

叶顶形状对动叶顶部流动和传热的影响研究

杨佃亮, 丰镇平

(西安交通大学叶轮机械研究所, 710049, 西安)

摘要: 应用数值方法和标准 $k-\omega$ 湍流模型, 研究了燃气轮机轴流透平不同叶顶密封方式对透平动叶顶部间隙内流动与传热的影响. 计算叶型采用 GE-E³ 发动机高压透平第一级动叶片, 考虑了 4 种不同的叶顶密封方式. 详细分析了不同叶顶密封时叶顶的流动结构和传热分布. 研究了旋转对动叶顶部流动和传热的影响, 并与静止的平面叶栅中获得的结果进行了对比. 结果表明: 不同叶顶密封方式对叶顶间隙泄漏流场影响很大; 双侧肩壁密封具有最好的密封性能, 而压力面肩壁密封性能最差; 采用吸力面肩壁密封获得了最低的叶顶传热系数, 压力面侧肩壁密封的叶顶传热系数则最高; 相对于静止叶栅, 旋转改变了叶顶泄漏流动结构, 增加了叶顶的传热系数.

关键词: 轴流透平; 顶部传热; 叶顶形状; 间隙泄漏流

中图分类号: TK474.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)05-0537-05

Effect of Squealer Geometry Arrangements on Tip Leakage Flow and Heat Transfer for Turbine Blade

YANG Dianliang, FENG Zhenping

(Institute of Turbomachinery, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A numerical prediction was performed to study the effect of squealer geometry on tip leakage flow and heat transfer for the first stage rotor blade in a high pressure turbine of GE-E³ engines. Calculations were conducted for four different squealer geometry arrangements by solving Reynolds-averaged N-S equations in conjunction with the standard $k-\omega$ two-equation turbulence model. Flow structure and heat transfer characteristics in the tip gap were presented. The effect of blade rotation was analyzed and compared with that obtained from linear cascade. The results show that the minimum leakage flow occurs when the full squealer tip is adopted. In addition the tip heat transfer coefficient is the lowest when suction side squealer geometry is used.

Keywords: axial turbine; tip heat transfer; squealer tip; tip leakage flow

动叶顶部是燃气轮机透平中传热系数最高的区域, 叶顶烧蚀是动叶失效的一个重要原因. 随着燃气透平进口温度的不断提高, 这一问题变得更加突出. 叶顶的传热与顶部泄漏气流特性直接相关. 为了降低叶顶热负荷, 不同的叶顶形状被设计和使用. 例如三菱 M701F 级燃气轮机透平第一级动叶叶顶采用了吸力面侧肩壁密封, 第二级动叶叶顶采用了吸力面和压力面双侧肩壁(凹槽状叶顶)密封. 然而, 由于试验水平和计算能力的限制, 过去对不同叶顶密封

时旋转动叶叶顶的传热机理并没有进行充分的研究. 因此, 研究不同叶顶密封的传热机理, 对于改进动叶叶顶设计, 增加动叶寿命, 进一步提高燃气透平的进口温度具有重要的意义.

自从文献[1]第一次获得一个动力透平叶片叶顶的传热数据以来, 叶顶传热研究一直是燃气透平传热研究领域的热点问题之一. 文献[2-3]利用平面叶栅研究了凹槽状叶顶传热系数的分布以及凹槽深度对叶顶传热系数的影响. 之后, 文献[4-8]先后

使用不同的叶型和装置研究了各种叶顶密封方式对叶顶传热的影响. 结果表明, 叶顶形状对叶顶传热系数分布及总体叶顶热负荷有很大的影响. 然而, 这些研究均是在平面叶栅中进行的, 无法考虑旋转对叶顶传热的影响. 文献[9]对一个带凹槽状叶顶的动叶研究表明, 旋转对叶顶传热系数的分布有很大的影响, 平面叶栅中获得的数据无法直接应用于叶顶冷却设计中.

本文以 GE-E³ 发动机透平第一级动叶栅为研究对象, 应用数值方法研究了不同叶顶形状对动叶顶部流动与传热的影响.

1 计算模型及方法

计算叶型采用 GE-E³ 发动机高压透平第一级动叶型线, 详细数据可以参见文献[9]. 叶顶间隙高度取为 1% 叶高, 叶顶肩壁厚取为 0.77 mm, 肩壁高度取为 2% 叶高. 计算考虑了 4 种不同肩壁布置方式: 压力面和吸力面双侧肩壁; 压力面肩壁; 吸力面肩壁; 叶顶中弧线肩壁; 叶顶形状如图 1 所示.

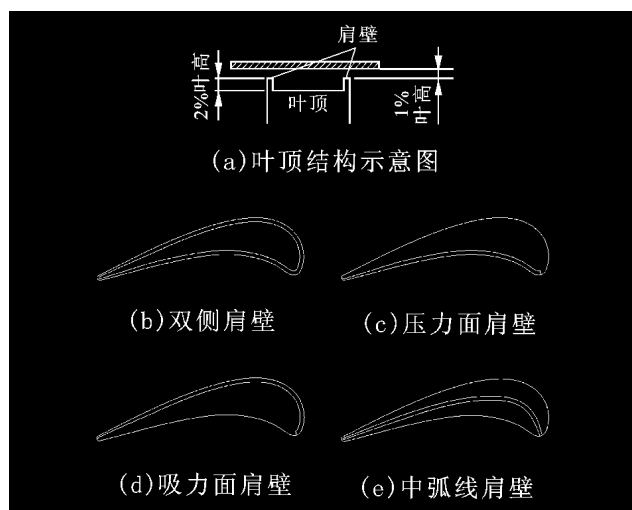


图1 不同密封方式时的叶顶几何形状

计算采用商用计算流体力学软件 CFX5.7, 求解稳态可压 N-S 雷诺时均方程, 湍流模型采用标准 $k-\omega$ 两方程湍流模型, 总体计算为二阶精度. 计算采用分块结构化网格, 为改善网格质量, 叶片壁面附近及叶片顶部间隙区域均采用 O 型网格剖分. 边界层内垂直壁面方向布置超过 15 个网格节点, 壁面第一层网格的 Y^+ 值控制在 1 之内, 总网格数约为 180 万. 文献[9]的研究已经表明, 本文使用的数值方法能够准确预测动叶叶顶的传热分布.

计算边界条件: 进口给定总温、总压和气流进口角; 出口给定静压; 叶栅转速为 8 450 r/min; 壁面给定恒定壁面温度, 壁温与进口总温比取为 0.7.

2 计算结果及分析

2.1 不同叶顶形状时叶顶的流动结构

当采用双侧肩壁密封(见图 2a~图 2c)时, 叶顶实际上是一个凹槽形状, 在 20% 轴向弦长的截面处, 从叶顶压力面侧进入间隙的气流偏转冲击到叶顶表面. 可以看出, 吸力面和压力面肩壁与叶顶之间都存在一个涡, 随着流动的发展, 压力面侧涡的尺寸不断增大, 气流冲击到叶顶的位置也不断向吸力面侧转移. 在 80% 轴向弦长的截面处, 来自压力面肩壁处的涡发展控制了整个流道, 在上游气体堆积的作用下, 泄漏流体被完全推出凹槽, 几乎平行通过叶顶间隙.

当采用压力面肩壁密封(见图 2d~图 2f)时, 在 20% 和 50% 轴向弦长的截面处, 泄漏流冲击到叶顶的位置与采用双侧肩壁密封时非常接近. 然而, 由于没有吸力面侧肩壁的阻碍, 泄漏流冲击到叶顶后沿叶顶流出间隙. 叶顶传热系数的增加正是因为泄漏流动的冲击所致, 因此当采用压力面肩壁密封时, 泄漏流的贴壁流动将会导致叶顶高传热系数的区域增加. 在 80% 轴向弦长的截面处, 压力面肩壁的涡同样发展将泄漏流推离叶顶.

当采用吸力面肩壁密封(见图 2g~图 2i)时, 叶顶压力面侧的流动与平叶顶时非常类似: 在叶顶压力面侧存在一个分离涡, 泄漏流进入叶顶间隙后经过分离涡然后再附着到叶顶. 然而, 从速度矢量的大小可以看出, 采用吸力面肩壁密封时泄漏流的速度要明显小于其他密封方式. 而且, 在 80% 轴向弦长的截面处, 吸力面肩壁处的涡发展占据了叶顶大部分空间, 泄漏流在压力面侧也没有再附着到叶顶.

当采用叶顶中弧线肩壁密封(见图 2j~图 2l)时, 叶顶的泄漏流场类似于采用吸力面肩壁密封和压力面肩壁密封的组合, 在叶顶压力面和中弧线之间类似于叶顶吸力面肩壁密封, 而在叶顶中弧线到叶顶吸力面之间则类似于叶顶压力面肩壁密封.

2.2 不同叶顶形状对气流角分布的影响

间隙泄漏流通过 2 个方面影响叶栅通道近顶部的流动. 首先, 间隙流进入吸力面侧后, 会卷曲形成泄漏涡, 其位置在叶片吸力面近顶部. 这个泄漏涡会与通道涡相互作用, 改变通道涡的位置, 从而改变气流角的分布. 其次, 间隙泄漏流在叶顶压力面侧相当于抽吸的作用, 同样会增加通道中气流的出口角. 因此, 通过平均气流角的变化可以看出叶顶形状对泄漏流的影响, 从而判断各种叶顶形状的密封性能.

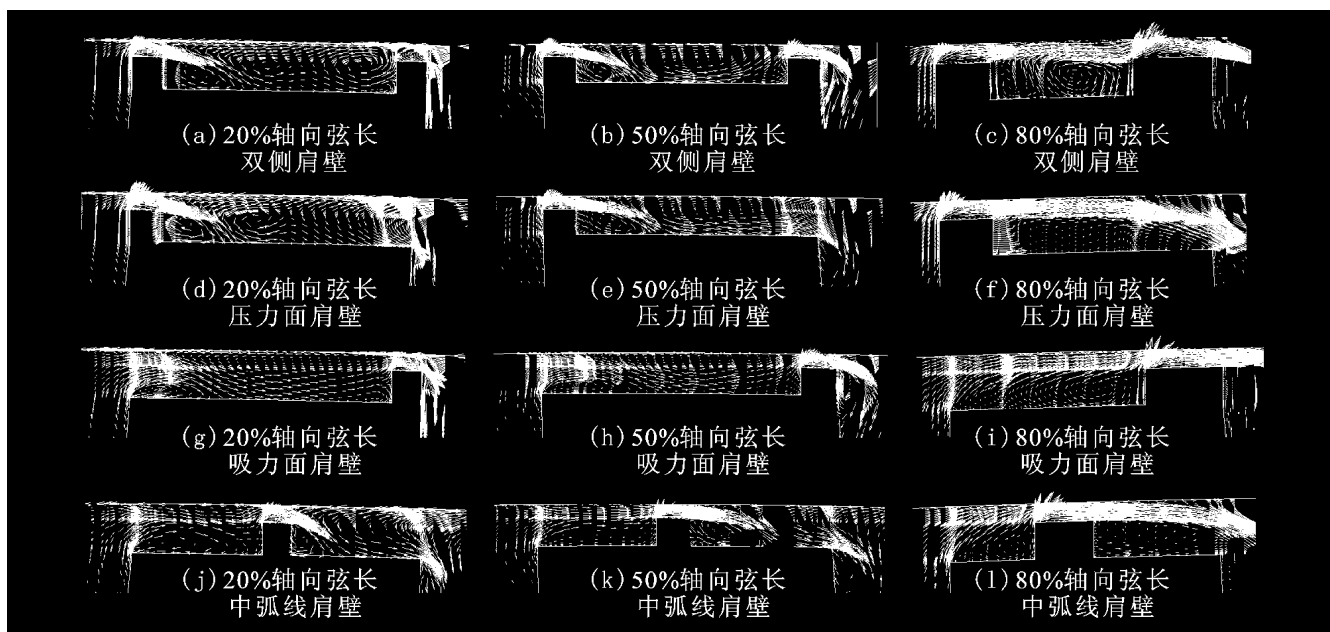


图2 不同叶顶形状、不同轴向弦长截面的二次流矢量图

从图3可以看出:叶顶泄漏对叶栅通道气流的影响主要在通道的上半部分,泄漏增加了通道中的气流角,降低其做功能力;双侧肩壁密封具有最好的密封性能,而压力面肩壁密封性能最差,在通道近顶部2种密封情况下平均气流角相差近 10° 。与双侧肩壁密封相比,压力面肩壁密封和叶顶中弧线肩壁密封对通道中气流的影响主要在70%叶高以上,由于这2种情况下密封性能较差,泄漏流量较大,致使叶顶附近气流角改变很大,但由于这2种密封时叶顶间隙吸力面出口面积大,泄漏流在吸力面出口处的速度并不大,因此泄漏流的强度并不高;同时,由于叶顶压力面侧较强的抽吸作用使得通道涡在叶展方向没有太大改变,甚至有些向叶顶方向移动。

当采用吸力面侧肩壁密封时(见图3),泄漏流

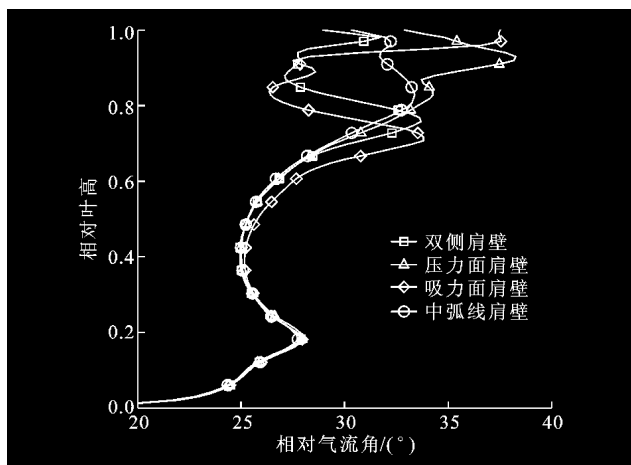


图3 叶栅出口截面周向平均相对气流角分布

道在吸力面的收缩使得泄漏流在间隙吸力面出口处具有较强的动量。泄漏形成的泄漏涡将叶顶附近的通道涡推离叶顶。与双侧肩壁密封相比,采用吸力面肩壁密封时,除去近顶部气流角因为泄漏的增加而增大外,通道中的平均气流角基本呈现平均下移的趋势,这正是泄漏涡与通道涡相互作用的结果。

2.3 叶顶传热系数分析

图4给出了叶栅顶部表面传热系数的分布,传热系数参考温度取为叶栅进口总温。从图4可以看出,叶顶采用不同密封方式对叶栅顶部表面传热系数有很大的影响。

当叶顶采用双侧肩壁密封时,叶顶表面存在2个高传热系数区域。一个位于叶顶前缘吸力面侧,这是由于在叶顶前缘附近,来流滞止形成较高的压力,然后进入叶顶间隙并加速冲击到叶顶前缘靠近吸力面侧,从而导致该处高的传热系数。另一个高传热系数区域位于叶顶靠近压力面侧,这是由于泄漏流在叶片两侧压差的作用下,进入叶顶间隙并偏转冲击到叶顶所致。从图2可以看出,泄漏流冲击到叶顶后在吸力面角涡的作用下又出现偏转,因此在叶顶吸力面侧的传热系数要低得多。在叶顶尾缘区域,由于压力面侧角涡发展增大,泄漏流被推出凹槽,使得该处的传热系数很低。

与文献[3]相比可以发现,旋转动叶顶部表面传热系数要高于静止叶片中获得的结果,而且传热系数的分布也有很大的区别。在双侧肩壁密封的静止叶片顶部,高传热系数区域主要集中在前缘附近靠

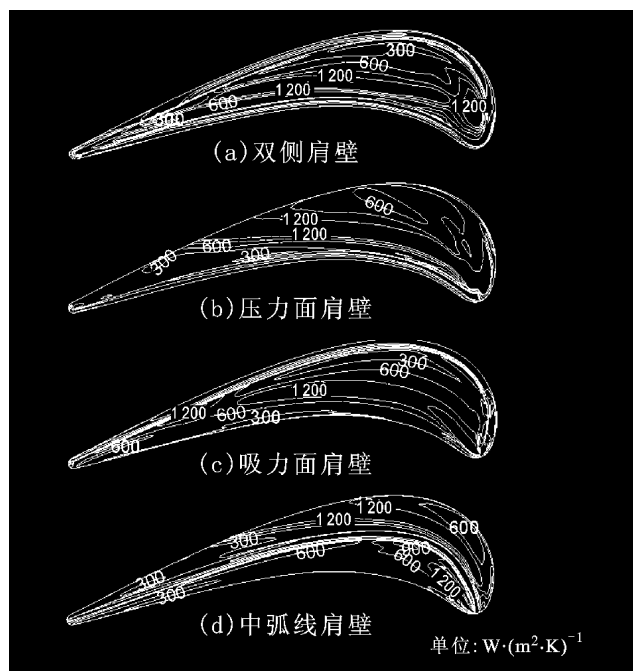


图4 叶顶表面传热系数分布

近吸力面侧,而叶顶其他部分的传热系数都相对较低.分析可知,动叶旋转的影响主要通过2个方面表现出来:端壁从叶顶吸力面侧到压力面侧的相对运动和哥氏力及离心力的影响;由于黏性的影响,贴附在端壁上的气体具有很高的相对速度,因此当动叶高速旋转时端壁刮削的作用比较明显,端壁边界层气流在叶顶间隙内的堆积使得泄漏流偏转并冲击到叶顶表面,从而造成了旋转动叶顶部的高传热系数的区域.相对来说,在采用肩壁密封的动叶顶部,哥氏力及离心力的影响要比端壁相对运动的影响小很多.

当叶顶采用压力面侧肩壁密封时,高传热系数的分布与双侧肩壁密封时类似.不过,正如图2所示,泄漏流动冲击到叶顶表面后并没有偏转,而是沿叶顶离开间隙,这使得叶顶吸力面侧的传热系数迅速增加.在尾缘区域,压力面侧肩壁密封时叶顶具有较低的表面传热系数.

当采用吸力面侧肩壁密封时,叶顶的高传热系数区域大大减小,传热系数高于 $1\,200\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 的区域仅仅出现在叶顶中间和前缘位置.相对于双侧肩壁密封,采用吸力面侧肩壁密封时叶顶的低传热系数区域变化不大.

当采用叶顶中弧线肩壁密封时,在肩壁与压力面之间的叶顶传热系数分布与采用吸力面侧肩壁密封时类似,不过传热系数的值要低很多,而在肩壁与吸力面之间则与压力面侧肩壁密封时类似,这与二

次流场显示的趋势一致.

图5给出了采用不同叶顶肩壁密封方式时叶顶总体面积平均传热系数:从整个叶顶(包括叶顶和肩壁表面)的平均传热系数来看,采用双侧肩壁密封和压力面侧肩壁密封时传热系数较高,而采用吸力面侧肩壁密封和叶顶中弧线肩壁密封时较低;但是,仅仅从叶顶表面来看,采用吸力面肩壁密封获得了最小的叶顶平均传热系数,而采用压力面侧肩壁密封时叶顶的平均传热系数最高.

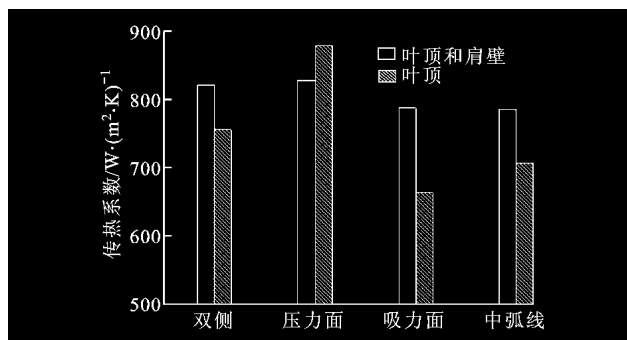


图5 不同肩壁布置时叶顶总体面积平均传热系数比较

3 结 论

(1)不同叶顶形状密封对叶顶间隙泄漏流场影响很大,采用吸力面肩壁密封能够明显降低冲击到叶顶的泄漏流速度.

(2)不同的叶顶形状密封性能相差较大.在4种叶顶形状中,采用双侧肩壁密封具有最好的密封性能,而采用压力面侧肩壁密封性能最差.

(3)叶顶形状对叶顶传热系数分布具有重要的影响.从叶顶平均表面传热系数来看,采用吸力面侧肩壁密封获得了最低的叶顶平均传热系数,而采用压力面侧肩壁密封时叶顶的平均传热系数最高.

(4)旋转使得叶顶泄漏流明显向叶顶偏转,这改变了叶顶传热系数的分布,增大了叶顶传热系数.

参考文献:

- [1] BUNKER R S, BALLEY J C, AMERI A A. Heat transfer and flow on the first-stage blade tip of a power generation gas turbine part 1-experimental results [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2000, 122 (2):263-271.
- [2] AZAD G S, HAN Jechin. Heat transfer and flow on the squealer tip of a gas turbine blade[J]. Journal of Turbomachinery, 2000, 122(4):725-732.
- [3] KWAK J S, HAN Jechin. Heat transfer coefficients on the squealer tip and near squealer tip regions of a

- gas turbine blade[J]. ASME Journal of Heat Transfer, 2003, 125(3):669-677.
- [4] AZAD G S, HAN Jechin, BUNKER R S, et al. Effect of squealer geometry arrangement on a gas turbine blade tip heat transfer[J]. ASME Journal of Heat Transfer, 2002, 124(3):452-459.
- [5] KWAK J S, AHN J, HAN Jechin. Effects of rim location, rim height, and tip clearance on the tip and near tip region heat transfer of a gas turbine blade[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47(26):5651-5663.
- [6] NASIR H, EKKAD S V, KONTROVITZ D M, et al. Effect of tip gap and squealer geometry on detailed heat transfer measurements over a high pressure turbine rotor blade tip[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2004, 126(2):221-228.
- [7] SAXENA V, EKKAD S V. Effect of squealer geometry on tip flow and heat transfer for a turbine blade in a low speed cascade[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2004, 126(4):546-553.
- [8] NEWTON P J, LOCK G D, KRISHNABABU S K, et al. Heat transfer and aerodynamics of turbine blade tips in a linear cascade[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2006, 128(2):300-309.
- [9] YANG Dianliang, FENG Zhenping. Tip leakage flow and heat transfer predictions for turbine blades[C]// Proceedings of ASME Turbo Expo 2007. New York, USA:ASME, 2007: 589-596.

(编辑 王焕雪)