

DOI: 10.7652/xjtuxb201803008

隔板位置对凹槽叶顶传热和冷却性能的影响

叶明亮, 黄琰, 晏鑫, 何坤

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 采用数值求解 RANS 方程(Reynolds averaged Navier-Stokes equations)的方法,对 3 种带隔板的凹槽叶顶间隙内的流动、传热以及冷却特性进行了研究,隔板分别位于凹槽 25%、50%和 75%弦长处,3 种结构分别称为 rib25、rib50、rib75,并与无隔板时的常规凹槽叶顶间隙内的总压损失、传热和冷却特性进行了对比。结果表明:随着叶顶间隙的增大,叶顶表面传热系数逐渐增大;rib75 结构的气动损失最小,在无气膜冷却条件下,rib75 结构的叶顶比纯凹槽叶顶的总压损失低 0.16%,对于叶顶带中弧线气膜冷却工况,rib75 结构叶顶的总压损失比带常规凹槽叶顶的叶栅低 0.15%;随着隔板向前缘方向移动,凹槽底部前缘吸力面侧的高传热区明显减小,在常规凹槽、rib25、rib50、rib75 这 4 种叶顶结构中,rib25 结构的叶顶平均传热系数与常规凹槽叶顶相近;加入叶顶中弧线气膜孔后,带隔板的叶顶可使冷气流更易聚集在凹槽底部区域,冷却效果显著提高,其中 rib25 结构具有最佳的冷却效果,比常规凹槽叶顶的平均冷却系数约高 21.5%。

关键词: 燃气轮机;凹槽叶顶;传热;气膜冷却

中图分类号: TK474.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)03-0055-08

Effect of Rib Location on the Heat Transfer and Cooling Characteristics of Squealer Tip

YE Mingliang, HUANG Yan, YAN Xin, HE Kun

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

Abstract: A numerical solution based on RANS (Reynolds averaged Navier-Stokes) equations was adopted to investigate the flow, heat transfer and film cooling characteristics in three modified squealer tip gaps where the ribs are configured at 25%, 50% and 75% axial chord in the squealer cavity, called rib25, rib50 and rib75, respectively. The total pressure loss, heat transfer and film cooling effects in the three tip configurations (rib25, rib50 and rib75) were also compared with that in the conventional squealer tip. The results showed that the heat transfer coefficient increases with the size of tip gap. The rib75 configuration has the lowest total pressure loss among four tip configurations (conventional squealer tip, rib25, rib50 and rib75). Without film cooling, the total pressure loss in rib75 configuration is 0.16% lower than that of the conventional squealer tip. With the tip camber line film cooling, the total pressure loss in rib75 configuration is lower than that of the conventional squealer tip by 0.15%. As the rib moves to the leading edge direction, the strong heat transfer area near the suction side can be effectively reduced in the no film cooling condition. Among four tip configurations (conventional squealer tip, rib25, rib50 and rib75), the area-averaged heat transfer coefficient on rib25 tip is close to

that on conventional squealer tip. As the rib is installed in the cavity, coolants are easier to be accumulated in the squealer cavity than in the conventional squealer tip, which significantly improves the film cooling effect on the squealer cavity floor. Among four squealer tips, rib25 has the best cooling effect on blade tip. The area-averaged film cooling coefficient on rib25 tip is higher than that of the conventional squealer tip by 21.5%.

Keywords: gas turbine; squealer tip; heat transfer; film cooling

燃气透平进口温度的提高可有效提高循环效率,随进口温度的提高,叶栅的热负荷逐渐增大。受到叶顶泄漏流的影响,高温燃气冲击叶顶并产生较大的热应力。为了改善动叶顶部的传热性能,对叶顶几何结构进行改进并采用合理的气膜冷却方式尤为重要。

目前,国内外针对动叶顶部传热与气膜冷却特性开展了较多研究。Kwak 等采用瞬态液晶技术测量了 2 种吹风比、3 种叶顶间隙下 GE-E³ 航空发动机第 1 级平顶动叶与凹槽顶动叶的叶顶传热性能和气膜冷却有效度分布^[1-2]。Bunker 等利用瞬态液晶法测量得到了不同叶顶间隙、湍流强度条件下叶顶的传热系数分布^[3]。Palafox 等采用 PIV 测量方法研究了不同间隙条件下动叶和端壁的相对运动对平顶叶栅叶顶泄漏特性的影响^[4],发现叶顶泄漏流对端壁二次流影响显著,动叶和端壁的相对运动减小了叶顶下部流体的速度值。Maesschalck 等采用参数化方法对类凹槽(squealer-like)叶顶进行造型^[5],并采用多目标优化方法对叶顶热负荷和叶栅气动效率进行了优化。Park 等采用实验研究了 5 种多凹槽叶顶的气动性能以及传热性能^[6],研究表明,通过在凹槽不同位置添加隔板可以提高叶片的气动性能,但该研究未对叶片气动及冷却进行深入研究。黄琰等研究了叶顶带中弧线和近压力面两排气膜孔时,3 种叶顶间隙、两种吹风比条件下的叶顶传热系数和气膜冷却有效度分布,并对带压力侧小翼的凹槽叶顶附近的流动换热以及冷却特性进行了分析^[7-8]。Ameri 数值研究了带中弧线条的平顶叶栅流动换热特性^[9],并与实验值进行对比,发现中弧线条可以减少叶顶泄漏流,但总压损失并未得到有效降低。杨佃亮利用实验数据考核了 4 种湍流模型对动叶叶顶间隙传热的预测能力^[10],并分析了叶顶间隙高度和凹槽深度对动叶叶顶间隙流动和传热的影响。

本文在 Park 等研究的基础上,采用商用计算流体动力学软件 ANSYS CFX11.0,对 3 种在常规凹槽叶顶 25%、50%和 75%弦长处添加垂直于弦长方

向的隔板形成双凹槽叶顶的气动性能及传热性能开展数值研究,研究了叶顶中弧线位置存在单排气膜孔时双凹槽叶顶的冷却性能,并与无气膜冷却时的双凹槽叶顶气动与传热性能进行了对比。

1 数值计算方法

将 GE-E³ 燃气透平第一级动叶叶顶型线放大 3 倍后拉伸 12.2 cm 生成计算的叶片几何模型,叶片轴向弦长为 8.61 cm。为了与 Kwak 的实验测量条件^[1]保持一致,凹槽深度为 5.08 mm,肩壁宽度为 2.29 mm,在中弧线处布置 13 个气膜孔,孔径为 1.27 mm,孔间距为 6.35 mm。分别在 25%、50%和 75%轴向弦长处添加垂直于弦线的隔板生成双凹槽叶顶结构(称为 rib25,rib50 以及 rib75),其中隔板宽度与肩壁宽度相等。叶片的几何模型及网格如图 1 所示。

数值计算的边界条件与实验条件^[1]保持一致。进口给定总温、总压、湍流强度和湍流尺度,计算叶顶传热性能时,叶片壁面和叶顶均给定等温边界,其他壁面给定绝热条件。计算叶顶气膜冷却特性时,所有壁面给定绝热条件,冷气进口给定总温与质量流量(流量由吹风比计算),计算中吹风比取 1,计算边界条件如表 1 所示。

表 1 计算边界条件^[1]

边界条件	参数	数值
进出口条件	进口总温/K	297
	进口总压/kPa	126.9
	进口湍流强度/%	9.7
	进口湍流尺度/m	0.015
壁面条件	出口静压/kPa	102.7
	壁面温度/K	340
冷却流条件	质量流量/kg·s ⁻¹	0.000 135
	进口总温/K	328

本文中定义吹风比为

$$M = \frac{\rho_c u_c}{\rho_m u_{avg}}$$

(1)

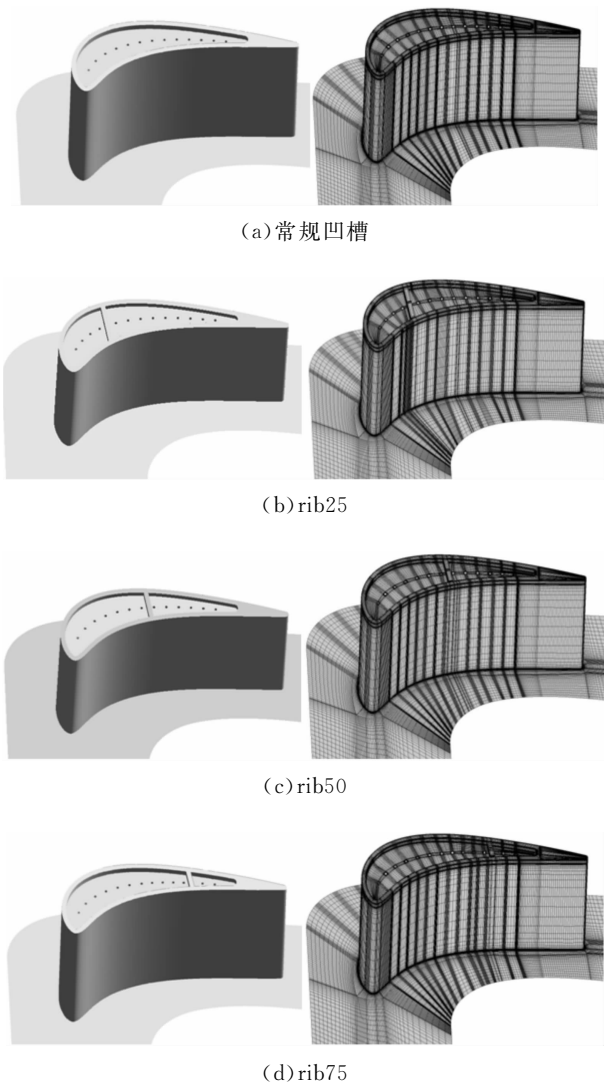


图 1 4 种叶顶结构计算模型和网格

式中: ρ_m 为进口主流密度; v_{avg} 为进口气流速度; ρ_c 为冷却气流密度; v_c 为冷却气流入口速度。

传热系数定义为

$$h = \frac{q}{T_w - T_{in}} \tag{2}$$

式中: q 为壁面热通量; T_w 为壁面温度, T_{in} 为进口主流总温。

气膜冷却有效度定义为

$$\eta = \frac{T_{aw} - T_{in}}{T_c - T_{in}} \tag{3}$$

式中: T_{aw} 为绝热壁面温度; T_c 为冷却气流温度。

总压损失定义为

$$\Delta P^* = \frac{P_{t,s} - P_{t,local}}{P_{t,s} - P_{s,local}} \tag{4}$$

$$P_{t,s} = \frac{\dot{m}_h P_{t,h} + \sum_{i=1}^{13} \dot{m}_{ci} P_{t,ci}}{\dot{m}_h + \sum_{i=1}^{13} \dot{m}_{ci}} \tag{5}$$

式中: $P_{t,local}$ 为当地总压; $P_{s,local}$ 为当地静压; $\dot{m}_h$ 为叶片进口质量流量; $P_{t,h}$ 为叶片进口总压; $\dot{m}_{ci}$ 为第 i 个气膜孔的冷气质量流量; $P_{t,ci}$ 为第 i 个气膜孔的进口总压。

图 2 给出了 $k-\omega$ 、 $k-\epsilon$ 和 SST 这 3 种湍流模型计算得到的叶顶传热系数和气膜冷却有效度分布,并与实验值^[2]进行了对比。由图 2 可知: $k-\epsilon$ 湍流模型计算出的叶片前缘的高传热区域较为狭长,而近压力面侧气膜冷却有效度偏小;SST 湍流模型计算出的高传热区域较大,高气膜冷却有效度区域在叶顶压力面侧的面积偏大,因此总体气膜冷却有效度偏高; $k-\omega$ 湍流模型计算得到的叶顶传热系数及气膜冷却有效度的分布与实验值吻合得较好,但计算结果与实验结果仍存在偏差,主要体现在叶顶凹槽前缘、肩壁和尾缘处。这一方面是由于实验的误差,在 Kwak 等^[1]的实验中,传热系数的瞬态液晶测量误差在 8% 左右,而气膜冷却有效度的实验误差在 10% 左右;另一方面是由于数值计算的误差,在冷热气掺混和刮削流的计算中,需要采用更为准确的流动求解方法 DES 或 LES 来提升数值计算的精度。 $k-\omega$ 湍流模型能较好地反映叶顶传热和冷却特性,因此本文采用 $k-\omega$ 湍流模型对叶顶传热和冷却性能进行研究。

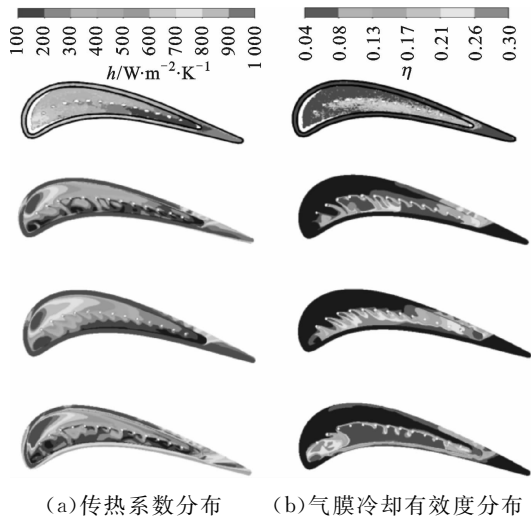


图 2 叶顶表面 h 和 η 分布云图

采用 $k-\omega$ 湍流模型进行网格无关性验证。Richardson 外推值为 634.017 时,表 2 给出了 4 种网格数下计算得到的叶顶平均传热系数及相对误差。由表 2 可知,随着网格数的增加,相对误差逐渐减小,当网格数达到 730 万时,对叶顶平均传热系数的计算结果影响较小,相对误差仅为 1.7%,可以认为已获得网格无关解。

表 2 4 种网格下叶顶的平均传热系数及相对误差

网格数/万	$h/W \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	相对误差/%
150	563.891	11.1
306	597.27	5.8
579	617.054	2.8
730	623.331	1.7

最后,选用 730 万网格以及 $k-\omega$ 湍流模型分析近壁面第 1 层网格距离对计算精度的影响,表 3 给出了 5 种近壁面第 1 层网格距离下的叶顶传热系数,表 4 给出了 5 种近壁面第 1 层网格距离下的气膜冷却有效度。计算表明,当衡量近地面第 1 层网格距离对换热性能影响的指标 $y^+ < 1$ 时,叶顶平均传热系数的计算误差可以控制在 1% 以内,叶顶平均气膜冷却有效度的计算误差可以控制在 3% 以内,因此在本文的计算中,近壁面第 1 层网格距离均设置为 0.001 mm。

在上述数值方法考核的基础上,最终确定了 4 种叶顶结构的计算网格数,如表 5 所示。

表 3 5 种近壁面第 1 层网格距离下的叶顶传热系数

第 1 层网格距离	y^+	平均传热系数	相对偏差/%
0.001	0.344	623.331	
0.002	0.708	628.151	0.77
0.005	1.800	638.105	2.37
0.010	3.678	691.445	10.90
0.050	19.050	637.112	2.21

表 4 5 种近壁面第 1 层网格距离下的叶顶气膜冷却有效度

第 1 层网格距离	y^+	气膜冷却有效度	相对偏差/%
0.001	0.373	0.064 8	
0.002	0.767	0.066 7	2.9
0.005	1.934	0.062 7	3.2
0.010	3.933	0.056 8	12.3
0.050	19.713	0.015 3	76.4

表 5 4 种叶顶结构的网格数

结构	网格数/万			
	无隔板	rib25	rib50	rib75
无气膜孔	362	375	421	374
中弧线单排气膜孔	730	754	786	759

2 计算结果分析

2.1 叶顶间隙对凹槽状叶顶流动换热的影响

本节主要研究 3 种间隙条件下凹槽叶顶的流动传热性能,叶顶间隙分别为 1.31 mm、1.97 mm 和 3.29 mm,占叶片高度的 1%、1.5% 和 2.5%。图 3 给出了 3 种叶顶间隙下常规凹槽叶顶的流线图。由图 3 可知,泄漏流流经凹槽叶顶间隙时会向凹槽底部偏转形成回流涡,且顺着凹槽向尾缘方向移动,最终掠过吸力面侧肩壁形成泄漏涡。

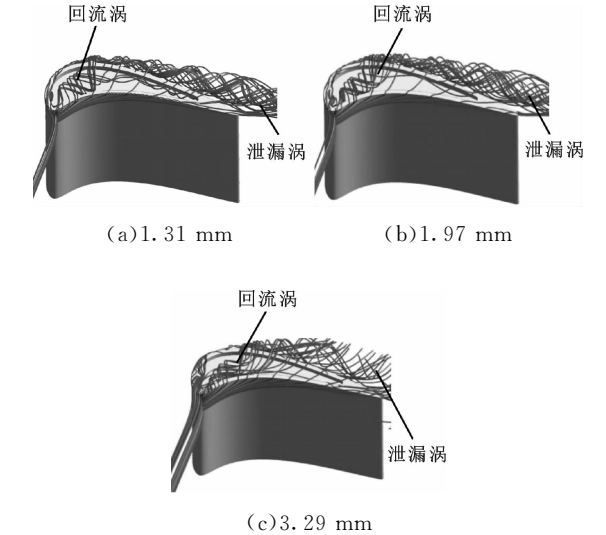


图 3 3 种间隙下的叶顶流场结构

图 4 给出了 4 种叶顶间隙下凹槽状叶顶沿不同轴向弦长截面的流线分布图。由图 4 可知:在 25% 轴向弦长处,随着叶顶间隙的增大,回流涡的尺度逐渐减小,并逐渐向压力面侧偏移;在 50% 轴向弦长处,回流区域均有明显增大,说明回流区得到发展;在 75% 轴向弦长处,泄漏涡区域明显增大。如果在凹槽内合适的轴向弦长位置增加阻力,泄漏涡的发展会受到抑制。

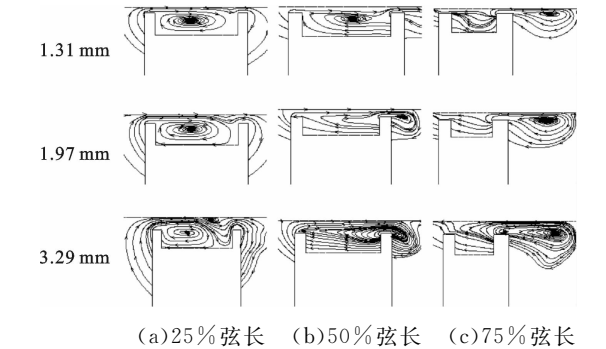


图 4 3 种间隙下凹槽叶顶不同轴向弦长处的流线图

图 5 给出了 3 种间隙下的叶顶传热系数分布云

图。由图 5 可知,受叶顶凹槽中回流涡的影响,叶顶前缘出现高传热区域,并且随着叶顶间隙的增大,叶片前缘高传热区也会逐渐增大。这是因为随着叶顶间隙的增大,回流涡尺度逐渐减小,导致气流卷吸作用减小,从而恶化了前缘附近的传热。

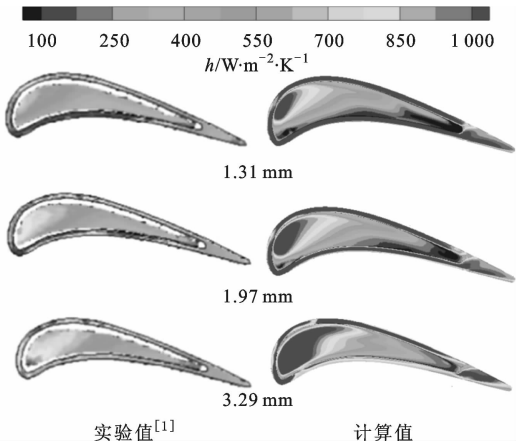


图 5 3 种间隙下叶顶的传热系数分布云图

2.2 无气膜冷却时双凹槽叶顶的流动传热特性

图 6 给出了 3 种双凹槽叶顶的流线图,由于隔板的存在,泄漏流在两个凹槽内形成了两个回流涡,并且靠近前缘位置的凹槽内的回流涡一部分掠过吸力面形成泄漏涡,另一部分掠过隔板,阻碍了靠近尾缘凹槽内回流涡的流动,随着隔板向尾缘方向的移动,靠近前缘位置凹槽内的回流涡逐渐增大,而靠近尾缘位置凹槽内的回流涡逐渐减小,这会导致靠近前缘的凹槽内的传热减弱而靠近尾缘的凹槽内的传热增强。

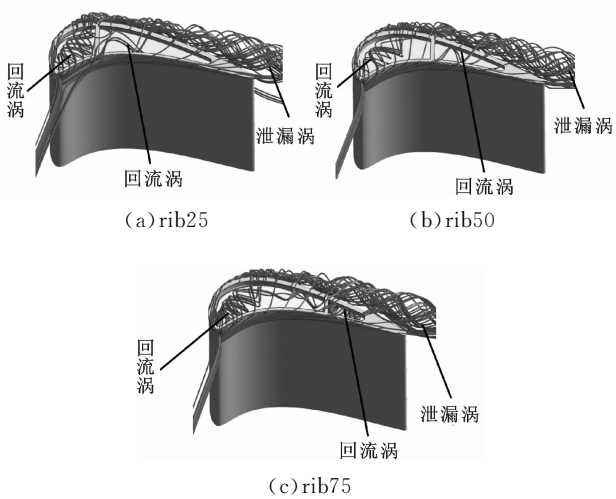


图 6 3 种双凹槽结构的叶顶流线图

图 7 给出了 3 种双凹槽叶顶沿 25%、50%以及 75%轴向弦长截面的流线分布图。由图 7 可知,随着隔板向尾缘方向移动,靠近前缘的凹槽内的回流

涡尺度会增大,并且提前形成泄漏涡。图 8 给出了叶顶表面的压力系数分布云图。由图 8 可知,与常规凹槽叶顶相比,双凹槽叶顶的前缘回流涡由于受到隔板限制,从而导致靠近前缘的凹槽内的压力普遍增大,而靠近尾缘的凹槽内的压力则有降低的趋势。这主要是因为靠近前缘的凹槽内的回流涡尺度比常规凹槽叶顶要小,导致在靠近前缘的凹槽内的流速降低,引起压力增大。图 9 给出了无气膜冷却时双凹槽叶顶总压损失沿叶高方向的变化曲线。由图 9 可知,在凹槽叶顶添加隔板会对叶片顶部的压力损失造成较大影响,rib50 的总压损失在叶顶间隙处最小,但在 80%~90%叶高区域,rib50 的总压损失最大。

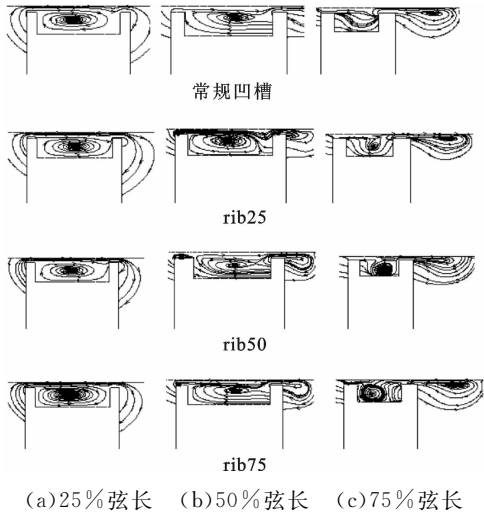


图 7 4 种凹槽叶顶在不同轴向弦长处的流线图

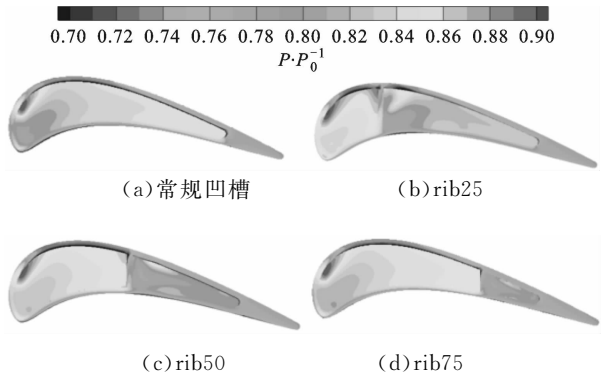


图 8 4 种凹槽叶顶压力系数分布云图

3 种双凹槽叶顶 rib25、rib50、rib75 和常规凹槽叶顶的总压损失为 14.16%、14.47%、13.91% 和 14.07%,可知随着隔板向尾缘方向的移动,总压损失先增大后减小,相比于常规凹槽,rib75 的总压损失降低了 0.16%,而 rib25 以及 rib50 会使总压损失有所增加。

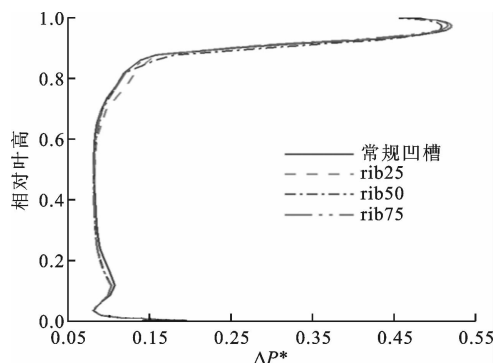


图9 4种凹槽叶顶的总压损失沿叶高方向的分布

图10给出了4种双凹槽叶顶时的平均传热系数分布云图。由图10可知,两个凹槽内均出现高传热区,通过比较可以发现,随着隔板位置向前缘方向移动,靠近前缘的凹槽内的高传热区域逐渐减小,而靠近尾缘的凹槽内的高传热区域逐渐增大。考虑到凹槽状叶顶的高传热区域主要分布在叶片前缘,为了缩小叶顶前缘的高传热区域,rib25要好于rib50和rib75。此外,由于靠近前缘的凹槽内回流涡会掠过隔板,所以隔板区域的传热系数也会偏高。

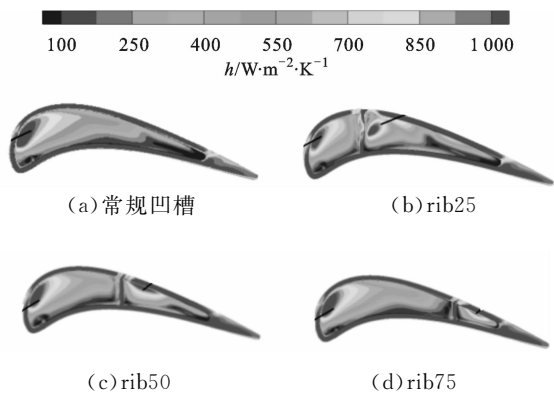


图10 4种凹槽叶顶传平均热系数分布云图

3种双凹槽叶顶 rib25、rib50、rib75 和常规凹槽叶顶的平均传热系数计算值为 694.614、718.389、711.606 和 695.834 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 。可以发现:凹槽叶顶加隔板结构,会增大叶顶平均传热系数;随着隔板向尾缘方向移动,叶顶平均传热系数先增大后减小。

2.3 带中弧线气膜孔的双凹槽叶顶传热及冷却特性

图11给出了3种双凹槽叶顶 rib25、rib50、rib75 的冷却气流流线图,通过与常规凹槽叶片比较可知,由于隔板的阻隔作用,冷却气流在凹槽内的停留时间将会更长。在常规凹槽叶顶内,冷却气流在泄漏流和回流涡的作用下,先被卷吸到压力侧,最后沿吸力侧流出叶顶。在添加隔板后,隔板前后两个

凹槽内被卷吸的冷却气流遇到隔板会在隔板附近反向流动,所以隔板附近的冷却效果要好一些。此外,由于两个凹槽内回流涡的作用,冷却气流在凹槽内的流动更充分,因此凹槽内的冷却效果也会更好。

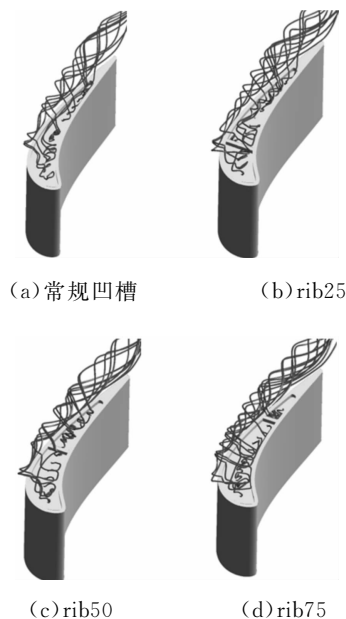


图11 4种凹槽内冷却气流流线图

图12给出了带中弧线气膜孔的常规凹槽叶顶以及3种双凹槽叶顶的总压损失沿叶高方向的变化曲线,规律与无中弧线气膜孔的双凹槽叶顶相似,rib50的总压损失在近顶径处最小。

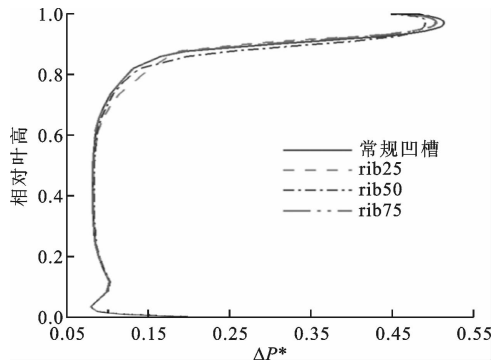


图12 4种凹槽叶顶总压损失沿叶高方向的变化曲线

带中弧线气膜冷却时3种双凹槽叶顶 rib25、rib50、rib75 和常规凹槽叶顶的总压损失计算值为 13.79%、13.82%、13.57% 和 13.72%,与无中弧线气膜孔时类似,总压损失随着隔板向尾缘方向的移动先增大后减小,且 rib75 的总压损失最小。与常规凹槽叶顶相比,rib75 总压损失降低了 0.15%,而 rib25 和 rib50 都会使得总压损失有所增大。此外,与无中弧线气膜孔叶顶相比,在添加中弧线气膜孔之后,总压损失会有所降低。这是因为冷却气流会

对叶顶间隙的泄漏流起到阻碍作用,使泄漏流流量和流速得到降低,从而降低了总压损失。

图 13 给出了带中弧线气膜孔时 4 种凹槽叶顶平均传热系数分布云图。由图 13 可知,随着隔板向叶顶尾缘移动,叶顶前缘的高传热区会逐渐增大,而靠近尾缘的凹槽内的高传热区逐渐减小。带中弧线气膜孔的 3 种双凹槽叶顶 rib25、rib50、rib75 和常规凹槽叶顶的平均传热系数计算值为 622.96、631.69、624.27 和 623.33 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$,可知 rib25 的叶顶平均传热系数在 3 种双凹槽叶顶中最小,并且随着隔板向尾缘方向移动,叶顶平均传热系数先增大后减小。

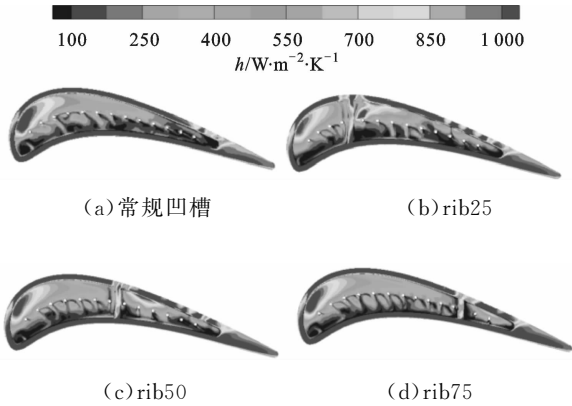


图 13 带中弧线气膜孔时 4 种凹槽叶顶平均传热系数分布云图

图 14 给出了带中弧线气膜孔时 4 种凹槽叶顶气膜冷却有效度分布云图。由图 14 可知,在靠近隔板位置冷却效果得到明显改善,在靠近叶片前缘的凹槽内的冷却气流有一部分会进入靠近尾缘的凹槽内,另一部分会在隔板附近阻碍靠近尾缘的凹槽内的冷却气体流出凹槽,所以靠近尾缘的凹槽可获得更好的冷却效果。带中弧线气膜孔的 3 种双凹槽叶顶 rib25、rib50、rib75 和常规凹槽叶顶的气膜冷却

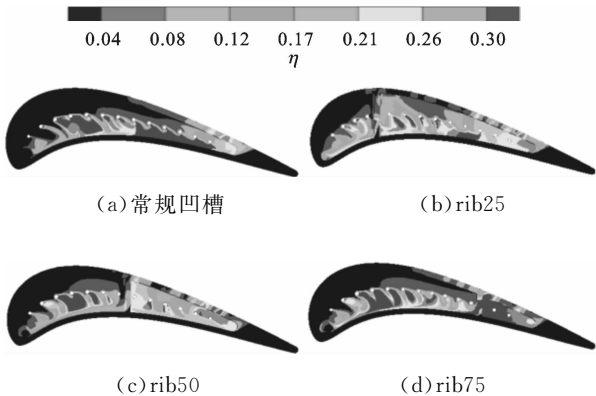


图 14 带中弧线气膜孔时 4 种凹槽叶顶气膜冷却有效度分布云图

有效度为 0.078 7、0.068 9、0.078 3 和 0.064 8。可知,由于存在隔板结构,叶顶获得了较好的冷却效果。

3 结 论

本文采用数值计算方法对常规凹槽叶顶和 3 种双凹槽叶顶的传热和冷却性能进行了数值研究。基于实验数据对计算方法的有效性进行了考核,得到了如下主要结论。

(1)对于常规凹槽叶顶,叶顶平均传热系数随叶顶间隙的增大而增大;

(2)对于无气膜冷却的双凹槽叶顶,rib25 叶顶平均传热系数最小,叶顶前缘的高传热区随着隔板向叶片前缘方向移动而逐渐缩减。rib75 的气动性能最好,总压损失比常规凹槽叶顶降低了 0.16%。

(3)对于带中弧线气膜冷却的双凹槽叶顶,rib25 的叶顶平均传热系数最小,气膜冷却有效度最高,比常规凹槽叶顶的气膜冷却有效度提高约 21.5%。rib75 的气动损失最小,总压损失比常规凹槽叶顶降低 0.15%。

参考文献:

[1] KWAK J S, HAN J C. Heat transfer coefficient on the squealer tip and near squealer tip regions of a gas turbine blade [C] // ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, New York, USA; ASME, 2002; 245-254.

[2] KWAK J S, HAN J C. Heat transfer coefficient and film-cooling effectiveness on the squealer tip of a gas turbine blade [C] // ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. New York, USA; ASME, 2002; 1073-1082.

[3] BUNKER R S, BAILEY J C, AMERI A A. Heat transfer and flow on the first stage blade tip of a power generation gas turbine; Part1-Experimental Results [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2000, 122: 272-277.

[4] PALAFOX P, OLDFIELD M L G, LAGRAFF J E, et al. PIV maps of tip leakage and secondary flow fields on a low speed turbine blade cascade with moving endwall [C] // ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. New York, USA; ASME, 2005; 465-476.

[5] DE MAESSCHALK C, LAVAGNOLI S, PANIAGUa G, et al. Heterogeneous optimization strategies for carved and squealer-like turbine blade tips [C] //

- ASME Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition. New York, USA: ASME, 2015: V05BT13A012.
- [6] PARK J S, LEE S H, KWAK J S. Measurement of blade tip heat transfer and leakage flow in a turbine cascade with a multi-cavity squealer tip [C]// ASME Turbine Blade Tip Symposium. New York, USA: ASME, 2013: V001T02A006.
- [7] 黄琰, 晏鑫, 何坤, 等. 气膜孔分布对凹槽叶顶传热和冷却性能的影响 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(5): 101-107.
- HUANG Yan, YAN Xin, HE Kun, et al. Effect of cooling hole distributions on heat transfer and cooling effectiveness on turbine blade tip [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(5): 101-107.
- [8] 黄琰, 晏鑫, 何坤, 等. 压力面侧小翼结构对凹槽叶顶冷却传热性能的影响 [J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(7): 51-56.
- HUANG Yan, YAN Xin, HE Kun, et al. Effect of pressure side winglet on film cooling and heat transfer performance of blade squealer tip [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(7): 51-56.
- [9] AMERI A A. Heat transfer and flow on the blade tip of a gas turbine equipped with a mean-camberline strip [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2001, 123(4): 704-708.
- [10] 杨佃亮. 燃气透平动叶顶部传热及冷却的数值研究

[D]. 西安: 西安交通大学, 2008.

[本刊相关文献链接]

- 董新宇, 毕勤成, 贺宇峰, 等. 钛合金螺旋扁管换热器流阻与传热性能实验研究. 2018, 52(1): 14-19. [doi: 10. 7652/xjtuxb201801003]
- 郑达仁, 王新军, 张峰, 等. 上游横向间断肋布置方式对气膜冷却性能的影响. 2017, 51(11): 7-13. [doi: 10. 7652/xjtuxb201711002]
- 费昕阳, 王新军, 陆海空. 平板冲击发散冷却流动与换热特性的数值模拟. 2017, 51(7): 57-61. [doi: 10. 7652/xjtuxb201707009]
- 高庆, 廖高良, 张永海, 等. 透平级气动及运行参数对轮缘密封封严性能影响的数值研究. 2017, 51(7): 62-72. [doi: 10. 7652/xjtuxb201707010]
- 周子杰, 王新军, 费昕阳. 燃机透平静叶尾缘柱肋通道内的汽雾/空气冷却流动与换热特性数值研究. 2016, 50(11): 21-27. [doi: 10. 7652/xjtuxb201611004]
- 刘昕, 袁奇, 欧文豪. 燃气轮机周向拉杆转子拉杆应力分析和改进设计. 2016, 50(10): 104-110. [doi: 10. 7652/xjtuxb201610016]
- 夏凯, 孙岩桦, 洪德江, 等. 轴向拉紧的圆弧端齿轴段扭转特性研究. 2016, 50(5): 51-56. [doi: 10. 7652/xjtuxb201605008]
- 谢金伟, 王新军, 周骏飞. 空心静叶汽膜孔排吹扫除湿的数值研究. 2015, 49(7): 61-66. [doi: 10. 7652/xjtuxb201507011]

(编辑 赵炜 苗凌)

(上接第 54 页)

- HAN linpei, HONG Wei, WANG Jianjun, et al. Performance optimization of partial load of gasoline engine at critical knock status using hot exhaust gas recirculation [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(10): 116-122.
- [11] 胡顺堂. 全可变气门机构汽油机泵气损失控制及对燃烧过程的影响 [D]. 天津: 天津大学, 2009.
- [12] PIERIK R J, BURKHARD J F. Design and development of a mechanical variable valve actuation system [R]. Washington, DC, USA: SAE, 2001.
- [13] SAUNDERS R J, ABDUL-WAHAB E A. Variable valve closure timing for load control and the Otto Atkinson cycle engine [R]. Washington, DC, USA: SAE, 1989.

[本刊相关文献链接]

- 袁超, 洪伟, 苏岩, 等. 直喷汽油机起动过程多环芳烃排放的研究. 2017, 51(9): 54-62. [doi: 10. 7652/xjtuxb201709008]
- 刘世宇, 李志军, 史春涛, 等. CO₂ 和水蒸气对稀燃 NO_x 催化

- 转化器的影响. 2017, 51(5): 134-141. [doi: 10. 7652/xjtuxb201705019]
- 李耀庭, 黄勇成, 孟凡胜, 等. 增压直喷汽油机中润滑油液滴诱发早燃机制的数值研究. 2016, 50(7): 51-57. [doi: 10. 7652/xjtuxb201607009]
- 麻斌, 董伟, 高莹, 等. 稀燃条件下废气再循环对缸内直喷汽油机微粒排放粒径分布的影响. 2016, 50(5): 87-94. [doi: 10. 7652/xjtuxb201605013]
- 钟兵, 洪伟, 苏岩, 等. 控制参数对增压缸内直喷汽油机部分负荷下微粒排放特性的影响. 2016, 50(5): 95-100. [doi: 10. 7652/xjtuxb201605014]
- 胡鹏, 王伟, 邓康耀, 等. 排气再循环与燃烧边界条件耦合对增压汽油机有效热效率的影响. 2016, 50(1): 34-40. [doi: 10. 7652/xjtuxb201601006]
- 韩林沛, 洪伟, 王建军, 等. 汽油机部分负荷应用热废气再循环实现临界爆震的性能优化. 2015, 49(10): 116-122. [doi: 10. 7652/xjtuxb201510019]

(编辑 赵炜 苗凌)