

文章编号: 1000-8055(2024)11-20220955-10

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220955

对转盘腔轮缘斜向密封几何对 燃气入侵影响的数值研究

宋彦庆^{1,2}, 隋秀明^{2,4}, 佟鑫², 宋权斌¹, 赵巍^{2,3,4}, 赵庆军^{2,3,4,5}

- (1. 长沙理工大学 能源与动力工程学院, 长沙 410114;
2. 中国科学院 工程热物理研究所, 北京 100190;
3. 中国科学院大学 航空宇航学院, 北京 100049;
4. 中国科学院 轻型动力创新研究院, 北京 100190;
5. 中国科学院 工程热物理研究所 分布式冷热电联供系统北京市重点实验室, 北京 100190)

摘 要: 采用数值模拟方法研究了高压轮缘斜向密封几何对燃气入侵的影响, 结果表明: 小封严冷气流量下, 高压轮缘末端径向扩张引起轮缘间隙内压力梯度减小, 延缓了低压轮缘边界层分离, 而高压轮缘径向扩张引起下端区主流流速增大, 流体抵抗逆压梯度能力增强, 上述因素综合作用导致轮缘间隙内封严涡核径向位置上移, 受封严涡卷吸而发生的燃气入侵程度减弱, 封严效率因而提升 46.95%。随着封严冷气流量的增大, 盘腔内封严冷气压力逐渐提升, 冷气出流能力增强导致封严效率逐渐提升, 高压轮缘径向扩张诱发的封严涡核径向上移作用效果弱于冷气流量增大对封严效率的影响, 因而随着冷气流量的增加, 封严效率的提升幅度逐渐减小。

关 键 词: 燃气入侵; 对转涡轮; 对转盘腔; 轮缘斜向密封; 封严效率

中图分类号: V233.93

文献标志码: A

Numerical investigation for influence of chute seal configuration of a counter-rotating turbine cavity on hot gas ingestion

SONG Yanqing^{1,2}, SUI Xiuming^{2,4}, TONG Xin², SONG Quanbin¹,
ZHAO Wei^{2,3,4}, ZHAO Qingjun^{2,3,4,5}

- (1. College of Energy and Power Engineering,
Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China;
2. Institute of Engineering Thermophysics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
3. School of Aeronautics and Astronautics,
University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
4. Innovation Academy for Light-duty Gas Turbine,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
5. Beijing Key Laboratory of Distributed Combined Cooling Heating and Power System,
Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

收稿日期: 2022-12-15

基金项目: 国家科技重大专项(J2019-II-0011-0031, 2017-III-0010-0036)

作者简介: 宋彦庆(1997—), 男, 硕士生, 主要从事叶轮机气动热力学研究。E-mail: SongYQ_0123@163.com

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

引用格式: 宋彦庆, 隋秀明, 佟鑫, 等. 对转盘腔轮缘斜向密封几何对燃气入侵影响的数值研究[J]. 航空动力学报, 2024, 39(11): 20220955.

SONG Yanqing, SUI Xiuming, TONG Xin, et al. Numerical investigation for influence of chute seal configuration of a counter-rotating turbine cavity on hot gas ingestion[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(11): 20220955.

Abstract: The numerical simulation method was used to study the influence of the chute seal configuration of the high-pressure wheel flange on hot gas ingestion, and the results showed that under low sealing flow, the radial expansion of the end of the high-pressure wheel flange caused the decrease of pressure gradient in the wheel flange gap, which delayed the separation of the boundary layer of the low-pressure wheel flange, while the radial expansion of the high-pressure wheel flange caused the increase of mainstream flow velocity in the endwall region, and the ability of the fluid to resist the inverse gradient was enhanced. As a result, the sealing efficiency increased by 46.95%; with the increase of the sealing flow, the pressure of the sealing flow in the disk cavity gradually increased, the sealing efficiency was gradually improved due to the enhancement of the sealing flow outflow capacity, and the radial upward movement effect of the sealing vortex core induced by the radial expansion of the high-pressure wheel flange was weaker than the influence of the increase of the sealing flow on the sealing efficiency, so with the increase of the sealing flow, the increase of sealing efficiency gradually decreased.

Keywords: hot gas ingestion; counter-rotating turbine; counter-rotating cavity;
chute seal configuration; sealing efficiency

高温燃气入侵盘腔会烧蚀轮盘,降低轮盘强度,缩短使用寿命。为阻止高温燃气入侵盘腔,通常引压气机排气冷却并封严涡轮盘腔。冷气从盘腔流入主流会对涡轮的气动性能产生负面影响,每增加 1% 冷气量会导致涡轮效率下降 0.8%^[1]。性能优异的轮缘密封结构可在较少的冷气量下完成盘腔的封严,为减少冷气用量国内外研究人员针对轮缘高效密封结构进行了大量研究工作。

Horwood 等^[2]在 1.5 级涡轮实验台上对轮缘斜向密封结构内部流动进行了实验与数值研究,研究表明轮缘间隙中由于存在较强的剪切梯度,流动具有非定常特性,存在多个大涡结构,且轮缘间隙内流动结构会与动叶前缘马蹄涡发生干涉,影响端区二次流。Gao 等^[3]利用大涡模拟对轮缘间隙内部流动进行了研究,得出的结论与 Horwood 相似,指出在轮缘间隙中存在多个大涡结构。Jia 等^[4]研究了封严冷气与主流的相互作用,发现在轮缘间隙内封严冷气与入侵主流形成旋涡结构,导致燃气沿动盘入侵盘腔。丛庆丰等^[5]对径向密封结构的封严效率进行了研究,发现冷气流量的增加强化了冷气出流,减弱了径向轮缘密封处的燃气入侵,盘腔内的封严效率随着冷气流量的增加而增加。

Popović 等^[6]对轮缘密封结构几何参数进行了研究,发现静子封严唇与转子封严唇的重叠长度会影响径向密封结构的封严效率。高庆等^[7]研究了径向内齿长度、轴向间隙对径向轮缘密封结构封严特性的影响,指出冷气量一定时,随着径向内齿长度增加和轴向间隙减小,径向轮缘密封结

构封严效率升高。周小兵等^[8]设计了一种带圆孔的径向轮缘密封结构,指出圆孔直径较大及孔心距较大时,可以改善传统径向轮缘密封结构的封严性能。郭泽宇等^[9]发现随着封严齿间距增大及齿高减小,复合密封结构的最小封严流量增大。高庆等^[10]指出在相同冷气流量下,动静叶轴向距离越大,封严效率越高。

董伟林等^[11]设计了一种静盘封严环下端带有挡环的新型密封结构,指出主流雷诺数较小时,内挡环结构能够增加流动阻力,减弱动盘旋转带来的泵吸效应;雷诺数较大时,由主流剪切作用产生的回流区涡被内挡环结构限制,未深入盘腔内部,避免了其卷吸的主流燃气进入盘腔。张晶辉等^[12]提出了一种波浪形轮缘密封结构,发现其间隙较小位置对燃气入侵形成阻力。Horwood 等^[13]针对重叠轮缘密封结构,通过实验测量和数值模拟的方法研究了涡轮主流、入侵燃气和封严冷气的共同作用。Sangan 等^[14]发现相比于径向轮缘密封结构,复合轮缘密封结构将入侵燃气限制在外部腔室中,提高了盘腔内部的封严效率。Chen 等^[15]设计了 7 种不同槽型的径向轮缘密封结构,发现沟槽结构增大了入侵燃气的流动阻力,提高了封严效果。高庆等^[16]提出了蜂窝面径向轮缘密封结构,指出蜂窝孔会增大燃气的流动阻力,提高了封严效果。罗擎阳等^[17]对具有咬合齿的密封结构进行了研究,表明封严齿的存在使轮缘间隙内流动结构更加复杂,流动阻力增大,入侵燃气被限制在咬合容腔中。

综上所述,国内外学者针对不同的轮缘密封

结构进行了大量研究, 得出了许多对轮缘密封结构优化设计具有重要指导意义的研究成果。但现有研究多是针对转静盘腔, 对转盘腔内高压轮盘相对旋转, 产生了不同于转静盘腔的两个反向旋转的大涡结构, 现有针对转静盘腔轮缘密封结构优化设计的成果可能不适用于对转盘腔, 且目前公开文献中鲜有轮缘几何对对转盘腔轮缘密封结构封严特性影响的相关研究。为此本文以无导叶对转涡轮中的对转盘腔为研究对象, 分析轮缘几何对轮缘间隙内涡系结构及封严效率的影响效应, 提出了适用于对转盘腔的新型密封结构。

1 计算模型及数值方法

1.1 计算模型

本文的研究对象为无导叶对转涡轮 (VCRT) 中对转盘腔的轮缘斜向密封结构。VCRT 参数如表 1 所示, 图 1 为 VCRT 结构示意图。在划分计算域时, 由于轮缘几何变化会影响主流道网格的生成, 故将轮缘密封结构对应的主流道区域与其他主流道区域分割, 和盘腔设置为一个计算域, 如图 1 中灰色区域所示。导叶设置为静止域, 高压、低压转子均设置为转动域, 盘腔与轮缘密封结构对应的主流道区域设置为静止域, 因此, 高压动叶与低压动叶之间存在两个转静交界面。

表 1 VCRT 参数

Table 1 Parameters of the VCRT

参数	高压导叶	高压动叶	低压动叶
叶片数	37	31	35
展弦比	2.01	1.68	1.98

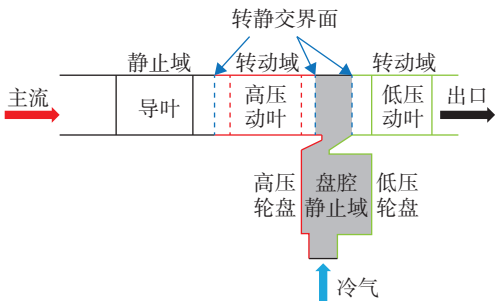


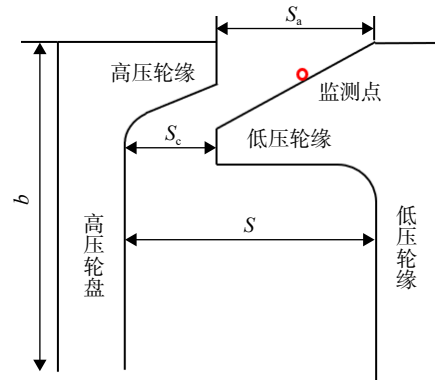
图 1 VCRT 结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the VCRT

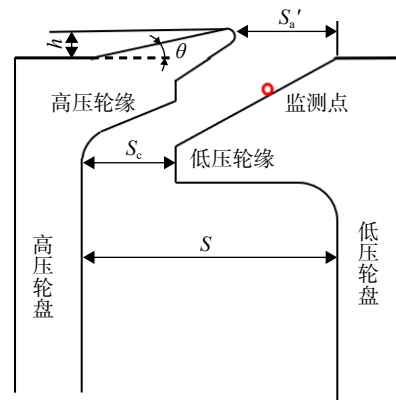
在涡轮中, 当主流道压力大于盘腔内压力时, 轮缘间隙内会产生径向向下 (由主流道指向盘腔) 的压力梯度, 在此压力梯度的作用下, 轮缘间隙

附近的主流会沿轮缘间隙入侵盘腔。通过增大轮缘间隙附近主流径向向上 (由盘腔指向主流道) 的动量, 可增强其对抗压力梯度的能力, 减弱燃气入侵的程度, 进而提升密封结构的封严效率。同时, 根据 Popović 等^[6]的研究结果, 增加封严唇的重叠长度可以提升密封结构的封严效率。基于上述考虑, 在轮缘斜向密封结构的基础上, 本文提出了高压轮缘轴向长度增加且具有扩张角 θ 的新型轮缘斜向密封结构。

图 2 展示了本文采用的两个计算模型, 其中, 图 2(a) 所示的轮缘斜向密封结构作为参考原型 (下文称为“原型”), 图 2(b) 所示的高压轮缘轴向长度增加且具有扩张角 θ 的轮缘斜向密封结构作为改型 (下文称为“改型”), 两个计算模型的具体几何参数如表 2 所示。计算模型中低压轮缘侧红色圆圈为封严效率监测点, 其径向位置为 $r/b=0.99$, r 为半径, b 为轮盘半径。



(a) 原型



(b) 改型

图 2 计算模型结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the calculation model structure

1.2 参数定义

本文中冷气量由流量比 Q 表示, 流量比 Q 定义为封严冷气质量流量与涡轮入口质量流量之比

表 2 计算模型几何参数

Table 2 Geometry parameters of calculate model

几何参数	数值
高、低压轮盘间距 S	$0.12b$
低压轮缘与高压轮盘间距 S_c	$0.03b$
原型轮缘密封轴向间距 S_a	$0.05b$
改型轮缘密封轴向间距 S'_a	$0.04b$
高压轮缘扩张高度 h	$0.003b$

$$Q = \frac{q_{m, \text{seal}}}{q_{m, \text{main}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中 q_m 代表质量流量, 下标 seal 代表盘腔入口位置, 下标 main 代表涡轮入口位置。

实验时, 研究人员通常采用浓度法计算封严效率, 即在主流中加入示踪气体, 测量其在盘腔内的体积分数, 利用体积分数计算密封结构的封严效率。在数值计算时, 通常设置一个标量附加变量用来代表实验中的示踪气体^[18]。求解附加变量的湍流输运方程得到其在盘腔及轮缘间隙中的

$$\eta = \frac{q_{m, \text{main}} c_{p, \text{main}} (T_{\text{in, main}} - T_{\text{out}}) + q_{m, \text{ejection}} c_{p, \text{ejection}} (T_{\text{in, ejection}} - T_{\text{out}})}{q_{m, \text{main}} c_{p, \text{main}} T_{\text{in, main}} \left[1 - \left(\frac{p_{\text{out}}}{p_{\text{in, main}}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] + q_{m, \text{ejection}} c_{p, \text{ejection}} T_{\text{in, ejection}} \left[1 - \left(\frac{p_{\text{out}}}{p_{\text{in, ejection}}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]} \quad (5)$$

式中 $q_{m, \text{main}}$ 与 $q_{m, \text{ejection}}$ 分别为主流与冷气质量流量; $c_{p, \text{main}}$ 和 $c_{p, \text{ejection}}$ 分别为主流与冷气比定压热容; $T_{\text{in, main}}$ 和 $T_{\text{in, ejection}}$ 分别为主流与冷气入口总温; $p_{\text{in, main}}$ 和 $p_{\text{in, ejection}}$ 分别为主流与冷气入口总压; T_{out} 和 p_{out} 分别为主流出口总温与总压; γ 为比热比。

1.3 数值方法

图 3 为计算网格及轮缘密封处网格细节图。主流道网格使用 IGG-AutoGrid5 模块 OH 网格进行划分。盘腔域网格采用 ICEM 进行结构化网格划分, 轮缘间隙处网格与主流道网格在周向上节点数保持一致以保证数据传输精度。对壁面处网格进行加密处理, 主流道壁面第 1 层网格高度为 0.01 mm, 盘腔壁面第 1 层网格高度为 2.4 mm, 第 1 层网格的 y^+ 值均在 1 左右。

为验证网格无关性, 对不同数量的网格进行了计算。图 4(a) 展示了轮缘间隙出口上游高压轮缘附近周向静压分布随网格数的变化规律, 横坐标周向位置进行归一化处理。从图中可知, 网格数为 1 200 万与 1 300 万时的静压分布曲线基本重合。图 4(b) 为原型封严效率随网格数的变化规律, 图中封严效率采用监测点的封严效率表示, 监测点位置如图 2 所示。从图中可知, 网格数为 1 200 万与 1 300 万时的封严效率仅相差 0.063%。

分布, 再采用浓度法计算封严效率 ε_c

$$\varepsilon_c = \frac{c_s - c_a}{c_0 - c_a} \quad (2)$$

式中 c_s 、 c_a 和 c_0 分别表示当地、主流入口及冷气入口的附加变量值。主流入口附加变量值设置为 0, 冷气入口附加变量值设置为 1。当 ε_c 为 1 时, 代表当地充满了冷气; 当 ε_c 为 0 时, 代表当地充满了主流。

旋转雷诺数 Re_ϕ 定义为

$$Re_\phi = \frac{\rho \omega b^2}{\mu} \quad (3)$$

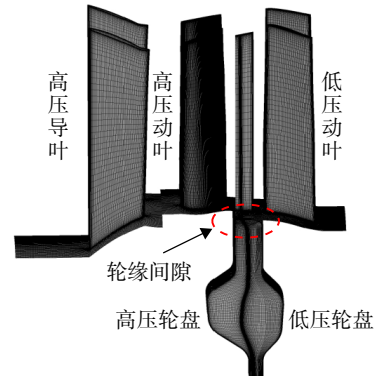
式中 ρ 为密度, ω 为轮盘角速度, μ 为动力黏度。

无量纲封严流量 C_w 定义为

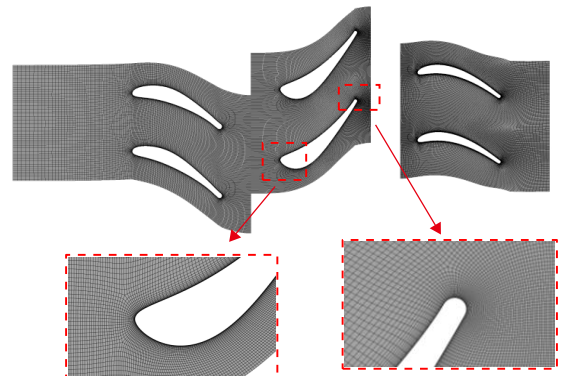
$$C_w = \frac{q_{m, \text{seal}}}{\mu b} \quad (4)$$

涡轮效率采用文献 [19] 中的计算方法, 计算公式如下:

综上所述, 可认为在 1 200 万网格的基础上进一步增加网格数量, 计算结果已没有太大差别, 故



(a) 计算域网格



(b) 主流道网格

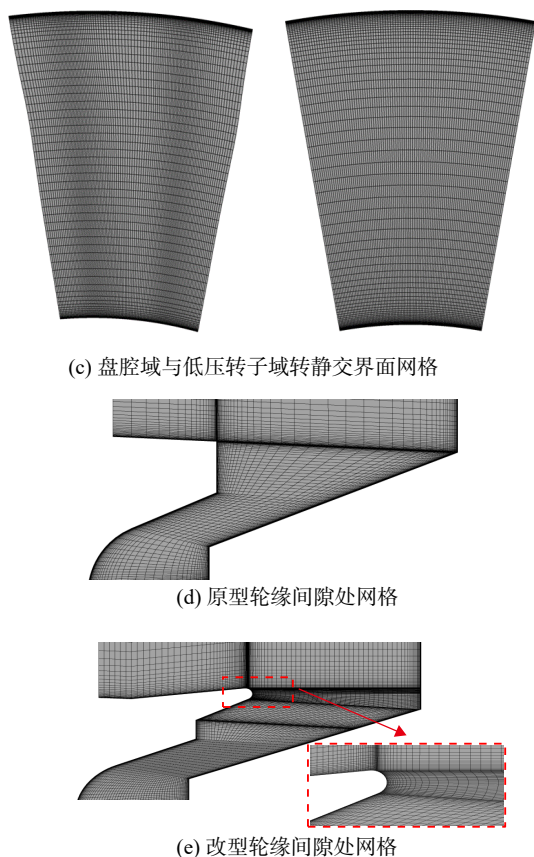
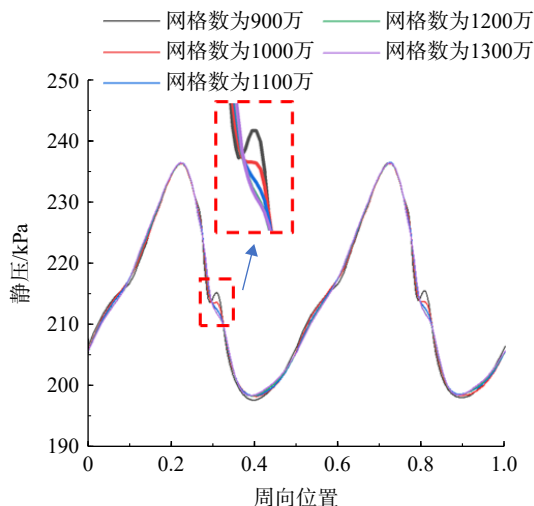


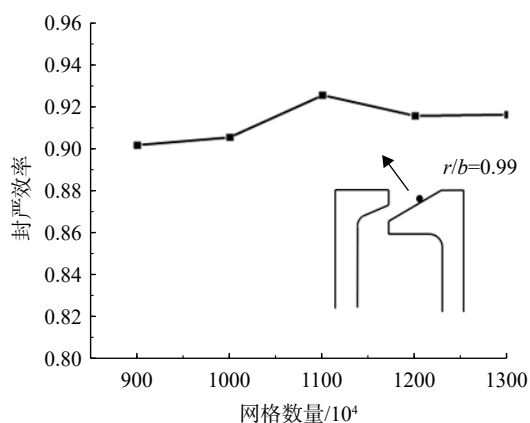
图 3 计算网格

Fig. 3 Computational mesh

采用 1 200 万网格进行数值计算。采用的网格中, 高压导叶域周向节点数为 118, 轴向节点数为 117, 展向节点数为 107, 总网格数为 147 万; 高压转子域轴向节点数为 178, 展向节点数为 145, 总网格数为 304 万; 低压转子域轴向节点数 194, 展向节点数 161, 低压转子域总网格数为 372 万; 主流道网格总数 889 万。轮缘间隙处网格轴向节点数



(a) 轮缘间隙出口静压分布随网格数变化



(b) 封严效率随网格数变化

图 4 网格无关性验证

Fig. 4 Mesh independence validation

为 57, 周向节点数与主流道保持一致为 118, 盘腔计算域网格总数 331 万。

采用 Ansys CFX 对三维雷诺时均 Navier-Stokes 方程 (RANS) 进行数值求解, 湍流模型选取 shear stress transport (SST) 模型。工质选用理想空气, 主流进口总温为 1 200 K, 总压为 0.43 MPa; 封严冷气入口设置为质量流量入口, 冷气总温为 570 K; 主流出口静压为 0.16 MPa。高压轮盘旋转雷诺数 $Re_\phi=5.21 \times 10^7$, 低压轮盘旋转雷诺数 $Re_\phi=4.93 \times 10^7$ 。固体壁面采用无滑移绝热壁面。转静交界面类型采用 Frozen-Rotor。当动量、能量及连续性方程的残差值均小于 10^{-5} , 且涡轮进出口流量、涡轮效率及监测点封严效率不再变化或产生规律波动时, 认为计算收敛。

为验证数值方法的可靠性, 利用 Gan 等^[20] 论文中的实验数据与数值计算结果进行了对比, 数值计算采用的计算模型依照文献 [20] 中的实验装置建立。图 5 展示了计算工况为 $C_w=2\ 310$ 、

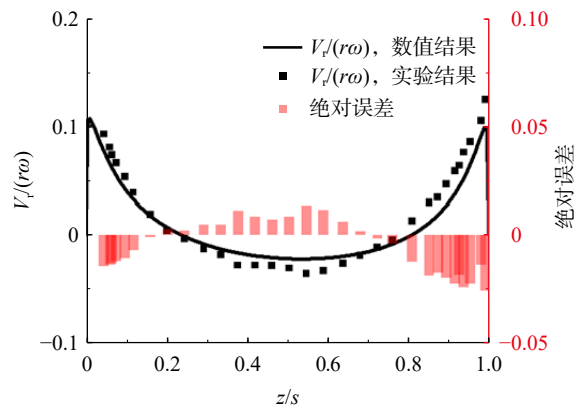


图 5 数值方法验证

Fig. 5 Numerical method validation

$Re_\phi=6.66 \times 10^5$ 时, 对转盘腔中 $r/b=0.6$ 处径向速度分布的计算值与实验数据的对比结果, 图中左侧纵坐标表示无量纲化的径向速度 ($V_r/(r\omega)$, V_r 为径向速度, r 为半径, ω 为轮盘转速), 横坐标表示无量纲化的轴向位置 (z/s , z 为距上游盘距离, s 为上游盘与下游盘间距)。从图中可知数值结果与实验结果的最大绝对误差小于 0.024, 且数值结果显示与实验结果相似分布规律, 因此, 本文采取的数值方法是可靠的。

2 结果与讨论

2.1 封严效率对比

图 6 为不同冷气量时两种轮缘密封结构的封严效率, 从图中可知, 在 0.1%~0.5% 冷气量范围内, 改型的封严效率均大于原型, 当冷气量低于 0.4% 时, 改型的封严性能明显优于原型, 但随着冷气量的增加, 改型与原型的封严效率差距逐渐缩小。当 $Q=0.1\%$ 时, 改型的封严效率较原型提升 46.95%, 而 $Q=0.4\%$ 时, 改型较原型封严效率仅提升 0.63%。

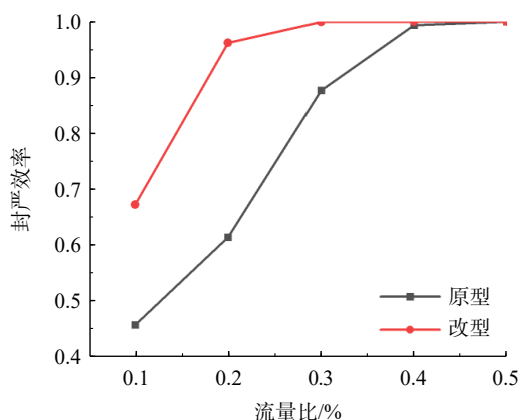


图 6 密封结构封严效率对比

Fig. 6 Comparison of sealing efficiency of sealing structure

为探究改型封严效果优于原型的原因, 以及改型对封严效率的提升作用随冷气量增加逐渐减弱的原因, 本文对 $Q=0.1\%$ 和 $Q=0.4\%$ 两种冷气量工况下, 两种密封结构轮缘间隙内流场进行了对比与分析。

2.2 $Q=0.1\%$ 轮缘间隙流动结构分析

图 7 给出了 $Q=0.1\%$ 时两种密封结构轮缘间隙出口截面的径向速度分布云图。如图所示, 在轮缘间隙出口截面上, 两种密封结构均出现了径向速度正负交替分布的现象。这是因为低压动叶

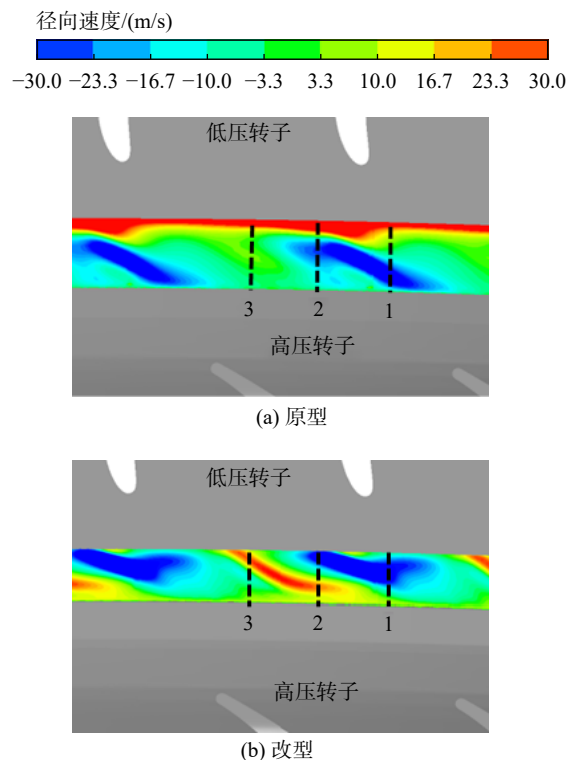


图 7 轮缘间隙出口径向速度云图

Fig. 7 Outlet axial velocity cloud graph of wheel flange clearance

前缘由于主流滞止形成高压区, 同时, 高压动叶尾缘由于吸、压力面流体掺混也形成高压区, 在两个高压区的共同作用下, 轮缘间隙出口处形成局部高压区域, 易发生燃气入侵。在远离低压动叶前缘以及高压动叶尾缘的区域, 轮缘间隙出口压力降低, 冷气更易流出, 因此轮缘间隙出口截面上形成了径向速度交替分布的现象。相比于原型, 改型轮缘间隙出口 1、2 位置, 负径向速度区域向低压转子迁移; 3 位置冷气出流区域的径向速度增大, 这对阻止燃气入侵, 提升封严效率是有益的。原型靠近低压转子侧出现了条带状正径向速度区域, 其形成原因将在下文进行分析。

图 8 给出了 $Q=0.1\%$ 时两种密封结构轮缘间隙内 3 个子午截面的静压分布及流线图, 各截面位置如图 7 所示。在截面 1 位置, 由于主流在低压动叶前缘滞止形成高压区, 导致轮缘间隙内出流冷气做逆压流动, 沿低压轮缘壁面流动的封严冷气在轮缘间隙内逆压梯度的作用下发生流动分离, 进而形成封严涡结构。受低压转子前缘高压区影响, 主流在轴向上做逆压流动, 靠近高压转子轮毂面动能较低的主流 (如图 8 中红色流线所示), 在逆压梯度和封严涡的共同作用下被卷吸进轮缘间隙中, 故在轮缘间隙出口截面 1 位置形

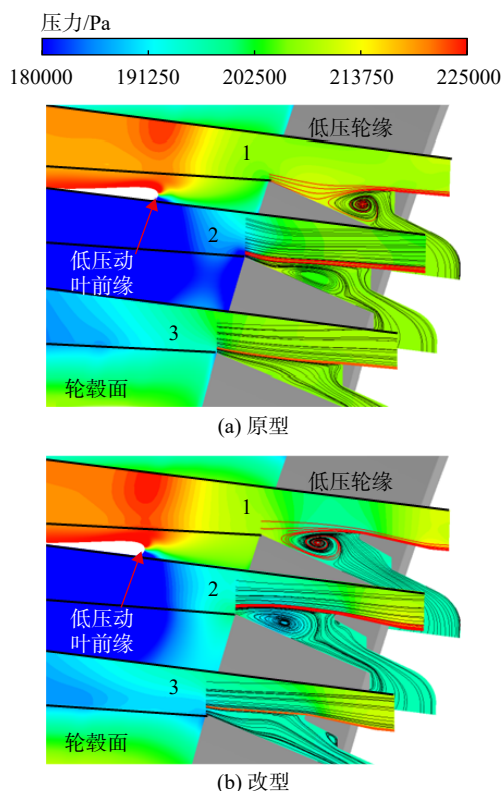


图 8 轮缘间隙流线、压力云图及低压转子轮毂面压力云图

Fig. 8 Wheel flange clearance streamline, pressure cloud graph and low pressure rotor hub face pressure cloud graph

成径向速度小于零的区域。在截面 2 位置, 由于远离低压动叶前缘高压区, 低压转子通道内压力降低, 轮缘间隙内出流冷气做顺压流动, 封严涡在顺压梯度作用下向下游迁移进而径向位置升高, 同时封严涡结构轴向尺度增大。上述因素导致主流入侵轮缘间隙的位置向低压转子迁移, 因此轮缘间隙出口截面 2 位置负径向速度区域较 1 位置更靠近低压转子。在截面 2 至截面 3 范围内, 由于轮缘间隙中冷气均为顺压流动, 封严涡结构逐渐消失, 导致主流不被吸进轮缘间隙, 因此轮缘间隙出口截面 3 位置的径向速度大于零。

原型截面 1、2 位置, 红色流线表示的主流中部分流体因动能较高, 可在逆压梯度下继续沿低压轮缘壁面流出轮缘间隙, 截面 3 位置, 封严冷气沿低压轮缘壁面流出。综上所述, 形成了图 7(a) 中轮缘间隙出口截面低压转子侧条带状正径向速度区域。

封严涡卷吸主流导致燃气入侵, 其径向位置影响着燃气入侵的程度。在截面 1、2 位置, 改型轮缘间隙内封严涡核的径向位置较原型升高 0.2%~0.4%。这表明改型可减弱燃气入侵程度进

而提升密封结构的封严效果。下文将对改型轮缘间隙内封严涡径向位置升高的原因进行分析。

图 9 为两种密封结构截面 1 处轮缘间隙内压力梯度分布云图。如图所示, 相比于原型, 改型轮缘间隙中低压力梯度区域(图 7 中蓝色区域)向下游扩大。这是由于高压轮缘向下游延伸, 导致高低压轮缘轴向重合长度增加, 轮缘间隙内流通截面较小的区域增加。根据伯努利原理可知, 当流通截面变化较小时, 流体的压力变化较小即压力梯度较小。随着高低压轮缘轴向重合长度增加, 低压力梯度区域随之扩大。这导致改型轮缘间隙内低压轮缘边界层延迟分离, 封严涡轴向位置向下游迁移, 径向位置提升。

图 10 展示了两种密封结构高压轮缘处速度云图。从图中可以看出, 在高压轮缘左端(图 10 黑色方框处)壁面附近, 改型主流流速较原型增大。这是由于高压轮缘径向扩张导致主流道流通截面缩小, 使得主流加速, 尤其是在轮毂面附近主流流速增加更为明显。图 11 为两种密封结构高压轮缘附近同一轴向位置主流速度对比, 以及改型主流速度相对原型的变化量, 轴向位置如图 10(a) 中点 1 所示, 横坐标周向位置进行归一化处理。从图中可知, 在不同周向位置, 改型高压轮毂面的主流速度较原型提升了 0%~37.7%。主流速度增大代表具有更强的抗逆压梯度能力, 故封严涡卷吸主流进入轮缘间隙的位置更靠近低

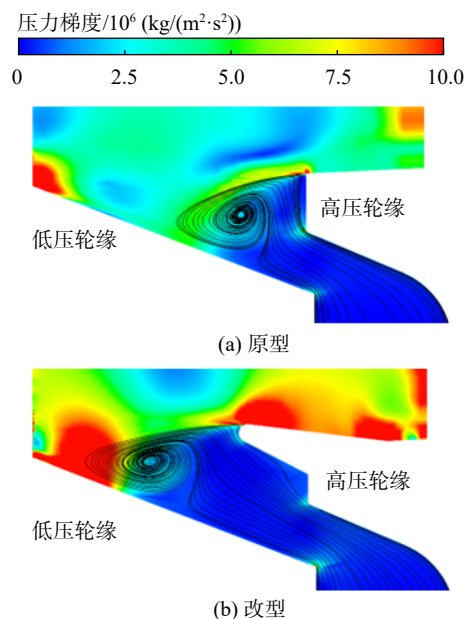


图 9 截面 1 压力梯度云图及冷气流线

Fig. 9 Pressure gradient cloud graph and cold air flow line of section 1

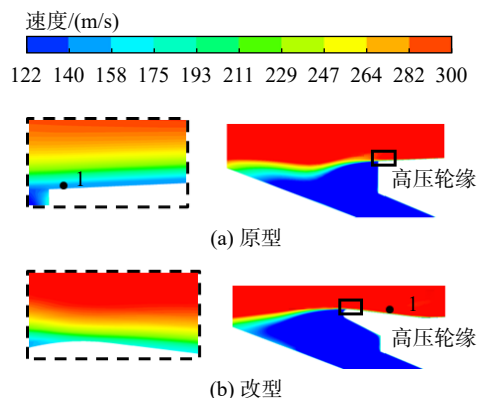


图 10 截面 1 高压轮缘处速度云图

Fig. 10 Velocity cloud graph at the high-pressure rim of section 1

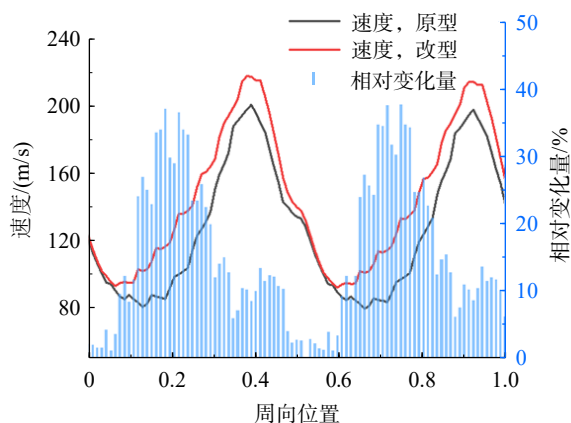


图 11 点 1 速度周向分布曲线及相对变化量

Fig. 11 Circumferential distribution curves of velocity at point 1 and relative change

压转子。这导致改型轮缘间隙出口截面 1、2 位置处负径向速度区域向低压转子迁移。

随着主流入侵轮缘间隙的位置向低压转子迁移以及受封严涡的阻碍作用,主流流入轮缘间隙再沿低压轮缘流出的现象消失,因此改型密封结构轮缘间隙出口截面低压转子侧没有出现条带状的正径向速度分布。

图 12 为两种密封结构轮缘间隙内截面 2 位置径向速度分布云图。从图中可知,改型轮缘间隙中径向速度大于原型。这是因为封严涡对出流冷气具有阻碍作用,冷气沿径向向上由封严涡与高压轮缘形成的间隙流出,改型由于高压轮缘向下游延伸,封严涡与高压轮缘形成的间隙缩小,导致出流冷气流速增大。故轮缘间隙出口 2 与 3 位置之间,改型的径向速度较原型增大。

综上所述,改型由于封严涡向下游迁移,径向位置升高,进而导致燃气入侵程度减弱;高压轮

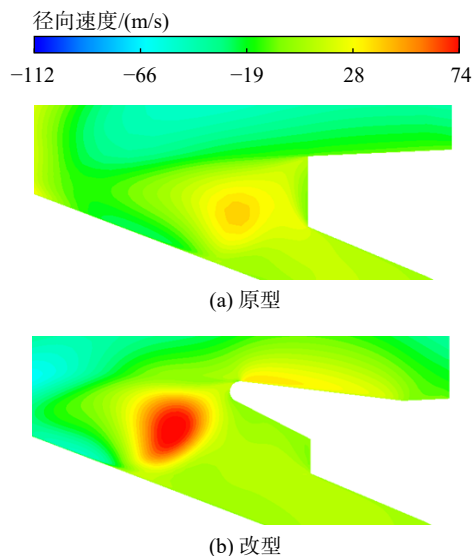


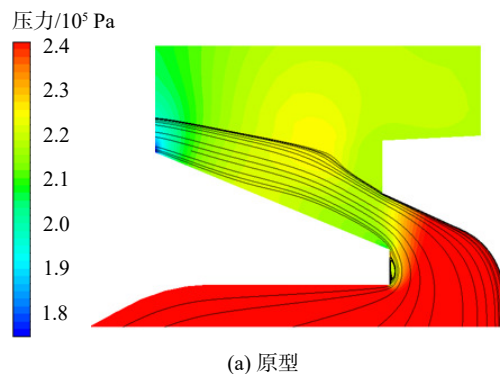
图 12 截面 2 轮缘间隙径向速度云图

Fig. 12 Wheel flange clearance radial velocity cloud graph of section 2

缘处主流流速增大,使得主流入侵轮缘间隙的位置向下游迁移,轮缘间隙出口截面径向速度小于 0 的区域集中在低压转子前缘;低压转子侧径向速度大于 0 的条带状区域未出现;出流冷气径向速度增大,阻止燃气入侵能力增强。综上所述,改型封严效率相比原型提升 46.95%。

2.3 $Q=0.4\%$ 轮缘间隙流动结构分析

当 $Q=0.4\%$ 时,原型与改型的封严效率分别为 0.999 74、0.999 82,改型相较原型封严效率仅提升 0.63%,改型对封严效率的提升作用基本消失。如图 13 所示,随着冷气流量增加,盘腔内压力大于主流通道内压力,轮缘间隙内出流冷气做顺压流动,沿低压轮缘壁面流动的冷气不产生流动分离,封严涡结构消失。随着封严涡的消失,改型由于高压轮缘径向扩张诱发的封严涡径向位置上移对封严效率的提升作用随之减弱,冷气流量对封严效率的影响增强。综上所述,随冷气量的增大,改型封严效率的提升幅度逐渐减小。



(a) 原型

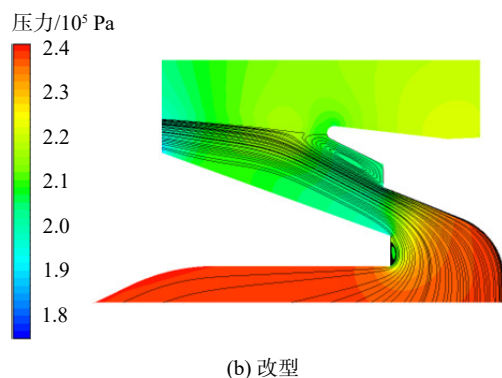


图 13 截面 1 轮缘间隙压力云图及流线

Fig. 13 Wheel flange clearance pressure cloud graph and streamlines of section 1

2.4 涡轮效率对比

高压轮缘径向扩张, 导致主流道流通截面缩小, 可能会对对转涡轮气动性能造成负面影响, 故对两种密封结构的涡轮效率进行对比分析。

表 3 为 $Q=0.1\%$ 至 $Q=0.5\%$ 范围内改型的涡轮效率较原型的相对变化。从表中可知, 在 $Q=0.1\%$ 至 $Q=0.5\%$ 范围内, 改型的涡轮效率均低于原型; 当 $Q \leq 0.3\%$ 时, 改型的高压效率低于原型, 但当 $Q > 0.3\%$ 时, 改型的高压效率大于原型。 $Q=0.1\%$ 至 $Q=0.5\%$ 范围内, 变化最大的效率参数为 $Q=0.2\%$ 时的低压效率, 改型相对原型下降了 0.043% , 其余工况下各效率参数相对变化均不超过 0.04% 。综上所述, 在冷气量 0.1% 至 0.5% 范围内, 改型封严结构有效改善封严效率的同时, 对涡轮效率造成的负面影响较小。

表 3 改型密封结构涡轮效率相对原型密封结构变化
Table 3 Turbine efficiency of the modified sealing structure is changed compared to the prototype sealing structure %

流量比	涡轮效率	高压效率	低压效率
0.1	-0.015	-0.011	0.040
0.2	-0.018	-0.007	-0.043
0.3	-0.025	-0.009	0.025
0.4	-0.020	0.001	-0.008
0.5	-0.015	0.001	-0.007

3 结 论

本文采用数值模拟方法研究了高压轮缘斜向密封几何对封严特性的影响, 得出以下结论:

1) 小冷气流量时, 盘腔内压力低于低压动叶前缘主流压力, 出流冷气在轮缘间隙内做逆压流动进而发生流动分离, 形成封严涡结构。高压轮

缘径向扩张引起轮缘间隙内压力梯度减小, 延缓了低压轮缘壁面处边界层分离。高压轮缘径向扩张使得主流道流通截面缩小, 主流流速增加, 抵抗逆压梯度能力增强。上述因素综合作用导致改型轮缘间隙中封严涡径向位置提升, 受封严涡卷吸而发生的燃气入侵程度减弱。当 $Q=0.1\%$ 时, 改型封严效率较原型提高 46.95% 。

2) 随冷气量增加, 盘腔内封严冷气压力升高, 冷气出流能力增强, 燃气入侵被抑制, 封严效率得到提升。冷气顺压流动导致轮缘间隙内封严涡结构消失, 高压轮缘径向扩张诱发的封严涡核径向上移作用效果弱于冷气流量增大对封严效率的影响, 故随封严冷气量增加, 高压轮缘径向扩张引起的封严效率提升幅度逐渐减小, 当 $Q=0.4\%$ 时, 改型封严效率较原型仅提升 0.63% 。

3) 高压轮缘径向扩张对涡轮气动性能造成了负面影响, 但在 $Q=0.1\%$ 至 $Q=0.5\%$ 范围内, 改型的涡轮效率较原型降低均不超过 0.043% 。高压轮缘径向扩张对涡轮气动性能影响较小, 并可提升封严效率。

参考文献:

- [1] DAHLQVIST J, FRIDH J. Experimental investigation of turbine stage flow field and performance at varying cavity purge rates and operating speeds[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2018, 140(3): 031001.
- [2] HORWOOD J T M, HUALCA F P, WILSON M, et al. Flow instabilities in gas turbine chute seals[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2020, 142(2): 021019.
- [3] GAO Feng, CHEW J W, MARXEN O. Inertial waves in turbine rim seal flows[J]. *Physical Review Fluids*, 2020, 5(2): 024802.
- [4] JIA Wei, LIU Huoxing. Numerical investigation of the interaction between upstream cavity purge flow and main flow in low aspect ratio turbine cascade[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2013, 26(1): 85-93.
- [5] 丛庆丰, 李志刚, 程舒娴, 等. 涡轮径向轮缘密封非定常燃气入侵和封严效率的数值研究[J]. *推进技术*, 2022, 43(6): 88-98.
CONG Qingfeng, LI Zhigang, CHENG Shuxian, et al. Numerical investigations on unsteady gas ingestions and sealing effectiveness of turbine radial rim seal[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(6): 88-98. (in Chinese)
- [6] POPOVIĆ I, HODSON H P. The effects of a parametric variation of the rim seal geometry on the interaction between hub leakage and mainstream flows in high pressure turbines[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2013, 135(11): 112501.
- [7] 高庆, 李军. 径向轮缘密封封严效率的数值研究[J]. *西安交通大学学报*, 2014, 48(9): 55-61.
GAO Qing, LI Jun. Numerical investigations for sealing efficiency of the turbine rim radial seal[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2014, 48(9): 55-61. (in Chinese)
- [8] 周小兵, 吴艳辉, 郭鑫, 等. 高压涡轮圆柱孔状径向轮缘密

- 封封严特性的数值研究[J]. 推进技术, 2022, 43(2): 167-176.
- ZHOU Xiaobing, WU Yanhui, GUO Xin, et al. Numerical study on sealing characteristics of high-pressure turbine cylindrical hole radial rim seal[J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(2): 167-176. (in Chinese)
- [9] 邬泽宇, 罗翔, 刘冬冬, 等. 涡轮盘轮缘密封结构参数对封严效率影响的实验研究[J]. 推进技术, 2017, 38(11): 2606-2612.
- WU Zeyu, LUO Xiang, LIU Dongdong, et al. Influence of different structural parameters on sealing efficiency of turbine disc rim[J]. Journal of Propulsion Technology, 2017, 38(11): 2606-2612. (in Chinese)
- [10] 高庆, 陶加银, 宋立明, 等. 涡轮轮缘密封封严效率的数值研究[J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(5): 12-17.
- GAO Qing, TAO Jiayin, SONG Liming, et al. Numerical investigation on the sealing efficiency of the turbine rim seal[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(5): 12-17. (in Chinese)
- [11] 董伟林, 王锁芳, 夏子龙. 典型参数对盘缘封严性能综合影响机制[J]. 推进技术, 2019, 40(6): 1293-1299.
- DONG Weilin, WANG Suofang, XIA Zilong. Integrated influence mechanism of typical parameters on sealing effectiveness of rim seal[J]. Journal of Propulsion Technology, 2019, 40(6): 1293-1299. (in Chinese)
- [12] 张晶辉, 马宏伟. 波浪形非均匀间隙封严结构影响涡轮性能的数值模拟[J]. 航空动力学报, 2015, 30(4): 865-874.
- ZHANG Jinghui, MA Hongwei. Numerical simulation of effects of contoured slot seal configuration on turbine performance[J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(4): 865-874. (in Chinese)
- [13] HORWOOD J T M, HUALCA F P, SCOBIE J A, et al. Experimental and computational investigation of flow instabilities in turbine rim seals[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2019, 141(1): 011028.
- [14] SANGAN C M, POUNTNEY O J, SCOBIE J A, et al. Experimental measurements of ingestion through turbine rim seals: Part III single and double seals[J]. Journal of Turbomachinery, 2013, 135(5): 051011.
- [15] CHEN Shuxian, LI Zhigang, LI Jun, et al. Numerical investigations on the sealing effectiveness of turbine groove radial rim seal[R]. ASME Paper GT2019-90205, 2019.
- [16] 高庆, 李军. 涡轮蜂窝面径向轮缘密封封严性能的数值研究[J]. 推进技术, 2016, 37(5): 937-944.
- GAO Qing, LI Jun. Numerical investigations on sealing performance of turbine honeycomb radial rim seal[J]. Journal of Propulsion Technology, 2016, 37(5): 937-944. (in Chinese)
- [17] 罗擎阳, 谭晓茗, 张庆才, 等. 跨声速涡轮轮缘复合封严结构的数值研究[J]. 推进技术, 2021, 42(10): 2257-2266.
- LUO Qingyang, TAN Xiaoming, ZHANG Qingcai, et al. Numerical investigation on composite rim seal configurations of transonic turbine[J]. Journal of Propulsion Technology, 2021, 42(10): 2257-2266. (in Chinese)
- [18] BOUTET-BLAIS G, LEFRANCOIS J, DUMAS G, et al. Passive tracer validity for cooling effectiveness through flow computation in a turbine rim seal environment[R]. ASME Paper GT2011-45654, 2011.
- [19] SUI Xiuming, ZHAO Wei, XIANG Xiaorong, et al. Investigation of the flowfield on a vaneless counter-rotating turbine with seal cavity flow ejection[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2021, 235(8): 1864-1876.
- [20] GAN Xiaopeng, KILIC M, OWEN J M. Flow between contra-rotating discs[C]//ASME 1993 International Gas Turbine and Aero-engine Congress and Exposition. Cincinnati, US: ASME, 1993: 24-27.

(编辑: 陈 越)