

高压涡轮封严流与主流相互作用的机理研究^{*}

陶文灿^{1,2}, 张子卿^{1,2}, 宋宇宽^{1,2}, 李紫良^{1,2}, 张燕峰^{1,2}

(1. 中国科学院工程热物理研究所, 轻型动力重点实验室, 北京 100190;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为探究高压涡轮轮毂封严流与主流相互作用的机理, 借助经过实验校核的数值模拟方法, 详细分析了封严流对主流端区二次流结构的影响以及封严流与主流的相互作用过程。研究发现: 一方面, 主流从叶片前缘位置侵入封严结构内部, 在封严出口处形成封严回流涡, 并在封严结构内部诱导出一个反向涡, 这两个涡直接影响封严结构的封严效率; 另一方面, 封严出口处封严回流涡与叶片通道内的马蹄涡压力面分支在流向上旋转方向一致, 互相融合并增强通道涡强度。封严结构决定了封严回流涡流出的位置和速度方向, 直接影响封严回流涡与马蹄涡压力面分支的相互作用过程, 从而决定了损失的大小。研究还发现, 当封严流和主流在封严出口交界面上流量相当且存在一定的周向速度差时, 封严出口会发生 Kelvin-Helmholtz 不稳定现象。此时伴随大量边界层低能流体进入封严结构内, 封严流周向速度减小, 马蹄涡的压力面分支和封严回流涡随之减弱, 继而使端区二次流损失减小。

关键词: 高压涡轮; 主流; 封严流; 封严回流涡; 马蹄涡; Kelvin-Helmholtz 不稳定现象

中图分类号: V231.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2019) 11-2473-09

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.180727

Investigation on Interaction Mechanism Between Rim Sealing Flow and Mainstream Flow in High-Pressure Turbine

TAO Wen-can^{1,2}, ZHANG Zi-qing^{1,2}, SONG Yu-kuan^{1,2}, LI Zi-liang^{1,2}, ZHANG Yan-feng^{1,2}

(1. Key Laboratory of Light-Duty Gas-Turbine, Institute of Engineering Thermophysics,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to advance the understanding of the fundamental mechanism of the interaction between rim sealing flow and mainstream flow in a high-pressure turbine, the influence of sealing flow on the structure of the hub secondary flow and the interaction process between them were analyzed in detail. The numerical simulation method has been verified by experiment to guarantee the accuracy. The study shows that, on the one hand, the mainstream flow ingress occurred at the leading edge of the blade, which leads to a recirculation zone at the outer part of the rim seal and a reverse vortex below it. The position and size of these two vortices influences sealing effectiveness directly. On the other hand, the pressure side leg of horse-shoe vortex and the leakage slot vortex would get merged and develops into passage vortex in the blade passage later, which has the same sense of rotation in streamwise direction. The sealing configuration determines the outflow position and velocity direction

^{*} 收稿日期: 2018-11-19; 修订日期: 2019-02-18。

基金项目: 国家自然科学基金 (51836008; 51876202)。

通讯作者: 陶文灿, 硕士生, 研究领域为叶轮机械气动热力学。E-mail: taowencan@iet.cn

引用格式: 陶文灿, 张子卿, 宋宇宽, 等. 高压涡轮封严流与主流相互作用的机理研究[J]. 推进技术, 2019, 40(11):2473-2481. (TAO Wen-can, ZHANG Zi-qing, SONG Yu-kuan, et al. Investigation on Interaction Mechanism Between Rim Sealing Flow and Mainstream Flow in High-Pressure Turbine [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40 (11):2473-2481.)

of the leakage slot vortex, which affects the loss caused by sealing flow. At the same time, the Kelvin-Helmholtz instability phenomenon is observed to occur at the seal outlet, resulting from a certain circumferential velocity difference between the sealing flow and the mainstream flow with almost the same scale massflow at the interface of the seal outlet. With lots of low-energy boundary layer fluid ingested into the rim seal, the circumferential velocity of the sealing flow would decrease. The pressure side leg of horse-shoe vortex and the leakage slot vortex would subsequently get weakened, which contributes to reducing losses.

Key words: High pressure turbine; Mainstream flow; Sealing flow; Leakage slot vortex; Horse-shoe vortex; Kelvin-Helmholtz instability

1 引 言

高压涡轮转、静部件之间存在着盘腔,为了防止高温燃气入侵,引起涡轮盘过热,采用封严结构并从压气机引入冷气来进行密封。这些封严冷气会汇入主流燃气,影响流动结构进而影响涡轮的性能。虽然封严流占主流的部分很少,但是它有可能会产生很大的气动损失^[1]。张晶辉等^[2]发现当封严流量占主流流量的 1.37% 时,涡轮效率降低 2.1%。

近几十年来,对于封严的研究主要集中在提高封严效率和减小封严流与主流相互作用造成的损失。针对封严效率,一般认为导致燃气入侵的因素主要是转盘的泵效应和涡轮轮缘外的燃气压力的周向不均匀,采用复杂的封严结构在增大流阻的同时可以利用外层封严的功能阻尼燃气中的周向压力不均匀度,因此可以提高封严的效率^[3]。Popović 等^[4]利用实验和数值模拟研究了通过修改封严几何形状来提高涡轮级效率和封严效果,研究发现封严内部形成的回流涡结构很好地阻止了燃气的向下入侵。针对封严流与主流相互作用造成的损失, Schuler 等^[5-6]研究发现采用复杂封严结构可以削弱封严流体的径向迁移,从而减小附加的气动损失。Burd 等^[7]认为封严流提供的轴向动量能加速低能端壁流,减薄边界层,从而抑制端区的横向流动。Schlienger 等^[8]研究发现封严流与主流的周向速度之差在增大掺混损失的同时,会在叶片通道入口产生正的流向涡并且增强通道涡。Bohn 等^[9]认为,使用合适的封严几何结构最多可以减少 30% 的封严流量。所以,可以通过对封严结构的设计,在保证封严效率的前提下减小封严流与主流相互作用造成的损失。周杨等^[10]研究发现封严气射入主流时对转子根部的影响最为明显,张伸展等^[11]认为封严气射入主流后冲击主流边界层内的流体,会造成端区流动结构的变化并引起掺混损失。Hunter 等^[12], McLean 等^[13], Gier 等^[14], Schlienger 等^[8]研究发现了类似的结论。虽然国内外

针对封严流与主流的相互作用开展了很多研究,但是目前对于封严流和主流相互作用时的端区二次流结构并没有进行深入研究,且缺少对于叶片通道内流场发展的细致描述。

本文以典型高压涡轮一级转子叶片为研究对象,采用经过实验校核的数值模拟方法,对比了某简单封严结构和其改进得到的复杂封严结构的性能,详细分析了封严流对主流端区结构的影响和封严流与主流的相互作用过程,揭示了高压涡轮主流与封严流相互作用的机理,为封严结构的设计提供了理论基础。

2 实验与数值模拟方法

2.1 实验方法

图 1 给出了本研究中所用的高速大尺度直列叶栅试验台,来流高压气体是由两台 1000kW 离心空压机提供,最大供气压力 1.0MPa,最大供气流量 5kg/s,在实验前保证主流的进口均匀性与出口周期性。放置在进口段中的毕托管可测得栅前的总温总压,栅后 $0.4C_x$ (轴向弦长) 测量槽处使用位移机构夹持三孔探针测量该截面的压力和气流角分布。试验叶型为典型高压涡轮一级转子叶片截面,其几何参数如表 1 所示。对于试验用叶栅是由 4 个叶片及一个吸力面和压力面组成的 5 个流道,测量在中间流道进行。

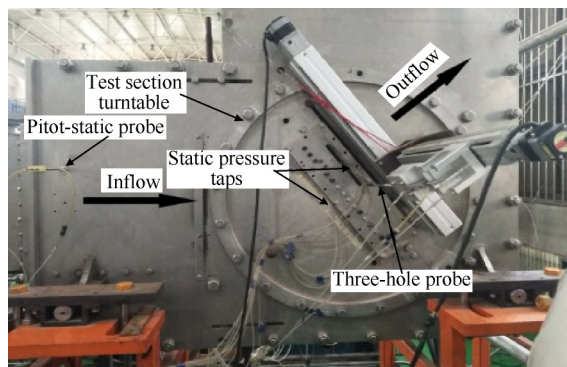


Fig. 1 Test section of the cascade rig

Table 1 Geometry parameters of the cascade

Parameter	Value
Chord /mm	61.08
Axial chord/mm	43.92
Pitch s/mm	50.445
Span h/mm	120
Incidence/(°)	1.4
Inlet flow angle/(°)	44
Outlet flow angle/(°)	18.47
Inlet Mach number	0.89
Outlet Mach number	0.26

2.2 研究对象

如图2所示,以真实发动机中的封严结构为原型Baseline,在此基础上改进得到复杂封严结构。在处理封严结构几何时,除了图中标注出的差异外其它特征参数均一致,以确保不同封严结构所导致的性能差异是由几何因素引起的。

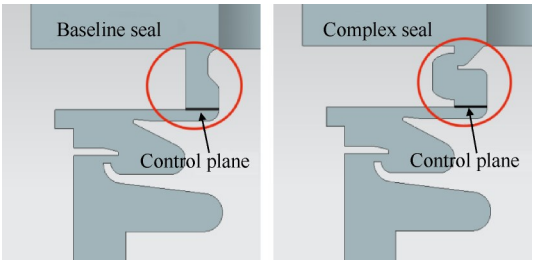


Fig. 2 Rim seal configurations

2.3 数值模拟方法

本文数值计算采用商用软件CFX,求解RANS方程时选取了 $k-\omega$ 湍流模型使方程组封闭。选取 $k-\omega$ 湍流模型的原因是该模型数值计算的结果与实验吻合得更好并且收敛得较快。计算流体域的网格生成通过Gambit软件来完成,在画网格时将主流区和封严区分成两块分别来画网格,主流区网格共用,封严区网格则采用相同的拓扑结构。为了节约计算资源,数值模拟选取的是半叶高进行计算,并采用对称面边界条件(封严流的影响在端区,不会到叶片中截面)。经网格无关性研究,半叶高网格总数为420万,并保证了大部分区域 $y^+ < 1$,其网格示意图如图3所示。

数值模拟的边界条件按照实验工况来给定,主流进口给定总温总压和气流角,进口边界层通过实验测得,如图4所示。出口给定静压边界条件,壁面采用绝热无滑移边界条件。封严流则给定进口法向速度(根据流量为主流的一定百分比调节垂直于进口方向的速度)及周向速度(周向速度 U 为50%的动

叶轮毂处周向速度 U_{hub})。两个侧面则采用周期性交界面。

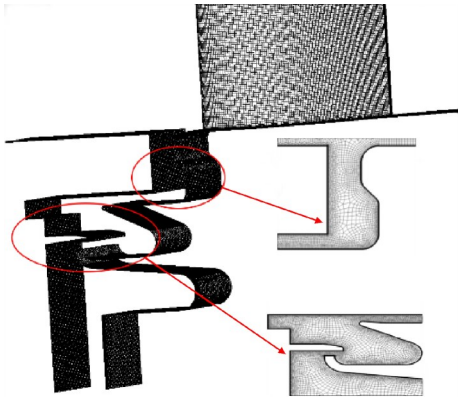


Fig. 3 Computational mesh of the rim seal configuration

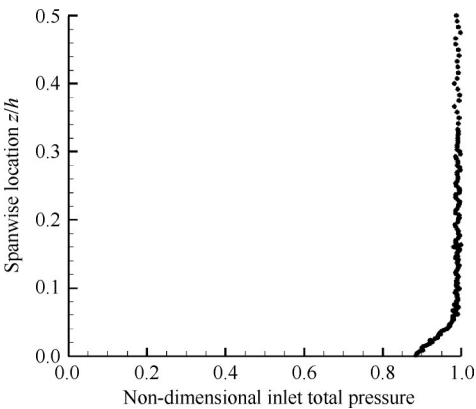


Fig. 4 Velocity profile of the inlet

2.4 数据处理

封严流量比的定义如下

$$LF = \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_1} = \frac{\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out}}{\dot{m}_1} \quad (1)$$

式中 $\dot{m}_1$ 和 $\dot{m}_L$ 分别为主流流量和封严流量, $\dot{m}_{in}$ 和 $\dot{m}_{out}$ 是流入封严腔和流出封严腔的流量,通过进出口管道上的流量计测量得出。主流流量则根据主流进口的总温总压以及静压计算得出。

封严效率的定义为

$$\eta_s = \frac{T_\infty - T_{seal}}{T_\infty - T_L} \quad (2)$$

式中 T_{seal} 为控制面处的温度,选取的控制面如图2中所示。 T_∞ 和 T_L 分别为主流和封严流的温度,数值计算的时候设置它们之间为20K的温度差,这里的封严效率作为一个对比的标准而引入,能反映出主流的入侵程度。总压损失系数的定义为

$$Y = \frac{p_{01,eff} - p_{02}}{p_{01} - p_2} \quad (3)$$

式中 p_{01} 为主流进口总压, p_{02} 和 p_2 分别为主流出口总压和静压, $p_{01,\text{eff}}$ 为考虑了主流和封严流后混合总压, 其计算式为

$$p_{01,\text{eff}} = \frac{\dot{m}_1 \cdot p_{01} + \dot{m}_L \cdot p_{0,\text{cav}}}{\dot{m}_1 + \dot{m}_L} \quad (4)$$

2.5 数值计算验证

为了验证本文的数值计算方法, 图5对比了试验获得的叶片载荷分布、栅后 $0.4C_x$ 位置处周向平均落后角以及总压损失系数 Y 。从图中可以看到, 数值计算的结果与实验结果在整体上的趋势都是一致的, 且能反映出二次流引起的过折转和欠折转现象。图5(c)数值计算与实验存在一定的差异, 这是因为数值计算的掺混模型给出的涡系掺混速率与实验有差异, 导致总压损失的值存在一定的误差。图6是栅后 $0.4C_x$ 位置处试验和数值计算得到的总压损失系数云图对比, 可见数值计算能够准确地捕捉到涡轮叶栅栅后主要的涡系结构引起的损失区。上述验证说明此数值计算方法的精度可以满足对于端区二次流结构的研究。

3 计算结果与分析

3.1 封严结构的性能对比

由图7可以看出, 封严效率和总压损失随着封严流量的增加而增大。相比于 Baseline 封严结构而言, 复杂封严结构的封严效率在各个封严流量下都得到了提升。当封严流量较小时, 复杂封严结构的封严效率提升较为明显, 到达一定封严流量之后, 两者之间的封严效率趋于相等, 此时封严效率也接近于1, 意味着选取的控制面处只存在封严流。而对于总压损失系数, 复杂封严结构和 Baseline 封严结构都在一定的流量范围存在优势, 当 $LF < 1\%$ 或 $LF > 1.75\%$ 时,

复杂封严结构气动性能优于 Baseline 封严结构。下面将从流场内的端区二次流和涡系发展的角度来分析上述现象的原因。

3.2 封严流与主流相互作用机制

为了描述封严流与主流相互作用机理, 图8给出了 Baseline 封严结构在 0.5% 封严流量下的封严流和主流相互作用过程中的典型涡系结构的发展演化。从图中可以看到, 离壁面较远能量较大的这部分边界层流体(HBL)并未受到封严流的影响, 在叶片前缘向下卷起形成马蹄涡, 并向前发展成为马蹄涡的吸力面分支(SHV)和压力面分支(PHV)。而离壁面最近能量最低的这部分边界层流体(LBL), 在压差的作用下于叶片前缘(静压最大)处流入封严结构内, 并与内部的封严流发生相互作用, 形成了一个较大的回流区(图中黑色虚线区域), 即封严回流涡^[15]。由于封严流与主流的周向速度分量相反, 封严回流涡在封严腔内分成了两个分支, 一支往叶片压力面发展, 另一支往吸力面发展。在封严腔内, 封严回流涡的吸力面分支(SLSV)与相邻通道的回流涡压力面分支(PLSV)相遇并融合, 从叶片通道中间静压较低处流出。流出的封严回流涡(LSV)会在通道内横向压力梯度的作用下向叶片的吸力面发展, 最终成为通道涡(PV)的一部分。同时, 由于封严回流涡的存在, 有一部分主流进入封严结构后不能继续向下流动, 而是直接折转并流出, 这一部分流体虽然进入了封严结构, 但是并未和封严流发生相互作用。

3.3 封严效率分析

在澄清了封严流与主流相互作用机制的基础上, 下面从内部流场对比分析两种封严结构的封严效率, 即对比主流入侵的深入程度和封严结构内温

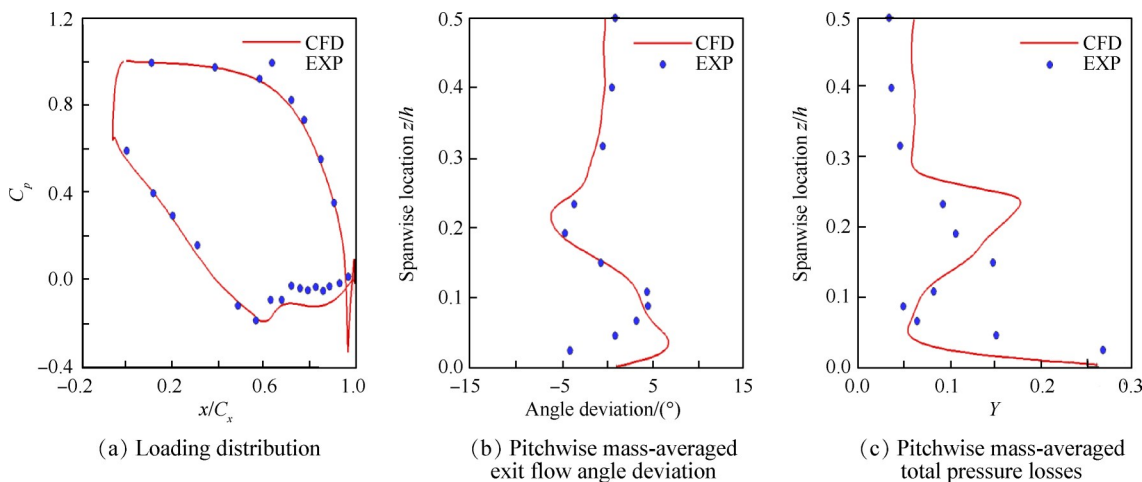


Fig. 5 Comparison of CFD and experimental results

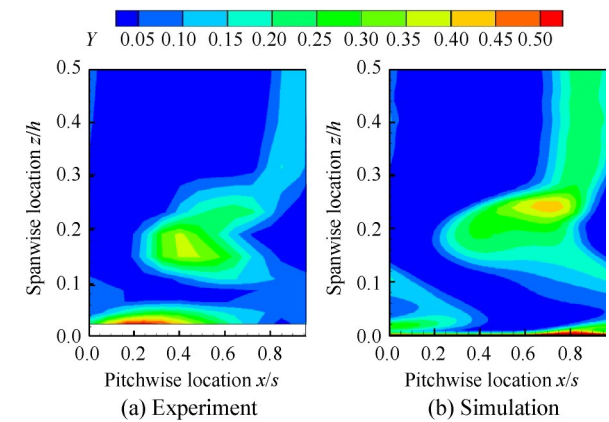


Fig. 6 Flood contours of total pressure losses (Y) at plane 40% C_x downstream of blades

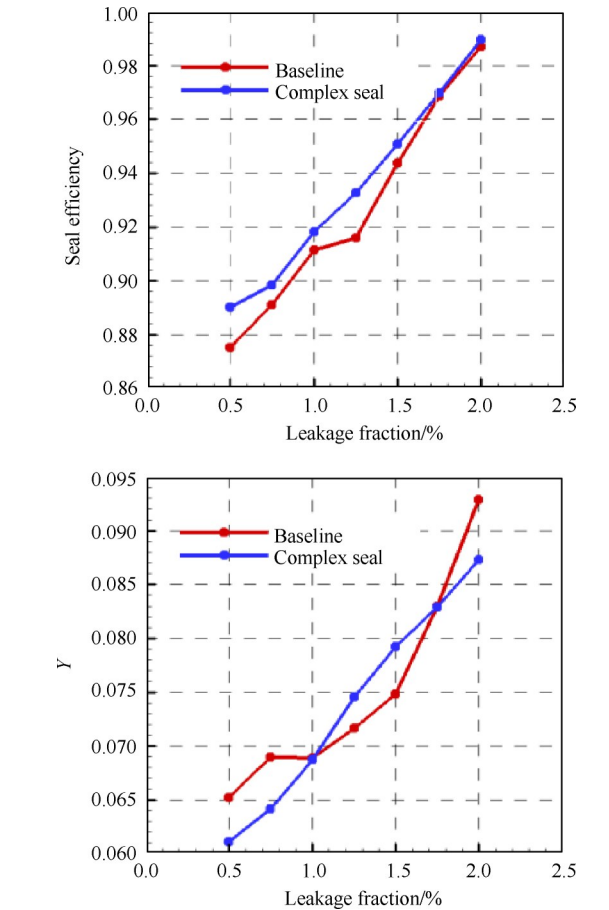


Fig. 7 Seal efficiency and total pressure losses of different rim seal configurations

度受主流影响的大小。图 9 对 0.5% 封严流量下两种封严结构的同一周向截面位置的流线进行了对比,选取的截面靠近于叶片前缘,即主流入侵最深入的区域。同时,右边给出了封严结构内的温度场分布云图。流线的颜色随温度变化,封严效率的大小可以从封严结构内控制面处的温度反映出来,可以很清楚地看出 Baseline 封严结构封严效率低。主流入侵形成的封严回流涡会在其下方诱导出一个反向

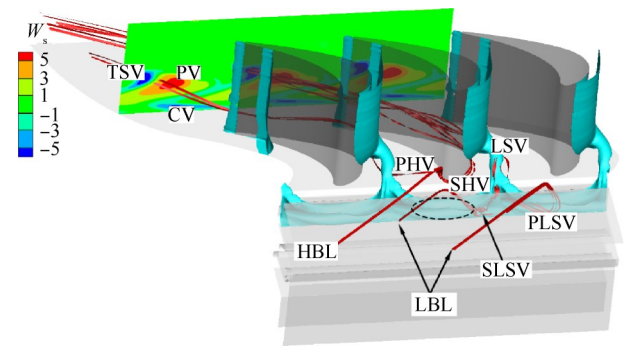


Fig. 8 Iso-surface of temperature superimposed with 3D streamline and streamwise vorticity at 40% C_x plane for the seal configuration

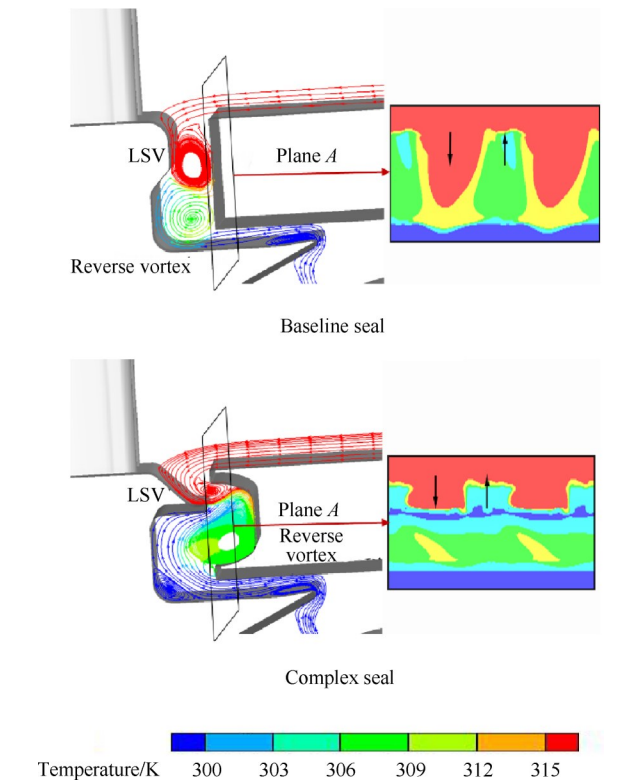


Fig. 9 Surface streamlines in meridional plane and flood contour of temperature at $LF=0.5\%$ for different configurations

涡,这个反向涡会卷吸主流和封严流,是主流和封严流在径向发生相互作用的区域,其位置和大小决定了控制面处的温度。复杂封严结构将这个反向涡限制在了控制面之上,这便是其封严效率高的原因。由流线图可以看到,不同的封严出口结构会改变封严回流涡的大小和位置,这决定了主流入侵的深入程度。在右侧的云图中主流入侵的程度对应着红色高温区向下扩散的范围,可以看出复杂封严结构将主流阻挡在了外层封严。封严内部的结构会影响反向涡的大小和位置,而封严回流涡和反向涡之间的

相互作用会影响封严结构内的温度分布。云图中可以看到在相同深度的位置,复杂封严结构的温度要低于简单封严结构。同时,复杂封严结构流出的封严流温度也相对较低,反映出在封严结构内封严流受到主流的影响较小。

3.4 主通道内流动损失分析

对比 Baseline 和复杂封严结构的总压损失系数时,发现存在很明显的三个区域:在小封严流量($LF < 1\%$)和大封严流量($LF > 1.75\%$)时,复杂封严结构优于 Baseline 结构,而在中等封严流量($1\% < LF < 1.75\%$)时,Baseline 结构优于复杂封严结构。下面选取 0.5% 和 1.5% 封严流量进行流场的详细分析。

图 10 表示的是 Baseline 和复杂封严结构在 0.5% 封严流量下的流场,展示了流道内三个不同截面的流向涡量云图,辅助云图是封严出口处的径向速度云图,黑色的流线表示主流,红色的流线表示封严流。

从图 10 可以看到,在 Baseline 封严结构中马蹄涡的压力面分支和封严回流涡在叶片通道入口便相遇,同时发生了剧烈的掺混,形成了一个很强的混合涡,并最终发展成为了通道涡。相比之下,在复杂封严结构中马蹄涡的压力面分支和封严回流涡在叶片通道内相遇较晚,各自独立发展,形成了两个较小的涡核。由于马蹄涡的压力面分支在横向压力梯度作用下形成了从压力面向吸力面的周向速度,而封严回流涡本身具有从压力面向吸力面的周向速度,导致了这两个涡的旋转方向一致,都表现为正涡量。这两个涡在沿流向发展的过程中,涡核并没有很快融合,只是卷吸的外层流体相互作用,虽然最终也发展成为通道涡,但掺混过程并没有那么剧烈。对比两个结构的栅后涡量云图可以看出,Baseline 封严结

构下的涡量更大,涡核更强,故而掺混越剧烈损失也越大。Baseline 封严结构下马蹄涡的压力面分支和封严回流涡在通道内相遇很快,经过分析认为主要由以下两个原因引起:(1)由封严出口的径向速度云图可以看出,Baseline 封严结构下封严流的流出更加靠近于叶片通道中间,而马蹄涡的压力面分支是从压力面往相邻叶片的吸力面流动,所以相遇更快。这种现象的发生是由于封严流在相对简单的封严结构里流阻较小、压力损失也小,故而封严出口处的封严流压力更大,可以从主流压力更大的叶片通道中间处流出。(2)Baseline 封严结构相比于复杂封严结构而言,其出口几何使得封严流的轴向速度分量很小,即封严回流涡沿轴向运动很慢,故不能像复杂封严结构中马蹄涡的压力面分支和封严回流涡那样各自独立发展。同时,值得注意的是,出口处封严流的轴向速度可以加速端壁处的低能流体,抑制二次流的发展,从而抵消掺混带来的损失^[12]。所以,在 0.5% 封严流量下复杂封严结构的损失更小。

图 11 表示的是 Baseline 和复杂封严结构在 1.5% 封严流量下的流场,可以看到在复杂封严结构中有两个很强的涡核,分别代表马蹄涡的压力面分支和封严回流涡。相比于复杂封严结构在 0.5% 封严流量下的云图,这两个涡都被增强了。这是由于封严流量增大,并且封严腔内的压力提高,低能边界层流体不再进入封严结构内。在 Baseline 封严结构中,可以看到只形成了封严回流涡,但并未形成明显的马蹄涡压力面分支,同时涡的强度相对来说较小。从该工况下的封严出口径向速度云图(图 12(a))中可以看到,流入和流出封严结构的区域和流量都显著增

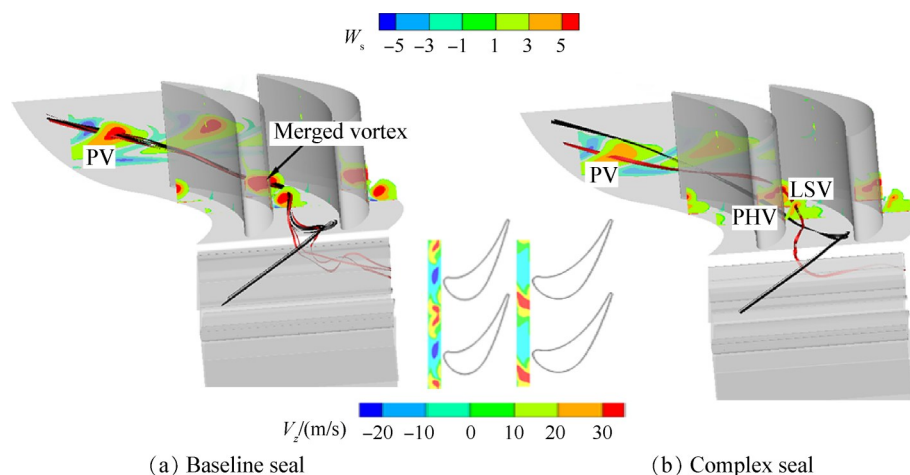


Fig.10 Flow field in terms of the flood contour of streamwise vorticity, velocity and 3D streamlines in the cascade passage for baseline and complex seal configuration at $LF=0.5\%$

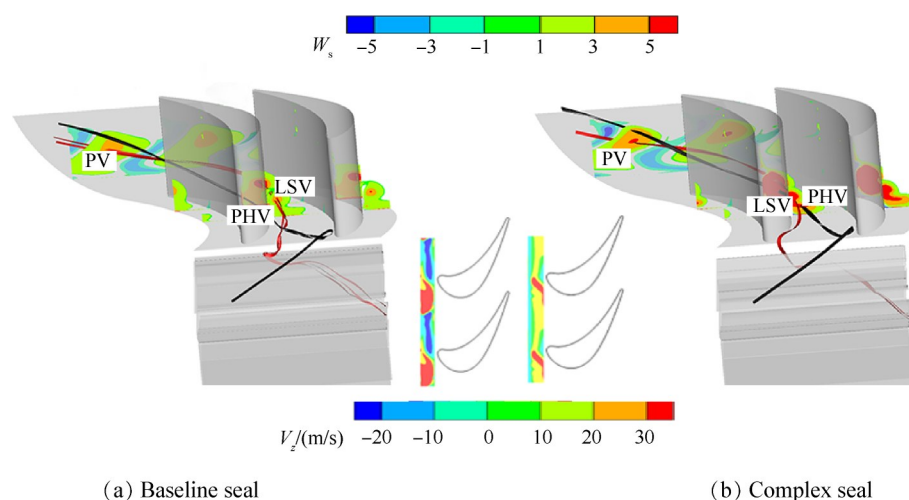


Fig.11 Flow field in terms of the flood contour of streamwise vorticity, velocity and 3D streamlines in the cascade passage for baseline and complex seal configuration at $LF=1.5\%$

大,此时封严出口出现的涡系结构与文献[16]中描述的 Kelvin-Helmholtz 不稳定性现象一致。该现象在速度剪切层里的形成过程在图 13 中进行了示意性描述。速度相反的上下两层粘性忽略不计的流体之间形成了一个速度间断面,见图 13(a),在一个小扰动的影响下这个剪切层轻微卷起,见图 13(b)。这个卷起引起了当地速度的增大和减小导致了局部的低压区(p^-)和高压区(p^+),会进一步加大剪切层的卷起,见

图 13(c)。这种不稳定的状态促使变形加大,最终会发展成为更大的周期性排列的涡,见图 13(d),即 Kelvin-Helmholtz 不稳定性现象。具有一定周向速度的封严流与主流之间会形成一个剪切层,这是形成 Kelvin-Helmholtz 不稳定性的条件^[17]。当封严流的流量不变、周向速度减小到 0 时,该现象便不再出现,如图 12(b)所示,此时主流流入封严结构内的区域和流量大大减小。Kelvin-Helmholtz 不稳定现象形成的涡使大量边界层低能流体被卷入封严结构内,导致马蹄涡的压力面分支发展受到抑制。同时,进入到封严结构内的低能流体会与封严流发生掺混,使流入叶片通道内的封严流周向速度减小,导致封严涡的强度减小。正如文献[18]所提到的,部分主流进入到封严结构内,使封严流在进入叶片通道之前与其进

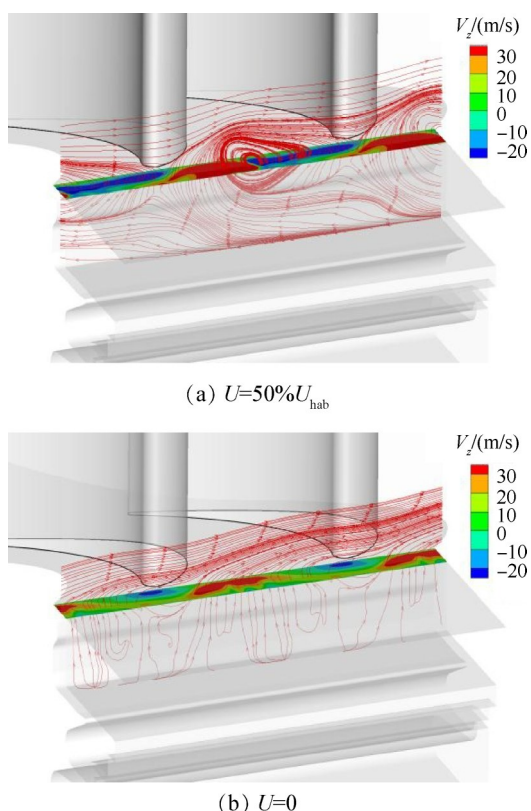


Fig. 12 Surface streamlines in axial plane of the seal slot for the baseline seal configuration at $LF=1.5\%$

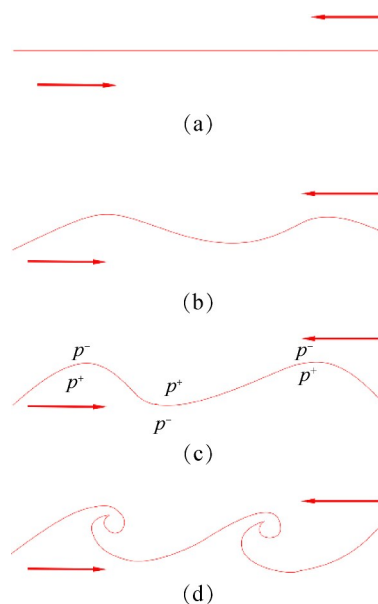


Fig. 13 Formation of Kelvin-Helmholtz instabilities

行掺混,可以提高整体的气动性能。叶片通道内的涡量大幅减小使气流间的掺混随之减弱,所以 1.5% 封严流量下 Baseline 封严结构的损失更小。当在大封严流量 ($LF > 1.75\%$) 时, Baseline 封严结构的损失更大,其原因在于 Kelvin-Helmholtz 不稳定现象的消失,如图 14 所示。此时两种封严结构的封严效率接近于 1,所以主流几乎不再进入封严结构内。而复杂封严结构的出口几何使得封严流的轴向速度分量较 Baseline 封严结构大,封严流的轴向速度可以加速端壁处的低能流体进而减小损失。Kelvin-Helmholtz 不稳定现象只发生在中等封严流量,这说明该现象形成的另一个条件是封严流和主流在封严出口交界面上流量相当。当在大封严流量时,封严出口均为封严流的流出,很少有主流的入侵,这时交界面上封严流占主导;而在小封严流量时,主流大量入侵,这时交界面上主流占主导。这两种情况下, Baseline 封严结构的损失都更大。所以,这里认为总压损失系数线图中出现三个明显的区域是由于 Kelvin-Helmholtz 不稳定现象的出现和消失导致的。

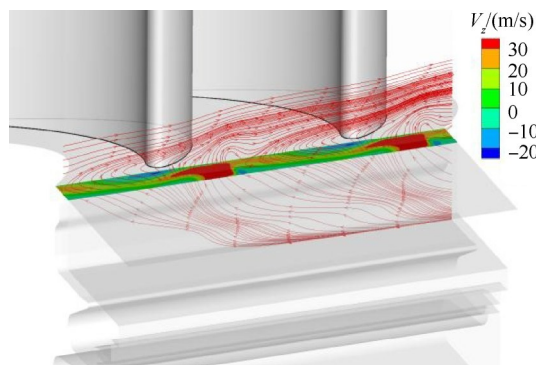


Fig. 14 Surface streamlines in axial plane of the seal slot for the baseline seal configuration at $LF=2\%$

4 结 论

本文针对不同类型的封严结构,利用经过校核的数值模拟方法,详细分析了封严流对主流端区二次流的影响和封严流与主流的相互作用机理,并得到以下结论:

(1) 来流边界层在压差的作用下于叶片前缘侵入封严结构,并与内部的封严流发生相互作用,形成了一个较大的回流区,即封严回流涡。在封严内部,封严回流涡的吸力面分支与相邻通道的回流涡压力面分支相遇并融合,从叶片通道中间静压较低处流出。流出的封严回流涡与马蹄涡压力面分支旋转方向一致,会在通道内横向压力梯度的作用下向叶片

的吸力面发展,最终成为通道涡的一部分。

(2) 不同封严结构会改变封严回流涡和反向涡的大小和位置,这两个涡直接影响到封严结构的封严效率。封严结构决定封严回流涡流出的位置和速度方向,直接影响封严回流涡与马蹄涡压力面分支的相互作用过程。封严回流涡流出更靠近于叶片吸力面,且具有一定的轴向速度,使封严回流涡与马蹄涡的压力面分支相遇更晚,有利于减小损失。

(3) 除了封严流与主流之间存在一定的周向速度差, Kelvin-Helmholtz 不稳定现象形成的另一个条件是封严流和主流在封严出口交界面上流量相当。当在封严出口发生 Kelvin-Helmholtz 不稳定现象时,会有大量边界层低能流体进入到封严结构内,使封严流在进入叶片通道之前与其进行掺混,可以同时减小通道内的封严回流涡和马蹄涡压力面分支的强度,有利于减小二次流损失。

致 谢: 感谢国家自然科学基金资助。

参考文献:

- [1] McLean C, Camci C, Glezer B. Mainstream Aerodynamic Effects Due to Wheelspace Coolant Injection in a High-Pressure Turbine Stage, Part I: Aerodynamic Measurements in the Stationary Frame [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2001, 123 (4): 687-696.
- [2] 张晶辉, 马宏伟. 轮缘封严气体对涡轮转子性能影响的非定常数值研究 [J]. *推进技术*, 2014, 35(4): 470-478. (ZHANG Jing-hui, MA Hong-wei. Unsteady Numerical Investigation for Effects of Rim Sealing Flow on Performance of a Turbine Rotor [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2014, 35(4): 470-478.)
- [3] 刘松龄, 陶 智. 燃气涡轮发动机的传热和空气系统 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2018.
- [4] Popović I, Hodson H P. Improving Turbine Stage Efficiency and Sealing Effectiveness Through Modifications of the Rim Seal Geometry [R]. *ASME GT-2012-68026*.
- [5] Schuler P, Kurz W, Dullenkopf K, et al. The Influence of Different Rim Seal Geometries on Hot-Gas Ingestion and Total Pressure Loss in a Low Pressure Turbine [R]. *ASME GT-2010-22205*.
- [6] Schuler P, Dullenkopf K, Bauer H J. Investigation of the Influence of Different Rim Seal Geometries in a Low Pressure Turbine [R]. *ASME GT-2011-45682*.
- [7] Burd S W, Simon T W. Effects of Slot Bleed Injection over a Contoured Endwall on Nozzle Guide Vane Cooling Performance, Part I: Flow Field Measurements [R]. *ASME GT-2000-199*.
- [8] Schlienger J, Pfau A, Kalfas A I, et al. Effects of Laby-

- rinth Seal Variation on Multistage Axial Turbine Flow [R]. *ASME GT*-2003-38270.
- [9] Bohn D E, Rudzinski B, Suerken N. Influence of Rim Seal Geometry on Hot Gas Ingestion into the Upstream Cavity of an Axial Turbine Stage [R]. *ASME GT*-1999-248.
- [10] 周 杨, 牛为民, 邹正平, 等. 轮毂封严气体对高压涡轮二次流动的影响[J]. 推进技术, 2006, 27(6): 515-520. (ZHOU Yang, NIU Wei-min, ZOU Zheng-ping, et al. Effects of Coolant Injection from Rim Seals on Secondary Flow in a High Pressure Turbine[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2006, 27(6): 515-520.)
- [11] 张伸展, 温风波, 赵志奇, 等. 高压涡轮封严冷气对主流气动性能的影响[J]. 航空动力学报, 2018, 33(5): 1215-1225.
- [12] Hunter S D, Manwaring S R. Endwall Cavity Flow Effects on Gas Path Aerodynamics in an Axial Flow Turbine, Part I: Experimental and Numerical Investigation [R]. *ASME GT*-2000-651.
- [13] McLean C, Camei C, Glezer B. Mainstream Aerodynamic Effects Due to Wheelspace Coolant Injection in a High-Pressure Turbine Stage, Part II: Aerodynamic Measurements in the Rotational Frame [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2001, 123 (4): 697-703.
- [14] Gier J, Stubert B, Brouillet B, et al. Interaction of Shroud Leakage Flow and the Main Flow in a Threestage LP Turbine [R]. *ASME GT*-2003-38025.
- [15] Popović I, Hodson H P. Aerothermal Impact of the Interaction Between Hub Leakage and Mainstream Flows In Highly-Loaded HP Turbine Blades [R]. *ASME GT*-2010-22311.
- [16] Joshua T M Horwood, Fabian P Hualca, Mike Wilson, et al. Unsteady Computation of Ingress Through Turbine Rim Seals [R]. *ASME GT*-2018-75321.
- [17] Rabs M, Benra F K, Dohmen H J, et al. Investigation of Flow Instabilities near the Rim Cavity of a 1.5 Stage Gas Turbine [R]. *ASME GT*-2009-59965.
- [18] 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 HP Turbines [R]. *ASME GT*-2012-68025.

(编辑:梅 瑛)