

文章编号:1001-2060(2024)03-0009-09

# 燃气旋流和湍流强度对转静盘腔入侵及流动特性影响的数值研究

李昆阳<sup>1</sup>, 杜昆<sup>1</sup>, 赵尊盛<sup>2</sup>, 刘存良<sup>1\*</sup>

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710072; 2. 中国航发湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412002)

**摘要:**为了探究主流旋流和湍流对转静盘腔燃气入侵规律及机理的影响,在封严冷气量固定的情况下,针对主流旋流角、湍流强度以及二者共同作用对燃气入侵规律的影响开展数值模拟研究。研究结果揭示:当仅存在旋流时,腔内 Batchelor 流动核心的分布位置和规模直接受主流旋流角的影响,同时,该核心的流动特性引起了封严效率的显著变化;此外,旋流角通过影响封严出口上游的压力分布,进一步影响了下游的燃气入侵程度。当无旋流角、改变主流湍流强度时,在极端湍流强度  $I=20\%$  的工况下,静盘侧 Batchelor 核心几乎完全消失,盘腔受到严重燃气入侵。当主流湍流强度  $I$  固定为 20%, 旋流角与其共同作用时,入侵状况相较于无旋流角时有所改善,但旋流角  $SA=15^\circ$  的工况封严效率反而略低于  $SA=30^\circ$  的工况,这主要是因为封严出口上游压力分布在湍流和旋流耦合作用下呈现出不同的波动特征。

**关键词:**轮缘密封; 燃气入侵; 封严效率; 数值模拟; 旋流角; 湍流强度

中图分类号: V231.1 文献标识码: A DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2024.03.002

[引用本文格式]李昆阳,杜昆,赵尊盛,等.燃气旋流和湍流强度对转静盘腔入侵及流动特性影响的数值研究[J].热能动力工程,2024,39(3):9-17. LI Kun-yang, DU Kun, ZHAO Zun-sheng, et al. Numerical study on the influence of gas swirl and turbulence intensity on the ingress and flow characteristics in a rotor-stator cavity[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(3): 9-17.

## Numerical Study on the Influence of Gas Swirl and Turbulence Intensity on the Ingress and Flow Characteristics in a Rotor-Stator Cavity

LI Kun-yang<sup>1</sup>, DU Kun<sup>1</sup>, ZHAO Zun-sheng<sup>2</sup>, LIU Cun-liang<sup>1</sup>

(1. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, China, Post Code: 710072;  
2. Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Aero Engine Corporation of China, Zhuzhou, China, Post Code: 412002)

**Abstract:** In order to investigate the influence of mainstream swirl and turbulence on the gas ingestion rules and mechanisms in the rotor-stator cavity, this study conducted numerical simulations of the influence of three different operating conditions including mainstream swirl angle (SA), turbulence intensity and the combined effect of swirl and turbulence on the gas ingestion rules under a fixed sealing cold air mass flow. The results reveal that when only swirl exists, the distribution position and scale of the Batchelor flow core within the cavity are directly affected by the mainstream swirl angle, meanwhile, the flow characteristics of the core also cause significant changes in the sealing efficiency; additionally, the swirl angle affects the gas ingestion downstream by influencing the pressure distribution upstream of the

收稿日期:2023-11-17; 修订日期:2023-12-21

基金项目:国家自然科学基金(52006178, U2241268); 国家科技重大专项(2022-DC-I-002-001)

Fund-supported Project:National Natural Science Foundation of China (52006178, U2241268); National Science and Technology Major Project (2022-DC-I-002-001)

作者简介:李昆阳(1996-),男,西北工业大学硕士研究生。

sealing outlet. When there is no swirl angle and the mainstream turbulence intensity changes, under the condition of extreme turbulence intensity  $I = 20\%$ , the Batchelor core on the stator side almost disappears, and the disc cavity suffers severe gas ingestion. When the mainstream turbulence intensity  $I$  is fixed at 20%, and the swirl angle acts together with it, the ingestion is alleviated compared to  $SA = 0^\circ$ , but the sealing efficiency under the condition of  $SA = 15^\circ$  is slightly lower than that under  $SA = 30^\circ$ . This is mainly because the pressure distribution upstream of the sealing outlet exhibits different fluctuation characteristics under the coupled action of turbulence and swirl.

**Key words:** rim seal, gas ingestion, sealing effectiveness, numerical simulation, swirl angle, turbulence intensity

## 引言

航空发动机热端部件热防护技术的进步从始至终伴随着发动机技术的发展,目前高温合金材料技术的提升已遇到瓶颈,陈文彬等人<sup>[1]</sup>指出,只发展材料的耐温程度不能解决实际问题,必须对其进行冷却保护。

针对封严问题,国内外学者开展了多方面的研究。Bayley 和 Owen<sup>[2]</sup>于 1988 年搭建了转静系实验台,测试了无主流条件下的盘腔入侵情况。实验结果表明,涡轮转速与轮缘密封有效间隙大小是影响轮缘密封效率的主要因素。Phadke 等人<sup>[3]</sup>搭建了多种不同密封结构的实验台,指出径向密封的封严效率要高于轴向密封。Graber 等人<sup>[4]</sup>创新性使用了示踪气体浓度法进行轮缘密封的封严效率测量,实验给出了封严冷气量与封严效率的详细关系曲线。

Johnson 等人<sup>[5]</sup>总结了影响盘腔入侵的主要因素,即主流通道非均匀压力分布、动静干涉导致的外环压力非定常变化、动盘侧泵吸效应、激波影响、轮缘密封几何结构等。随后 Owen 等人<sup>[6-8]</sup>在研究中采用测量压力、测量示踪气体浓度及流场可视化记录等相结合的方式,首次提出了盘腔入侵的两种主要形式,即外环诱导入侵(Externally-induced Ingress, EI)及旋转诱导入侵(Rotationally-induced Ingress, RI)。Bohn 等人<sup>[9]</sup>搭建了模拟发动机真实工况的实验台,实验结果表明,在特定工况下,主流不仅可能沿静盘面入侵盘腔,还可能在旋转诱导作用下到达动盘盘面。

Sangan<sup>[10]</sup>使用 CO<sub>2</sub> 气体作为示踪气体,利用盘腔内 CO<sub>2</sub> 浓度定义封严效率,研究了不同主流流量、

不同封严流量下,不同封严结构的封严效率。并在 Phadke 等人<sup>[3]</sup>提出的孔板模型的基础上,定义了一系列无量纲数,如无量纲流量、流量系数比、经验常数  $K$  等,作为封严效率的简单评判准则。

国内对于相关领域的研究起步较晚,早期研究集中在动静级涡轮方面。徐国强等人<sup>[11]</sup>使用混合长度模型,对高位轴向进气的动静级旋转盘腔流动换热特性进行了数值模拟,并与实验结果进行比较。研究表明,盘腔内在射流位置两侧存在一个旋转方向相反的涡系,而较大半径位置处盘面温度急剧增加。孙纪宁等人<sup>[12]</sup>同样对高位轴向封严进气、径向出流模型进行了数值研究。结果表明,盘腔内在此工况下的流动分为强迫对流和自然对流,随着转速增大,盘腔内自然对流增强,并占据主导地位。丁水汀等人<sup>[13]</sup>对孙纪宁的实验模型进行了验证,并得到了相同的结论。张晶辉等人<sup>[14]</sup>指出,由于盘腔内涡核结构是稳定的,径向速度的非定常波动被限制在封严间隙内,盘腔内非定常波动很小。丛庆丰等人<sup>[15]</sup>指出,轮缘密封出口区域周向时均压力受冷气出流影响较大。

在目前的研究中,国内外学者采用实验与数值模拟相结合的方法探究盘腔问题,主要侧重于提高封严效率。但近年来,发动机部件之间的耦合效应对工作效率和工质流动特征的影响受到了越来越多的关注。在真实发动机燃烧室出口处,燃气流动具有一定的旋流角和较高的湍流强度,其数值通常高于常规研究方法的工况。然而,现有研究结果的边界条件与发动机真实工况存在较大差距。因此,为了充分揭示真实工况下盘腔入侵受主流流动特点的影响机理,本文选取转静盘腔系统为研究对象,详细分析了以不同旋流角进气、常规和高端流强度下的盘腔封严规律和流场特征。

## 1 计算模型和网格划分

### 1.1 计算域模型

本文选取 Sangan 的涡轮实验中采用的一级动静叶及动静级间的盘腔<sup>[10]</sup>作为研究对象。图 1 给出了本文采用的动、静盘及叶片模型示意图。该结构包括 32 个静叶和 41 个动叶。本文在计算时采用了径向密封封严方式,图 2 给出了封严结构示意图。

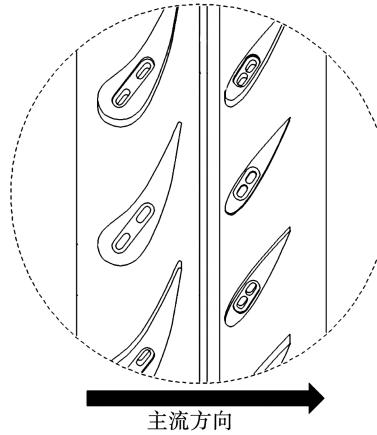


图 1 动、静盘及叶片模型示意图<sup>[10]</sup>

Fig. 1 Schematic diagram of rotor-stator disc and blade model<sup>[10]</sup>

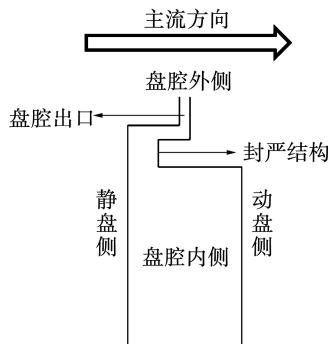


图 2 轮缘密封结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of rim seal structure

### 1.2 数值方法

无量纲质量流量定义为:

$$C_w = \frac{m}{\mu b} \quad (1)$$

式中: $m$ —质量流量, kg/s; $\mu$ —动力粘度系数, Pa·s; $b$ —轮缘密封径向位置尺寸,m。

在已有的实验研究中,通常采用 CO<sub>2</sub>作为示踪气体添加进封严流中,并使用 CO<sub>2</sub>相对浓度作为封严效率表征参数,定义式为:

$$\varepsilon_c = \frac{c_s - c_a}{c_o - c_a} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $\varepsilon_c$ —封严效率,%; $c_s$ —静盘表面  $r/b = 0.958$  处 CO<sub>2</sub>体积分数( $r$  为所取位置径向尺寸,取 0.19 m); $c_a$ —封严结构处主流 CO<sub>2</sub>体积分数; $c_o$ —冷却流入口处 CO<sub>2</sub>体积分数。

本文数值模拟采用附加变量示踪法来测定封严效率。具体方法是,加入附加变量(Additional Variables),且该变量仅作为独立附加数值,并不改变工质物性,将其在二次流进口的 CO<sub>2</sub>体积分数设定为 100%,主流进口的体积分数设定为 0。

为节省计算资源,并满足周期性边界条件,本文采用 Domain Scaling 方法<sup>[16]</sup>进行叶片建模,使静叶与动叶均为 32 个。Domain Scaling 方法是叶轮机械仿真中一种常见的模型处理方法,该方法会对计算结果产生一定影响,但影响在可接受范围内,遗憾的是现有研究中并未有学者给出定量结论。计算时将动静交界面设置在盘腔上游静叶尾缘与封严间隙之间,盘腔部分与动叶部分设置为旋转域。入口段采用 0.75 倍轴向弦长,出口段采用 1.5 倍轴向弦长,以保证主流充分发展并避免回流。图 3 给出了密封结构的计算网格。表 1 给出了具体边界条件,边界条件与 Sangan 的实验条件<sup>[10]</sup>相同,以保证数值方法的准确性。

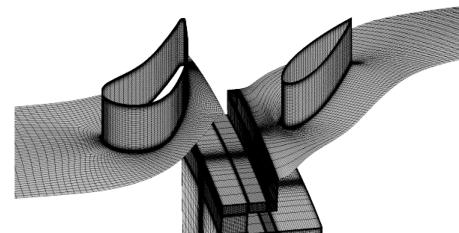


图 3 计算网格

Fig. 3 Computational grid

表 1 模型边界条件

Tab. 1 Boundary conditions of the model

名 称	数 值
主流进口总温/K	320
主流进口总压/Pa	113 422
出口静压/Pa	101 325
二次流进口总温/K	300
主流湍流强度/%	5
转速/r·min <sup>-1</sup>	3 000

据文献[15]对网格无关性的验证,网格数量在240万以上时,计算结果对网格数量基本不敏感,本研究中网格总数为340万。网格采用结构化网格,在流固壁面边界层区域进行加密以保证网格 $y^+$ 值在1左右。计算时选取高精度离散格式对流项,当连续方程、能量方程、动量方程、湍流方程的均方根残差均小于 $10^{-4}$ ,且各计算域进出流量不平衡率小于0.1时认为计算收敛。根据丛庆丰等人<sup>[15]</sup>对此模型的研究结果,对比 $k-\varepsilon$ 、 $k-\omega$ 和SST 3种湍流模型,其中SST湍流模型计算结果与实验最接近,故本文使用SST湍流模型进行数值模拟计算。

### 1.3 数值方法验证

在前节给定的条件下使用ANSYS CFX软件进行数值模拟定常计算,当全部特征监测点的值稳定规律波动时,可认为计算结果收敛,进行结果后处理并与Sangan的实验结果<sup>[10]</sup>进行对比。图4给出了监测点数值波动曲线。图5给出了不同无量纲封严冷气量下的封严效率与Sangan的实验<sup>[10]</sup>中给出的对应位置的封严效率数值对比曲线。

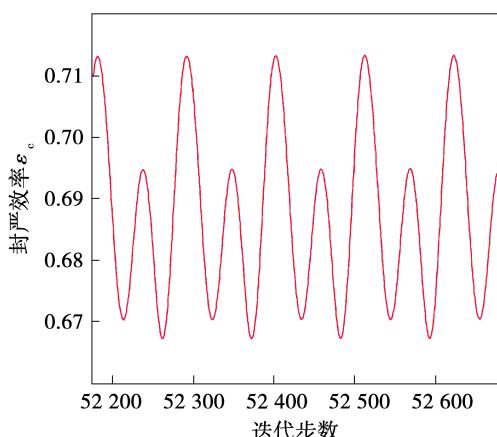


图4 监测点封严效率曲线

Fig. 4 Plot of sealing efficiency for monitoring point

可以看到,数值模拟结果与原实验对比,在 $C_w=3208$ 封严冷气流量下封严效率达到99%,而在 $C_w=658$ 下,封严效率为57%,此时有严重入侵。数值计算结果在3种封严冷气流量下整体吻合较好,验证了本数值方法的可靠性。因此,本文后续研究将基于此模型和数值方法开展,并固定封严冷气量 $C_w$ 为1432,以得到介于完全封严和严重入侵之间更有代表性的结果。

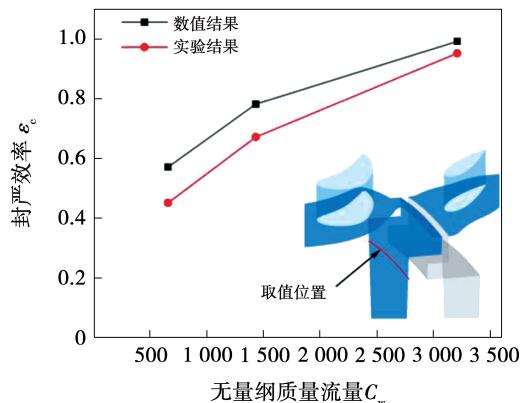


图5 封严效率计算值和实验值对比

Fig. 5 Comparison of calculated and experimental values of sealing effectiveness

## 2 主流旋流角对入侵和流动的影响

旋流角定义为:

$$SA = \tan^{-1} \frac{u_t}{u_a} \quad (3)$$

式中: $SA$ (Swirl Angle)一旋流角,(°); $u_t$ 一切向速度,m/s; $u_a$ —轴向速度,m/s。

本节模拟工况分别设置 $SA$ 为 $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 开展模拟。具体方法为,在CFX的主流入口边界条件设置时保持 $C_w$ 稳定为1432,根据旋流角计算出轴向和切向速度,并赋予入口轴向分量(Axial Component)及切向分量(Theta Component)速度。其余边界条件及计算设置与实验工况相同。

图6给出了封严流量 $C_w$ 为1432,不同旋流角下盘腔内的流线图和封严效率云图。在旋转离心力作用下,流体沿动盘面径向出流,封严冷气进入盘腔后首先流附于动盘侧。在盘腔内部核心区域内出现了典型的无粘性旋转核心,即Batchelor流动核心,该流动将使流体从静盘侧向动盘侧迁移。考察Batchelor流动的特点发现, $SA=15^\circ$ 工况下动静盘侧流动核心规模相近,分布对称,这使得流体的横向迁移分布均匀,大部分入侵流始终被压制在静盘面边界层内,而盘腔内封严冷气更均匀分布也加强了封严效率;对于 $SA=0^\circ$ 和 $SA=30^\circ$ 的工况,由于Batchelor流动核心的非对称分布和规模差的作用,腔内流体横向迁移呈现非均匀状态,增强了主流沿静盘侧边界层的横向迁移,进一步加剧了燃气入侵。

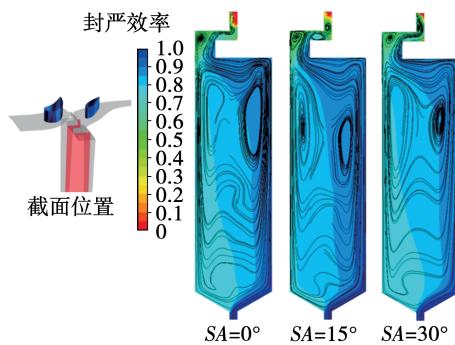


图 6 不同旋流角下盘腔封严效率云图和流线图

Fig. 6 Disc cavity sealing efficiency and streamline under different swirl angles

在不同工况下,取不同径向位置处距静盘面1 mm的封严效率进行对比,如图7所示。由图7可见,在径向封严外侧区域,无旋流封严效率明显高于有旋流。而在封严内侧区域,SA=30°时流体因带有强烈的旋转动量,即使经过封严结构,旋转动量的影响也无法完全消除,其入侵程度在整个流动区域明显强于其余两种旋流角情况。在深入盘腔区域,因Batchelor流动导致的非均匀横向迁移使得SA=0°和SA=15°工况下的流体在 $r=0.165$ 附近产生了差异,此处也是Batchelor流动核心驻留的区域。此处流体的均匀横向迁移将入侵流部分隔绝于外侧,并使得沿静盘边界层迁移的入侵流降低,进而缓解了上游主流入侵。

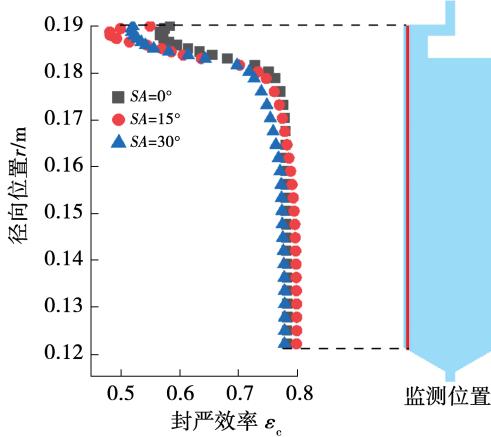


图 7 不同旋流角下封严效率径向分布

Fig. 7 Radial distribution of sealing efficiency under different swirl angles

对于盘腔出口处,在未完全封严工况下流体流动由燃气入侵主导,故此处流体的径向速度可近似表征入侵状况,径向速度指向盘腔内的区域为入侵区域,反之为出流区域。图8为不同旋流角下盘腔

出口处出流与入侵区域,其中,两侧浅色区域表示径向出流区域,深色区域表示径向入侵区域。可以看到,在旋流影响下,入侵区域发生了相对周向偏移,入侵区域中心更加靠近动叶前缘点。将两旋流角工况对比,SA=30°的入侵区域面积更大,且动静盘间入侵区域更趋近于周向不敏感分布,此独特现象是由于该工况下高压区域更加集中,而SA=15°的区域压力分布在周向更加平均,压力突变区域相对较少。

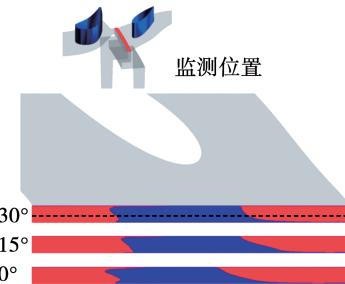
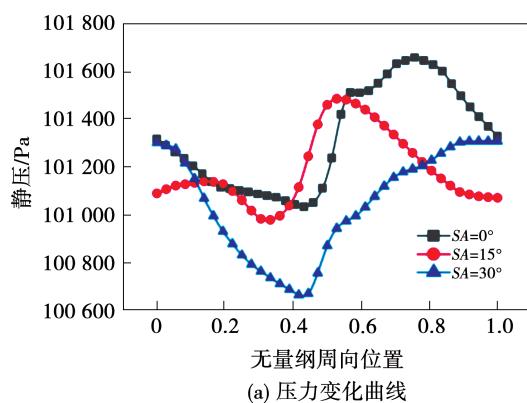


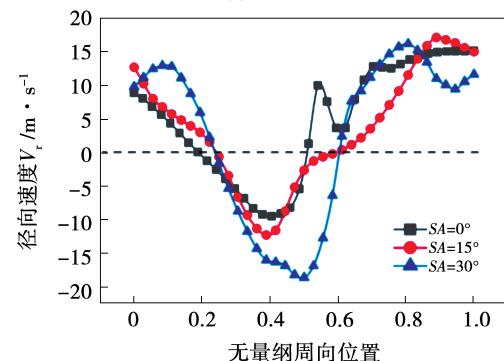
图 8 不同旋流角下盘腔出口处出流与入侵区域

Fig. 8 Outflow and inflow regions at the outlet of disc cavity under different swirl angles

图9为封严间隙处(对应图8黑色虚线位置)压力及径向速度 $V_r$ 随周向位置的变化曲线。



(a) 压力变化曲线



(b) 径向速度变化曲线

图 9 不同旋流角下封严间隙处压力与径向速度

Fig. 9 Pressure and radial velocity at the sealing gap under different swirl angles

图 9 中,周向位置范围为一个动叶间隙的距离,做无量纲化处理。由图 9 可见,  $SA = 30^\circ$  工况的周向压力变化最剧烈且径向速度最大, 入侵最为严重。 $SA = 0^\circ$  和  $SA = 15^\circ$  工况下压力的突变程度相对较低, 其入侵状况相比  $SA = 30^\circ$  工况也有一定缓解。

图 10 给出了 3 种旋流角工况下不同周向位置处的盘腔出口径向速度, 并作 max-min 无量纲化处理, 当值为负时表示入侵, 为正时表示出流。可以看到, 当  $SA = 0^\circ$  时, 截面 1, 2, 3 处流体由封严出流主导, 几乎无燃气入侵; 截面 4, 5 在动盘侧由于动叶前缘的滞止效应出现燃气入侵, 相对应地, 封严流沿静盘侧出流; 截面 6 入侵被遏制, 但封严出流相比前 3 截面较少。对于  $SA = 15^\circ$  的工况, 截面 1, 2 封严出流比  $SA = 0^\circ$  工况增多, 但截面 3 封严出流减少, 截面 4, 5 入侵流同样减少, 截面 6 封严出流减少。而对于  $SA = 30^\circ$  工况, 截面 1, 2, 3 封严出流相比  $SA = 0^\circ$  时均有减少, 截面 4 入侵明显加重, 截面 5 的封严出流和入侵流都有增强, 而在截面 6 封严出流相比  $SA = 0^\circ$  时有增加。

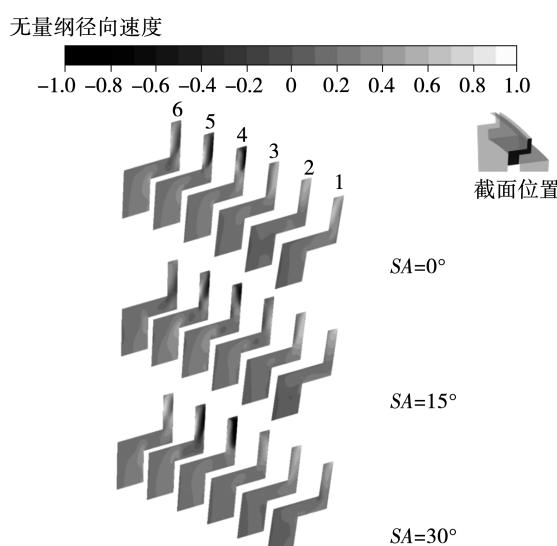


图 10 不同旋流角下盘腔出口径向速度

Fig. 10 Radial velocity at the outlet of disc cavity under different swirl angles

综上, 3 种旋流角工况下入侵和出流的流体在周向上均呈现出周向非均匀性。 $SA = 15^\circ$  工况封严出流和入侵流规模与  $SA = 0^\circ$  时相比都有所降低, 即盘腔出口处流体流动在周向更加“均匀”, 而  $SA = 30^\circ$  工况在周向的入侵区域, 燃气入侵明显加重, 部

分区域封严出流有所增加。

### 3 主流湍流强度对入侵和流动的影响

湍流强度 (Turbulence Intensity)  $I$  定义为, 脉动速度的均方根  $\hat{U}$  与平均速度  $U_{avg}$  的比值, 即:

$$I = \frac{\hat{U}}{U_{avg}} \quad (4)$$

其中,

$$\hat{U} = \sqrt{(U_x^2 + U_y^2 + U_z^2)/3} \quad (5)$$

$U_x, U_y, U_z$ —速度在 X, Y, Z 方向的脉动量, 单位与平均速度  $U_{avg}$  一致, 均为 m/s。在常规模拟中, 通常使用各向同性假设, 即  $U_x = U_y = U_z$ 。

定义  $I = 5\%$  为中等湍流强度,  $I = 10\%$  以上为高湍流强度。在通常情况下, 涡轮第 1 级导叶进口主流湍流强度在 5% 到 10% 之间, 然而在某些极端情况下, 湍流强度可以达到 20%, 甚至更高。在本节模拟中, 保持各边界条件不变, 且主流无旋流角, 即  $SA = 0^\circ$ , 仅在计算时改变主流湍流强度, 即设置 Turbulence Intensity 为 5%, 10%, 20% 3 个工况进行计算。

图 11 给出了封严流量  $C_w$  同为 1 432, 不同主流湍流强度下盘腔内的流线图和封严效率云图。由图可见,  $I = 20\%$  工况下盘腔受到严重入侵。观察 Batchelor 流动特征可以看到,  $I = 10\%$  工况相比于  $I = 5\%$  工况, 一方面, 两侧盘面附近的流动核心均稍向下移动, 静盘侧核心受到主流入侵增强的影响, 边界层内流动受到破坏, 且其脱离盘面开始轴向迁移的位置上移, 即整个静盘侧核心规模缩小且边界层流动区域减小; 另一方面, 入侵燃气增多使得由静盘到动盘轴向迁移的流体同样增多, 动盘侧流动核心规模增大, 导致从动盘侧出流流量增大。而对于  $I = 20\%$  的工况, 由于主流湍流强度在经过叶栅通道后仍有部分保留, 这些具有较高湍流强度的主流在进入盘腔后, 出现了与前两种工况完全不同的流动状态。综上, 当湍流强度增加至  $I = 20\%$  时, 典型 Batchelor 流动被完全破坏, 盘腔内流动呈现与常规湍流强度工况截然不同的状态, 由于该状态流体由湍流态主导, 流动掺混过程十分复杂, 因此很难得到规律特征。

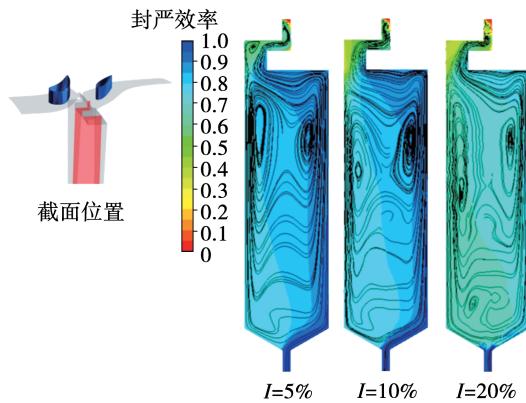


图 11 不同主流湍流强度下盘腔封严效率云图和流线图  
Fig. 11 Disc cavity sealing efficiency and streamline under different mainstream turbulence intensities

图 12 展示了盘腔内的不同径向位置处距静盘面 1 mm 处的封严效率分布。可以看到,与常规工况  $I = 5\%$  相比,  $I = 10\%$  工况下盘腔内封严效率整体上有一定降低,静盘侧入侵流 - 封严流掺混区域,即 Batchelor 核心存在驻留点更加靠下(即盘腔内侧),而对于  $I = 20\%$  的工况,由于流动结构被严重入侵的燃气破坏,Batchelor 核心消失,静盘侧整体封严效率较常规工况有很大程度降低,但沿径向变化幅度很小,整个盘腔都受到了严重入侵。

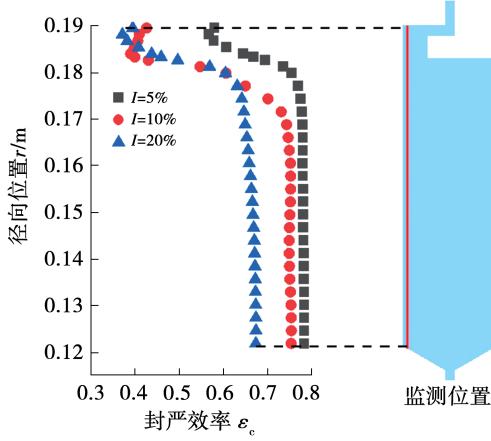


图 12 不同主流湍流强度下封严效率径向分布  
Fig. 12 Radial distribution of sealing efficiency under different mainstream turbulence intensities

图 13 给出了盘腔内  $r/b = 0.93$  处流体的径向速度和湍流动能(Turbulence Kinetic Energy)周向分布,周向位置作无量纲处理。 $r/b = 0.93$  处,即封严结构内侧位置处的数据反映了经过封严结构影响后的流体流动参数特点, $I = 20\%$  工况下此处径流体全

部朝盘腔内侧径向入侵,完全无出流, $I = 5\%$  和  $I = 10\%$  工况仅有少部分区域流体径向速度为 0 或出流。仅从径向速度来看, $I = 5\%$  工况入侵最严重,但结合湍流动能可以看到, $I = 20\%$  工况下湍流动能很低,即流体速度波动很小,几乎全部指向入侵方向,出流冷气很少,此处流动的驱动力主要是由入侵的燃气湍流动能耗散导致流体压力的提高;而对于  $I = 10\%$  工况,其湍流动能很高,是由于在此处入侵燃气与出流冷气规模相近,二者发生剧烈掺混,然而掺混耗散不足以完全抵消入侵燃气的动能,使得入侵依然比  $I = 5\%$  的工况下稍严重。

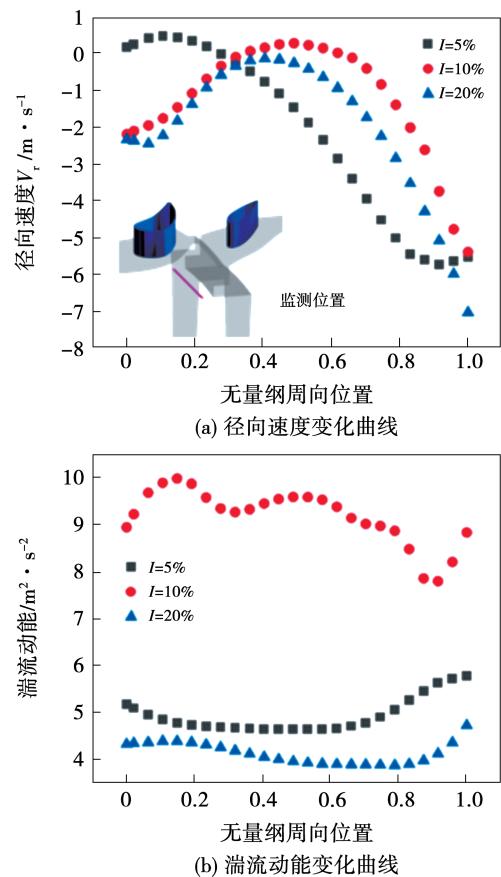


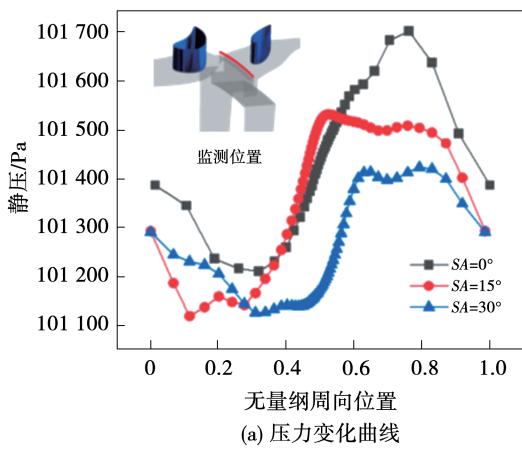
图 13 不同主流湍流强度下静盘面处径向速度和湍流动能  
Fig. 13 Radial velocity and turbulent kinetic energy on stator disc surface under different mainstream turbulence intensities

#### 4 主流旋流角与湍流强度耦合作用对盘腔封严的影响

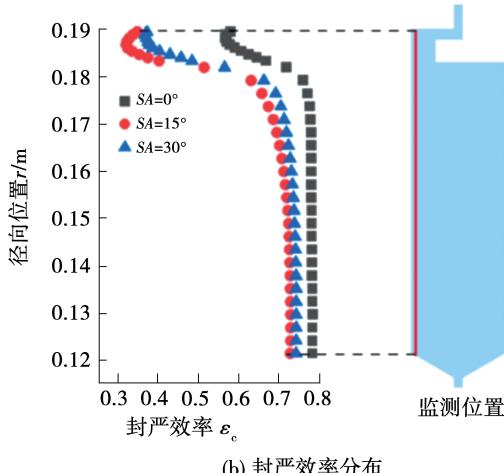
由前文可知,当湍流强度  $I = 10\%$  时入侵虽有加剧,但燃气入侵特征和盘腔内流体流动规律与

$I=5\%$ 工况类似,而 $I=20\%$ 工况,即实际工作中的极限工况下流动特征与前两者差异较大。针对该工况的研究对于发动机实际工况设计有较大参考价值,故本节选用湍流强度 $I=20\%$ ,改变旋流角,在 $SA$ 为 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ 的3个工况下进行研究,模型和其余边界条件与前文工作完全相同。

图14展示了盘腔出口壁面处周向压力与盘腔内静盘表面径向封严效率分布。与 $I=5\%$ 的常规工况相比,3种旋流角工况下封严效率都有所降低,特别地,在高湍流强度 $I=20\%$ 工况下大旋流角 $SA=30^\circ$ 工况封严效率反而略高于 $SA=15^\circ$ 工况。推测是由于旋流和湍流耦合作用下改变了压力分布,使得 $SA=30^\circ$ 工况平均压力降低且周向压力分布更加均匀,从而使得交替出现的入侵与出流在粘性流动下互相牵制抵消,缓解了主流的入侵。



(a) 压力变化曲线



(b) 封严效率分布

图14 盘腔出口处周向压力与静盘表面封严效率分布

Fig. 14 Circumferential pressure at the outlet of disc cavity and sealing efficiency on stator disc surface

图15为盘腔封严效率云图和流线图。根据盘腔内的流线分布可知, $SA=0^\circ$ 时,静盘侧Batchelor

核心更加靠近盘腔出口,入侵的主流在沿壁面边界层进入盘腔后便立即被卷吸入流动核心内,从而减少了更深区域的入侵。同时,动盘侧核心驻留位置也更加靠近盘腔出口,出流冷气在此处形成稳定涡并与静盘侧入侵流形成一组对转涡系,其中 $SA=15^\circ$ 工况下动盘侧冷气核心更加远离封严出口,封严冷气相比 $SA=30^\circ$ 工况将更多驻留在盘腔内而不是出流至盘腔出口并与入侵流交互,故 $SA=15^\circ$ 效率略低于 $SA=30^\circ$ 工况。

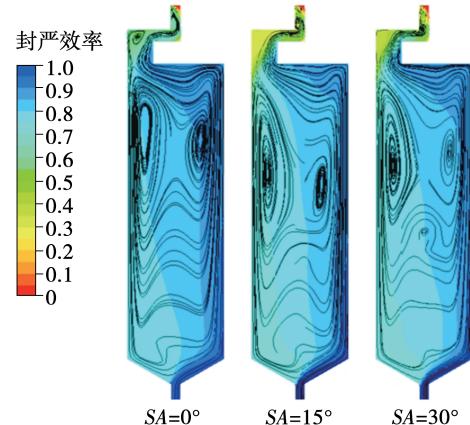


图15 盘腔封严效率云图和流线图

Fig. 15 Disc cavity sealing efficiency and streamline

图16给出了不同旋流角下盘腔出口处的压力周向分布和静盘侧特征平面位置处封严效率分布云图。

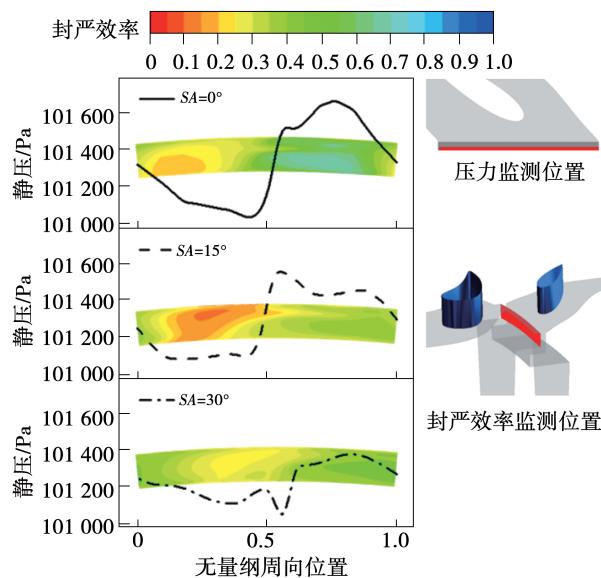


图16 盘腔出口处的压力和静盘特征面处封严效率

Fig. 16 Pressure at the outlet of disc cavity and sealing efficiency on stator disc characteristic surface

由图16可见,随着旋流角SA的增大,入侵区域逐渐后移并与盘腔出口低压区域基本重合。对于 $SA=0^\circ$ 工况,在动叶前缘滞止点周向上游存在一处小面积低压区,该区域入侵较为严重,但在经过滞止点后,压力发生阶跃性升高,封严出流迅速占据主导,封严效率升高。当 $SA=15^\circ$ 时,在滞止点周向上游存在一处面积较大的低压区,该区域内入侵最严重,但在该区域下游同样存在一处阶跃性高压区,封严出流占据主导,但由于入侵较严重,且压力并未达到 $SA=0^\circ$ 工况的同等高水平,使得入侵虽有缓解但未被很好抑制。在 $SA=30^\circ$ 工况下,滞止点上游压力降低很小且低压区面积有所缩减,在滞止点下游压力提升最少,即该工况下压力的波动变化因旋流湍流耦合作用被削减,从而呈现出与前两者有明显区别的分布趋势。

## 5 结 论

本文针对因主流燃气入侵盘腔导致的转静盘过热问题,选取了一种典型径向轮缘密封结构,采用附加变量示踪法表征封严效率,在封严冷气量及其它模型和边界条件均不变的情况下,针对主流旋流角、湍流强度以及二者共同作用3种情况开展研究,考察特征位置处的封严关键参数,得到以下结论:

(1) 主流旋流角的不同直接导致了腔内Batchelor流动核心的非对称位置分布和规模差异,同时这种差异也是影响封严的重要因素。在这些因素影响下,腔内流体横向迁移同样呈现出非均匀状态,增强了主流沿静盘侧边界层的横向迁移,进一步加剧了入侵。此外,封严出口上游的压力周向分布也是一个不可忽视的因素。 $SA=15^\circ$ 工况下盘腔出口处流体流动在周向更加“均匀”,其盘腔内整体封严效果优于其余两工况,而 $SA=30^\circ$ 工况封严出口处压力周向波动剧烈,燃气入侵明显加重。

(2) 在无旋流角垂直进气时,盘腔封严效率随湍流强度提高急剧降低。其中湍流强度 $I=20\%$ 工况下,静盘侧Batchelor流动核心几乎完全消失,燃气无阻碍地大量入侵盘腔,封严状况十分恶劣。在腔内,主流与冷气的掺混耗散不足以完全抵消入侵燃气的动能,较高湍流度工况入侵更为严重。

(3) 在主流旋流的作用下,高湍流强度带来的

负面影响在一定程度上被削减,封严效率整体比无旋流主流有显著提高。特别地, $SA=15^\circ$ 工况封严出口上游压力分布反而较 $SA=30^\circ$ 工况波动更加剧烈,其封严效率也稍低于后者。

## 参 考 文 献:

- [1] 陈文彬,刘存良,李冰然,等.吹风比与湍流度对涡轮叶片压力面气膜冷却影响的实验研究[J].热能动力工程,2019,34(6):29–36.  
CHEN Wen-bin, LIU Cun-liang, LI Bing-ran, et al. Experimental investigation on the effects of turbulence intensity on film cooling on turbine vane pressure side[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2019, 34(6): 29–36.
- [2] BAYLEY F J, OWEN J M. The fluid dynamics of a shrouded disk system with a radial outflow of coolant[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1970, 92, 335–341.
- [3] PHADKE U P, OWEN J M. An investigation of ingress for an air-cooled shrouded rotating-disk system with radial-clearance seals [J]. Journal of Engineering for Power, 1983, 105: 178–183.
- [4] GRABER D J, DANIELS W A, JOHNSON B V. Disc pumping test final report[R]. Air Force Wright Aeronautical Laboratories, Report No. AFWAL-TR-87-205, 1987.
- [5] JOHNSON B V, MACK G J, PAOLILLO R E. Turbine rim seal gas path flow ingestion mechanisms[C]//30th Joint Propulsion Conference and Exhibit, Indianapolis, IN, USA, June 27–29, 1994.
- [6] PHDAKE U P, OWEN J M. Aerodynamic aspects of the sealing of gas-turbine rotor-stator systems, Part 1: The behavior of simple shrouded rotating-disk systems in a quiescent environment[J]. Heat and Fluid Flow, 1988, 9: 98–105.
- [7] PHDAKE U P, OWEN J M. Aerodynamic aspects of the sealing of gas-turbine rotor-stator systems, Part 2: The performance of simple seals in a quasi-axisymmetric external flow[J]. Heat and Fluid Flow, 1988, 9: 106–112.
- [8] PHDAKE U P, OWEN J M. Aerodynamic aspects of the sealing of gas-turbine rotor-stator systems, Part 3: The effect of nonaxisymmetry external flow on seal performance[J]. Heat and Fluid Flow, 1988, 9: 113–117.
- [9] BOHN D, RUDZINSKI B, SURKEN N. Experimental and numerical investigation of the influence of rotor blades on hot gas ingestion into the upstream cavity of an axial turbine stage[C]//ASME Turbo Expo 2000: Power for Land, Sea, and Air, Munich, Germany, May 8–11, 2000.
- [10] SANGAN C. Experimental measurements of ingestion through gas turbine rim seals[J]. Journal of Turbomachinery, 2013, 135(2).