage brush seals

从图中还可以看出, MBS 最高温度 T_{max} 在各个工况下均高于 MBS_{rbh} 与 MBS_{rtb} , MBS_{rtb} 最高温度 T_{max} 最低。这是因为 MBS 与 MBS_{rbh} 结构各级刷丝束厚度均高于 MBS_{rtb} 结构, 在同一工况下刷丝与转子接触面积大于 MBS_{rtb} 结构产生的摩擦热更高。MBS 结构相比 MBS_{rbh} 结构后挡板保护高度更低, 刷丝与后挡板之间的接触面积更大, 产生的摩擦力更强, 摩擦热也最高。

如图 24 所示, 3 种结构多级刷式密封泄漏量均随进气压力的增大而增大。其中 MBS 结构在各压力工况下泄漏量最小, MBS_{rbh} 结构泄漏量最大。

3.5.4 转速对多级刷式密封最高温度与泄漏量的影响

图 25 给出了进出口压比为 3.0, 进气温度为 301 K 不同转速时的多级刷式密封最高温度的变化规律。如图所示, 随着转速的增加各结构多级

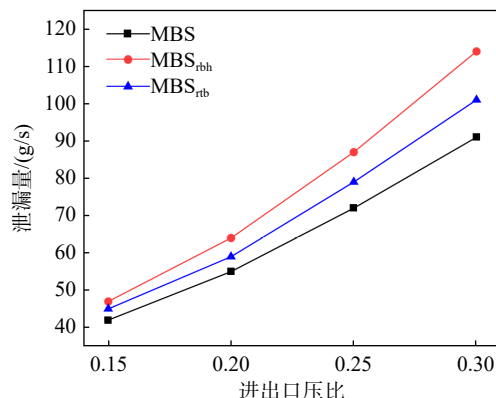


图 24 进出口压比对多级刷式密封泄漏量的影响

Fig. 24 Influence of inlet and outlet pressure ratio on leakage of multi-stage brush seals

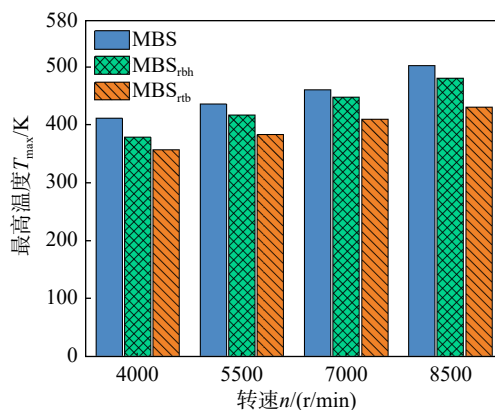


图 25 转速对多级刷式密封最高温度影响

Fig. 25 Influence of rotating speed on maximum temperature of multi-stage brush seals

刷式密封最高温度也随之上升; 转速从 4 000 r/min 到 8 500 r/min 时, MBS、 MBS_{rbh} 及 MBS_{rtb} 最高温度分别上升了 18.1%、21.3%、17.1%; 各压力工况下 MBS 最高温度 T_{max} 最高, MBS_{rtb} 最低。

如图 26 所示, 3 种结构多级刷式密封泄漏量

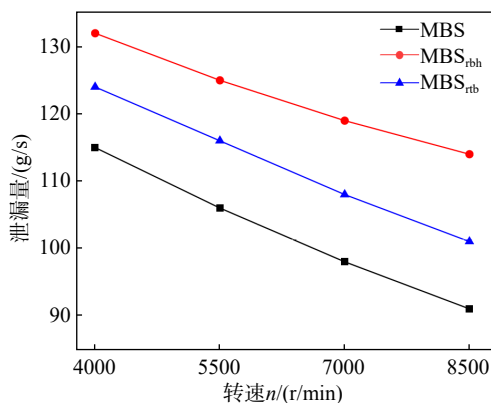


图 26 转速对多级刷式密封泄漏量的影响

Fig. 26 Influence of rotating speed on leakage of multi-stage brush seals

随转子转速的增大而降低。同一转速工况下, MBS_{rbh} 泄漏量最高, MBS_{rb} 次之, MBS 最低。

4 结 论

本文理论分析了多级刷式密封级间流动传热特性, 实验验证了数值模型的准确性。在高温静态、常温动态及高温动态工况下, 研究了提高后挡板保护高度及减少刷丝束厚两种各级差异化结构及各级相同结构多级刷式密封的级间温度、最高温度及泄漏特性的影响规律, 得出以下结论:

1) 提高后挡板高度与减少刷丝束厚度结构多级刷式密封, 各级间温度在高温静态与高温动态工况下随上下游压差的升高而增大, 在常温动态工况下随上下游压差的升高而减小, 高温动态工况下各级间温度整体上大于高温静态工况, 泄漏量整体上小于高温静态工况。

2) 3 种结构多级刷式密封第二级间温度均高于第一级间温度, 各级相同结构各级间温度以及最高温度最大, 提高后挡板高度结构次之, 减少刷丝束厚度结构最低, 各级相同结构末级刷丝束上下游压差最大, 压降分配均衡性最差。

3) 3 种结构多级刷式密封泄漏量随进出口压比的增大而升高, 随转速增大而降低, 相同工况下提高后挡板高度结构泄漏量最高, 各级相同结构泄漏量最低。

参考文献:

- [1] DOGU Y, AKSIT M F. Effects of geometry on brush seal pressure and flow fields: Part II backing plate configurations[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2006, 128(2): 379-389.
- [2] 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.
- [3] 孙丹, 杜宸宇, 刘永泉, 等. 刷式密封刷丝变形与振动特性实验[J]. *航空学报*, 2020, 41(10): 63-73.
SUN Dan, DU Chenyu, LIU Yongquan, et al. Experiment on bristle deflection and oscillation characteristics of brush seals[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(10): 63-73. (in Chinese)
- [4] 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)
- [5] 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)
- [6] 张元桥, 王妍, 晏鑫, 等. 刷式密封泄漏流动及传热特性的研究第二部分: 传热特性[J]. *工程热物理学报*, 2018, 39(5): 970-976.
ZHANG Yuanqiao, WANG Yan, YAN Xin, et al. Investigations on the leakage and heat transfer characteristics of brush seal: Part 2 heat transfer characteristics[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2018, 39(5): 970-976. (in Chinese)
- [7] 黄首清, 索双富, 李永健, 等. 几何参数对刷式密封泄漏和刷丝尖端力的影响[J]. *航空动力学报*, 2016, 31(1): 196-202.
HUANG Shouqing, SUO Shuangfu, LI Yongjian, et al. Influences of geometric parameters on leakages and bristle tip forces in brush seals[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2016, 31(1): 196-202. (in Chinese)
- [8] HENDRICKS R C, SCHLUMBERGER S, BRAUN M J, et al. A bulk flow model of a brush seal system: ASME Paper 1991-GT-325 [R]. Piscataway, US: ASME, 1991.
- [9] 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.
- [10] DOGU Y, AKSIT M F. Brush seal temperature distribution analysis[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2006, 128(3): 599-609.
- [11] 李国勤, 孙丹, 焦忠泽, 等. 多级低滞后型刷式密封流动传热特性数值研究[J]. *风机技术*, 2019, 61(5): 56-63.
LI Guoqin, SUN Dan, JIAO Zhongze, et al. Numerical study on inter-stage pressure and heat transfer characteristics of multi-stage low hysteresis brush seal[J]. *Chinese Journal of Turbomachinery*, 2019, 61(5): 56-63. (in Chinese)
- [12] 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): 74-86.
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): 74-86. (in Chinese)
- [13] QIU Bo, LI Jun, YAN Xin. Investigation into the flow behavior of multi-stage brush seals[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 2014, 228(4): 416-428.
- [14] 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): 102509.1-102509.9.
- [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] 文龙, 王之栋, 丁蕾, 等. 双级低滞后刷式密封级间不平衡性分析[J]. *北京航空航天大学学报*, 2014, 40(8): 1154-1159.
WEN Long, WANG Zhili, DING Lei, et al. Inter-stage imbalance analysis of two-stage low hysteresis brush seal[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2014, 40(8): 1154-1159. (in Chinese)
- [17] 赵欢, 李业隆, 孙丹, 等. 新型各级差异化多级刷式密封级间压降均衡性数值与实验研究[J]. *航空动力学报*, 2022, 37(5): 934-945.
ZHAO Huan, LI Yelong, SUN Dan, et al. Numerical and experimental investigation on equalization of pressure drop between

- stages of a new differential multistage brush seals[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2022, 37(5): 934-945. (in Chinese)
- [18] 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)
- [19] BIDKAR A R, ZHENG X, DEMIROGLU M, et al. Stiffness measurement for pressure loaded brush seals: ASME Paper GT 2011-45399. [R]. Vancouver, Canada: ASME, 2011.
- [20] PUGACHEV A O, DECKNER M. CFD prediction and test results of stiffness and damping coefficients for brush-labyrinth gas seals [C]// *Power for Land, Sea, and Air*. Phoenix, US: ASME, 2010: 6-12.
- [21] FELLESTEIN J A, DELLACORTE C. A new tribological test for candidate brush seal materials evaluation: NASA TM-10675[R]. Washington DC, US: NASA, 1995.
- [22] FELLESTEIN J, DELLACORTE C, MOORE K, et al. High temperature brush seal tuft testing of selected nickel-chrome and cobalt-chrome superalloys: AIAA 1997-2634[R]. Reston, Virginia: AIAA, 1997.
- [23] 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 distributions in a three-dimensional brush seal model[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2014, 54(6): 805-810. (in Chinese)
- [24] 杜宸宇, 孙丹, 刘永泉, 等. 刷式密封吹下效应诱发机理流固耦合数值研究[J]. *航空动力学报*, 2021, 36(2): 310-319.
- DU Chenyu, SUN Dan, LIU Yongquan, et al. Numerical investigation on induced mechanism of blow-down effect of brush seals with fluid-structure interaction[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2021, 36(2): 310-319. (in Chinese)

(编辑: 张 雪)