

燃气透平动叶不同叶顶结构对顶部泄漏 流动和换热的影响

李 鹏, 张 超, 刘建军

(中国科学院工程热物理研究所 北京 100190)

摘 要:以某重型燃机透平第一级动叶为研究对象,数值模拟了平叶顶、凹槽、压力面肩壁和吸力面肩壁等 4 种不同叶顶结构对顶部泄漏流动和换热的影响。模拟结果表明,不同叶顶结构对叶顶间隙泄漏流动和叶顶附近吸力面侧压力分布影响较大。相比平叶顶结构,凹槽结构和压力面肩壁结构减小了泄漏引起的总压损失,吸力面肩壁结构则使该损失增加。平叶顶结构具有最高的平均换热系数,吸力面肩壁结构的平均换热系数最低,约为平叶顶结构的 70%。

关 键 词:燃气透平;叶顶结构;泄漏流;顶部换热

中图分类号:TK474.7 文献标识码:A

引 言

对于无围带的燃气透平动叶,叶顶两侧压差使得叶顶间隙内形成泄漏流。泄漏流不参与做功,且具有较高的温度和速度,使叶顶表面承受较大的热负荷,容易造成叶顶的局部烧蚀。因此有必要研究不同叶顶结构的流动和换热特性,用以减小叶顶泄漏流和降低叶顶热负荷。

Azad 等人采用瞬态液晶技术实验研究了静止下 GE-E³ 叶片平面叶栅平顶和凹槽结构的流动和换热特性,发现凹槽结构能降低叶顶的整体换热系数^[1-2]。之后进一步实验研究了 6 种不同肩壁位置(中弧线、压力面侧、吸力面侧及其两两组合)叶顶结构的换热特性^[3],在减小叶顶换热方面,吸力面肩壁结构表现最好,压力面肩壁结构效果最差。也有不少学者开展了数值预测与实验研究方面的比较工作^[4-5]。值得注意的是,有关旋转状态下的透平动叶顶部换热性能的实验研究较少,多采用数值方法进行研究。Ameri 等的数值研究结果表明^[6],旋转下凹槽结构叶顶间隙内的换热特性与静止直叶栅中获得的实验结果有所差异。杨佃亮等人指出叶顶换热的改变主要是受端壁相对运动的影响^[7]。本

研究在考虑透平旋转条件和高温高压工况下,以某重型燃机透平第一级动叶为研究对象,利用 CFX 软件数值模拟了 4 种不同叶顶结构(平顶、凹槽、压力面间壁和吸力面间壁)对顶部泄漏流动和换热的影响。

1 计算方法与模型

1.1 数值方法与验证

计算采用了基于有限体积法和隐式方法求解三维稳态可压 $N-S$ 方程组的 CFX 软件。选用二阶精度格式,计算残差收敛到 1×10^{-5} 。湍流模型采用 $k-\omega$ 湍流模型和自动壁面函数处理。对文献[8]中静止下 1.5% 间隙高度的 GE-E³ 叶片的实验先进行了数值预测,并与实验结果进行验证,其中边界条件的设定参照文献[4]。图 1 给出了计算结果与实验结果叶顶换热系数的比较,可以看出两者吻合较好。

1.2 几何模型与边界条件

所研究的几何模型为某地面重型燃机透平第一级动叶,考虑叶顶间隙高度为 1% 叶高。4 种叶顶结构分别为:(a) 平叶顶结构(Flat);(b) 凹槽结构(SSPS Rim);(c) 压力面侧肩壁结构(PS Rim);(d) 吸力面侧肩壁结构(SS Rim),如图 2 所示,其中肩壁厚度均为 1.4 mm,肩壁高度为 2% 叶高。

因流动的周期性,计算时仅选取一个流动通道。采用六面体结构化网格,在叶片表面以及叶顶间隙区域进行“O”型网格加密,设置大于 10 层的边界层网格。同时在间隙内沿展向进行加密。平叶顶结构的计算网格总数约为 125 万,具有肩壁结构叶顶的计算网格总数均在 150 万左右。图 3 为凹槽结构计算网格分布。

收稿日期:2011-11-10;修订日期:2011-12-08

基金项目:国家重点基础研究发展规划(973 计划)基金资助项目(2007CB210108)

作者简介:李 鹏(1986-),男,湖南浏阳人,中国科学院工程热物理研究所硕士研究生。

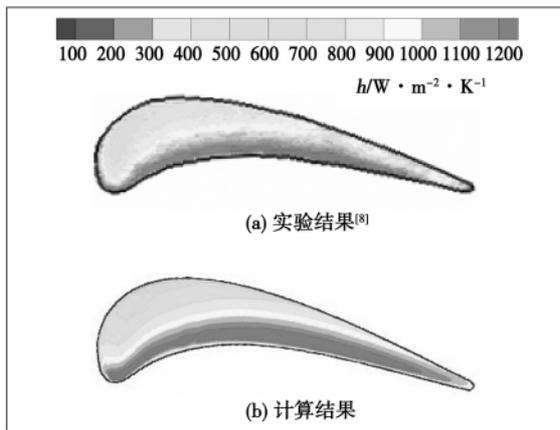


图1 实验与计算叶顶换热系数的比较
Fig. 1 Comparison of experimental result and predicted result

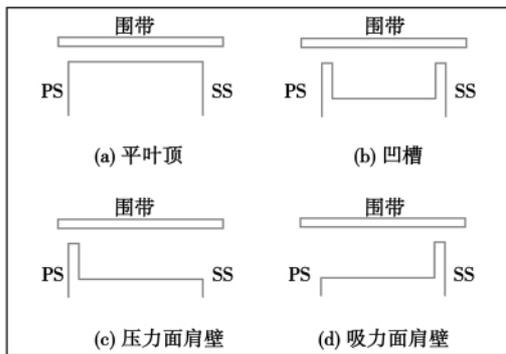


图2 4种叶顶结构示意图
Fig. 2 Schematic view of the four tip configurations

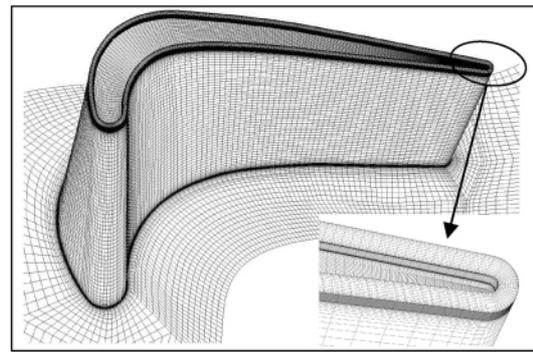


图3 凹槽结构计算网格分布
Fig. 3 Grid distribution for the squealer tip

各计算方案中采用相同的边界条件设置。计算流道设置为旋转域,叶片转速为3 000 r/min,并设置旋转周期性边界。流道进口给定质量流量、总温 ($T_{0in} = 1\ 367\ K$)、流动方向和湍流度,出口给定平均静压 ($P_{out} = 787.1\ kPa$)。叶片表面给定壁温 ($T_w = 957\ K$)、机匣面为无滑移静止绝热边界,轮毂面为无滑移转动绝热边界。

2 计算结果及分析

2.1 叶顶间隙内的流动结构

叶顶结构的差异,使得叶顶间隙内具有明显不同的流动结构。图4给出了采用不同叶顶结构时叶顶的流线分布以及图示截面间隙内的二次流矢量分布。

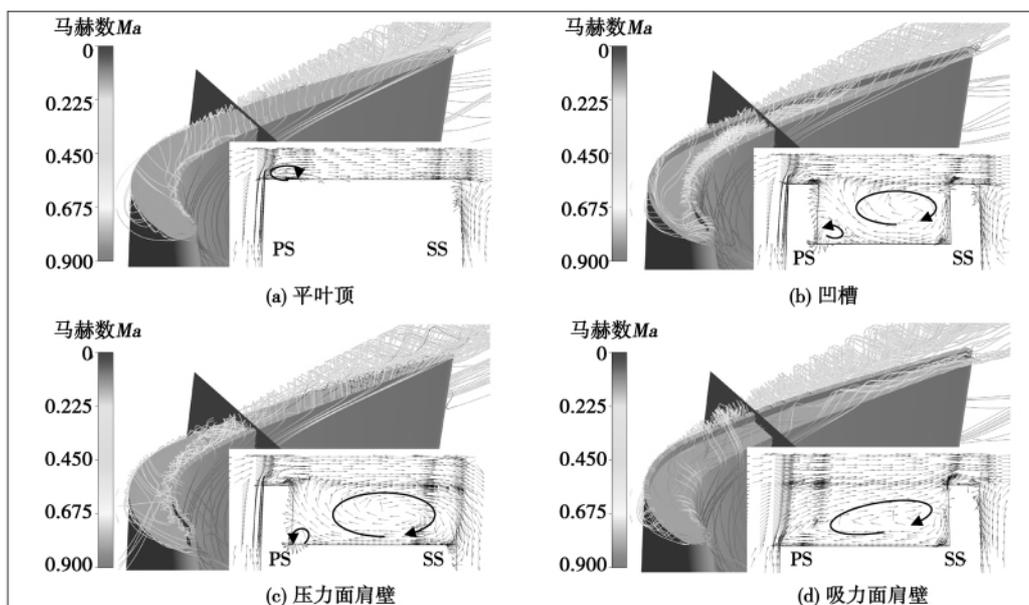


图4 叶顶流线和截面间隙二次流矢量图
Fig. 4 Flow around tips and secondary velocity vectors in the cut plane

当叶片顶部采用平叶顶结构时,因入口效应,泄漏流在压力面入口处存在一个较小的分离涡,如图 4(a) 所示。该分离涡从前缘开始,沿叶顶压力面侧向后发展。进入间隙的气流经分离涡后,再附着到叶顶,之后沿叶顶流出间隙,进入流道形成泄漏涡。

当采用凹槽结构时,间隙内流动变得复杂很多,如图 4(b) 所示。叶顶前缘处,压力面肩壁与凹槽底面之间存在一个分离涡。泄漏流从压力面侧进入间隙后,经分离涡,偏转并冲击到凹槽底面。从叶顶大约 1/3 弦长处开始,压力面肩壁的分离涡发展占据了整个凹槽。叶顶间隙内,分离涡内气体的堆积作用使得泄漏流体被完全推出凹槽,几乎平行通过叶顶间隙。

当采用压力面肩壁结构时,与凹槽结构情况类似,如图 4(c) 所示。叶顶前缘处,泄漏流进入间隙后,偏转冲击到叶顶底面,进行再附着,形成压力面侧的涡。同时因没有吸力面肩壁,部分气流受流动惯性影响,从吸力面侧进入间隙,与分离涡汇合,后随泄漏流流出间隙。相比平叶顶,泄漏涡开始的位置靠后。叶顶中后部区域,压力面肩壁的分离涡的发展同样使得泄漏流被推离叶顶。

当采用吸力面肩壁结构时,叶顶前缘处,泄漏流与平叶顶时类似,入口效应使得压力面侧形成一个的分离涡,如图 4(d) 所示。泄漏流经分离涡再附着到叶顶,后沿吸力面肩壁流出间隙。分离涡沿叶顶向后发展过程中,将占据间隙内大部分空间,使泄漏流被推离叶顶。与凹槽结构和压力面肩壁结构不同之处在于,分离涡占据间隙大部分空间的位置靠前,且涡内气流速度相对较低。

2.2 压力分布和总压损失

图 5 给出了不同叶顶结构时,半叶高处和叶顶附近(97%叶高)的叶片表面压力分布,横坐标为相对轴向弦长,纵坐标为以进口相对平均总压(p_0)为参考的相对压力。由图 5(a) 可知,半叶高处叶片表面压力分布基本不受叶顶结构的影响。图 5(b) 显示,不同叶顶结构对叶顶附近压力面侧的压力分布影响较小,但对吸力面侧压力分布影响较大,这将对叶片的气动性能产生一定影响。

图 6 为不同叶顶结构时,叶栅出口截面(100%轴向弦长)的总压损失系数分布云图,其中总压损失系数 c_p 定义为:

$$c_p = \frac{p_0 - p_t}{p_0} \quad (1)$$

式中: p_0 —进口相对平均总压; p_t —当地相对总压。

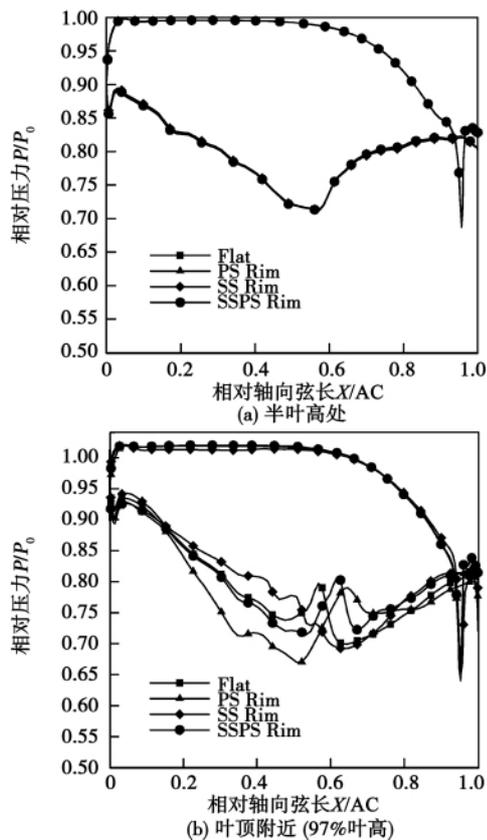


图 5 叶片表面压力分布

Fig. 5 Pressure distribution on the blade surface

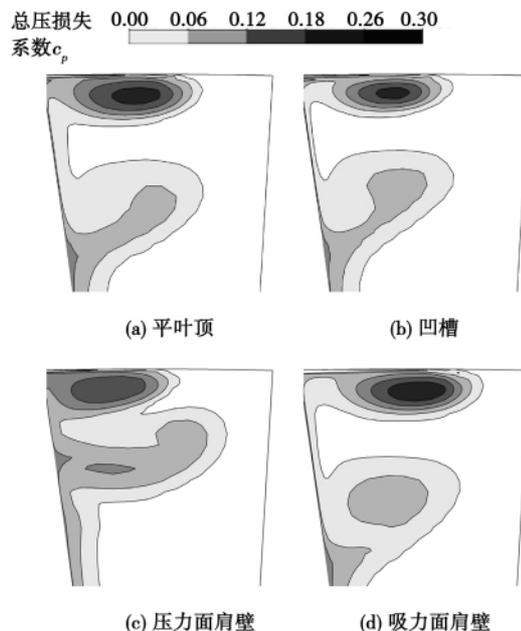


图 6 叶栅出口截面近顶部总压损失系数分布

Fig. 6 Total pressure loss coefficient distribution near the tip region in the outlet plane

总压损失是伴随强二次流的出现而产生的。图 6 表明,叶顶附近的总压损失主要由两部分构成,一是由泄漏涡耗散引起的,二是由通道中马蹄涡引起的,其中泄漏涡核区域的总压损失相对较大。相比平叶顶结构,凹槽结构能够削弱泄漏涡,使泄漏涡引起的损失降低。压力面肩壁结构使泄漏涡引起的损失进一步降低,但增加了马蹄涡引起的损失,且马蹄涡位置明显上移。吸力面肩壁结构则使泄漏涡引起的总压损失有所增加。

2.3 叶顶换热分析

图 7 为不同叶顶结构的叶顶表面换热系数的分布云图,其中换热系数 h 定义为:

$$h = \frac{q_w}{(T_w - T_{0in})} \quad (2)$$

式中: q_w —壁面热流; T_w —壁面温度; T_{0in} 为进口总温。



图 7 叶顶表面换热系数分布
Fig. 7 Heat transfer coefficient distribution on the tip surface

由图 7 可知,不同的叶顶结构所具有的叶顶表面换热系数分布差异较大。(1) 平叶顶结构时,泄漏流经分离涡再附着到叶顶的区域具有较高的换热系数,如图 7 (a) 所示。前缘吸力面附近因气流流速

较低,为低换热系数区域;(2) 与平叶顶相比,凹槽叶顶的换热分布截然不同,底面出现了明显的高换热系数区域和低换热系数区域,如图 7 (b) 所示。对照图 7 (b),因间隙流偏转并冲击凹槽底面所导致的高换热系数,主要位于凹槽底面的前中部区域。底面未受间隙流直接冲击的部分,尤其是尾缘区域,因气流速度较低,具有低的换热系数。中部的吸力面肩壁表面受上游泄漏流的冲击影响具有高的换热系数;(3) 压力面肩壁结构时,高换热系数区域的分布与凹槽结构类似。因没有吸力面肩壁的阻挡,泄漏流冲击底面后的贴壁流动使得高换热系数区域增大,如图 7 (c) 所示。叶顶底面的中后部区域同样具有低的换热系数;(4) 吸力面肩壁结构时,高换热系数区域大为减小,仅在叶顶底面前缘压力面区域因分离涡的影响而呈现高于其他区域的换热系数,如图 7 (d) 所示。从图 7 也发现,相比平叶顶结构,肩壁结构的使用,增大了叶顶表面换热系数的最大值与最小值之间的差距,局部变化更为剧烈,肩壁表面的换热系数也相对较高。

图 8 给出了叶顶面积平均换热系数的比较。仅从叶顶底面(不包括肩壁表面)来看,吸力面肩壁结构具有最低的平均换热系数,约为平叶顶结构的 57%,凹槽结构次之,约为平叶顶结构的 86%,压力面肩壁结构的平均换热系数相对较高,但仍低于平叶顶结构。从整个叶顶(包括肩壁表面)来看,吸力面肩壁结构仍然具有最小的平均换热系数,约为平叶顶结构的 70%,凹槽结构则是 87%,压力面肩壁结构约为 92%。这说明采用肩壁结构进行顶部密封,能够不同程度减小叶顶的平均换热系数,其中吸力面肩壁结构效果最好。相比平叶顶结构,透平动叶顶部常采用的凹槽结构能够降低叶顶的整体换热系数。

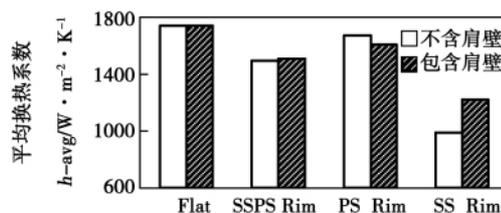


图 8 叶顶面积平均换热系数
Fig. 8 Average heat transfer coefficient on the tip surface

3 结 论

采用数值模拟方法,对比分析了燃气透平动叶4种叶顶结构对顶部泄漏流动和换热的影响。主要结论如下:

(1) 不同叶顶结构对叶顶间隙内泄漏流动结构影响较大,间隙内的泄漏流动因肩壁结构的使用而更加复杂。

(2) 叶顶附近吸力面侧的压力分布受叶顶结构影响较大。相比平叶顶结构,凹槽结构和压力面肩壁结构减小了泄漏涡所引起的总压损失,吸力面肩壁结构则使该总压损失有所增加。

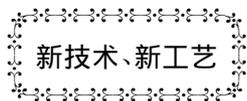
(3) 不同的叶顶结构所具有的叶顶表面换热系数分布差异较大。从整个叶顶换热来看,平叶顶结构具有最高的平均换热系数,吸力面肩壁结构的平均换热系数最低,约为平叶顶结构的70%,凹槽结构则约为平叶顶结构的87%。

参考文献:

[1] Azad G M S, Han J C, Teng S. Heat transfer and pressure distribution on a gas turbine blade Tip [R]. ASME Paper GT2000 - 194 2000.

- [2] Azad G M S, Han J C, Boyle R. Heat transfer and flow on the squealer tip of a gas turbine blade Tip [R]. ASME Paper GT2000 - 195 2000.
- [3] Azad G M S, Han J C, Bunker R S. Effect of squealer geometry arrangement on a gas turbine blade tip heat transfer [J]. Journal of Heat Transfer 2002, 124: 452 - 459.
- [4] Fadil Memic, Daniel Eriksson, Bengt Sundén. On prediction of tip leakage flow and heat transfer in gas turbines [R]. ASME Paper GT2004 - 53448 2004.
- [5] Lamyaa A, El - Gabry. Numerical modeling of heat transfer and pressure losses for uncooled gas turbine blade tip: effect of tip clearance and tip geometry [R]. ASME Paper GT2007 - 27008 2007.
- [6] Ameri A A, Steinthorsson E, Rigby D L. Effect of squealer tip on rotor heat transfer and efficiency [J]. Journal of Turbomachinery, 1998, 120(4): 753 - 759.
- [7] YANG Dian-liang, YU Xiao-bing, FENG Zhen-ping. Investigation of leakage flow and heat transfer in a gas turbine blade Tip with Emphasis on the Effect of Rotation [R]. ASME Paper GT2008 - 51215 2008.
- [8] Kwak J S, Han J C. Heat transfer coefficient on a gas turbine blade tip and near tip regions [R]. AIAA Paper 2002 - 3012 2002.

(丛敏编辑)



高温燃气涡轮冷却叶片热力状态的模拟

据《Теплоэнергетика》2012年1月刊报导,目前国内外燃气轮机的主要发展方向是提高涡轮进口工质的参数,目的在于提高进口温度,从而提高装置效率和单位功率。

分析了对流-气膜冷却叶片热力状态的三维模拟方法,该方法的误差不超过5%。

与一维理论计算相比,流动和伴随热交换的三维模拟给出了叶片内部空气流量的重新分布。由于空气在径向间隙内的串流和进气边附近不同方向的气膜流动,中间截面的温度与叶片端部的温度相差25%。

为了计算气膜的效果,引入叶片表面曲率修正系数来提高计算与试验数据的一致性,在叶片吸入面部分两者偏差在8%以内。

(吉桂明 摘译)

rotating speed respectively. There exists an optimum blade tip machining extent at which a relatively big increment of the stability margin can be obtained by the rotor at various rotating speeds. **Key words:** axial flow compressor , leakage flow , leading edge blade tip machining , stability margin , numerical simulation

燃气透平动叶不同叶顶结构对顶部泄漏流动和换热的影响 = **Influence of Various Rotating Blade Tip Structures on the Blade Tip Leakage Flow and Heat Exchange of a Gas Turbine** [刊, 汉] / LI Peng, ZHANG Chao, LIU Jian-jun (Engineering Thermophysics Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100190) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012, 27(5). - 535 ~ 539

With the first stage of a heavy-duty gas turbine serving as the object of study, numerically studied was the influence of such blade tip structures as flat blade tip, slot, shoulder on both the pressure surface and the suction surface on the blade tip leakage flow and heat exchange. The simulation results show that the blade tip structure has a relatively big influence on the leakage flow in the blade tip clearance and the pressure distribution on the suction surface near the blade tip. Compared with the flat blade tip structure, the slot structure and shoulder one on the pressure surface can decrease the total pressure loss caused by the leakage vortices while the shoulder structure on the suction surface can increase the loss. The flat blade tip structure has the highest mean heat exchange coefficient while the shoulder structure on the suction surface has the lowest mean heat exchange coefficient, about 70% of the flat blade tip structure. **Key words:** gas turbine, blade tip structure, leakage flow, blade tip heat exchange

一种新的汽轮发电机组真空系统漏气率在线检测方法 = **New Method for On-line Measuring the Gas Leakage Rate of a Turbo-generator Unit Vacuum System** [刊, 汉] / GUO Ying, WANG Xue-tong, ZHOU Guang-shun (Steam Turbine Research Institute, Shandong Electric Power Academy, Jinan, China, Post Code: 250002), YAO Fei (Jilin Electric Power Prospecting Design Institute, Changchun, China, Post Code: 130022) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012, 27(5). - 540 ~ 543

Presented was a new method for on-line measuring the gas leakage rate of a turbo-generator unit vacuum system. The method in question can be used to calculate and obtain the air leakage rate of a condenser by additionally installing temperature, pressure and relative humidity measuring points on the gas extraction pipeline of the condenser of a power plant and insert the parameters such on-line measured into the calculation formula derived herein. To verify the correctness of the method, a test rig for simulating the vacuum extraction pipeline environment of the condenser of a power plant was set up. The uncertainty degree of the whole test system from an uncertainty analysis was