

文章编号: 1000-8055(2008)08-1523-07

涡轮叶尖镶嵌肋条对泄漏流场的影响

李 伟, 乔渭阳, 许开富, 罗华铃
(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 结合基于压力修正的采用雷诺应力湍流模型加壁面函数的三维计算流体力学程序, 通过沿着叶尖表面加肋条以期减小叶尖间隙泄漏损失, 对某一轴流涡轮转子叶尖表面镶嵌肋条对泄漏流场细节的影响进行了数值研究, 并详细分析了不同肋条高度和肋条宽度对泄漏流场的影响. 结果表明: 肋条使得气流通过压力面肋条时出现分离形成回流区, 阻碍泄漏流动, 减小泄漏损失; 肋条高度 h 对涡轮效率有较大影响, 且有最佳肋条高度值, 在最佳肋条高度下涡轮效率提高 0.13%; 肋条宽度 w 对流场影响不大, 但小肋条宽度形成较大的空腔, 可以稍提高涡轮效率.

关 键 词: 叶尖泄漏涡; 叶尖间隙高度; 被动控制; 数值模拟

中图分类号: V231.3

文献标识码: A

Influence of squealer tip on tip leakage flow in axial turbine

LI Wei, QIAO Wei yang, XU Kai fu, LUO Hua ling

(School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In order to reduce the tip leakage loss, a pressure correction based, 3D Reynolds-averaged Navier-Stokes equations CFD code with Reynolds stress model and wall function was used to simulate the effects of the passive control of a partial squealer tip around tip platform on the tip leakage flow in a turbine rotor. The effect of squealer tip with different rim heights and widths on the tip leakage flow was sequentially simulated. The results show that recirculation region appeared in the tip region and the rim near suction side could block the tip leakage flow, which decrease the tip leakage loss. The height of tip platform rim had more influence on the turbine efficiency, and it had an optimal value, where the turbine efficiency could increase by 0.13 percent. The rim width had less influence on the flow field, but it made the cavum became large, so the turbine efficiency slightly increased.

Key words: tip leakage vortex; tip clearance height; passive control; numerical simulation

叶尖泄漏流是叶轮机械转子中最普遍和有影响的流动现象之一, 当泄漏流从吸力面流出时与通道主流相互作用在沿着叶片吸力面的角落处形成泄漏涡, 泄漏流和泄漏涡可以堵塞通道主流, 引起下游的不稳定性, 增大叶片换热的复杂性, 增加气动损失, 涡轮中 1/3 以上的损失由叶尖间隙泄漏流引起. 而降低损失、提高效率一直是主要动力装置

涡轮部件必须解决的重要问题, 因此研究采用相应控制措施去减小间隙泄漏流动损失近年来是涡轮叶尖间隙研究的热点和难点^[1-6]. 文献[1-2]为主动控制在涡轮叶尖间隙泄漏流中的应用, 即在轴流涡轮转子实验台上开展的涡轮叶尖表面开孔射流实验研究, 并考虑了射流孔位置和射流流量对泄漏流动带来的影响. 文献[3]在涡轮叶尖表面嵌入等离

收稿日期: 2007-07-31; 修订日期: 2007-10-18

作者简介: 李 伟(1981-), 男, 湖北天门人, 博士生, 研究领域为推进系统气动热力学.

子体控制器以期对叶尖泄漏流施加一种电磁力以期达到减小泄漏损失的目的. 文献[4]为减小泄漏流带来的影响,在涡轮转子实验台上分别在叶尖间隙处进行喷气、叶尖表面加肋条和叶尖带叶冠的实验研究,其中叶尖加肋条的研究表明当叶尖间隙较小时加肋条可以提高涡轮性能. 文献[5]在高速平面叶栅上对平顶叶尖和叶尖表面加肋条的泄漏流动开展了实验研究,并考虑雷诺数和马赫数带来的影响. 结果表明:相对平顶叶尖,双肋条叶尖使得叶尖泄漏流动出口速度减小,产生较小的泄漏损失;对于平顶叶尖,增加雷诺数引起叶尖泄漏速度增加,而叶尖加肋条则对雷诺数变化不敏感. 文献[6]分别对 GE-E3 平叶尖、单吸力边加肋条和叶尖边缘均加肋条的泄漏流和叶尖传热进行了数值模拟,结果表明在 3 种叶尖配置中单叶尖吸力边加肋条可以最有效地减小叶尖泄漏流动. 但文献[6]主要是研究涡轮叶尖传热,而在涡轮真实工作环境下(即高温高压高速)从气动角度研究在涡轮叶尖表面镶嵌肋条以其减小泄漏流动损失开展的较少,因此本文结合某一高速涡轮转子,在考虑变比热容的情况下,对涡轮叶尖表面镶嵌肋条的转子通道内部流场进行模拟,并结合通道内的流线和速度矢量分布详细分析了泄漏流场,最后计算了肋条对涡轮转子效率的影响.

1 数值方法和计算网格

通过求解直角坐标系下雷诺平均 N-S 方程来获得涡轮转子通道内部三维稳态粘性流场. 数值离散格式采用有限体积法,空间离散采用二阶迎风格式,时间离散采用 5 步龙格-库塔法. 文献[6-7]表明涡轮叶尖区域湍动能在不同方向上的分布各向异性,因此基于各向同性的湍流模型(如两方程模型)在机匣、泄漏涡和吸力面边界层附近区域不再适用,而雷诺应力湍流模型可以捕捉各项异性和旋转的影响,这样湍流模型采用雷诺应力湍流模型加壁面函数. 另外,为了加速收敛,采用残差光顺技术.

数值模拟只考虑一个叶片通道,在所采用的计算网格中,主流区域采用结构化六面体网格,轴向、周向和径向的网格节点数分别为:130、60 和 90;叶尖间隙区域采用非结构化六面体网格,叶尖吸力面边缘镶肋条的网格见图 1. 进口边界到叶根前缘的距离为一倍叶根处轴向弦长,尾缘到出口边界距离为两倍叶根处轴向弦长. 进口和出口边界条件分别采用压力进口和压力出口边界条件. 由于燃气在高

温条件下比热容变化比较大,文中采用变比热容计算,粘性系数用 sutherland 公式计算.

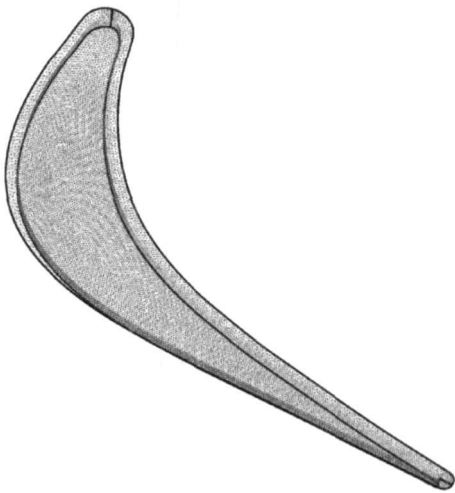


图 1 叶尖附近网格

Fig. 1 Mesh near blade tip

另外,由于手头没有涡轮叶尖间隙流场的实验数据,为了对程序进行验证,对 NASA 中心的一个单级轻负荷涡轮的总性能进行了计算,并与实验结果作了比较,具体见文献[8].

2 结果和分析

计算采用的某型轴流涡轮转子,叶根轴向弦长 20 mm,叶高 40 mm,叶片数 90,叶片中径处绝对进气角(与轴向)为 50°,出气角(与轴向)为 59°,转速 17 000 r/min,进口总压 $1.013\,25\times 10^6$ Pa,总温 1 300 K. 将叶尖间隙高度分为绝对叶尖间隙高度(即叶尖表面加肋条后的叶尖高度)和相对叶尖间隙高度(即叶尖表面不加肋条时的间隙高度),则相对叶尖间隙高度 t 为所加肋条高度与绝对叶尖间隙高度之和. 结合以上数值方法,分别对相对叶尖间隙高度 $t=1.5\% H$ (H 为叶高), $w/t=1/3$ (w 为肋条宽度,小肋条宽度)时肋条高度 h 分别为 $1/3t$, $2/3t$ 和 $5/6t$ 时的流场进行计算,然后变化肋条宽度 w ,计算了 $w/t=1/2$ 下(大肋条高度)上面三个不同肋条高度下的流场,并将两者流场详细进行了比较,详细分析叶尖表面加肋条后对流场的影响,最后计算了涡轮转子效率.

2.1 改进叶尖表面对转子通道出口流场的影响

图 2 为平叶尖和改进叶尖的转子通道出口 110% 轴向弦长处总压损失系数 ζ 分布,其中 $\zeta=(p_{\text{rinlet}}-p_{\text{rlocal}})/(1/2\rho U_m^2)$, p_{rinlet} 为进口相对总压, p_{rlocal} 为当地相对总压, ρ 为密度, U_m 为转子中径处速度. 图 2(a) 为绝对叶尖间隙高度 $t/H=$

0.5% 时小肋条宽度下通道出口 ζ 分布, 图 2 (b) 为大肋条宽度下通道出口 ζ 分布, 其中上半图对应平叶尖基本流场, 下半图对应为叶尖镶嵌肋条后流场. 高总压损失系数区域是由叶尖间隙泄漏流动引起, 从图可以看出叶尖镶嵌肋条可以有效地降低泄漏涡强度, 减小泄漏涡损失, 具体流动细节分析见后面.

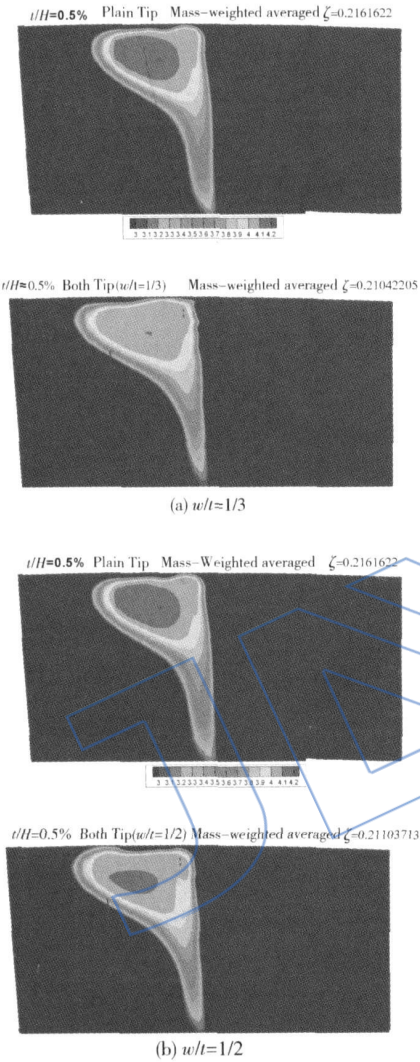


图 2 转子出口总压损失系数分布

Fig. 2 Distribution of total pressure loss coefficient

2.2 肋条高度 h 对流场细节的影响

图 3 为小肋条高度下 $t=1.5\%H$ 时肋条高度分别为 $1/3t$ 和 $5/6t$ 时在间隙区域所截的与叶尖表面平行的两个等叶高平面处流线和速度矢量分布. 所截平面到叶尖表面的距离 z 与叶尖间隙高度 t 的比值 z/t 分别为 $1/3$ 和 $5/6$, 其中图 3 (a) 和图 3 (c) 为 $h/t=1/3$ 时的两个截面流场分布, 图 3 (b) 和图 3 (d) 为 $h/t=5/6$ 时的两个截面流场分布.

从图可以清晰地看出泄漏流从吸力面流出时

与通道主流相互作用形成泄漏涡分离线 SL_{TL} . 相对图 3 (a), 图 3 (b) 中 SL_{TL} 靠近叶片吸力面, 这是由于图 3 (b) 中所截平面位置在叶尖平面下方, 而图 3 (a) 中所截平面与叶尖表面重合, 另外图 3 (b) 中绝对叶尖间隙高度 t 较小. 图 3 (c) 中 SL_{TL} 在通道内部相对图 3 (d) 稍靠近叶片吸力面, 这说明虽然高转速条件下涡轮旋转对泄漏流起到更强的阻碍作用, 这是由于涡轮的旋转方向与泄漏流动方向相同, 但较大的叶尖间隙高度产生较多的泄漏流, 这样产生尺寸稍大点的泄漏涡, 这和文献[8]所得结论相似. 由于机匣的相对运动抑制泄漏流, 图 3 (c) 相对图 3 (a) 而言 SL_{TL} 更靠近叶片吸力面, 图 3 (c) 和图 3 (d) 中的流线相对图 3 (a) 和图 3 (b) 偏向叶片压力面方向. 图 3 (a) 和图 3 (d) 中泄漏流在 $30\% C_a$ 处开始. 当气流通过叶尖边缘所镶嵌肋条形成的空腔时, 由于肋条对泄漏流的阻碍作用以及气流分离, 在间隙区域出现回流区, 具体分析见图 4. 肋条高度小, 形成回流区也较小, 故图 3 (a) 中叶尖区域体现回流区的特征不明显, 仅在靠近压力边流线稍有弯曲. 图 3 (b) 中气流流经叶尖压力边时气流出现分离形成回流区, 其附着线如图中 AL_1 . 叶尖吸力面肋条对泄漏流动起阻碍作用, 同时靠近机匣表面气流粘性的影响使得前缘处气流攻角发生变化, 故在靠近吸力面处形成回流区, 其分离线见图 3 (c) 中 SL_1 所示. 图 3 (d) 中由于肋条所形成空腔较大, 且截面靠近肋条叶尖表面, 故由压力面肋条处气流分离和吸力面阻碍气流形成两个明显的回流区. 泄漏流流出吸力面时, 一方面由于气流经过在压差作用下流出吸力面, 另一方面泄漏流在漩涡的作用下卷起裹入回流区, 回流区分离线见图中 SL_2 ; 经过叶尖压力边处形成的回流区与由于叶尖吸力面肋条的阻碍在空腔中部形成的回流区旋转方向相反, 所形成回流区附着线见图中 AL_2 , 具体分析见图 4.

图 4 为叶尖间隙附近二次流动流线分布, 所截面与泄漏涡涡核相垂直, 然后将速度分解为垂直截面的主流和截面上的二次流, 具体见文献[9]. 另外截面在叶尖表面中弧线上轴向位置分别取在 $30\% C_a$, $50\% C_a$, $70\% C_a$ 和 $90\% C_a$. 各图上半部分和下半部分中 h/t 分别对应于 $5/6$ 和 $1/3$. 依次看各图中泄漏涡: 首先在 $30\% C_a$ 附近泄漏流动比较强烈, 卷起形成较大的泄漏涡; 当在 $50\% C_a$ 时由于空腔内形成的回流区阻碍泄漏流动, 使得泄漏涡减小; 然后在 $70\% C_a$ 时回流区消失泄漏流动稍增强, 卷起形成较大的泄漏涡; 最后

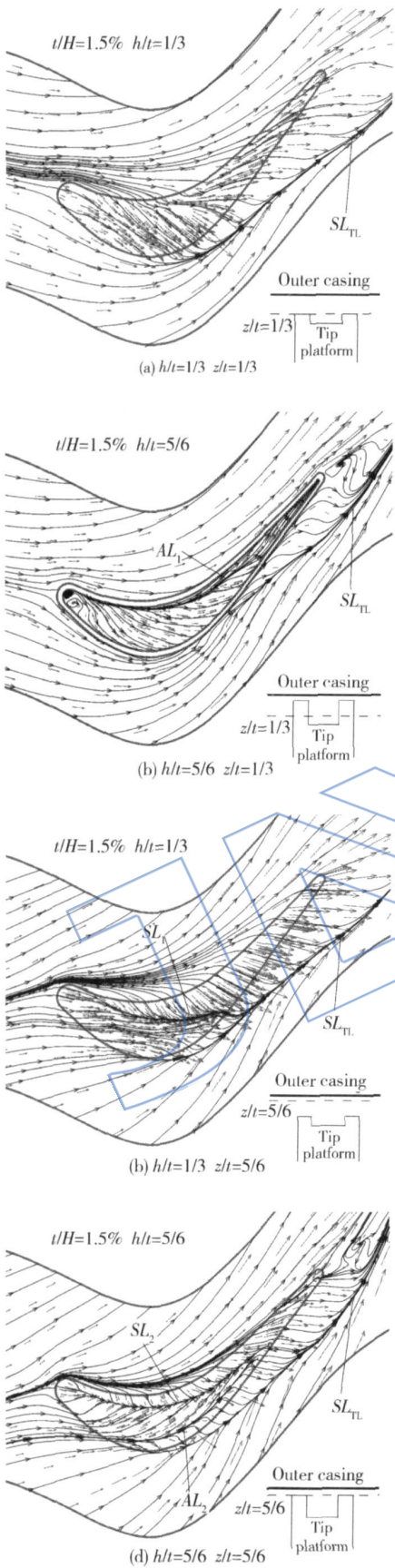


图 3 叶尖间隙内与叶尖表面平行截面内的流线分布
Fig. 3 Leakage flow patterns in planes parallel to the tip surface

在 90% C_a 附近从上游传来的具有很强的二次流的流动, 该流动形成一个自由剪切面, 向叶片吸力面流动, 阻碍泄漏涡的进一步发展, 并且两者相互作用, 使得泄漏涡结构发生了改变, 如图 4 (d) 中所示. 小间隙时泄漏流量小, 所卷起形成泄漏涡小, 大间隙时泄漏涡较大, 和上游传来的二次流动的相互作用增强.

当泄漏流动经过叶尖压力面处肋条直接进入空腔时, 泄漏流动突然扩张, 气流角变化大, 在空腔内部叶尖表面靠近压力面角落处出现分离, 形成回流区, 如图 4(a) 上半部分中 V_2 所示, 下半部分由于肋条高度小, 气流角变化较小, 没有出现回流区. 在靠近空腔吸力面角落处, 由于叶尖表面压差和叶尖载荷卸载的作用, 形成从空腔吸力面角落处跨越吸力面肋条的流动, 这时流动有垂直向上的速度分量, 阻碍空腔中部靠近机匣处的泄漏流, 形成回流区 V_1 . 回流区 V_1 和 V_2 向下游发展逐渐增大, 这可从图 4(b) 中回流区 V_3 和 V_4 看出. 当泄漏流动发展到 70% C_a 时, 由于吸力面肋条对泄漏流起到阻挡作用, 使得空腔内流动从吸力面到压力面流动, 同时此处空腔宽度较小, 没有形成比较明显的回流区. 流动发展到 90% C_a 处也如此. 当肋条高度减小时, 见图 4 下半图, 大致流动结构和大肋条高度基本相似, 只是回流区面积减小, 这是由于大的肋条高度使得空腔内流动变得更为剧烈和复杂. 回流区内流动对泄漏流起到阻碍作用, 相当于减小叶尖间隙高度, 使得泄漏流量减小. 结合图 4(a) 和 (b), 可以清楚理解图 3 中回流区中附着线和分离线的特征.

2.3 肋条宽度 w 对流场细节的影响

考虑肋条宽度 w 变化对流场的影响, 肋条高度 h 取为 $2/3t$, w/h 分别为 1.0 (小宽度) 和 1.5 (大宽度). 图 4 为叶尖间隙区域内平行叶尖表面平面的速度矢量和流线分布, z/t 分别为 $1/3$ 和 $5/6$, 其中图 5(a) 和 5(c) 对应于小宽度, 图 5(b) 和图 5(d) 为大宽度下的速度矢量和流线图.

比较图 5(a) 和图 5(b) 中流线的分布、速度矢量的大小和方向、泄漏涡分离线位置、叶尖间隙区域回流区分离线和附着线位置, 可以看出两者大致流场结构相似, 图 5(c) 和图 5(d) 也如此, 这说明文中的肋条宽度变化对流场影响不大. 图 5(a) 和图 5(b) 靠近尾缘处流场变化剧烈, 这是由于叶片尾迹的影响, 同时在压差的作用下, 尾迹向泄漏涡方向流去, 和泄漏涡剧烈作用, 增大损失, 这也可从图 3(b) 和图 3(d) 看出.

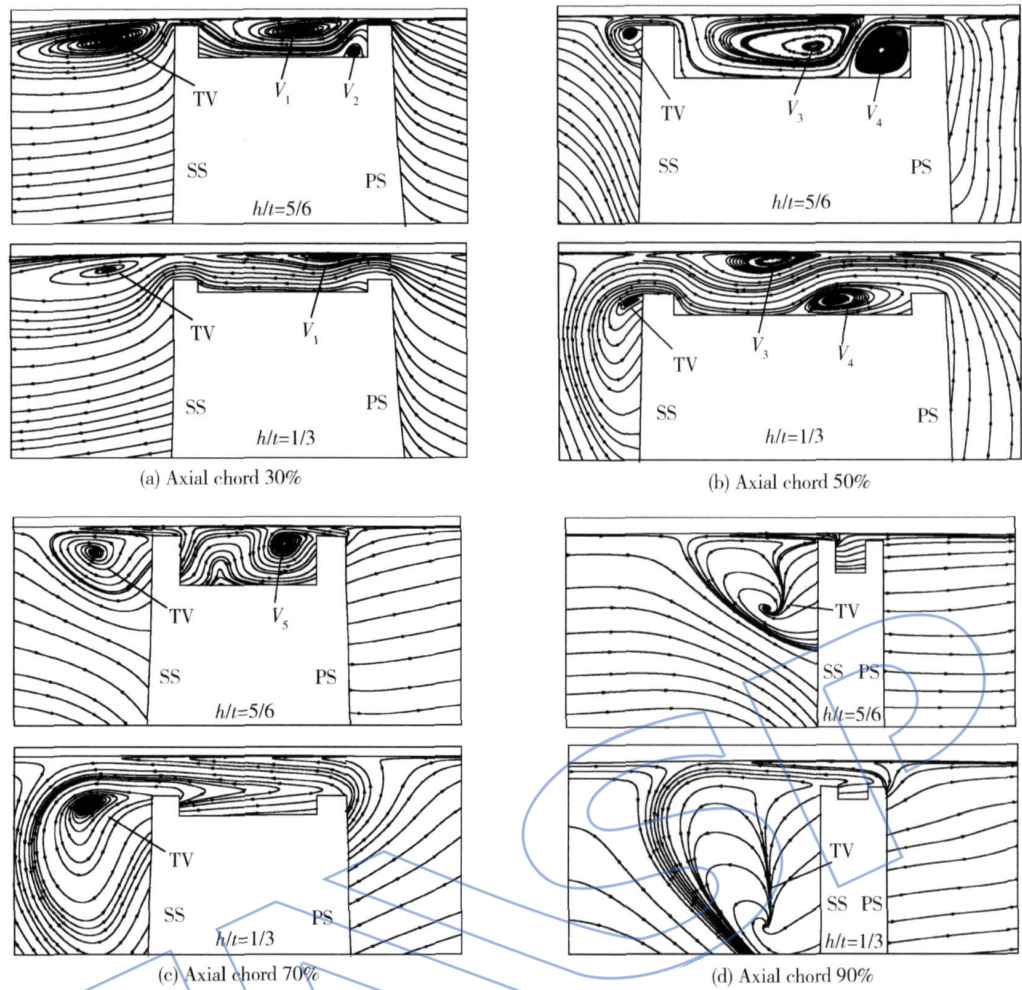
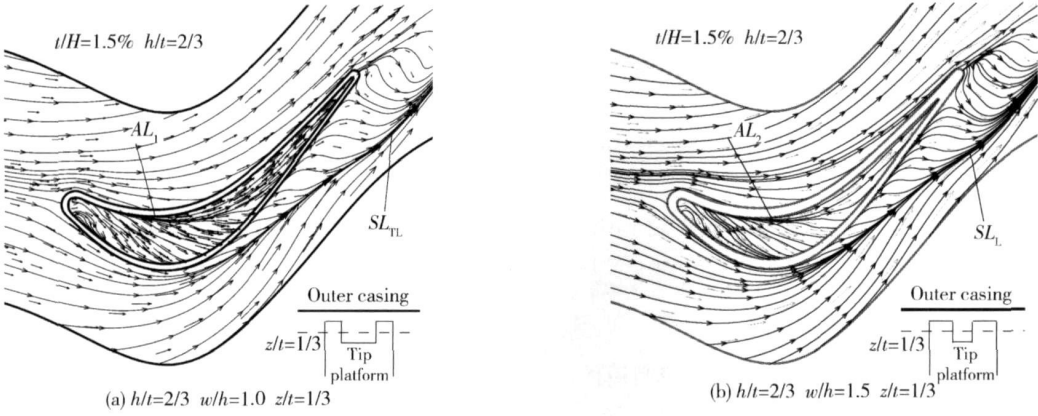


图 4 叶尖间隙区域垂直流面的二次流流线分布
Fig. 4 Eakage flow patterns in the tip gap space inside cross stream planes

图 6 为间隙附近径向位置流线的分布, 所截平面如图 4, 且轴向位置分别取在 30% C_a , 50% C_a , 70% C_a 和 90% C_a . 其中上半图和下半图 分别对应于 1.0 和 1.5. 从图可以看出肋条宽度对大

致流场结构影响不大. 但大宽度使得空腔对应宽度减小, 从而形成稍小点的回流区. 泄漏涡的发展过程与图 4 相同, 同时结合图 4 可以看出较大的绝对间隙高度产生较大的泄漏涡, 但差别不大.



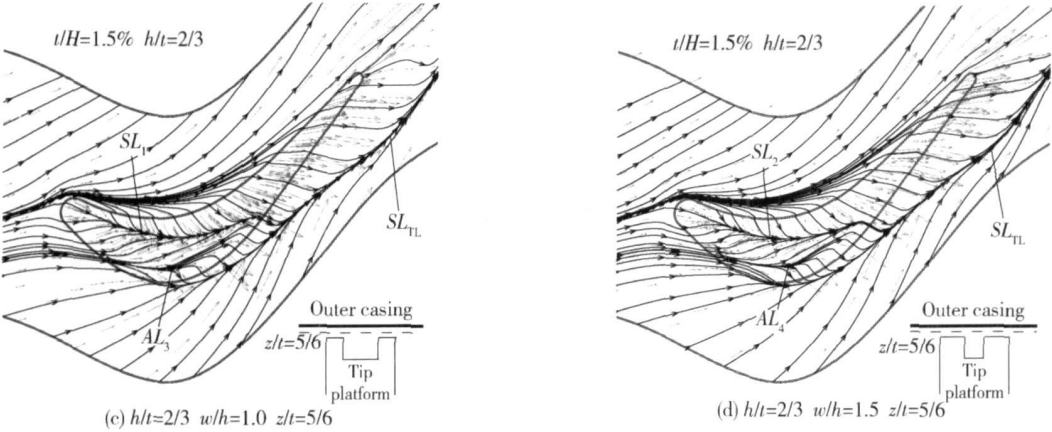


图 5 叶尖间隙内与叶尖表面平行截面内的流线分布
Fig. 5 Leakage flow patterns in planes parallel to the tip surface

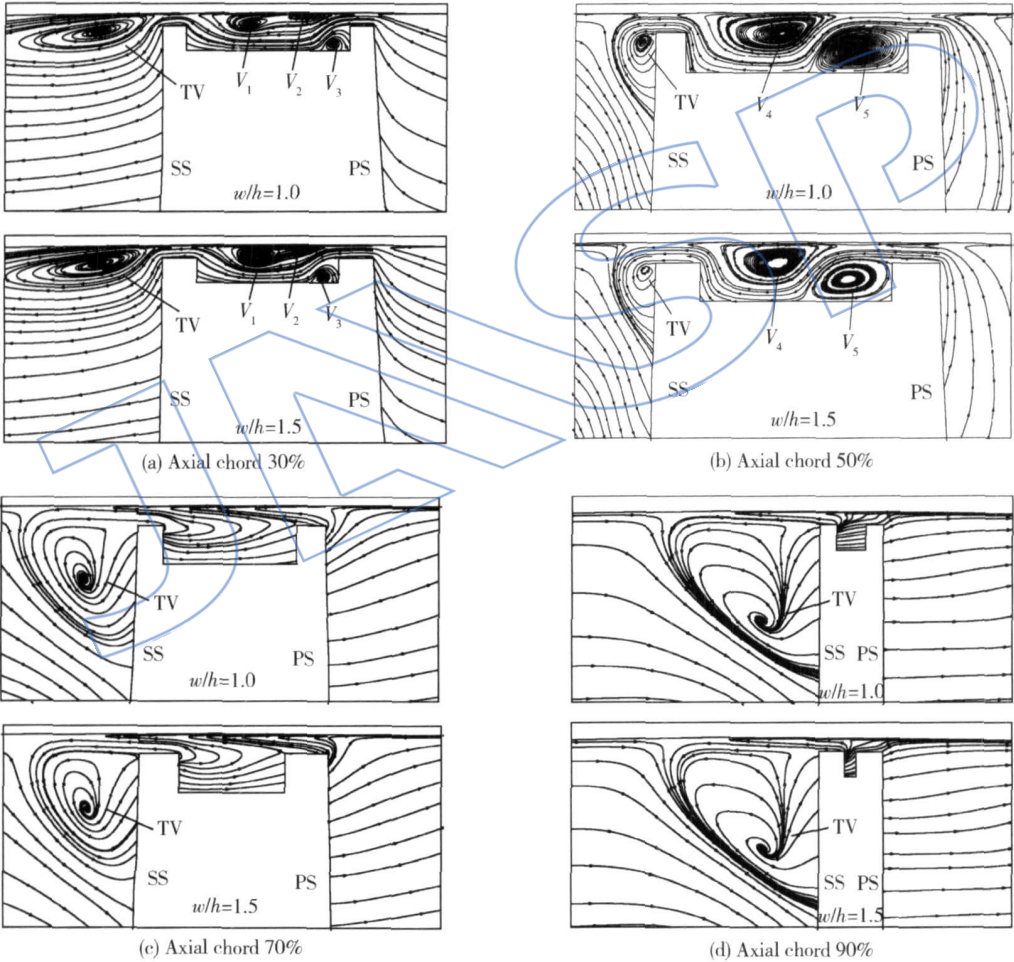


图 6 叶尖间隙区域垂直流面的二次流流线分布
Fig. 6 Leakage flow patterns in the tip gap space inside cross stream planes

2.4 涡轮转子效率的变化

图 7 为对涡轮叶尖表面加以被动控制后的效率,纵坐标是涡轮效率的变化值,一小格表示 0.5 个百分点。横坐标为叶尖间隙高度。图中 3 条横线分别对应于叶尖间隙高度为 0.25% H , 0.5% H

和 1.0% H 时基本流场(即叶尖表面不加肋条)的涡轮效率。沿叶尖表面边缘镶肋条进行被动控制对涡轮效率影响较大,通过适当选择肋条高度 h 可以尽量提高涡轮效率。从图可以看出有个最佳肋条高度,所加肋条高度较小($h/t=1/3$),或肋条

高度较大 ($h/t = 5/6$) , 这时涡轮效率相对等绝对叶尖间隙高度的基本流场变化不大, 而当肋条高度取 $h/t = 2/3$ 时, 涡轮效率增加 0. 13% , 这说明肋条高度 h 的选择对流动影响较大, 在设计当中必认真考虑. 另外肋条宽度 w 对流场效率影响不大, 但小肋条宽度时涡轮效率稍微增加. 小肋条宽度形成较大的空腔, 对泄漏流动的阻碍作用增强, 可以提高涡轮效率.

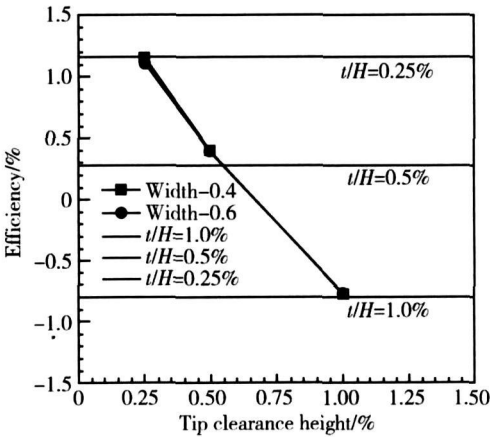


图 7 叶尖表面被动控制对涡轮效率的影响

Fig. 7 Comparison of efficiency with passive control on tip platform

3 结 论

1) 在涡轮叶尖表面边缘镶肋条对泄漏流动进行被动控制, 若适当选择肋条几何参数, 则可减小泄漏流动损失, 提高涡轮效率. 这是由于在叶尖间隙区域空腔前半部, 气流通过压力面肋条时出现分离出现回流区, 气流经过吸力面肋条由于叶尖表面压差和叶尖载荷卸载的作用, 形成回流区, 回流区可以阻碍泄漏流动, 相当于减小了叶尖间隙高度; 在叶尖间隙区域后半部, 吸力面处肋条对泄漏流动起到阻碍作用, 减小泄漏流. 这和文献 [6] 类似.

2) 肋条高度 h 对涡轮效率有较大影响, 且有个最佳肋条高度. 当肋条高度较小或较大时, 涡轮

效率相对等绝对叶尖间隙高度的基本流场变化不大, 而当肋条高度取 $h/t = 2/3$ 时, 涡轮效率增加 0. 13% , 这说明肋条高度 h 的选择对流动影响较大, 在设计当中必认真考虑.

3) 肋条宽度 w 对流场影响不大, 但小肋条宽度时涡轮效率稍微增加. 小肋条宽度形成较大的空腔, 产生较大的回流区, 对泄漏流动的阻碍作用增强, 涡轮效率增加.

参考文献:

[1] Rao N M, Camci C. Axial turbine tip desensitization by injection from a tip trench. Part 1: Effect of injection mass flow rate[R]. ASME GT2004- 53256.

[2] Rao N M, Camci C. Axial turbine tip desensitization by injection from a tip trench. Part 2: Leakage flow sensitivity to injection location[R]. ASME GT2004- 53258.

[3] Morris S C, Corke T C, VanNess D, et al. Tip clearance control using plasma actuators[R], AIAA 2005- 782.

[4] Dey D. Aerodynamic tip desensitization in axial flow turbines[D]. Pennsylvania: The Pennsylvania State University, 2001.

[5] Key N L, Arts T. Comparison of turbine tip leakage flow for flat tip and squealer tip geometries at high speed conditions[R]. ASME GT2004- 53979.

[6] Yang Huitao, Chen Hamn Ching, Han Je Chin. Flow and heat transfer prediction on turbine rotor with various tip configurations[R]. AIAA 2005- 573.

[7] Xiao Xinwen, McCarter A A, Lakshminarayana B. Tip clearance effects in a turbine rotor. Part I : Pressure field and loss[R]. ASME 2000- GT- 0476.

[8] 李伟, 乔渭阳, 许开富, 等. 雷诺数对涡轮叶尖流场影响的数值研究[J]. 推进技术, 2007, 28(4) : 388- 393.

LI Wei, QIAO Weiyang, XU Kaifu, et al. Numerical simulation of tip leakage flows for different Reynolds numbers in turbine[J]. Journal of Propulsion Technology, 2007, 28(4) : 388- 393. (in Chinese)

[9] 吴艳辉. 轴流压气机端壁二次流动的数值研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2003, 51- 52.

WU Yanhui. Numerical investigation on end wall secondary flows in axial flow compressors[D]. Xi' an: Northwest ern Polytechnical U niversity, 2003: 51- 52. (in Chinese)