

DOI: 10.7652/xjtuxb201603009

冷却孔布置对透平转静腔室性能影响的数值研究

张峰, 王新军, 李军

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 采用 SST 湍流模型数值研究了透平第二级转、静腔室的流动与封严特性, 分析了冷却孔布置对腔室内的流动、冷却效率以及主流燃气入侵特性的影响。研究表明: 冷却孔的位置对上游腔室内的流动影响较大, 对下游腔室基本无影响; 冷却孔距离上游越近, 上游腔室的旋流比越大, 级间密封进口的旋流比越小, 密封进、出口压比越小, 相应的流过级间密封的质量流量越小, 上游轮缘密封的燃气入侵量越小, 上游腔室转、静壁面的冷却效率就越大; 下游轮缘密封出流的旋流比越小, 相应的主流通道的流动损失越大, 但冷却孔位置对下游腔室内的旋流比和壁面冷却效率的影响很小; 随着冷却空气流量的增加, 3 种冷却孔布置下上游腔室壁面冷却效率的差值减小。

关键词: 转静腔室; 轮缘密封; 传热; 数值计算

中图分类号: TK263 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)03-0055-07

Numerical Investigation for Effect of Coolant Inlet Arrangements on Performance of Turbine Rotor-Stator Cavity

ZHANG Feng, WANG Xinjun, LI Jun

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

Abstract: The flow and sealing performance of secondary rotor-stator cavity was numerically investigated with SST turbulence model. The effect of coolant inlet position on cavity flow, cooling performance and mainstream ingestion phenomenon were analyzed. The results show that the influence of coolant inlet position on the flow in upstream cavity is significant, while that in downstream cavity is slight. As the coolant inlet position moves toward upstream, the swirl ratio in the upstream cavity increases, the swirl ratio at the inlet of interstage labyrinth seal decreases, the pressure ratio and mass flow through interstage labyrinth seal decrease, the mass flow of mainstream ingestion on the upstream rim seal decreases, and meanwhile the cooling performance of the upstream cavity walls increases; whilst the swirl ratio on the downstream rim seal decreases, correspondingly the flow losses of mainstream flow increase, while the swirl ratio and walls cooling performance in the downstream cavity slightly depends on the coolant inlet position. As the mass flow rate of cooling air increases, the difference in cooling performance of the upstream cavity walls set in different coolant inlet positions decreases.

Keywords: rotor-stator cavity; rim seal; heat transfer; numerical calculation

随着燃气轮机技术的发展, 透平通流设计已经达到了很高的水平, 而通过透平二次空气系统的研

究可进一步改进透平通流设计。轮盘转、静腔室是二次空气系统中最复杂的通流单元, 因此对转、静腔

收稿日期: 2015-06-19。 作者简介: 张峰(1993—), 男, 博士生; 王新军(通信作者), 男, 副教授。

网络出版时间: 2015-12-10

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20151210.1128.004.html>

室性能的研究得到了重视。

转、静腔室的研究集中于预旋转、静腔室,这类腔室主要用来给第一级动叶提供冷却空气。Didenko 等数值研究了腔室宽度和预旋喷嘴位置对转、静腔室的预旋效率、压力损失系数和流量系数的影响^[1]。罗翔等数值研究了某预旋转、静腔室的流动与换热特性^[2]。

罗罗公司和萨塞克斯大学热流中心对第二级转、静腔室进行了一系列的实验和数值研究,分析了冷却空气流量、冷却孔角度、冷却孔数量和导流板对腔室内的流动和冷却效率的影响,研究了腔室壁面的换热特性和轮缘密封的封严效率^[3-7]。Liu 采用共轭换热的方法数值研究了不同冷却空气流量下腔室内的流动与换热特性^[8]。Amirante 采用流热固耦合的方法研究了腔室内的换热特性^[9]。

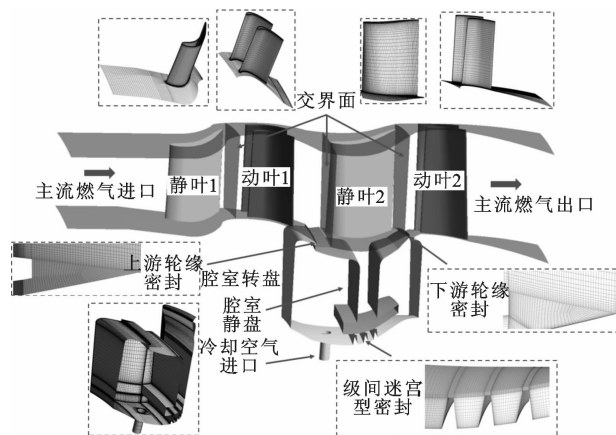
上述研究多集中于冷却孔的角度、数量和导流板布置的影响分析,而本文采用商用软件 ANSYS-CFX12.1 数值研究了冷却孔轴向位置对第二级转、静腔室内的流动、冷却效率和主流燃气入侵特性的影响。

1 计算模型和数值方法

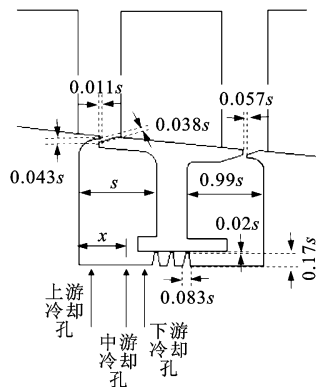
1.1 计算模型

二级轴流实验透平原型^[10]由萨塞克斯大学热流中心提供,实验透平包含了 39 个静叶和 78 个动叶,为了简化计算,选取了整体结构的 1/39 作为本文的研究对象。计算模型如图 1a 所示,其中包括涡轮主流通道和第二级转、静腔室。第二级转、静腔室分上游腔室和下游腔室,上游腔室由第一级动叶轮盘的下游壁面和第二级静叶叶根的上游壁面围成,而下游腔室由第二级静叶叶根的下游壁面和第二级动叶轮盘的上游壁面围成。转、静壁面之间必然存在间隙,因此在 2 个腔室顶部与主流通道连接处布置了轮缘密封结构。2 个轮缘密封结构分别位于第二级静叶的进、出口位置,因此这 2 处的主流气体之间存在压差。当没有为腔室提供冷却空气时,在压降的作用下主流燃气从上游轮缘密封处入侵腔室,并由级间密封进入下游腔室,最后从下游轮缘密封处流入主流燃气中。此时,主流燃气入侵的质量流量主要由上、下游轮缘密封处的压降和级间密封结构决定。为了防止主流燃气入侵,必须为腔室提供冷却空气,而腔室内气流的流动情况受到了 2 股气流相互作用的影响。模型中静叶流道为静止域,动叶流道为旋转域,2 个域之间由交界面连接。冷却

孔沿轴向的布置如图 1b 所示,分别定义为上游冷却孔、中间冷却孔和下游冷却孔,它们距上游腔室旋转壁面的距离与腔室宽度的比值 x/s 分别为 0.15、0.58 和 0.86。



(a) 腔室及主流通道几何结构与网格示意



(b) 冷却孔轴向分布

图 1 计算模型示意图

采用商用软件 ICEM 进行了结构化网格划分,其中叶片周围区域采用 O 网格,腔室倒圆角部分采用 Y 网格,其他位置采用 H 网格,对轮缘密封、级间密封及一些流动和结构复杂区域的网格进行了加密处理。

1.2 数值方法及验证

采用商用软件 ANSYS-CFX12.1 数值求解了带有主流通道的第二级转、静腔室的三维定常黏性雷诺时均 N-S 方程,并进行了网格无关性和湍流模型验证。

冷却空气质量流量 $m_c = 50 \text{ g/s}$ 时,3 种网格数下腔室内虚线所示位置的气流旋流比 β 沿径向的变化如图 2 所示。可以看出,在低半径处 250 万网格的预测值与 420 万网格的预测值非常接近,且最大相对变化量低于 1%,因此在后续计算中网格数为

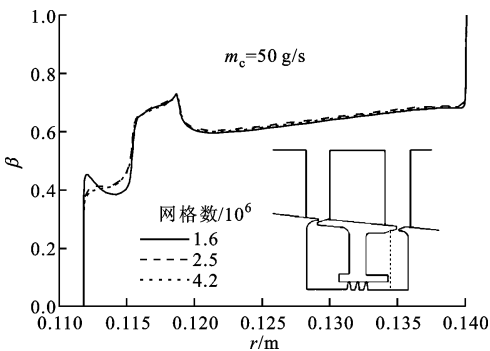


图2 不同网格数下腔室内虚线所示位置的气流旋流比沿径向的变化

250 万。
图3给出了 $m_c=50\text{ g/s}$ 时转、静腔室中监控点处的温度分布,计算条件与文献[11]的实验条件相同。由于未考虑叶片及叶根的导热,3种湍流模型的数值预测值均略低于实验值。上游腔室监控点处的预测值与实验值比较接近,而下游腔室的预测值存在一定差异,SST湍流模型的计算结果与实验值吻合最好。因此,后续计算均采用SST湍流模型。

1.3 参数定义

腔室壁面的冷却效率

$$\eta_T = \frac{(T_{0,\text{inlet}} - T_w)}{(T_{0,\text{inlet}} - T_c)} \tag{1}$$

式中: $T_{0,\text{inlet}}$ 为主流通道进口总温; T_w 为壁面温度; T_c 为冷却工质进口总温。

气流在腔室内流动的旋流比

$$\beta = V_\varphi / \omega r \tag{2}$$

式中: V_φ 为气流的周向速度; ω 为轮盘转速; r 为半径。

冷却空气及上游腔室轮缘密封、级间迷宫型密封处的质量流量与主流燃气质量流量的比值分别为 M_c 、 M_{rs} 、 M_{ls} ,即

$$M_c = \frac{m_c}{m_h} \tag{3}$$

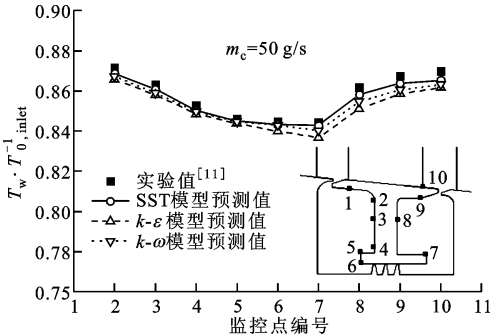


图3 湍流模型的数值预测值与实验值对比

$$M_{rs} = \frac{m_{rs}}{m_h} \tag{4}$$

$$M_{ls} = \frac{m_{ls}}{m_h} \tag{5}$$

式中: m_h 为主流燃气的质量流量; m_{rs} 为流过上游轮缘密封的质量流量; m_{ls} 为流过级间迷宫型密封的质量流量。

迷宫型密封进、出口压比

$$R_P = \frac{P_{0,ls}}{P_{ls,out}}$$

式中: $P_{0,ls}$ 为迷宫型密封进口总压; $P_{ls,out}$ 为迷宫型密封出口静压。

1.4 边界条件

表1给出了计算时采用的边界条件。计算工质为理想气体,密度为温度的函数,动力黏性系数采用Sutherland定义;主流通道的进口给定总温 $T_{0,\text{inlet}}$ 、总压 $P_{0,\text{inlet}}$ 和进口湍动度 I_T ,出口给定静压 P_{outlet} ;冷却空气进口给定总温 T_c ,冷却空气质量流量与主流通道质量流量的比值 M_c (冷却空气来自压气机抽气,不同的抽汽位置和沿程密封结构等都会改变冷却空气进口总压,从而改变冷却空气质量流量,一定的进口总压对应着一定的冷却空气质量流量,此处考虑3种冷却空气质量流量的影响)和进口湍动度 I_{Tc} ;动叶和旋转轮盘的转速为 ω ;转、静域之间采用交界面连接,周向给定周期性边界条件,其他壁面为绝热无滑移壁面。当连续方程、动量方程、能量方程、湍流方程的均方根残差小于 10^{-6} ,且位于上游轮缘密封处的监控点监测的温度和质量流量曲线平稳时计算收敛。

表1 边界条件

$P_{0,\text{inlet}}/\text{kPa}$	300	T_c/K	300
$T_{0,\text{inlet}}/\text{K}$	443	$M_c/\%$	0.61,1.22,1.84
$I_T/\%$	6.5	$I_{Tc}/\%$	3
$P_{\text{outlet}}/\text{Pa}$	111 015	$\omega/\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$	1 113

2 计算结果及分析

2.1 转、静腔室内的流动分析

图4为3种冷却孔布置下上游腔室内气流流动对比。可以看出,当 $M_c=0.61\%$ 时,少量冷却空气进入腔室。在旋转轮盘离心力的作用下,入侵的主流燃气直接流向静止壁面,形成一个顺时针方向旋转的涡,同时一个逆时针旋转的涡出现在腔室右下角。来自上游冷却孔的冷却空气受到旋转轮盘离心

力的作用,沿转盘壁面径向流出,在腔室顶部与入侵燃气掺混,见图 4a;来自中间和下游冷却孔的冷却空气由于动量较小,且受到入侵燃气的阻挡,所以冷却射流仅仅渗入到静叶的叶根底部,且被入侵燃气压制在腔室的右下角,其中来自中间冷却孔的冷却空气进入腔室后形成了一个顺时针旋转的涡,然后向级间密封处流动,见图 4b,而来自下游冷却孔的冷却空气受到叶根底部靶面的阻挡,直接向级间密封处流动,见图 4c。

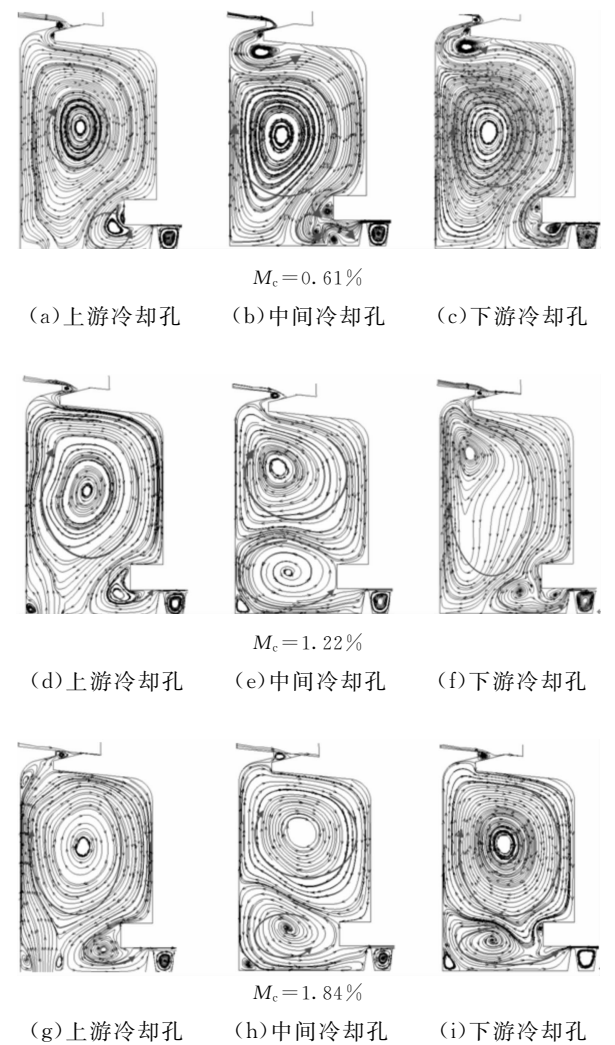


图4 上游腔室的流线分布

随着冷却空气质量流量的增加,入侵的燃气流量减小,当 $M_c=1.22\%$ 时,少量燃气入侵腔室,而当 $M_c=1.84\%$ 时,冷却空气从上游轮缘密封处溢出,见图 5,因此冷却空气对腔室内气流流动的影响增强。比较图 4a、4d、4g 可以发现,在上游布置了冷却孔,腔室内气流流动情况基本不受冷却空气质量流量的影响。这是因为上游冷却孔紧邻旋转轮盘壁面,使得来自上游冷却孔的冷却射流受到壁面旋转

离心力的作用较大,气流始终沿壁面径向流出。对于中间冷却孔,当 $M_c=1.22\%$ 时,燃气入侵流量减小,使得入侵气流对冷却射流的阻挡作用减弱,冷却射流的动量增加,因此来自中间冷却孔的冷却空气能够向腔室顶部渗入,形成一个逆时针旋转的涡,此外,受转盘离心力的作用,到达转盘的冷却射流在腔室中心位置形成了一个顺时针旋转的涡,见图 4e;当 $M_c=1.84\%$ 时,冷却射流的动量进一步增大,使得位于腔室底部的涡向腔室顶部膨胀,见图 4h。对于下游冷却孔,当 $M_c=1.22\%$ 时,冷却射流的动量增大,入侵燃气的阻挡作用减弱,因此来自下游冷却孔的冷却射流在冲击静叶叶根底部的靶面之后,能够沿轴向向腔室上游渗入,由此形成了一个逆时针旋转的涡,见图 4f;当 $M_c=1.84\%$ 时,冷却射流的动量进一步增强,使得涡向腔室上游和顶部膨胀,见图 4i。

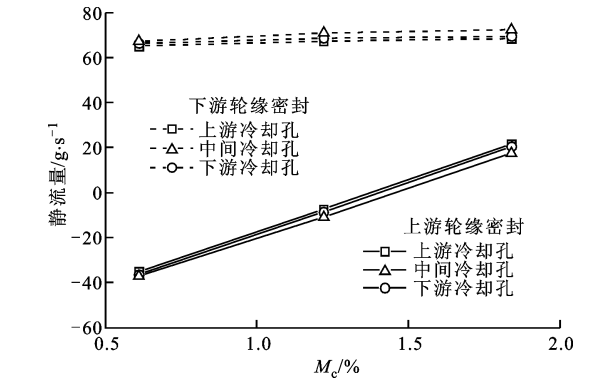


图5 上、下游腔室轮缘密封处净流量随冷却空气流量的变化

上游腔室的气流最终通过级间密封流向下游腔室,气流在级间密封中流动时,密封结构能够消除上游腔室气流流动的差异,使得气流在下游腔室的流动情况相同,如图 6 所示。因此,冷却孔的位置对下游腔室的流动情况基本无影响,下游腔室的气流流动主要由一个逆时针旋转的涡来控制。

由分析可知,腔室中气流的流动受到了入侵燃气和冷却空气的影响。入侵燃气来自第一级动叶出口,

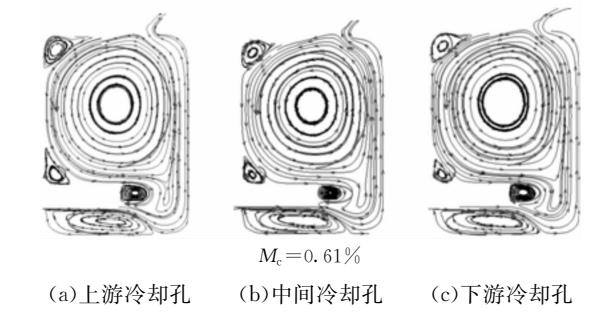


图6 下游腔室的流线分布

由于动叶出口气流角与转子旋转方向相反,因此入侵燃气的旋流比很小,而冷却孔位于第一级动叶轮盘与第二级动叶轮盘之间的驱动臂上,冷却空气在冷却孔中随轮盘旋转,使得进入腔室的冷却空气旋流比很大,因此气流旋流比能够定性地反映入侵燃气和冷却空气的相对大小。图 7 为转、静腔室内气流旋流比分布云图。可以看出,随着冷却空气质量流量的增加,腔室内的旋流比增大。

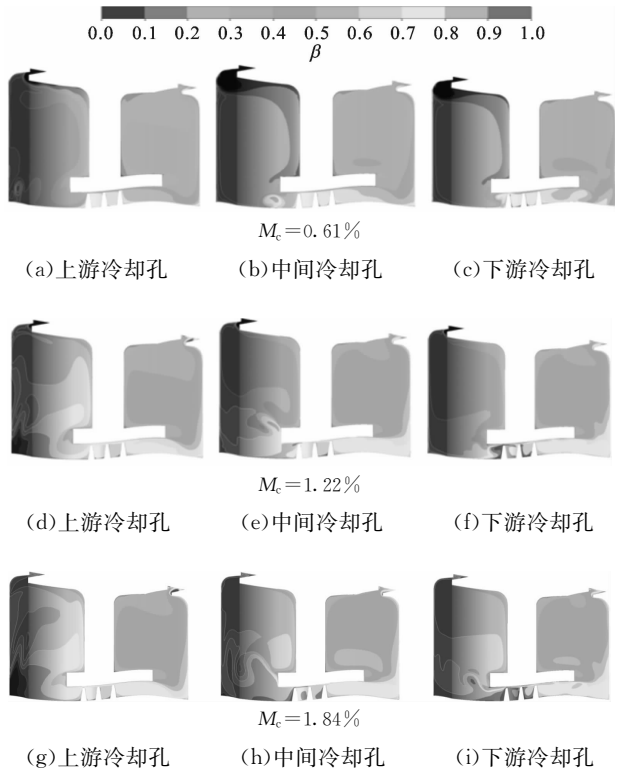


图 7 腔室内气流旋流比分布云图

2.2 转、静腔室内冷却效率和密封效率分析

图 8 为 3 种冷却孔布置下级间密封进口处的气流旋流比随冷却空气质量流量的变化。可以看出,随着冷却空气质量流量的增加,气流的旋流比增大。冷却孔距离下游越近,气流的旋流比越大。这是因为冷却孔越靠近下游,直接进入级间密封的冷却空气量就越大,来自上游冷却孔的冷却空气与入侵的主流燃气掺混,使得气流周向速度减小,气流径向流过静止壁面后才进入级间密封,静止壁面对气流的黏性阻力的作用又使气流周向速度进一步减小,因此来自上游冷却孔的冷却空气在级间密封进口处的气流旋流比最小。

图 9 为 3 种冷却孔布置下级间密封进、出口压比随冷却空气质量流量的变化。可以看出,上游布置冷却孔后级间密封进、出口压比最小。这是因为来自上游冷却孔的冷却空气全部与入侵燃气掺混后产生的压力损失较大,而来自中间冷却孔的部分冷却空气直接

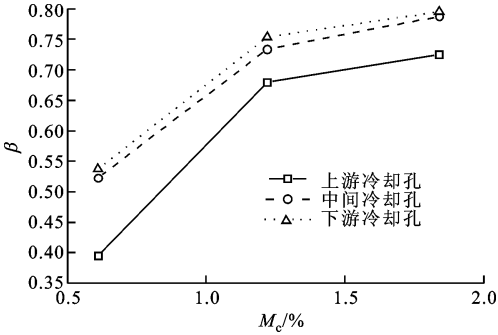


图 8 级间密封进口旋流比随冷却空气质量流量的变化

流向级间密封,相应的冷却空气与燃气掺混后产生的压力损失较小,因此中间布置冷却孔的级间密封进、出口压比大于上游布置冷却孔;下游冷却孔的位置正对静叶叶根的底部靶面,冷却射流受叶根底部靶面的限制被阻塞在级间密封进口处,使得进口总压升高,因此下游布置冷却孔后级间密封进、出口压比最大。

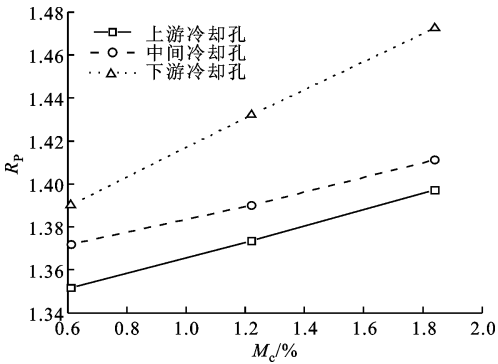


图 9 级间密封进、出口压比随冷却空气质量流量的变化

级间迷宫型密封的质量流量主要受密封进、出口压比和密封结构的影响。当密封结构不变时,进、出口压比越大,流过级间密封的质量流量越大,因此下游冷却孔的级间密封质量流量最大,中间冷却孔次之,上游冷却孔最小,如图 10 所示。流过级间密封的气流由冷却空气和入侵燃气组成。当冷却空气供给量一定时,增加的级间密封质量流量由入侵燃气填补,因此冷却孔距离下游越近,燃气的入侵量越大,如图 11 所示。

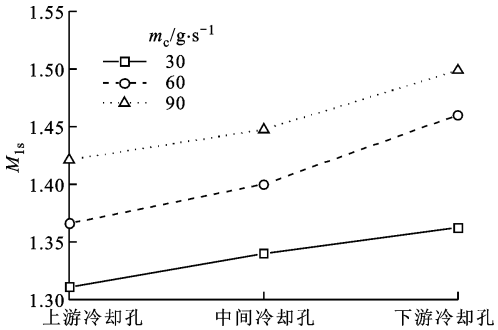


图 10 3 种冷却孔布置下级间密封质量流量对比

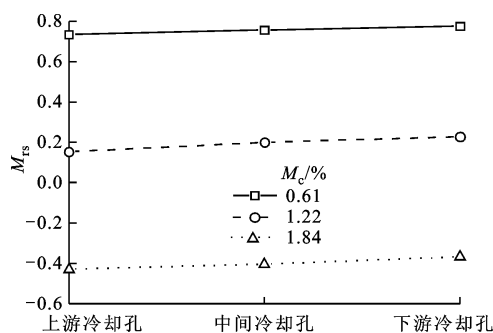


图 11 3 种冷却孔布置下燃气入侵流量对比

图 12 和图 13 分别给出了上游腔室和下游腔室的转、静壁面平均冷却效率的对比。可以看出:冷却空气流量越大,腔室壁面的冷却效率越大;旋转壁面的冷却效率大于静止壁面,但下游腔室转、静壁面的冷却效率相差很小;3 种冷却孔布置对上游腔室壁面的冷却效率影响明显,而对下游腔室基本无影响。当 $M_c=0.61\%$ 、 1.22% 时,冷却孔距离上游越近,上游腔室壁面的冷却效率越大。这是因为来自上游冷却孔的冷却空气受到转盘的泵效应影响比较显著,使得冷却射流沿轮盘壁面径向出流,最终沿静止壁面回流,这部分冷却空气能够减少入侵燃气与壁面的直接接触,降低燃气温度,并对轮盘和叶根壁面进行冷却保护,且由上游冷却孔布置引起的燃气入侵量较小,因此冷却效率较高;来自中间和下游冷却孔的气流被压制在腔室右下角和腔室底部,使得轮盘和叶根的大部分壁面直接暴露在入侵燃气中。此外,2 种冷却孔布置的燃气入侵量较大,且部分冷却空气直接流向级间密封,没有起到冷却上游腔室壁面的作用,因此冷却效率较低。当 $M_c=1.84\%$ 时,冷却空气充满了整个上游腔室,并从上游轮缘密封处溢出,此时 3 种冷却孔布置下的壁面冷却效率基本相同,但中间冷却孔布置的壁面冷却效率稍高。这是因为来自下游冷却孔的气流直接流向级间密封的质量流量较大,而来自上游冷却孔的气流受到的转盘黏性加热作用明显。此外,随着冷却空气质量流量的增加,3

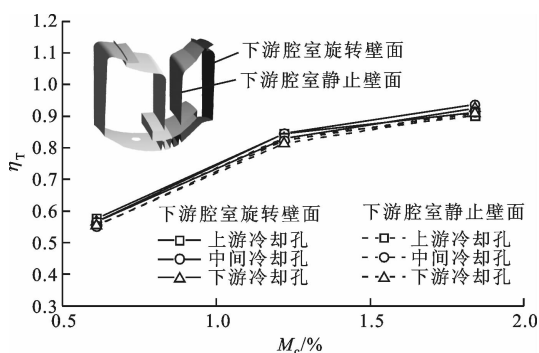


图 13 3 种冷却孔布置的下游腔室壁面平均冷却效率对比

种冷却孔布置下上游腔室壁面冷却效率的差值减小。

腔室内的气流最终从下游轮缘密封处流出且进入主流与燃气掺混。下游轮缘密封位于第二级静叶出口,静叶出口气流角与转子旋转方向相同,因此气流的旋流比较大,大于腔室出流的旋流比。图 14 给出了下游腔室出口处气流旋流比随冷却空气质量流量的变化。可以看出,冷却孔距离上游越近,腔室出流旋流比越小。Demargne 等的研究指出,腔室出流和通道主流的旋流比相差越大,掺混产生的气动损失就越大^[12]。因此,上游布置冷却孔后流动损失最大,中间布置冷却孔后流动损失次之,下游布置冷却孔后流动损失最小。

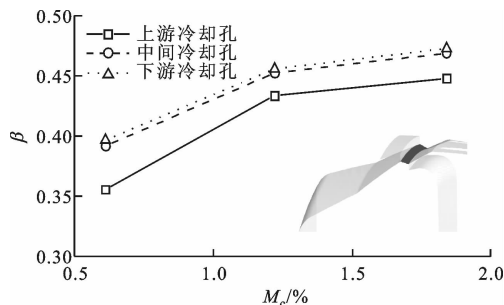


图 14 下游腔室出口处气流旋流比随冷却空气质量流量的变化

3 结论

本文数值研究了透平第二级转、静腔室的流动和封严特性,分析了不同位置冷却孔对腔室内的流动、冷却效率及主流燃气入侵特性的影响规律,结论如下。

(1)腔室内气流的流动受冷却空气和入侵燃气的影响,冷却孔的位置对上游腔室内的流动影响较大,对下游腔室基本无影响。

(2)冷却孔距离上游越近,上游腔室的旋流比越大,级间密封进口的旋流比越小,密封进、出口压比越小,相应的流过级间密封的质量流量越小,上游轮缘密封的燃气入侵量就越小;上游腔室转、静壁面的

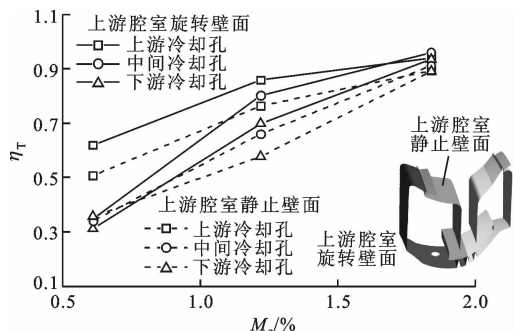


图 12 3 种冷却孔布置的上游腔室壁面平均冷却效率对比

冷却效率越大,随着冷却空气流量的增加,3种冷却孔布置下壁面冷却效率差值减小;下游腔室的旋流比和壁面的冷却效率基本不受冷却孔位置的影响。

(3)冷却孔距离上游越近,下游轮缘密封出流的旋流比越小,相应的主流通道的流动损失越大。

(4)综合考虑冷却孔位置影响可知,冷却孔靠近上游布置时腔室的性能最好。

参考文献:

- [1] DIDENKO R A, KARELIN D V, IEVLEV D G, et al. Pre-swirl cooling air delivery system performance study [C]// ASME 2012 Turbine Technical Conference and Exposition. New York, USA: ASME, 2012: 1921-1932.
- [2] 罗翔, 冯野, 徐国强, 等. 直接供气预旋转静系流动和换热数值模拟 [J]. 航空动力学报, 2012, 27(10): 2188-2193.
LUO Xiang, FENG Ye, XU Guoqiang, et al. Numerical simulation of flow and heat transfer performances in a direct transfer pre-swirl system [J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(10): 2188-2193.
- [3] DIXON J A, BRUNTON I L, SCANLON T J, et al. Turbine stator well heat transfer and cooling flow optimisation [C]// ASME Turbo Expo 2006: Power for Land, Sea, and Air. New York, USA: ASME, 2006: 1375-1383.
- [4] DIXON J A, VALENCIA A G, COREN D, et al. Main annulus gas path interactions; turbine stator well heat transfer [C]// ASME 2012 Turbine Technical Conference and Exposition. New York, USA: ASME, 2012: 2013-2024.
- [5] VALENCIA A G, DIXON J A, DA SOGHE R, et al. An investigation into numerical analysis alternatives for predicting re-ingestion in turbine disc rim cavities [C]// ASME 2012 Turbine Technical Conference and Exposition. New York, USA: ASME, 2012: 2025-2035.
- [6] VALENCIA A G, DIXON J A, GUARDINI A, et al. Heat transfer in turbine hub cavities adjacent to the main gas path including FE-CFD coupled thermal analysis [C]// ASME 2011 Turbine Technical Conference and Exposition. New York, USA: ASME, 2011: 833-843.
- [7] EASTWOOD D. Investigation of rim seal exchange and coolant re-ingestion in rotor stator cavities using gas concentration techniques [D]. Brighton, UK: University of Sussex, 2014.

- [8] LIU H, AN Y, ZOU Z. Aerothermal analysis of a turbine with rim seal cavity [C]// ASME 2014 Turbine Technical Conference and Exposition. New York, USA: ASME, 2014: V05AT11A006.
- [9] AMIRANTE D, HILLS N J, BARNES C J. Thermo-mechanical finite element analysis/computational fluid dynamics coupling of an interstage seal cavity using torsional spring analogy [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2012, 134(5): 051015.
- [10] STEFANIS V. Investigation of flow and heat transfer in stator well cavities of a two-stage axial turbine [D]. Brighton, UK: University of Sussex, 2007.
- [11] ANDREINI A, DA SOGHE R, FACCHINI B. Turbine stator well CFD studies: effects of coolant supply geometry on cavity sealing performance [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2011, 133(2): 021008.
- [12] DEMARGNE A A J, LONGLEY J P. The aerodynamic interaction of stator shroud leakage and main-stream flows in compressors, 2000-GT-0570 [R]. New York, USA: ASME, 2000.

[本刊相关文献链接]

- 张峰,王新军,李军. 球凹平板冲击冷却性能的数值研究及结构改进. 2016, 50(1): 124-130. [doi:10.7652/xjtuxb201601019]
- 杜长河,范小军,李亮,等. 喷嘴长宽比和雷诺数对旋流冷却流动与传热特性的影响. 2015, 49(12): 124-129. [doi:10.7652/xjtuxb201512020]
- 张峰,王新军,李军. 带肋U型通道中的汽雾/空气流动与换热数值研究. 2015, 49(9): 52-57. [doi:10.7652/xjtuxb201509010]
- 李森,李亮,杜长河. 球窝/球凸结构下的U型通道蒸汽冷却性能. 2015, 49(9): 63-69. [doi:10.7652/xjtuxb201509012]
- 王新军,周子杰,宋钊,等. 核电站凝汽器的压力瞬态变化特性. 2015, 49(7): 6-10. [doi:10.7652/xjtuxb201507002]
- 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]
- 费继友,曾俊雄,高铁瑜,等. 涡旋核心分布对斜置肋片蒸汽冷却通道换热特性的影响. 2015, 49(5): 7-15. [doi:10.7652/xjtuxb201505002]
- 霍文浩,李军,钟刚云,等. 冷却结构对中压透平级蒸汽冷却性能的影响. 2015, 49(5): 36-42. [doi:10.7652/xjtuxb201505006]
- 钟兵,洪伟,苏岩,等. 点火时刻对怠速工况缸内直喷汽油机微粒排放特性的影响. 2015, 49(3): 32-37. [doi:10.7652/xjtuxb201503006]

(编辑 苗凌)