

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

赵欢¹, 李业隆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. 中国航空发动机集团有限公司 沈阳发动机研究所, 沈阳 110015;

3. 中国航空发动机集团有限公司 航空发动机动力传输航空科技重点实验室, 沈阳 110015)

摘 要: 分析多级刷式密封级间压降分配特性理论, 提出新型各级差异化多级刷式密封结构, 基于流固耦合方法建立新型多级刷式密封三维实体计算模型, 设计搭建新型多级刷式密封泄漏流动特性实验装置, 数值与实验研究在不同工况条件下, 结构参数对新型结构多级刷式密封级间压降均衡性和泄漏特性的影响规律。研究表明: 传统结构多级刷式密封各级级间压降占比均衡性标准差为 8.41, 新型结构各级级间压降占比均衡性标准差最大为 4.69, 最小为 2.07。相较传统各级相同结构, 增大下游级有效流通面积的新型各级差异化多级刷式密封可有效改善级间压降的不均衡性。提高后挡板保护高度使得新型结构各级级间压降占比均衡性标准差最小, 各级级间压降占比更接近, 可明显改善新型结构多级刷式密封级间压降均衡性。减少刷丝束厚度和增大刷丝束与转子面间隙使新型结构多级刷式密封的泄漏量增大明显。

关 键 词: 新型各级差异化多级刷式密封; 流固耦合; 三维实体建模; 级间压降均衡性; 泄漏流动

中图分类号: V233.5

文献标志码: A

Numerical and experimental investigation on interstage pressure drop equalization of differential multi-stage brush seals

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

(1. Key Laboratory of Advanced Measurement and Test Technique for Aviation

Propulsion System, Liaoning Province, School of Aero-engine,

Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136;

2. Shenyang Engine Research Institute,

Aero Engine Corporation of China, Shenyang 110015, China;

3. Key Laboratory for Power Transmission of Aero Engine,

Aero Engine Corporation of China, Shenyang 110015, China)

收稿日期: 2021-05-18

基金项目: 国家自然科学基金(52075346, 51675351); 辽宁省自然科学基金(2019-ZD-0236);

辽宁省教育厅基础科研项目(JYT2020047)

作者简介: 赵欢(1982—), 女, 副教授, 博士, 主要研究航空发动机新材料密封的制备技术及其特性研究。

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

引用格式: 赵欢, 李业隆, 孙丹, 等. 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 interstage pressure drop equalization of differential multi-stage brush seals[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(5): 934-945.

Abstract: Through analysis of multi-stage brush seal interstage pressure drop distribution characteristic theory, a new brush seal structure of differential stage was presented, and based on the fluid-structure interaction method, a new multi-stage brush seal three-dimensional entity model at all stages was established to build a new multi-stage brush type seal leakage flow characteristics experiment device; through numerical and experimental research under the different working conditions, the effects of structural parameters on pressure drop equilibrium and leakage characteristics of a new type of multi-stage brush seal were analyzed. The results showed that the standard deviation of the equilibrium ratio of pressure drop between different stages of the traditional multi-stage brush seal structure was 8.41, and that of the equilibrium ratio of pressure drop between different stages of the new structure was 4.69 and 2.07. Compared with the traditional structure at each stage, the new differential multi-stage brush seal with the increasing area of the downstream stage can effectively improve the imbalance of pressure drop between stages. Increasing the backing plate protection height could bring about the minimum standard deviation of the equilibrium of pressure drop ratio between different stages of the new structure, and the pressure drop ratio between different stages was close to each other, which can significantly improve the equilibrium of pressure drop between different stages of the new structure. Reducing the thickness of the brush bundle and increasing the clearance between the brush bundle and the rotor surface could make the leakage of the new multi-stage brush seal increase obviously.

Key words: new differential multi-stage brush seals; fluid-solid coupling;
three-dimensional entity modeling; interstage pressure drop equalization;
leakage flow

刷式密封是一种具有优良密封性能的接触式动密封,它的泄漏量能降至传统非接触式密封的 $1/5\sim 1/10$,已被广泛应用于透平机械中^[1-4]。在高压差工况下,单级刷式密封因其承压能力不足,需采用多级刷式密封^[5]。研究表明传统各级结构相同的多级刷式密封各级间气流压降分配不均衡^[6],进而引起多级刷式密封失效,降低其使用寿命^[7-10],因此开展新型均压结构多级刷式密封的研究意义重大。

国内外研究人员已对多级刷式密封开展了大量的研究。邱波、李军等^[11-12]通过数值与实验研究得出两级刷式密封泄漏量随压比增加而增加,随转速的增加而减少的结论。孙丹等^[13]建立刷式密封刷丝接触变形特性三维瞬态求解模型,数值与实验对比研究了压比和三种刷式密封结构对刷丝接触变形及接触应力的影响。Raben等^[14-15]在蒸汽环境下实验研究了两级刷式密封摩擦温升特性。此外,Pugachev等^[16]研究发现多级刷式密封级间压降是不均衡的。Hendricks等^[17]实验研究了两级刷式密封的各级压力分布,结果表明第二级级间压降占比比第一级级间压降占比高约20%,两级刷式密封级间压降分配不均匀。文龙

等^[18]数值研究了两级低滞后型刷式密封的级间压力均衡性问题,并分析了分压比与刷丝倾角及末级前后挡板保护高度的关系,研究结果表明,改变刷丝倾角及后挡板保护高度可改善两级刷式密封级间压降分配,保持第一级结构参数不变仅改变第二级前挡板高度对级间压降不均衡性影响较小。王凯杰等^[6]数值研究了两级刷式密封轴向泄漏流的流速和压力分布规律,分析了级间距离和刷丝排数对出口气流流速的影响,研究表明在刷丝排数相同时,两级刷式密封级间压降分布明显不均匀,并随着压比的增大会加剧级间压降不均匀性。李国勤、张国强等^[19-20]通过三维实体建模数值研究了多级刷式密封传热特性及压力分布特性,认为压降主要发生在刷丝束区域,最大级间压降及最高温度均出现在末级刷丝处。赵欢等^[21]研究了两级和三级刷式密封级间压降分配规律及其影响因素。

多级刷式密封级间压降不均衡会诱发多级刷式密封失效,严重影响其密封性能及使用寿命。现有文献大多针对各级相同结构多级刷式密封展开级间压降分配特性研究,发现其级间压降存在不均衡问题,进一步探讨新型各级差异化多级刷

式密封的级间压降均衡性,对抑制密封失效、延长使用寿命具有重要意义。

本文提出新型各级差异化多级刷式密封结构,基于流固耦合方法建立新型多级刷式密封三维实体求解模型,设计搭建新型多级刷式密封泄漏流动特性实验装置,与传统各级相同结构多级刷式密封对比,系统研究不同工况条件下,结构参数对新型各级差异化多级刷式密封级间压降均衡性及泄漏特性的影响规律,为改善多级刷式密封级间压降不均衡性,抑制其失效技术的研发提供研究依据。

1 多级刷式密封级间压降均衡性理论分析

如图1所示,不计气体自身重力,多级刷式密封某级级间压降由伯努利方程可得

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho_{\text{out}} v_{\text{out}}^2 - \frac{1}{2} \rho_{\text{in}} v_{\text{in}}^2 \quad (1)$$

式中 Δp 为进出口压降, ρ 为气流密度, v 为气流速度,下标 in、out 分别表示进口和出口。

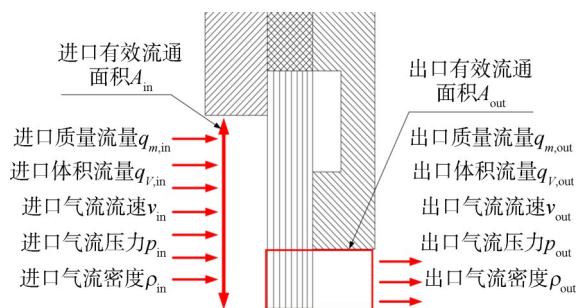


图1 某级多级刷式密封进出口相关参数

Fig.1 Multi-stage brush seal inlet and outlet fluid parameters of a certain stage

流经多级刷式密封的气流质量流量

$$q_m = \rho q_v = \rho v A \quad (2)$$

式中 q_m 为气流质量流量, q_v 为气流量, A 为有效流通面积。带入式(1)得

$$\Delta p = \frac{q_m}{2} \left(\frac{q_{v,\text{out}}}{A_{\text{out}}^2} - \frac{q_{v,\text{in}}}{A_{\text{in}}^2} \right) \quad (3)$$

引入某级多级刷式密封进口与出口有效流通截面面积比值 C

$$C = \frac{A_{\text{in}}}{A_{\text{out}}} \quad (4)$$

带入式(3)得

$$\Delta p = \frac{q_m (C^2 q_{v,\text{out}} - q_{v,\text{in}})}{2 A_{\text{in}}^2} \quad (5)$$

气流流经多级刷式密封各级时,各级进出口体积流量变化随级数增加而逐级不均匀增加^[21],以三级刷式密封为例,即

$$\Delta q_{v,3} > \Delta q_{v,2} > \Delta q_{v,1} \quad (6)$$

由式(5)知,当 q_m 、 A_{in} 和比值 C 不变时,多级刷式密封第 i 级刷丝上下游压降 Δp_i 取决于第 i 级进出口体积流量变化;当多级刷式密封的级数增加,多级刷式密封体积流量会逐级不均匀增大,各级上下游压降也随之逐级不均匀增大,即:

$$\Delta p_{v,3} > \Delta p_{v,2} > \Delta p_{v,1} \quad (7)$$

由此可知多级刷式密封各级级间压降是不均衡的。

以多级刷式密封第一级刷丝上下游为例:由式(2)、式(3)进一步可得

$$\Delta p = \frac{q_m}{2} \left(\frac{v_{\text{out}}}{A_{\text{out}}} - \frac{v_{\text{in}}}{A_{\text{in}}} \right) \quad (8)$$

由式(8)知,当某级刷式密封 q_m 、 A_{in} 、 v_{in} 不变时,有效流通截面 A_{out} 增加,出口流速 v_{out} 降低,可减小该级刷丝束上下游压降 Δp 。因此,为改善多级刷式密封各级级间压降的不均衡问题,可通过设计增大下游级有效流通面积 A_{out} 的新型各级差异化结构来改变级间压降分配,进而平衡多级刷式密封各级压降。

2 新型各级差异化多级刷式密封结构设计

2.1 新型各级差异化多级刷式密封结构

图2和图3给出了新型各级差异化多级刷式密封结构图,从图中可以看出,新型各级差异化多级刷式密封结构主要由带减压腔的单级低滞后型刷式密封为密封单元体,将多个低滞后型刷式密封单元体串联组合成多级刷式密封。各级密封单元体前挡板保护高度 H_q 、后挡板保护高度 H_h 逐级提高,刷丝束轴向厚度 W_s 逐级减少,刷丝束与转子面径向间隙 H_g 逐级增大,刷丝排列密度 ρ_{bristle} 逐级减小。

2.2 新型各级差异化多级刷式密封均压原理

由文中第1节可知,多级刷式密封各级刷丝上下游压降存在不均衡性问题。由式(8)知,通过增大多级刷式密封刷丝下游出口有效流通面积可改善多级刷式密封各级压降分配,进而使多级刷式密封级间压降达到相对平衡。本文设计新型各级差异化多级刷式密封各级密封单元体提高后挡板保护高度 H_h 、减小刷丝束厚度 W_s 和增大刷丝

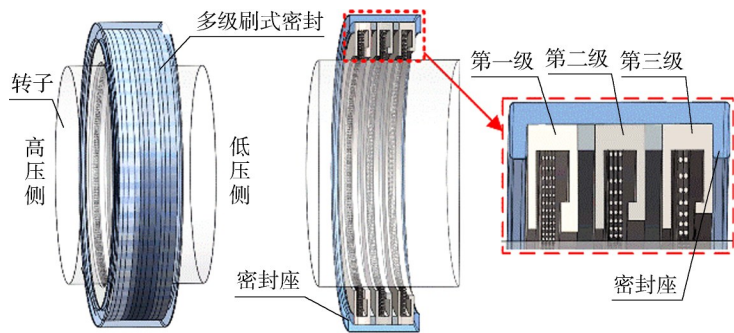


图2 新型各级差异化多级刷式密封结构示意图
Fig.2 Schematic diagram of the new multi-stage differential brush seal structure

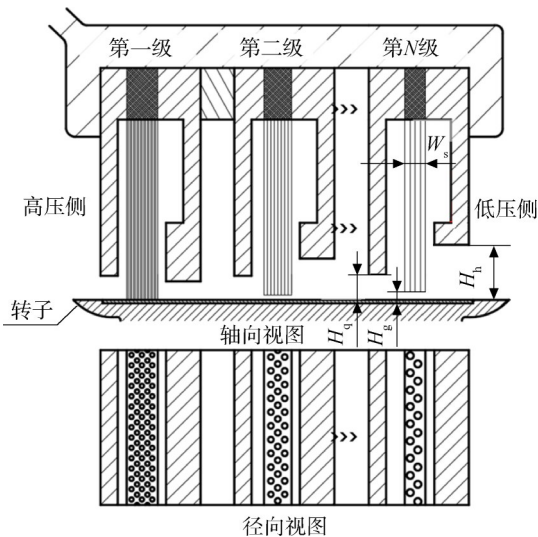


图3 新型各级差异化多级刷式密封二维结构图
Fig.3 Two-dimensional structure drawing of the new differential multi-stage brush seal

与转子面径向间隙 H_g ,旨在增大多级刷式密封下游出口有效流通面积 A_{out} ,进而使多级刷式密封各级压降趋于均衡。

3 新型各级差异化多级刷式密封级间压降均衡性数值计算模型

3.1 求解模型

本文建立的计算模型中,刷丝材料为 Haynes 25,弹性模量为 213.7 GPa,泊松比为 0.29。本文以三级刷式密封为例,新型各级差异化结构的参数详见表 1。建模时取中间一整排刷丝(轴向 20 根)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^[22],如图 4 所示。由于多级刷式密封为周向对称结构,而本文计算模型是以最小循环周期单元建立,故相关计算数据需乘以周期数。周期数为实验件长度除以最小循环单元周向长度^[23]。本文计算值泄漏量按照实验件尺寸进行

表 1 多级刷式密封数值计算模型结构参数
Table 1 Structural parameters of numerical calculation model of multi-stage brush seal

参数	第一级	第二级	第三级
后挡板保护高度 H_h/mm	2.1	2.5	3.5
刷丝束与转子面间隙 H_g/mm	0	0.01	0.02
刷丝束轴向厚度 W_s/mm	1.7	1.5	1.3
前挡板保护高度 H_q/mm	2.5	13.5	13.5
前挡板宽度 W_q/mm	2.5	2.5	2.5
后挡板宽度 W_h/mm	2.5	2.5	2.5
减压腔高度 H_j/mm	8.4	8.4	8.4
减压腔宽度 W_j/mm	1.0	1.0	1.0
级间距 W_d/mm	13	13	13
刷丝直径 d/mm	0.08	0.08	0.08
刷丝间隙 δ/mm	0.008	0.008	0.008
刷丝周向倾角 $\alpha/(\circ)$	45	45	45

换算

$$L_t = \frac{c}{\sqrt{3}(d + \delta)} L_n \quad (9)$$

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, d 为刷丝直径, δ 为刷丝间隙, c 为扇形段实验件周向长度(沿刷丝端部)。

3.2 网格划分

由于刷丝束所在的流固耦合区域流动情况较为复杂,故对此区域采用四面体网格划分,流体区域则采用六面体网格如图 5 所示。为提高网格质量和计算精度,对刷丝区域设置边界层网格,并对刷丝间隙处网格进行加密。

综合考虑计算精度和计算资源,本文对求解模型进行网格无关性验证,如表 2 所示。随着网格数量的逐渐增加,计算精度逐渐提高。当网格

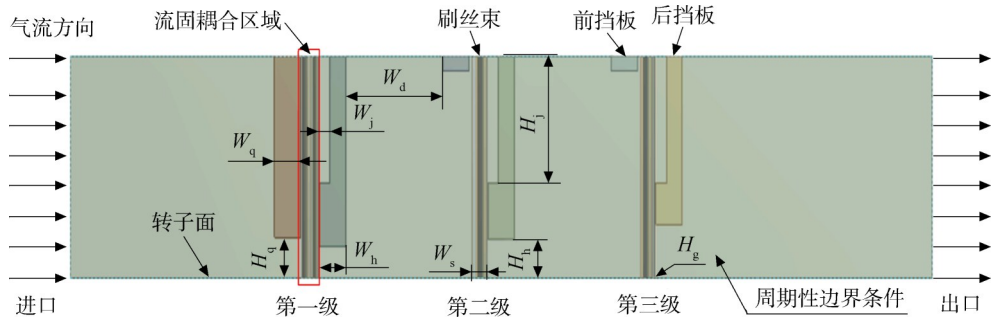


图 4 新型各级差异化多级刷式密封数值计算模型图

Fig.4 Numerical calculation model diagram of a new differential multi-stage brush seal

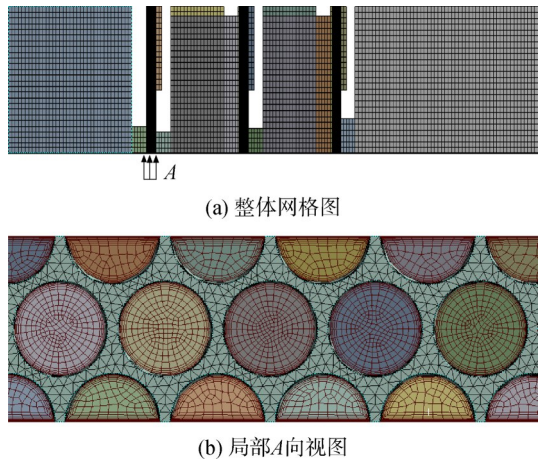


图 5 新型各级差异化刷式密封网格划分示意图

Fig.5 Diagram of grid division of the new differential multi-stage brush seal

表 2 网格无关性验证

Table 2 Grid independence validation

网格数量/ 10^4	泄漏量/(kg/s)	相对误差/%
610	0.014 3	10.49
660	0.013 6	6.25
760	0.012 1	5.47
810	0.012 1	5.47
860	0.012 1	5.47

注:进出口压比为 3.0。

数量达到 760 万时泄漏量实验值为 0.012 8 kg/s,与数值结果误差达到最小,且随着网格数量继续增加该误差基本不变,故确定网格数量为 760 万。

3.3 边界条件与求解方法

采用进口压力为总压、出口压力为静压边界条件,进出口压比为 R_p ;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;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 3 所示。对于流体

表 3 边界条件

Table 3 Boundary conditions

参数	数值及说明
进口总压/MPa	0.1~0.3
出口静压/MPa	0.1
转速/(r/min)	0
湍流模型	$k-\omega$
壁面函数	Scalable
流体介质	理想空气
总迭代步数	3 500

域和固体域采用流固耦合方法进行数据传递。为了使气动载荷和网格变形等信息通过流固耦合面进行交换与传递,在满足求解精度及确保能量传递守恒的同时采用守恒插值法。

4 多级刷式密封级间压降均衡性实验研究

4.1 实验装置

如图 6 所示,该实验装置由进气系统、密封系统和测试系统三部分组成。进气系统方面,实验中气体由空气压缩机向储气罐内充入高压空气,此高压空气又经冷干机通过管路流入密封腔室,其最高压力为 1.0 MPa,并通过压力调节阀控制进入密封腔室的高压空气。密封系统方面,密封装置由气缸、密封安装座及实验件组成,且多级刷式密封安装座固定在气缸上,用于装配实验件进行密封实验。测试系统方面,上游气路及下游分支气路分别安装有高精度涡街主流量计(量程范围:110~870 (N·m³)/h)和副流量计(量程范围:20~150 (N·m³)/h)。主、副量程流量计均具有压力和温度补偿功能,测量精度为 1 级。多级刷式密封各级压力由连接在安装座引压点上的气管

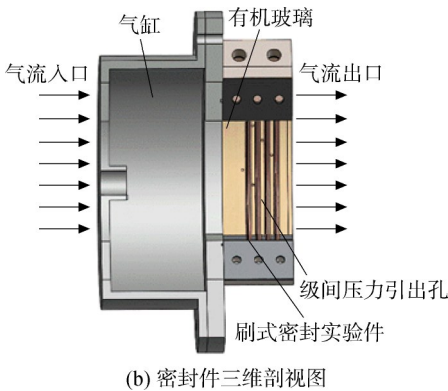
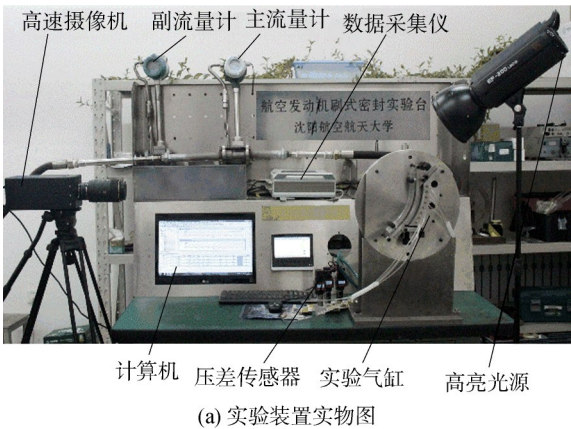


图 6 刷式密封泄漏流动特性实验装置
Fig.6 Brush seal leakage flow characteristics experimental device

引入压差传感器进行测量。通过数据采集仪和计算机的配合进行数据采集和显示存储。该实验台还配有高速摄像机用以观测刷丝接触变形特性。

4.2 实验原理

如图 7 所示,经空气压缩机压缩后的气流在储气罐内保存,实验时气流通经冷干机进行干燥处理,然后流入主流路。主流路上安装有主流量计,流经主流量计的气体分别流入装有新型各级差异化多级刷式密封实验件的气缸和下游分支气路。当实验件的泄漏量较大时,关闭下游分支气路上副流量计的上游阀门,而主流量计的读数为此时对应压差下的刷式密封泄漏量;当实验件的泄漏量较低时,气体的流量无法达到主流量计的量程下限时,开启副流量计的上游阀门,使得主路中的流量增大,最后达到主路中主流量计的量程下限,实验件在此时刻压差下的泄漏量为主流量计与副流量计的读数之差。

如图 8 所示,多级刷式密封实验件轴向各级前后各有两个级间压力引入孔,每级前后两个一

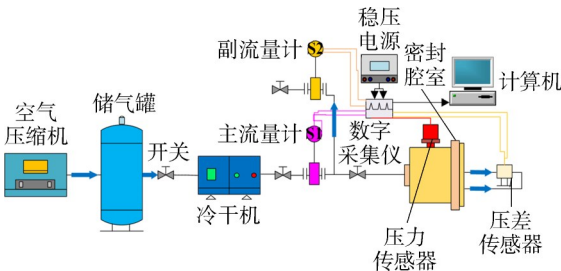


图 7 多级刷式密封泄漏流动特性测试原理图
Fig.7 Schematic diagram of multi-stage brush seal leakage flow characteristics experimental device

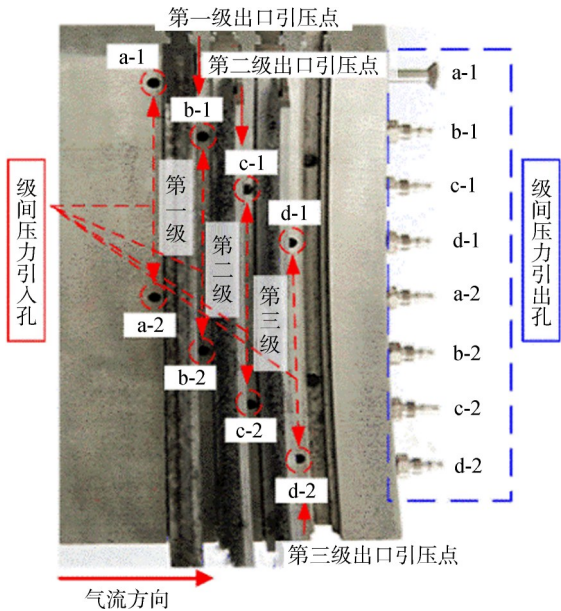


图 8 多级刷式密封级间压降特性测试原理图
Fig.8 Schematic diagram of multi-stage brush seal interstage pressure drop characteristic experimental device

组,共有四组,分别为 a~d,在出口端与之相对应有四组级间压力引出孔。流过密封件的气流先由各级间压力引入孔流入内流道,最后从级间压力引出孔流出。将压差传感器连接在相应的级间压力引出孔,用于测量多级刷式密封级间压力。

5 数值计算与实验测量结果分析

5.1 数值计算与实验测量结果对比验证

5.1.1 级间压降特性对比验证

图 9 给出了各级结构参数相同(传统结构)的低滞后型多级刷式密封和新型各级差异化结构(新型结构)多级刷式密封在不同进出口压比下各级级间压力变化。传统结构多级刷式密封各级参数同表 1 中第一级相关参数,其中各级前挡板保

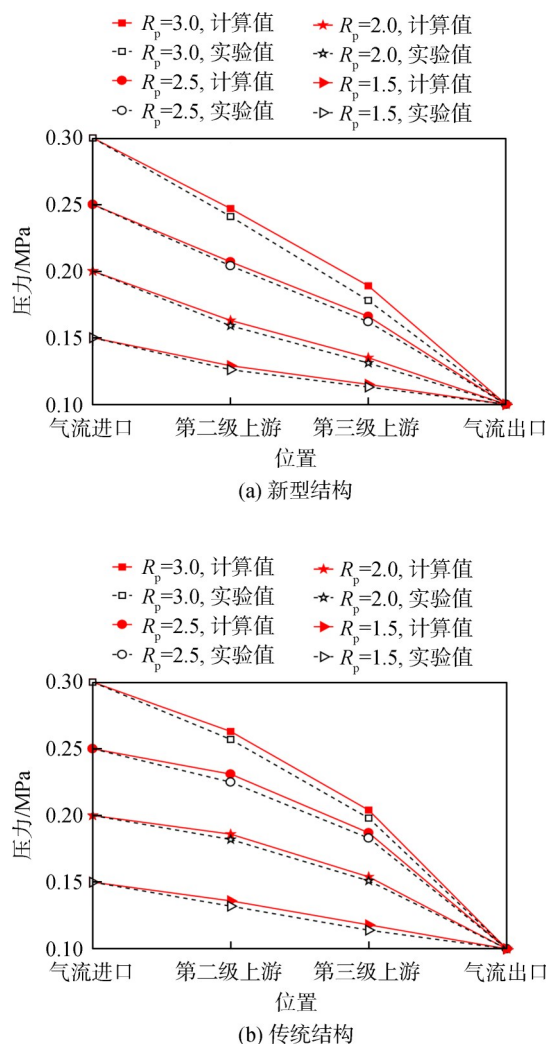


图9 多级刷式密封级间压力计算值与实验值对比
Fig.9 Comparison between calculated and experimental values of interstage pressure of multi-stage brush seals

护高度为 2.5、13.5、13.5 mm。各级级间压力定义为该级间轴向 100 个压力点的平均值。从图中可以看出,气流流过新型结构和传统结构多级刷式密封过程中气流压力逐渐减小,且后一级的级间压降大于前一级。传统结构多级刷式密封级间压降的变化量逐级不均匀增加,末级压降明显大于前两级,存在级间压降不均衡性;新型结构多级刷式密封各级级间压降变化量相近,各级级间压降变化更均匀。由数值计算与实验测量结果对比可得,传统结构和新型结构的级间压力最大误差为 6.2%,验证了数值模型的准确性。由于实验过程中级间压力从压力引出孔引出过程中存在沿程压力损失,故影响了测量精度。

5.1.2 泄漏特性对比验证

从图 10 中可以看出,在不同进出口压比下,传统结构与新型结构多级刷式密封数值计算与实验测量结果泄漏量值均随进出口压比的增加而增大;相对于传统结构多级刷式密封,新型结构多级刷式密封泄漏量较高。如图 10 所示,针对传统结构和新型结构多级刷式密封,其泄漏量的计算值与测量值之间相对误差不超过 5.8%。这主要有两方面原因:一是实验装置存在一定安装间隙,部分气流未流经实验件直接从安装间隙内流出,影响了测量精度;二是理论计算模型为简化模型,综合结果导致实验测量值略高于数值计算值。

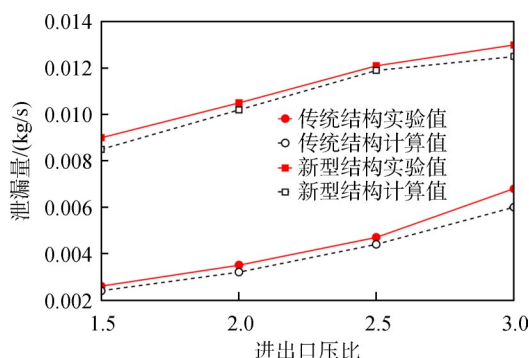


图 10 进出口压比对两种结构多级刷式密封泄漏量影响
Fig.10 Effect of inlet/outlet pressure ratio on leakage of two types of multi-stage brush seals

5.2 新型各级差异化多级刷式密封流场特性分析

5.2.1 各级气流速度分布分析

如图 11 所示,在进出口压比 R_p 为 3.0 条件下,两种结构气流流速均逐级增加,末级出口处气流流速最大,且新型结构第一级出口气流流速大于传统结构。两种结构中第一级上游区域气流流速比较稳定,流速变化主要发生在各级后挡板以下靠近转子面区域,气流在此区域呈射流状流出。由速度矢量图可以看出,受第一、二级间腔内气流旋涡的影响,两种结构多级刷式密封各级刷丝束出口处有旋涡流现象,且新型结构中旋涡流强度逐级增加。传统结构中旋涡流强度几乎一致。

5.2.2 各级级间压力分布分析

如图 12 所示,两种结构的三级刷式密封进口处气流压力最高($R_p=3.0$),在流过刷丝束后压力逐级递减,进出口及各级间气流压力基本不变,压降主要发生在刷丝束区域。由速度矢量图可以看出,新型结构第一级间腔内气流旋涡靠近转子面,涡流方向为顺时针,第二级间腔内气流旋涡在腔

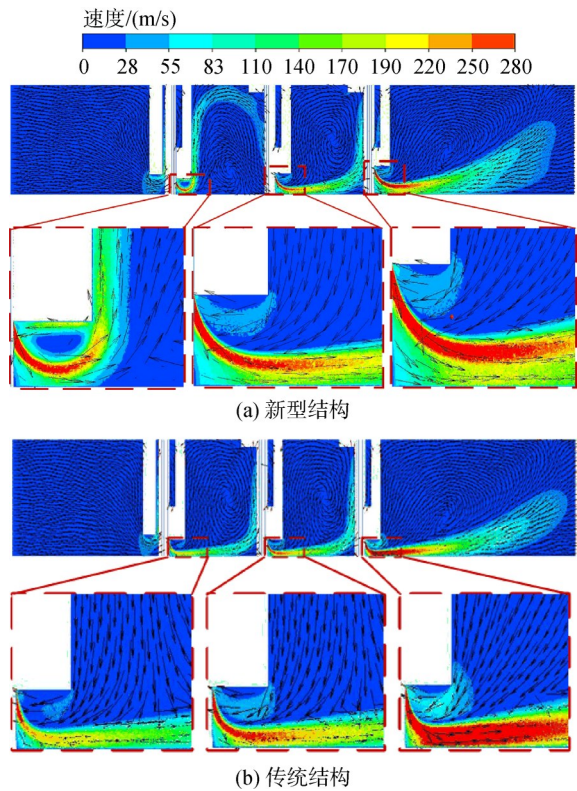


图 11 多级刷式密封轴向速度分布
Fig.11 Axial velocity distribution of multi-stage brush seals

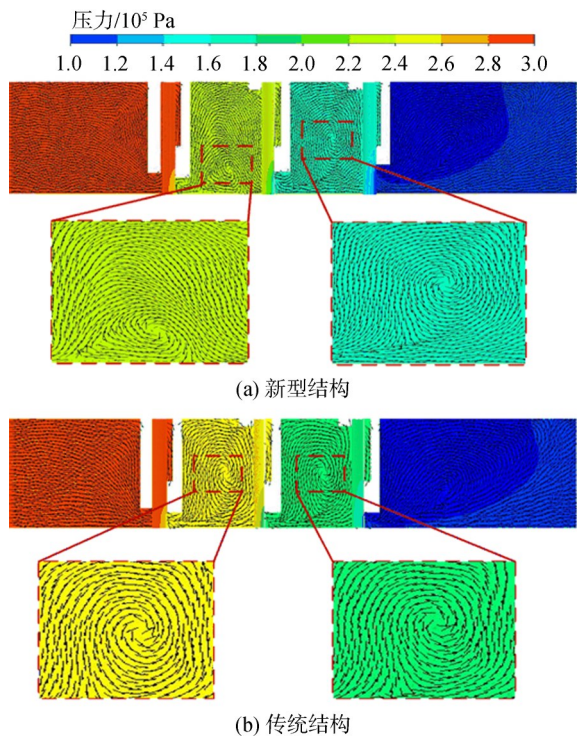


图 12 多级刷式密封轴向压力与速度矢量分布
Fig.12 Axial pressure and velocity vector distribution of multi-stage brush seals

室中部,涡流方向为逆时针;传统结构第一级间腔内、第二级间腔内气流旋涡均在腔室中部,涡流方

向均为逆时针。

图 13 给出了多级刷式密封各级轴向压力分布。从图中可以看出,在第一级刷丝束端部区域,新型结构压力变化总体从刷丝束端部中游区开始逐渐降低,传统结构在中下游区压力开始变化,且新型结构压力变化大于传统结构;在第二级刷丝束端部区域,两种结构气流压力总体在刷丝束中游偏上区域开始变化,较第一级压力初始变化区提前,且两种结构压力变化相差不大;在第三级刷丝束端区域,两种结构初始压力变化区较第二级

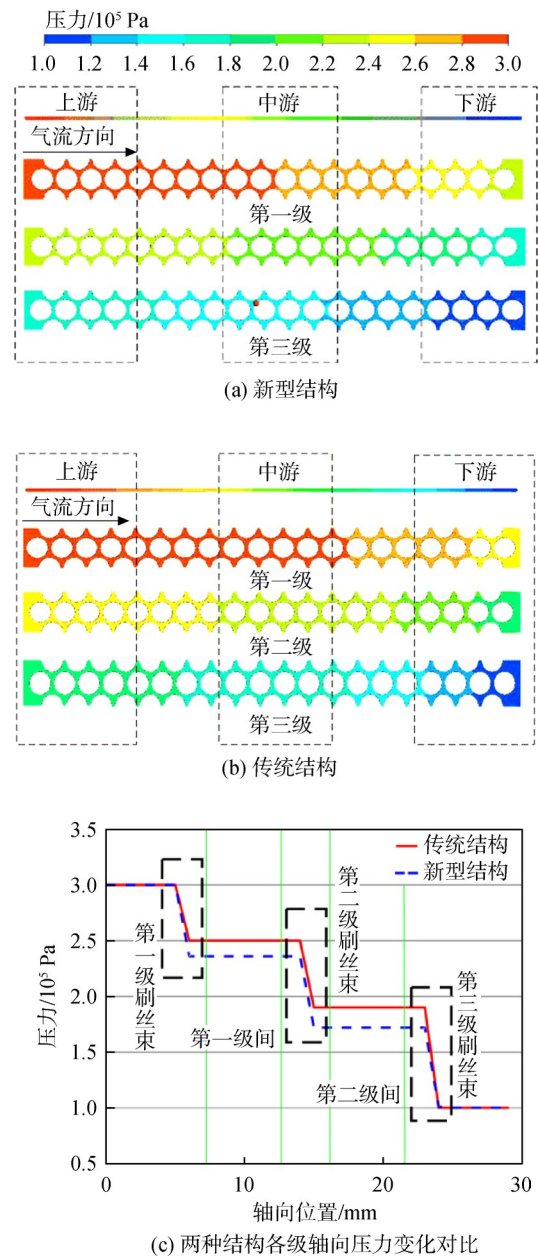


图 13 多级刷式密封各级轴向压力分布
Fig.13 Multi-stage brush seal axial pressure distribution at all stages

提前,新型结构比传统结构压力变化更早,上下游压差更小,各级压力变化较均匀。这是由于相较于传统结构,新型结构增大了第二、三级下游有效流通面积,末级压降降低,第一级压降增大,各级压降趋于均衡。两种结构第二级压降相差不大,第一级压降新型结构较大,故新型结构多级刷式密封第三级上下游压差小于传统结构。

5.3 新型各级差异化多级刷式密封级间压降

均衡性影响因素分析

5.3.1 后挡板保护高度对级间压降均衡性影响分析

定义级间压降占比 $x_i(i=1,2,3)$ 为各级刷式密封的上下游压降与总压降的比值。为了衡量传统结构和新型结构多级刷式密封级间压降均衡性,定义

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 (x_i - r)^2} \quad (10)$$

式中 σ 为多级刷式密封各级级间压降占比均衡性标准差, r 为本文三级刷式密封理想情况下各级压降占比的平均值,该值为 33.3%。

结构 A、B、C 为第二、三级后挡板保护高度逐级提高的新型结构,结构参数如表 4 所示,其他结构参数保持不变。从图 14 中可以看出,在进出口压比为 3.0 时,传统结构多级刷式密封数值计算结果各级压降占比最大差值为 19.7%,压降占比均衡性标准差 σ 为 8.41,各级压降占比存在明显差异,特别是第三级级间压降占比增加的幅度较大,末级刷丝束承受较大的压降容易提前失效进而导致密封整体失效。随着第二、三级后挡板保护高度逐渐提高,新型结构 A、B、C 各级级间压降占比数值计算结果最大差值分别为 6.5%、3.3%、4.5%,第二、三级级间压降占比逐渐降低;压降占比均衡性标准差 σ 分别为 2.66、2.07、2.31,均小于传统结构多级刷式密封,反映出新型结构级间压降均衡性较好。因此提高第二、三级后挡板保护

表 4 三种结构后挡板保护高度参数

Table 4 Height parameters of three types of structure tailgate protection

结构	后挡板保护高度/mm	
	第二级	第三级
A	2.5	3.5
B	2.8	3.8
C	3.1	4.1

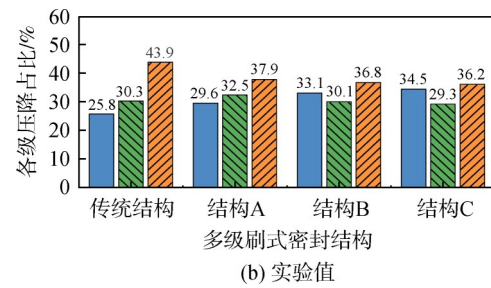
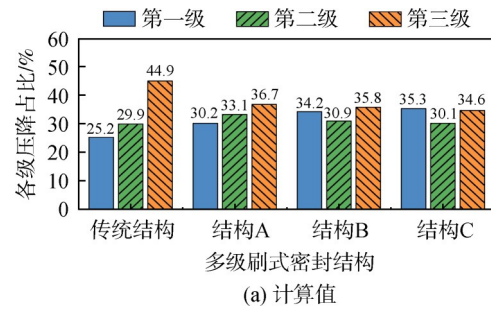


图 14 后挡板保护高度对新型结构级间压降分配影响

Fig.14 Effect of tailgate protection height on interstage pressure drop distribution between stages of new structure

高度可明显改善新型各级差异化多级刷式密封级间压降均衡性。

从图 15 中可以看出,传统结构和新型结构多级刷式密封泄漏量随着进出口压比的增加而增大。在相同进出口压比条件下,随着后挡板保护高度逐级增加,多级刷式密封泄漏量逐渐增大。新型结构 A、B、C 的泄漏量均大于传统结构,结构 C 的泄漏量最大,这意味着后挡板保护高度提高得越多,新型结构多级刷式密封泄漏量就越大。

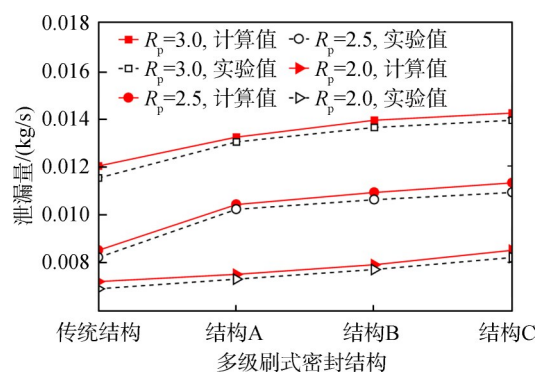


图 15 后挡板保护高度对新型结构泄漏特性影响

Fig.15 Effect of tailgate protection height on leakage characteristics of new structure

5.3.2 刷丝束厚度对级间压降均衡性影响分析

结构 D、E、F 为逐次减少第二、三级刷丝束厚

度的新型结构,结构参数如表 5 所示,其他结构参数保持不变。从图 16 中可以看出,进出口压比为 3.0 时,传统结构及新型结构 D、E、F 数值计算结果各级级间压降占比最大差值分别为 19.7%、10.3%、9.3%、8.2%,逐渐降低。传统结构级间压降均衡性标准差 σ 为 8.41,新型结构 D、E、F 级间压降均衡性标准差 σ 分别为 4.54、3.81、3.58,级间压降均衡性均优于传统结构。数值计算值与实验测量值各级压降占比最大相差为 1.3%。显示出减少第二、三级刷丝束厚度可改善新型结构多级刷式密封压降均衡性。

表 5 三种结构刷丝束厚度参数

Table 5 Thickness parameters of three types of brush bundles

结构	刷丝束厚度/mm	
	第二级	第三级
D	1.5	1.3
E	1.3	1.1
F	1.1	0.8

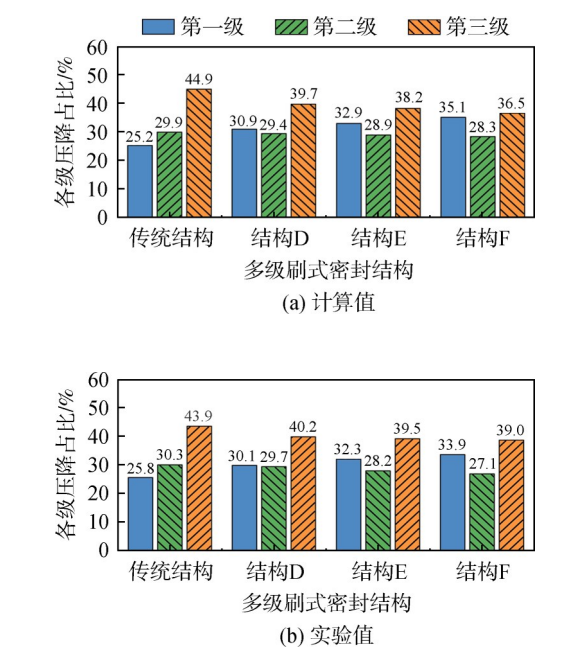


图 16 刷丝束厚度对新型结构级间压降分配影响

Fig.16 Effect of brush bundle thickness on interstage pressure drop distribution between new structures

图 17 给出了刷丝束厚度对新型结构泄漏特性影响。从图中可以看出,传统结构和新型结构多级刷式密封泄漏量随着进出口压比的增加而增

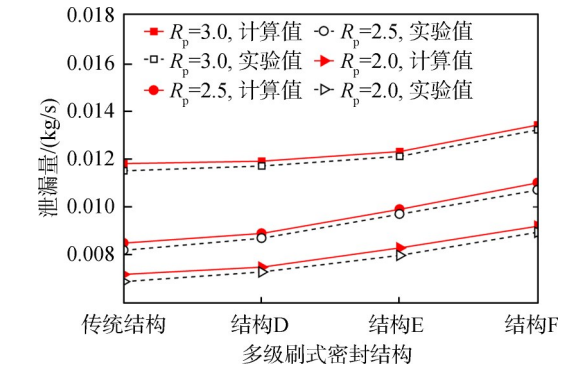


图 17 刷丝束厚度对新型结构泄漏特性影响

Fig.17 Effect of brush bundle thickness on leakage characteristics of new structure

大。在相同进出口压比条件下,随着刷丝束厚度逐渐减小,多级刷式密封的泄漏量逐渐增加,增加幅度较大。新型结构 D、E、F 的泄漏量均大于传统结构,结构 F 的泄漏量最大,这意味着刷丝束厚度减少得越多,新型结构多级刷式密封泄漏量就越大。

5.3.3 刷丝束与转子面间隙对级间压降均衡性影响分析

结构 L、M、N 为逐级增大第二、三级刷式密封刷丝束与转子面间隙的新型结构,结构参数如表 6 所示,其他结构参数保持不变。从图 18 中可以看出,随着刷丝束与转子面间隙逐渐增大($R_p=3.0$),传统结构及新型结构 L、M、N 各级级间压降占比均衡性标准差分别为 8.41、4.69、4.57、4.42,显示出新型结构的级间压降均衡性较好。结构 L、M、N 末级压降占比数值计算值相较于传统结构分别降低了 5.3%、6%、6.9%,实验测量值分别降低了 4.5%、4.9%、5.6%。尽管各新型结构末级承压仍较大,但各新型结构第一级级间压降占比逐渐增加,第二级级间压降占比变化不大,各级压降分配趋于均衡。结构 N 的第二、三级承受压

表 6 三种结构刷丝束与转子面间隙参数

Table 6 Clearance parameters of brush bundles and rotor surface of three structures

结构	刷丝束与转子面间隙/mm	
	第二级	第三级
L	0.01	0.02
M	0.02	0.03
N	0.03	0.04

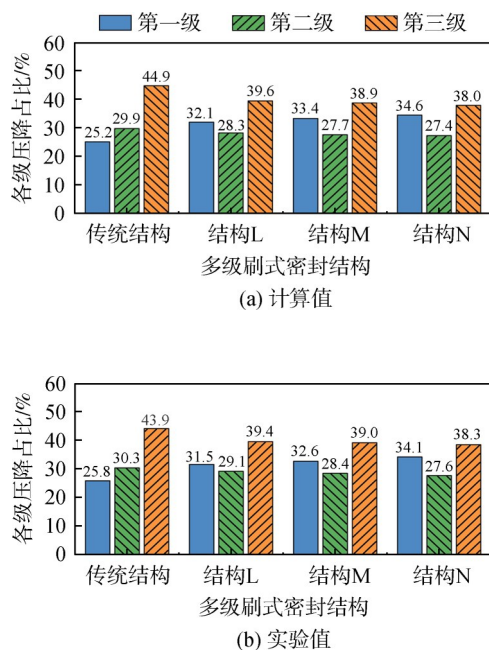


图 18 刷丝束与转子间隙对新型结构级间压降分配影响

Fig.18 Effect of clearance between brush bundle and rotor surface on interstage pressure drop distribution of new structure

降占比最小,且各级级间压降占比最接近。以上显示出改变第二、三级刷丝束与转子面间隙可改善新型结构多级刷式密封级间压降均衡性。

图 19 给出了刷丝束与转子面间隙对新型结构泄漏特性影响。从图中可以看出,传统结构和新型结构多级刷式密封泄漏量随着进出口压比的增加而增大。进出口压比不变时,随着刷丝束与转子面间隙逐渐增大,多级刷式密封的泄漏量逐渐增大。新型结构多级刷式密封 L、M、N 的泄漏量均高于传统结构,结构 N 的泄漏量相对较大,说

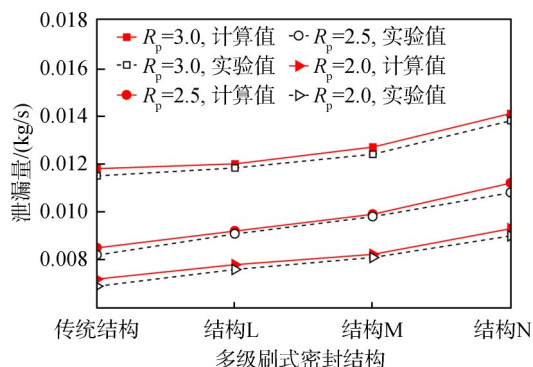


图 19 刷丝束与转子面间隙对新型结构泄漏特性影响

Fig.19 Effect of clearance between brush bundle and rotor surface on leakage characteristics of new structure

明刷丝束厚度减小得越多,新型结构多级刷式密封泄漏量就越大。

6 结 论

本文提出了新型各级差异化多级刷式密封结构,数值计算与实验测量相结合,研究了不同工况条件下,结构参数对新型结构多级刷式密封级间压降特性和泄漏特性的影响规律,具体结论如下:

1) 传统各级相同结构多级刷式密封级间压降的变化量逐级不均匀增加,存在着明显的级间压降不均衡性。增大下游级有效流通面积的新型各级差异化多级刷式密封各级级间压降变化量相近,级间压降变化较均衡。

2) 传统结构多级刷式密封各级级间压降占比均衡性标准差为 8.41。新型各结构各级级间压降占比最大均衡性标准差为 4.69,最小为 2.07,新型结构各级级间压降占比更接近,显示出新型结构级间压降均衡性优于传统结构。

3) 减少刷丝束厚度和增大刷丝束与转子面间隙的新型结构多级刷式密封中,各级级间压降占比均衡性标准差最大为 4.69,最小为 3.58。提高后挡板保护高度的新型结构各级级间压降占比均衡性标准差最大为 2.66,最小为 2.07,级间压降均衡性较好,对改善新型结构多级刷式密封级间压降均衡性作用较明显。

4) 由于增大了下游级有效流通面积,新型结构多级刷式密封泄漏量高于传统结构;减少刷丝束厚度及增大刷丝束与转子面间隙使新型结构多级刷式密封泄漏量变化得更明显。

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] BAYLEY F J, LONG C A. A combined experimental and theoretical study of flow and pressure distributions in a brush seal[J]. Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, 1993, 115(2):404-410.
- [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] 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):29-33,54.
HE Lidong, YUAN Xin, YIN Xin. The advance in the investigation of brush seal[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21

- (12):29-33, 54. (in Chinese)
- [5] FLOWE R R. Brush seal development system[R]. AIAA 90-2143, 1990.
- [6] 王凯杰, 杨义勇, 索双富, 等. 两级刷式密封的流动计算与系统参数的配置研究[J]. 润滑与密封, 2017, 42(10):43-47. WANG Kaijie, YANG Yiyong, SUO Shuangfu, et al. Analysis on flows of two-stage brush seals and research on configuration of system parameters[J]. Lubrication Engineering, 2017, 42(10):43-47. (in Chinese)
- [7] 刘璐园, 张元桥, 李军. 基于流固耦合方法的刷式密封刷丝变形及接触力特性的数值研究[J]. 燃气轮机技术, 2019, 32(1):1-7. LIU Luyuan, ZHANG Yuanqiao, LI Jun. Numerical investigations on the bristle deformation and contact force characteristics of brush seals using fluid-structure coupling method[J]. Gas Turbine Technology, 2019, 32(1):1-7. (in Chinese)
- [8] 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)
- [9] 邱波, 李军, 丰镇平. 考虑刷丝变形的刷式密封摩擦热效应研究[J]. 工程热物理学报, 2013, 34(11):2030-2034. QIU Bo, LI Jun, FENG Zhenping. Investigations on frictional heat generation of brush seals with consideration of bristle deflections[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 34(11):2030-2034. (in Chinese)
- [10] 吴施志, 江平, 李宁, 等. 刷式密封摩擦生热温度场数值计算及试验[J]. 航空动力学报, 2019, 34(4):737-743. WU Shizhi, JIANG Ping, LI Ning, et al. Numerical calculation and experiment on temperature field of friction heat generation of brush seal[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(4):737-743. (in Chinese)
- [11] 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)
- [12] 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)
- [13] 孙丹, 杜宸宇, 刘永泉, 等. 基于ALE流固耦合方法的刷式密封刷丝接触变形特性理论与试验研究[J]. 机械工程学, 2020, 56(9):170-180. SUN Dan, DU Chenyu, LIU Yongquan, et al. Theoretical and experimental investigation on the bristle contact deflections characteristics of brush seals based on ALE fluid-structure interaction method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(9):170-180. (in Chinese)
- [14] RABEN M, FRIEDRICHS J, FLEGLER J, et al. Brush seals used in steam environments-chronological wear development and the impact of different seal designs[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2016, 138(5):051901.1-051901.10.
- [15] RABEN M, FRIEDRICHS J, FLEGLER J. Brush seal frictional heat generation-test rig design and validation under steam environment[R]. ASME Paper GT-2016-56951, 2016.
- [16] 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.
- [17] 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[R]. ASME Paper 94-GT-266, 1994.
- [18] 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)
- [19] 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)
- [20] 张国强, 孙丹, 焦忠泽, 等. 两级刷式密封流动传热特性数值与实验研究[J]. 风机技术, 2020, 62(2):44-52. ZHANG Guoqiang, SUN Dan, JIAO Zhongze, et al. Numerical and experimental research on heat transfer characteristics of two-stage brush seal flow[J]. Chinese Journal of Turbomachinery, 2020, 62(2):44-52. (in Chinese)
- [21] 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):79-91. 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):79-91. (in Chinese)
- [22] 孙丹, 刘宁宁, 胡广阳, 等. 考虑刷丝变形的刷式密封流场特性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 seal with bristle deflections[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(10):2544-2553. (in Chinese)
- [23] 孙丹, 卢江, 刘永泉, 等. 篦齿封严风阻温升特性研究[J]. 航空学报, 2018, 39(11):70-79. SUN Dan, LU Jiang, LIU Yongquan, et al. Investigation on windage heating characteristics of labyrinth seals[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(11):70-79. (in Chinese)

(编辑: 陈 越)