

低压透平叶片流动分离主动控制的数值研究

刘小民, 周海洋

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 基于 Langtry-Menter 转捩模型的 Menter SST 两方程模型,通过数值求解了三维非定常雷诺时均 Navier-Stokes 方程,研究了雷诺数(Re)和来流湍流强度(I_{FSTI})对 Pak-B 低压透平叶片吸力面流动分离的影响. 计算结果表明:该湍流模型能够较好地预测低压透平叶栅内流动特性,并能有效捕捉到叶片吸力面上流动分离和再附位置;随着 Re 和 I_{FSTI} 的增大,叶片吸力面流动分离均有大幅度的减少. 在 Re 和 I_{FSTI} 较低的条件下,数值分析了涡流发生器(VGJ)对低压透平叶片表面流动分离的控制效果,结果表明:VGJ 的引入能够有效抑制甚至消除低 Re 条件下叶片吸力面上的流动分离,减小总压损失和尾迹宽度. 在 VGJ 流动控制中,存在着最佳吹气比,由此可获得最佳的流动控制效果. 吹气比太小,不能有效抑制流动分离;吹气比太大,射流与主流掺混加剧,流动损失增加. 当 VGJ 吹气比为 2 时,流动控制效果最佳,相对于无 VGJ 控制时的总压损失减少了 45%.

关键词: 流动分离控制;涡流发生器;低压透平叶片;数值模拟

中图分类号: V231.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)09-0021-06

Numerical Study on Active Flow Separation Control for Low-Pressure Turbine Blade

LIU Xiaomin, ZHOU Haiyang

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The three-dimensional viscous unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes equations were employed to investigate the effects of Reynolds numbers (Re) and freestream turbulence intensity (I_{FSTI}) on the flow separation at the suction side of the Pak-B low-pressure turbine (LPT) blade on the basis of the Menter SST turbulence model coupled with the Langtry-Menter transition model. The numerical results indicate that the turbulence simulation can predict the flow characteristics inside the LPT cascade and capture the flow separation and reattachment location at the suction side of the blade effectively. The flow separation at the suction side of the blade decreases significantly with the increase in Re or I_{FSTI} . The control effect of vortex generator jets (VGJs) on the flow separation at the suction side of the blade was numerically analyzed at the low Re and low I_{FSTI} . Applying VGJs can suppress the flow separation at the suction side of the blade and reduce the total pressure loss and wake width. There is an optimum blowing ratio (B) in the flow control by VGJs. The flow separation could not be suppressed effectively with a small B and the mixing loss of jet flow and main flow could rise with a large B . The total pressure loss decreases by 45% compared with that without the control by VGJs when B of VGJs equals 2.

Keywords: flow separation control; vortex generator jets; low pressure turbine blade; numerical simulation

在低 Re 条件下,透平叶片吸力面附近会出现严重的边界层流动分离,从而导致低压透平叶栅内流动损失显著增大,涡轮效率急剧下降.近些年来,涡流发生器(VGJ)作为一种具有主动流动控制方式,受到愈来愈多的关注,国内外许多研究机构和学者正在积极开展基于 VGJ 流动控制的研究. Bons 等人^[1-2]在低压透平叶片表面采用 VGJ 对流动分离进行控制,通过在相同条件下的低压透平叶片实验研究表明:采用 VGJ 使得低 Re 条件下涡轮叶栅的流动分离得到了实质性的改善.

随着计算流体力学(CFD)技术的不断发展和湍流模型研究的进一步深入,数值计算已经成为研究流动分离转捩及其控制技术的一种有效方法.例如:结合三维雷诺时均 Navier-Stokes 方程和标准 $k-\epsilon$ 湍流模型,数值研究了在带有、不带有 VGJ 的条件下,射流速度比、VGJ 射流孔数及孔径等对圆筒形扩压器性能的影响^[3];耦合三维非定常雷诺时均 Navier-Stokes 方程和基于转捩模型的剪切应力运输(SST)湍流模型,来预测叶片表面的流动分离和转捩现象^[4];采用高精度直接数值模拟方法研究带有 VGJ 控制的低压透平叶栅流动^[5];采用三维隐式大涡模拟模型对带有 VGJ 的低压透平叶栅流动分离控制进行数值分析^[6],发现 VGJ 能够促使叶片吸力面边界层的转捩提前发生,从而达到有效减小叶片表面流动分离区域的效果.上述研究尽管在一定程度上揭示了 VGJ 对低压透平叶栅内流动结构的影响,但对计算机的运算速度和内存容量要求很高,而且计算时间也很长.

本文采用耦合 Langtry-Menter 转捩模型的 Menter SST 两方程湍流模型来求解三维非定常雷诺时均 Navier-Stokes 方程,其对计算机硬件要求较低,计算量也比较小.

1 数值计算方法

1.1 研究对象

本文的研究对象是 Pak-B 透平叶片.该叶片是由 Pratt & Whitney 公司设计的一种专门针对无人驾驶飞行器飞行条件的低 Re 透平叶片,具有高负荷、后加载的低压透平叶型,但在低 Re 情况下会产生流动分离损失.图 1 所示为带有 VGJ 的 Pak-B 叶型几何示意图.在叶片吸力面上装有 VGJ,叶片弦长 $C=17.78$ cm,叶片安装角度 $\gamma=26^\circ$,叶片轴向弦长 $C_x=C\cos\gamma=15.95$ cm,叶片栅距 $L=0.88 C_x$,叶片进口角 β_1 和出口角 β_2 分别为 35° 和 -60° . VGJ

沿叶展方向布置, VGJ 射流方向由偏斜角 θ 和倾斜角 φ 来确定,其中 θ 为射流方向在当地表面的投影与当地主流方向的夹角, φ 为射流方向与当地表面的夹角.

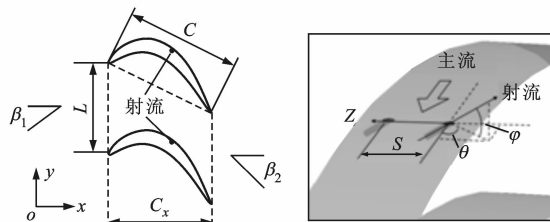


图1 带有 VGJ 的 Pak-B 叶型示意图

1.2 计算网格及边界条件

数值计算区域为周向一个栅距的单个涡轮叶栅通道,通道上下边界条件设定为周期性边界条件.由于射流孔沿叶展方向周期性分布,故计算域沿展向取 2 个射流孔间距的长度,射流孔位于计算域中间位置,叶片展向边界条件设定为周期性边界条件.这样,选取的计算区域既可保证计算的有效性,又可减小计算的工作量.在叶片轴向上,沿前缘上游延伸 $2C_x$ 作为进口边界,并给定进口气流的温度、速度和来流角度;沿尾缘下游延伸 $5C_x$ 作为出口边界,并给定出口气流静压,以消除出口压力边界的反射效应;叶片壁面为绝热无滑移壁面.本文射流孔径 $d=1$ mm,射流孔间距 $S=10$ mm,射流管长度 $l=5$ mm.计算域网格采用 H-O-H 结构化网格,其划分如图 2 所示.在叶片近壁面及流动分离区加密网格,在叶片壁面、射流内壁面附近和射流出口区域均采用 O 型网格.叶片计算域网格数为 476 694,射流计算域网格数为 18 120,叶片表面网格的 $y^+<1$.

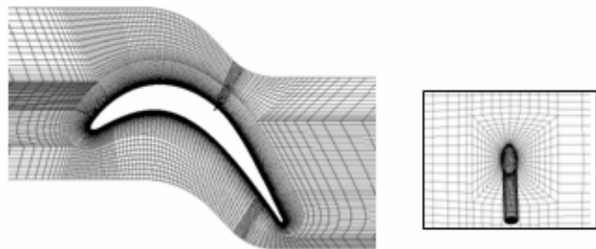


图2 计算网格及叶片吸力面射流孔附近区域网格

1.3 湍流计算模型

本文采用耦合 Langtry-Menter 转捩模型的 Menter SST 两方程湍流模型,来描述低 Re 条件下低压透平叶片吸力面上边界层转捩和分离现象. Langtry-Menter 模型是严格建立在局部变量基础

之上的基于经验关联的转捩模型,它考虑了来流湍流度以及逆压梯度对边界层转捩的影响^[7-8].该转捩模型基于两个输运方程,即间歇因子输运方程和转捩起始动量厚度 Re 输运方程.前者与 SST 湍流模型耦合,以开启边界层转捩点之后的湍动能生成项,触发当地转捩;后者为转捩起始动量厚度 Re 输运方程,以捕捉边界层边缘的湍流度及压力梯度的非局部影响,并将经验关联式中的非局部变量转换成局部变量,然后再与当地涡量的 Re 对比来确定流场中满足转捩起始准则要求的转捩位置点.一旦流场中任何位置处的涡量的 Re 超出转捩起始的 Re ,则激活间歇因子输运方程,开启湍流生成项,进而触发开启转捩过程.

对于三维非定常雷诺时均 Navier-Stokes 方程的数值求解,采用基于有限单元的有限体积法,方程中扩散项和源项的离散采用二阶中心差分格式,对流项的离散采用高精度离散格式,时间项的离散采用双时间步隐式时间迭代方法.

1.4 数值方法验证

取相邻射流孔中间截面为观察面.图 3 给出了观察面上来流湍流强度 $I_{FSTI}=0.08\%$ 且在不同 Re 条件下,Pak-B 叶片表面压力系数 C_p 沿叶片弦长的分布. Re 是基于叶栅进口速度与叶片轴向弦长定义的,表达式为

$$Re = \frac{\rho_{in} u_{in} C_x}{\mu} \tag{1}$$

式中: ρ_{in} 为叶栅进口气流密度; u_{in} 为叶栅进口气流速度; μ 为流体动力黏性系数.

压力系数

$$C_p = \frac{P_s - P_{\infty}}{(1/2)\rho_{in} u_{in}^2} \tag{2}$$

式中: P_{∞} 为叶栅进口气流静压; P_s 为叶片表面静压; $\frac{1}{2}\rho_{in} u_{in}^2$ 表示叶栅进口动压.

从图 3 可以看出,叶片压力面上 C_p 的分布与实验测量的^[9]结果非常吻合,这表明转捩模型能够有效预测低压透平叶片流动特性.

2 计算结果及分析

2.1 Re 和 I_{FSTI} 对流动分离的作用

从物理意义上讲, Re 和 I_{FSTI} 在很大程度上影响着边界层流动分离.为详细分析 Re 和 I_{FSTI} 对低压透平叶片流动分离的影响,本文对 Re 分别为 2.5×10^4 、 5×10^4 、 7.5×10^4 、 10×10^4 和 I_{FSTI} 分别为

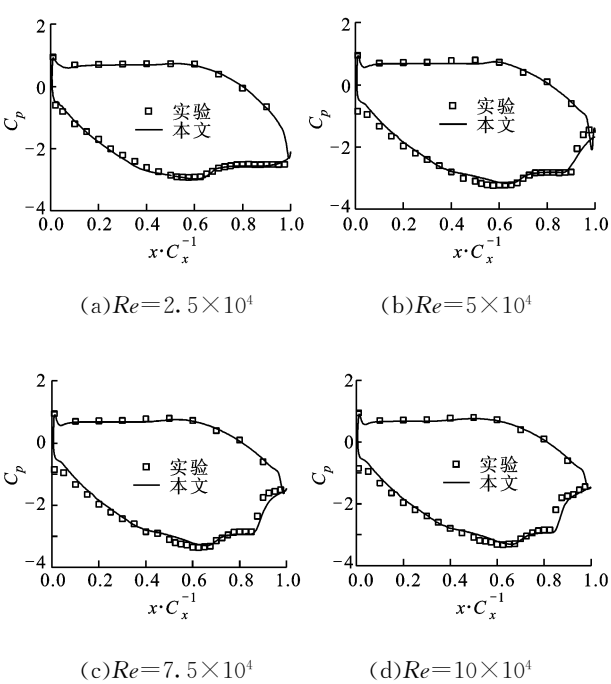


图 3 I_{FSTI} 为 0.08% 时叶片表面压力系数分布

0.08%、2.35%、6.0% 时低压透平叶栅内流动进行了数值计算.

图 4 给出了低压透平叶栅出口总压损失 ξ' 随 Re 和 I_{FSTI} 的变化, ξ' 定义为

$$\xi' = \xi / \xi_{ref} \tag{3}$$

式中: ξ_{ref} 为 $Re = 2.5 \times 10^4$ 、 $I_{FSTI} = 0.08\%$ 时叶栅出口总压损失,即 $Re = 2.5 \times 10^4$ 、 $I_{FSTI} = 0.08\%$ 时 $\xi' = 1$; ξ 为基于叶栅出口动压头的总压损失,定义为

$$\xi = \frac{P_{ti} - \bar{P}_{to}}{P_{to} - \bar{P}_{so}} \tag{4}$$

其中 $\bar{P}_{to}$ 表示质量加权平均的叶栅出口总压, $\bar{P}_{so}$ 表示质量加权平均的叶栅出口静压, P_{ti} 表示叶栅进口气流总压.

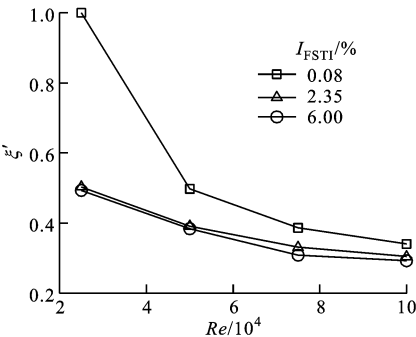


图 4 Re 和 I_{FSTI} 对总压损失的影响

从图 4 可以看出,在相同 Re 条件下,随着 I_{FSTI} 增大,对应的总压损失随之减少.当 I_{FSTI} 分别为

2.35%和6.0%时, ξ' 的差别不大. 当 $I_{\text{FSTI}}=0.08\%$ 时, ξ' 明显大于 I_{FSTI} 为 2.35%和6.0%时的情况. Re 越低, 这种现象越明显. 当 I_{FSTI} 固定时, 随着 Re 的增加, 总压损失不断减少. 在 $I_{\text{FSTI}}=0.08\%$ 且 $Re=5\times10^4$ 和 $Re=10\times10^4$ 时的叶栅出口总压损失 ξ' 分别为 $Re=2.5\times10^4$ 时的 50%和 34%.

图 5 所示为 Re 和 I_{FSTI} 对叶片吸力面流动分离和再附位置的影响. 当 $Re=5\times10^4$ 且 $I_{\text{FSTI}}=0.08\%$ 时, 流动分离点和再附点位置分别为 71% C_x 和 98% C_x ; 当 I_{FSTI} 增加到 2.35%时, 流动分离点后移到 73.3% C_x , 向下游移动了 2.3% C_x , 再附点移动到 87.8% C_x , 向上游移动距离高达 10.2% C_x ; 当 I_{FSTI} 继续增大到 6.0%, 分离点仅仅向下游移动了 0.6% C_x , 约在 73.9% C_x 处, 再附位置向上游移动了 2.2% C_x , 约在 85.6% C_x 处. 通过以上分析表明: 在 Re 相同且 I_{FSTI} 较低条件下, I_{FSTI} 的变化对流动分离的影响更为明显; 当 I_{FSTI} 较高时, I_{FSTI} 的变化对流动分离的影响比较弱. 另一方面, 流动分离起始点和再附位置对 I_{FSTI} 的敏感程度有所不同, I_{FSTI} 变化对再附位置的影响远远大于对分离位置的影响.

从图 5 可以看出, 随着 Re 增大, 叶片表面流动分离的起始位置逐渐向下游移动. 当 $I_{\text{FSTI}}=0.08\%$ 时, $Re=2.5\times10^4$ 的分离点位置在 68% C_x 处, 流动无再附现象; 当 $Re=5\times10^4$ 时, 分离点位置向下游移动到 71% C_x 附近, 在尾缘附近约 98% C_x 处流动出现再附; 随着 Re 再增加, 分离点继续向下游移动, 再附点向上游移动. 当 $Re=10\times10^4$ 时, 分离再附位置分别在 72% C_x 处和 88% C_x 处.

图 6 表示 Re 和 I_{FSTI} 对叶栅出口当地总压损失的影响. 图中 Y 表示叶栅出口截面沿叶栅周向的坐标, $Y=0$ 表示叶片吸力面和压力面的分界面. 叶栅出口当地总压损失

$$\xi_{\text{loc}} = \frac{P_{\text{ti}} - P_{\text{to,loc}}}{P_{\text{to}} - P_{\text{so}}}$$

(5)

式中: $P_{\text{to,loc}}$ 表示叶栅出口的当地总压.

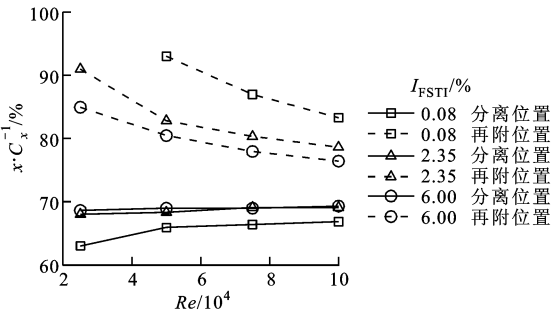
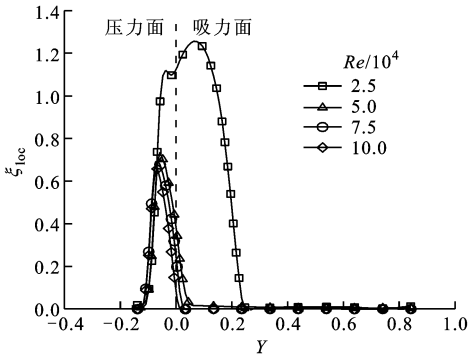
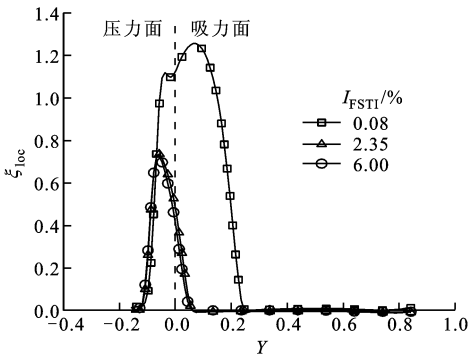


图 5 Re 和 I_{FSTI} 对叶片吸力面流动分离和再附位置的影响

$I_{\text{FSTI}}=0.08\%$ 时 Re 对叶栅出口当地总压损失的影响如图 6a 所示, 由图可以看出, 当地总压损失峰值由 $Re=2.5\times10^4$ 对应的 1.26 下降到 $Re=5\times10^4$ 对应的 0.74 和 $Re=10\times10^4$ 对应的 0.65, 峰值向远离压力面的方向(负 Y 方向)移动, 尾迹宽度也随之减小. 在 Re 较高的条件下, 峰值和尾迹宽度随着 Re 的增加只有轻微的变化. 图 6b 为 $Re=2.5\times10^4$ 时 I_{FSTI} 对叶栅出口当地总压损失的影响, 由图可以看出, I_{FSTI} 和 Re 对当地总压损失的影响规律基本一致.



(a) $I_{\text{FSTI}}=0.08\%$ 时 Re 的影响



(b) $Re=2.5\times10^4$ 时 I_{FSTI} 的影响

图 6 Re 和 I_{FSTI} 对低压透平叶栅出口当地总压损失的影响

以上分析结果表明: 当 Re 增加时, 增加了对扰动的放大作用, 增强了流体的湍流强度, 从而抑制了流动分离. 当 I_{FSTI} 增大时, 表示湍流脉动增强, 促使分离泡上方的自由剪切层内转捩位置提前, 由此加强了分离边界层与主流之间的掺混作用, 从而使得分离流动提前附着. 这也为流动分离控制提供了理论依据.

2.2 VGJ 不同吹气比对流动分离的控制

在低 $Re(2.5\times10^4)$ 和低 $I_{\text{FSTI}}(0.08\%)$ 的条件下, 为有效抑制或者消除低压透平叶片吸力面上流动的分离, 引入 VGJ 对该流动进行控制. VGJ 沿叶

展方向均匀布置在流动分离起始位置之前,VGJ 射流方向的 $\theta=90^\circ$ 、 $\varphi=30^\circ$. 吹气比 B (射流管进口速度与射流孔处无射流控制时的主流速度之比)分别取 1、2、3.

图 7 给出了 VGJ 的吹气比对流场控制效果的影响,由图可以看出,在 3 个吹气比下,叶栅的出口总压损失都明显减少. $B=1、2、3$ 时,总压损失分别为 57%、55%、59%. 可见, $B=2$ 时, VGJ 控制效果最佳,与无控制条件下相比总压损失减少了 45%.

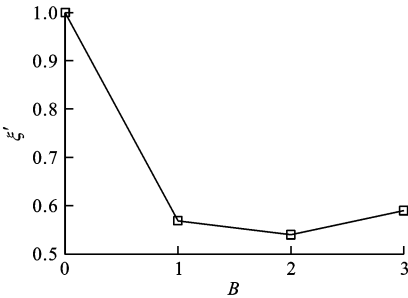


图 7 VGJ 的吹气比对总压损失的影响

图 8 为无控制和不同吹气比控制条件下观察面上叶片表面压力系数 C_p 的分布. 从图中可以看出, $B=1$ 时,叶片吸力面下游处 C_p 出现了先快速上升再缓慢上升,随后又快速上升再缓慢上升的过程. 这表明在吸力面有流动分离和再附现象,且与无控制时相比,分离位置明显靠近叶片吸力面下游. $B=2$ 时, C_p 曲线在吸力面的下游处出现了快速上升的过程,接近尾缘附近出现了一个压力平台,一直延伸到尾缘. 这表明在吸力面靠近尾缘存在一个分离区域,并且无流动再附. $B=3$ 时, C_p 曲线在吸力面下游区域不断升高,没有表现出明显的分离特征,说明 VGJ 完全消除了叶片吸力面的流动分离.

图 9 所示为 VGJ 的吹气比 B 对叶片出口尾迹的影响. 由图可以看出, VGJ 能够有效减小尾迹宽度和深度,并且尾迹峰值向远离压力面的方向(负

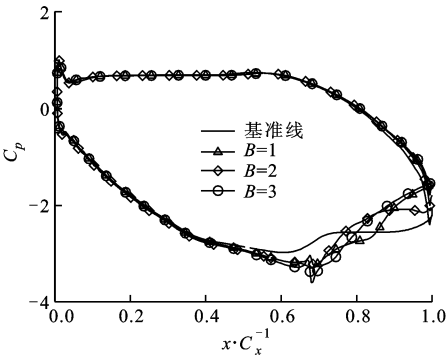


图 8 带有和不带有 VGJ 时观察面上低压透平叶片表面压力系数分布

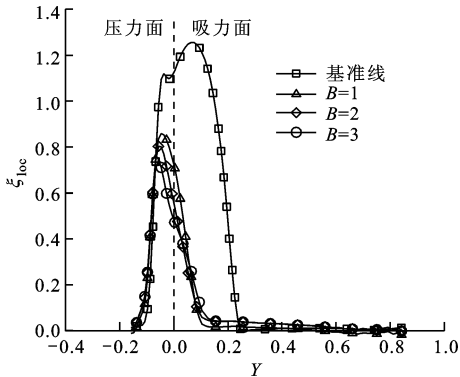


图 9 吹气比对低压透平叶片出口当地总压损失的影响

Y 方向)移动. 随着 B 的增加,峰值不断减小,但尾迹宽度变化不大. $B=3$ 时,尾迹峰值为 0.74,小于 $B=2$ 对应的 0.8,但 $B=2$ 时总压损失却低于 $B=3$ 时的总压损失. 这是因为当 $B=3$ 时,虽然射流有效抑制了流动分离,但大质量流量射入主流区而引起了较大的掺混损失,使得总压损失反而有所增加.

在无控制和不同吹气比条件下,观察面上静压和流线分布如图 10 所示. 在无控制条件下,叶片吸力面的后半段存在严重的流动分离. 对于带有 VGJ 的流动控制,叶片吸力面的低压区明显减小,分离泡明显变小. 当 $B=1$ 时,在叶片的吸力面存在一个分离泡,其分离位置相对于无控制条件下更靠近叶片吸力面下游,并且在尾缘附近出现再附;当 $B=2$ 时,分离位置更加靠近尾缘,但没有出现再附;当 $B=3$ 时,叶片吸力面的流动分离几乎完全消失. 这个结果与 C_p 曲线的分析一致. 通过 VGJ 的控制,吸力面的低压区均明显减小. 分析认为: $B=1$ 时, VGJ 射流流量较小,不足以有效抑制流动分离,只能使得分离位置向后推移,并引发再附,减小分离区域,随着 B 的增加,射流质量流量增大,分离位置不断地向下游移动; $B=2$ 时,叶片吸力面上流动分离位置已经接近尾缘; $B=3$ 时,由于 VGJ 的引入基本上完全消除了叶片吸力面上的流动分离现象,但射流质量流量的增加使得射流与主流的掺混损失增大,流动损失也相应增加.

采用 VGJ 进行低 Re 条件下透平叶栅流动分离控制,能够有效抑制甚至消除叶片吸力面上的流动分离,减少总压损失. VGJ 的吹气比对流动分离控制效果有较大影响,吹气比存在着一个最佳值,由其可获得最佳的流动控制效果.

3 结 论

本文在不同 Re 和 I_{FSTI} 下对 Pak-B 低压透平叶

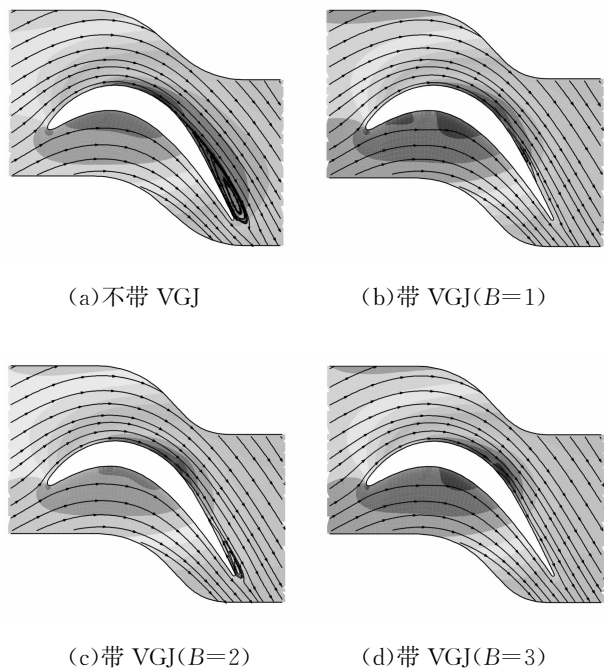


图10 带有和不带有VGJ时低压透平叶片
观察面上流线图和压力云图

栅内流动特性进行了数值分析,并在 $Re=25 \times 10^4$ 、 $I_{\text{FSTI}}=0.08\%$ 的条件下考察了VGJ的吹气比对叶片表面流动分离控制效果的影响,获得的主要结论如下。

(1) 采用基于Langtry-Menter转捩模型的Menter SST湍流模型,能够较为准确地预测低压透平叶片流动特性,有效捕捉叶片吸力面的流动分离与再附。

(2) 在 $Re=2.5 \times 10^4$ 、 $I_{\text{FSTI}}=0.08\%$ 的条件下,VGJ能有效抑制Pak-B叶片表面流动分离,减小总压损失和尾迹宽度。

(3) VGJ的吹气比对流动分离控制效果有很大的影响,吹气比存在最优值使得VGJ的控制效果最佳。 $B=1$ 时,VGJ的射流流量较小,只能在一定程度上抑制流动分离; $B=3$ 时,VGJ基本上完全消除了叶片吸力面上的流动分离,但射流质量流量的增加使得射流与主流的掺混损失增大,流动损失也相应增加; $B=2$ 时,控制效果最佳,总压损失系数减少了45%。

参考文献:

- [1] BONS J P, SONDERGAARD R, RIVIR R B. Control of low-pressure turbine separation using vortex generator jets, AIAA 99-0367 [R]. Reston, VA, USA: AIAA, 1999.
- [2] BONS J P, SONDERGAARD R, RIVIR R B. Turbine separation control using pulsed vortex generator jets [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2001, 123 (2):198-206.
- [3] LIU X M, NISHI M. Improvement of diffuser performance by using vortex generator jets with different scheme of velocity ratio [C] // Proceedings of 2003 Meeting of Japan Society of Fluid Mechanics. Tokyo, Japan: Japan Society of Fluid Mechanics, 2003:408-409.
- [4] 尹进宝, 乔渭阳. 低雷诺数下涡轮叶栅流动分离实验与数值研究 [J]. 推进技术, 2008, 29(2):208-213.
YI Jinbo, QIAO Weiyang. Experimental and numerical investigation on flow separation in turbine cascade with low Reynolds number [J]. Journal of Propulsion Technology, 2008, 29(2):208-213.
- [5] POSTL D, GROSS A, FASEL H F. Numerical investigation of low-pressure turbine blade separation control, AIAA 2003-0614 [R]. Reston, VA, USA: AIAA, 2003.
- [6] RIZZETTA D P, VISBAL M R. Numerical simulation of separation control for a transitional highly-loaded low-pressure turbine [J]. AIAA Journal, 2005, 43 (9):1958-1967.
- [7] MENTER F R, LANGTRY R B. A correlation-based transition model using local variables, part I: model formulation, ASME-GT 2004-53452 [R]. New York, NY, USA: ASME, 2004.
- [8] LANGTRY R B, MENTER F R. A correlation-based transition model using local variables, part II: test cases and industry applications, ASME-GT 2004-53454 [R]. New York, NY, USA: ASME, 2004.
- [9] HUANG J, CORKE T C, THOMAS F O. Plasma actuators for separation control of low-pressure turbine blades, AIAA 2003-1027 [R]. Reston, VA, USA: AIAA, 2003.

(编辑 苗凌 王焕雪)