

文章编号:1000-8055(2013)07-1510-07

间隙高度对自发射流抑制叶尖泄漏的影响

胡建军^{1,2}, 孔祥东¹, 徐进良³

(1. 燕山大学 机械工程学院, 河北 秦皇岛 066004;

2. 燕山大学 建筑工程与力学学院, 河北 秦皇岛 066004;

3. 华北电力大学 可再生能源学院 新能源与可再生能源北京市重点实验室, 北京 102206)

摘 要: 通过数值求解三维定常黏性雷诺时均 N-S 方程, 获得了单孔叶尖自发射流条件下不同叶顶间隙的叶栅流场, 对比分析了间隙高度对自发射流与叶尖泄漏流相互作用特性、叶尖泄漏流量以及叶片载荷的影响。结果表明: 当叶顶间隙高度为 1 mm ($t/H=0.5\%$) 时, 自发射流对泄漏流有明显的阻挡作用, 泄漏流量比减少 0.06%, 同时叶片载荷增加 1.39%。当叶顶间隙高度增大到 4 mm ($t/H=2\%$) 时, 自发射流的阻挡作用及对叶片载荷的增加作用基本消失; 减小间隙高度可以有效提高自发射流的控制效果, 同时降低因分离造成的流动损失; 自发射流的存在显著改变了间隙流场分布及叶尖吸力面附近静压系数分布, 计算发现当泄漏流绕自发射流流过时, 下游流场出现类似卡门涡街的涡分布现象。

关键词: 叶尖泄漏流; 自发射流; 间隙高度; 数值模拟; 控制效果

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

Effect of clearance height on tip leakage reduced by spontaneous tip injection

HU Jian-jun^{1,2}, KONG Xiang-dong¹, XU Jin-liang³

(1. School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao Hebei 066004, China;

2. School of Civil Engineering and Mechanics,

Yanshan University, Qinhuangdao Hebei 066004, China;

3. Beijing Key Laboratory of New and Renewable Energy, School of Renewable Energy, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The steady cascade flow field with different tip clearance height was obtained by numerically solving three-dimensional Reynolds-averaged N-S equations (RANS) and energy equations under the condition of single-hole spontaneous tip injection. The influences of clearance height on the interaction characteristics of the spontaneous injection with the tip leakage flow, the mass flow rate of leakage flow and the blade load were analyzed. The results show that the spontaneous jet has significant blocking effect on the leakage flow, the leakage ratio decreases by 0.06% with 1 mm ($t/H=0.5\%$) tip clearance, and meanwhile the blade load increases by 1.39%. The blocking effect decays with the increasing clearance height and can be ignored when the clearance height rises to 4 mm ($t/H=2\%$); decreasing clearance height can effectively improve the controlling effect of spontaneous jet on leakage

收稿日期:2012-07-11

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130711.1810.201307.1510_014.html

基金项目: 河北省自然科学基金青年科学基金(E2011203094); 国家重点基础研究发展计划(2011CB710703)

作者简介: 胡建军(1982—), 男, 黑龙江虎林人, 讲师, 博士, 主要从事叶轮机械气动热力学研究。E-mail: kewe729@163.com

flow and reduce the flow losses caused by flow separation; the presence of spontaneous tip injection significantly changes the flow field of tip gap and the distribution of static pressure coefficient near the suction. The calculation results show that a vortex similar to the Karman vortex street appears downstream the jet flow when the leakage flow moves around the spontaneous jet.

Key words: tip leakage flow; spontaneous tip injection; clearance height; numerical simulation; control effect

对于开式叶轮机械,叶顶间隙的存在导致叶尖泄漏的发生,泄漏流不仅造成做功工质泄漏,同时还对叶栅流场特性产生重要影响,诱发额外的流动损失.对于低展弦比叶栅,有研究表明:叶尖间隙泄漏产生的损失占涡轮总流动损失可达 $1/3$,涡轮叶尖间隙每增加 1% ,效率约降低 1.5% ,而耗油率约升高 3% ^[1-2].因此,发展叶尖泄漏流控制技术对于提高叶轮机械的性能、效率,扩展稳定工作范围具有十分重要的意义.

从减小叶尖泄漏的方法来看,可以分为主动控制和被动控制两大类.主动控制一般以外部能量输入为代价,实现手段较为复杂,系统可靠性低^[3-4].而被动控制方法不需要额外能量输入,一般通过减小叶顶间隙高度、改变叶尖端部结构或对机匣进行处理等手段实现,其中改变叶尖结构的方法,简单可行,效果好,国内外学者对叶尖凹槽(cavity squealer)、压力面肋条(pressure-side squealer)、吸力面肋条(suction-side squealer)或叶尖襟翼(winglet tip or tip platform extensions)等进行了深入研究^[5-10],部分结构已经被成功应用于商用燃气轮机,如 GE 的高压涡轮 HPT(high pressure turbine)系列叶片.

被动控制的另外一种手段就是根据叶片表面压力分布特点,自然生成一股气流,将其用于控制叶尖泄漏流及其损失,原理如图 1(a)所示.最早提出该概念的是 Auxier,并申请了美国专利^[11].2007 年,维也纳科技大学的 Hamik 等^[12]提出一种具体的开孔方案,如图 1(b)所示.并用一个简化模型对其进行了初步理论分析.近期,南京航空航天大学曹传军等^[13]基于上述原理,提出一种被动式逆向涡流发生器用于毫米尺度的涡轮叶尖泄漏流的控制,采用数值手段对比了有无叶尖逆向涡流发生器条件下,泄漏流场特性、周向载荷分布及涡轮效率.由于逆向涡流发生器的引入孔和出射孔集中分布在压力面叶尖端部,此处工作条件恶劣,在长期的运行下是否会出现整体剥落还有待实践去检验.

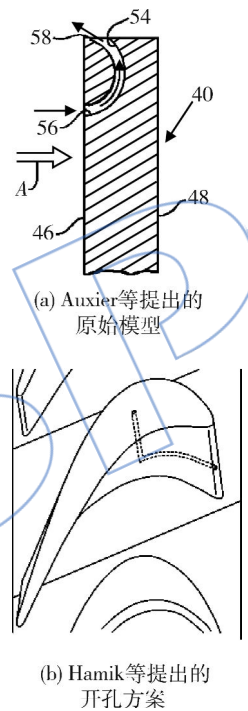
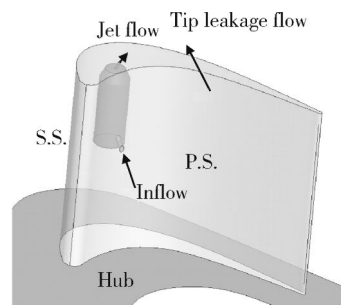


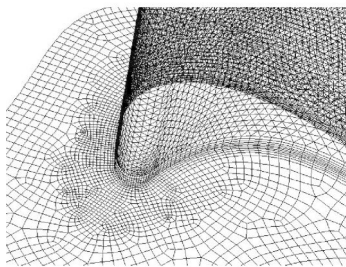
图 1 早期研究者提出的开孔方案

Fig. 1 Drilling hole scheme proposed by early researchers

基于此,本文将该方法用于常规尺度叶尖泄漏流控制,提出一种容易通过机加工手段实现的开孔方式,如图 2(a)所示,主要是方便后续实验研究,本文把重点放在探讨开孔后自发射流对叶尖流场特性的影响.抓住间隙高度是影响自发射流控制叶尖泄漏效果的重要因素,着重分析了间隙高度对单孔自发射流与叶尖泄漏流相互作用特



(a) 三维计算模型



(b) 叶栅前缘附近网格划分

图 2 计算模型及网格划分

Fig. 2 Computational model and mesh generation

性、叶尖泄漏量及叶片载荷分布的影响。

1 数值模型

本文研究采用的基础叶栅模型为具有详细几何尺寸和试验数据的 Durham 平面叶栅,其主要参数如表 1 所示. 计算时叶顶间隙高度 t 取值为 1, 2, 4 mm 三种, 对应叶顶间隙高度 t 与叶高 H 的比值为 0.5%, 1%, 2%. 本文计算中叶栅静止不动, 暂忽略机盖与叶栅相对运动对流动的影响。

表 1 基础叶栅主要参数

Table 1 Major parameters of baseline turbine cascade

叶栅参数	量值
弦长/mm	224
轴向弦长/mm	180
进口气流角/(°)	42.75
出口气流角/(°)	-68.7
栅距/mm	191
叶高/mm	200

1.1 几何建模及网格划分

本文平面叶栅计算模型的几何建模由 Pro/Engineer 软件完成, 取一个叶片及两侧各 1/2 流道作为计算域, 周向边界按周期性边界条件处理. 坐标系定义为, X 方向为轴向, Y 方向为周向, Z 方向为叶片展向. 叶片内部开孔道综合考虑可加工性及流道阻力问题, 内设空气容腔, 直径为 30 mm, 压力面开孔直径 6 mm, 入射角 45° , 叶尖射流孔为 3 mm, 射流角 60° , 如图 2(a) 所示. 网格划分采用 GAMBIT 软件, 考虑到非结构四面体网格良好的几何适应性, 采用其对计算流域进行网格划分, 在近壁区采用边界层网格, 前缘附件网格划分细节如图 2(b) 所示 (图中 P. S. 为压力面, S. S. 为吸力面)。

首先, 以间隙泄漏量为衡量指标, 考察计算结果对网格的依赖性, 计算结果见表 2. 由于建模时已经进行流域分块, 主体网格和间隙网格生成可分别独立控制, 首先主体采用较密的网格 (约 91 万), 通过改变间隙网格节点, 考察间隙网格的敏感性, 当间隙节点数超过 9 后, 泄漏量变化开始不明显. 然后固定间隙节点数为 9, 改变主体网格密度, 网格数超过 67 万后, 间隙泄漏量不再发生显著变化. 本计算是在 2% H 叶顶间隙下进行的, 其他间隙模型的网格划分以此数据作为参考, 以消除计算结果对网格的依赖性。

表 2 网格无关性考察计算结果

Table 2 Calculation results of grid independence test

进口 雷诺数	间隙 节点数	主体 网格数	间隙泄漏量/ (kg/s)
5.6×10^5	5	916846	0.06650
	9		0.06645
	13		0.06627
	17	513050	0.06626
			0.06667
			0.06647
		916846	0.06645

1.2 湍流模型、流体物性及边界条件

Realizable $k-\epsilon$ 模型与两方程模型中的其他模型相比, 在负压力梯度流动、分离流、复杂二次流以及冲击射流预测方面更具有优势, 是叶轮机械流场分析常采用的湍流模型之一^[13-14]. 因此本文选用该湍流模型, 由于近壁区无量纲壁面距离 Y^+ 约为 28 左右, 采用标准壁面函数、无滑移边界条件处理边界层与主流速度分布衔接. 在计算高雷诺数工况时, 局部马赫数有时超过 0.3, 应考虑气体可压缩效应, 因此流体按理想气体处理, 暂不考虑温度对流动的影响, 叶栅进口温度取常温 300 K. 进出口边界条件为压力入口和压力出口, 湍流强度为 3%, 周向边界按周期性边界处理。

1.3 数值模型正确性验证

计算采用基于有限体积法的 ANSYS FLUENT 12.0 商业程序, 2 阶迎风格式离散对流项, 中心差分格式离散扩散项采用基于 Simple 算法的数值求解方法和分离式求解器. 计算过程中, 除能量方程残差下降 1 个数量级外, 其他方程残差下降 5 个数量级视为收敛。

由于文献调研还鲜见有带叶尖射流的叶栅流

场测量试验数据,因此采用文献[15]中 Durham 叶栅的试验数据对本文数值模型进行检验.图3为本文计算得到的50% H 处叶片表面时均压力系数 C_p 与文献中试验测量结果的比较,横坐标 X/c 为无量纲化的轴向弦长.其中,压力系数 C_p 按下式定义:

$$C_p = \frac{p_{s,in} - p_{s,loc}}{0.5 \bar{\rho}_m \bar{u}_{in}^2} \quad (1)$$

式中 $p_{s,in}$ 为时均质量加权平均进口静压, $p_{s,loc}$ 为时均叶片表面当地静压, $0.5 \bar{\rho}_m \bar{u}_{in}^2$ 为叶栅进口动压.由图3可知:本文计算结果与文献[15]中的试验数据吻合较好,最大误差在5%以内,说明可以运用该数值模型预测叶尖射流条件下叶栅流场特性,捕捉自发射流与叶尖泄漏流相互作用细节,探索间隙高度对自发射流抑制叶尖泄漏流效果影响.

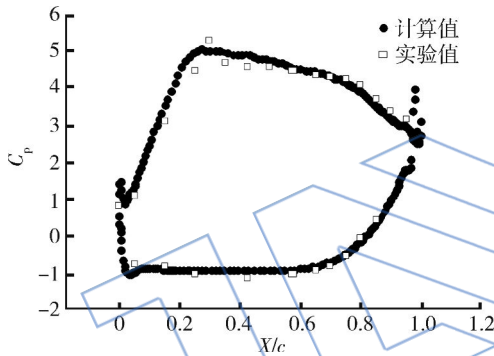


图3 本文计算结果与文献[15]计算结果比较

Fig. 3 Results comparison of Ref. [15]

with this paper

2 计算结果及分析

2.1 间隙高度对自发射流条件下叶尖流场的影响

为使不同间隙下叶尖流场具有可比性,图4及以下各图都是在叶尖单孔射流、叶栅进口雷诺数为 5.6×10^5 条件下获得的,其中雷诺数定义是基于质量加权平均叶栅进口速度和轴向弦长.图4对比了0.5% H 、1% H 、2% H 叶顶间隙高度下, $X=0$ 截面叶尖附近流场及总压损失系数分布,其中总压损失系数 $C_{p,t}$ 定义为

$$C_{p,t} = \frac{p_{t,in} - p_{t,loc}}{0.5 \bar{\rho}_m \bar{u}_{in}^2} \quad (2)$$

式中 $p_{t,in}$ 为时均质量加权平均进口总压, $p_{t,loc}$ 为时均当地总压.由图4可以看出:叶顶间隙高度对自发射流条件下间隙流场、泄漏流的强度及总压损失系数分布均具有显著影响.由流线分布发现:0.5% H 叶顶间隙高度时,叶尖自发射流能够完全阻断射流孔附近的泄漏流,但泄漏流会部分“侵

入”自发射流区域,可以预期“侵入”区域大小会随射流与泄漏流的相对强度变化而变化,虽然自发射流以60°的射流角逆泄漏流射出,但在压力面和吸力面压差推动下迅速偏转,最终从吸力面流出.到1% H 叶顶间隙时,泄漏流开始从自发射流上部掠过,但由于自发射流挤占了泄漏流的流通道,泄漏流被压缩为紧贴机盖的一个薄层,说明自发射流对泄漏流仍能起到一定封严作用,但效果在逐渐恶化.当间隙高度达到2% H 时,自发射流对泄漏流的阻挡作用进一步减弱,后续计算表明此时自发射流对泄漏流的封严效果可以忽略.

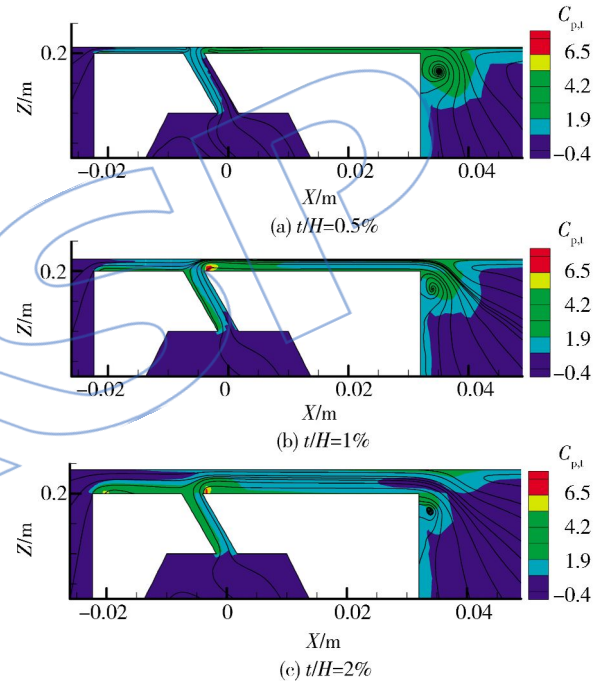


图4 不同叶顶间隙下 $X=0$ 截面流线及总压损失系数分布

Fig. 4 Total pressure loss coefficient and streamline of different tip clearances in section $X=0$

由图4中总压损失系数分布可知:不同间隙高度时总压损失系数分布规律是不同的.涡度高的地方由于内摩擦、高低能流体掺混等作用,能量耗散严重,表现为总压损失系数高.总压损失最高的区域不是出现在泄漏流的核心,而是出现在泄漏流与通道流交汇的地方,因此,可以认为泄漏流造成的流动损失中,高低能流体的掺混占主要方面.

此外,计算中还发现:在大间隙时($t/H=2\%$),泄漏流的入口以及自发射流入口的总压损失系数也较高,而这主要是由流动分离造成的,这2个区域存在明显的分离泡(separation bubble),而在小间隙时($t/H=0.5\%$)流动分离受到明显地抑制,由流动分离造成的总压损失显著降低.

图5为不同叶顶间隙高度时,间隙中截面流线及马赫数分布情况.由流线分布发现:0.5% H 叶顶间隙高度时,在自发射流的阻挡下,射流孔后形成明显的扇形低速区,扇形区内形成类似卡门涡街的涡分布,这可能是由于自发射流相当于一个柔性圆柱障碍物,泄漏流绕其流过,在特定的流动条件下形成了此种涡分布,可以预期:随着流动条件发生变化,任何圆柱绕流所具有的流动形式都可能在扇形区出现,但这还需要进一步计算论证.此外,扇形低速区的存在及其特殊的流动形式,打断了泄漏流与主流的交汇线,迫使交汇线从扇形区后重新发展.随着间隙的增大,射流影响区逐渐缩小,到2% H 叶顶间隙高度时,射流对间隙中截面泄漏流线基本无影响.

此外,由图5流线分布观察可知,叶顶间隙高度对泄漏涡(leakage vortex)卷起的起始点位置有较大影响,间隙高度越大,泄漏涡形成的起点离前缘越远,同时泄漏流与主流交汇线与吸力面的夹角也越大,这主要是由于叶顶间隙高度越大,泄漏流动量越大,越不易受到通道二次涡(passage

secondary vortex)“搓”的作用卷起泄漏涡.由此也可以解释图4中同为 $X=0$ 截面,大间隙高度条件下泄漏涡强度明显小于小间隙高度泄漏涡,原因在于:在此位置大间隙高度泄漏涡刚开始发展形成,尚未完全卷起.

图6为不同间隙高度时机盖内表面静压系数分布,但为了能够清楚显示自发射流对机盖静压系数分布的影响,图中同时显示了叶尖平面及射流孔轮廓.比较发现:当叶顶间隙高度为0.5% H 时,自发射流能够穿透叶顶间隙对机盖造成明显的冲击,在冲击的阻滞作用下,在射流孔上方及下游机盖表面形成显著的低静压系数区,由静压系数定义可知此区域的静压较高,该区域占据了部分泄漏流通道,因此会对泄漏流产生一定抑制作用.随着间隙高度增大,泄漏流量逐渐变大,机盖表面静压下降,静压系数上升,同时自发射流对机盖表面静压系数分布的影响也在逐渐降低,到叶顶间隙高度为2% H 时,自发射流对机盖静压系数分布的影响已经非常微弱,对泄漏流的抑制作用基本丧失.

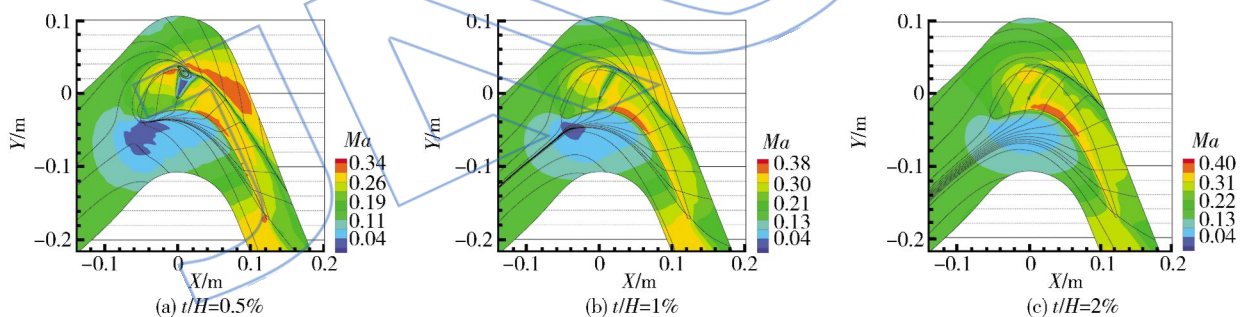


图5 不同叶顶间隙高度中截面流场分布

Fig. 5 Distribution of middle section flow field of different tip clearance heights

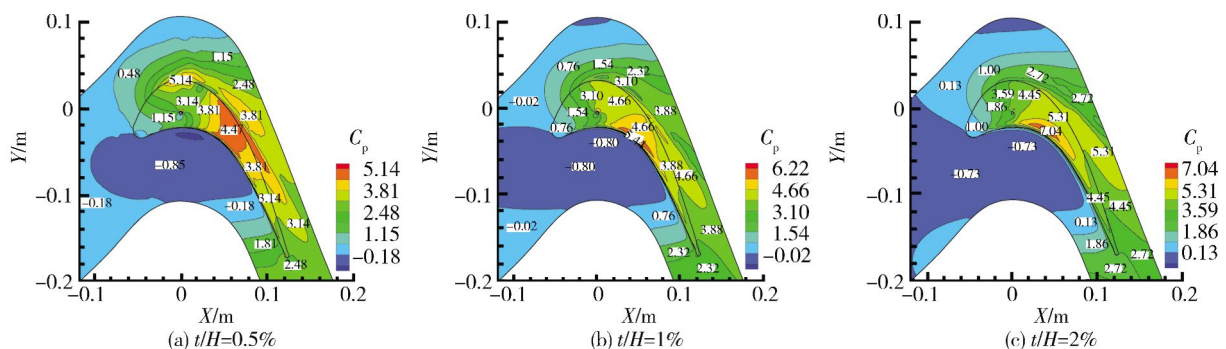


图6 不同叶顶间隙高度下机盖静压系数分布

Fig. 6 Distribution of static pressure coefficient on cover of different tip clearance heights

2.2 间隙高度对自发射流条件下叶尖泄漏流量的影响

表3对比了3种间隙条件下,有无自发射流

时,自发射流、泄漏流与主流的相对大小关系,用以衡量自发射流对泄漏流的抑制效果及自发射流本身造成的工质损耗.在叶顶间隙高度为0.5% H

时,自发射流的存在对泄漏流有明显的抑制作用,泄漏流与主流的流量比与无叶尖射流相比降低了 0.06%。随着叶顶间隙高度增大,该流量比显著增大,到叶顶间隙高度为 2% H 时,流量比已增加到 5% 左右,同时自发射流对泄漏流的抑制作用已基本消失。

表 3 不同条件下射流、泄漏流、主流流量比较
Table 3 Comparison of flow rate of tip jet, tip leakage and main flow on different conditions

$(t/H)/\%$	叶尖射流	(射流/主流)/%	(射流/泄漏流)/%	(泄漏流/主流)/%
0.5	无			1.1569
	有	0.0184	1.7062	1.0986
1	无			2.4915
	有	0.0242	0.9974	2.4523
2	无			5.0353
	有	0.0274	0.5480	5.0345

此外,自发射流在抑制泄漏流的同时,会引起做功工质损耗,但计算发现:在单孔射流条件下,自发射流与主流的流量比在 10^{-4} 数量级,因此自发射流造成工质损耗的负面效应与对泄漏流抑制的正面效应相比,可以忽略。

2.3 间隙高度对自发射流条件下叶片载荷的影响

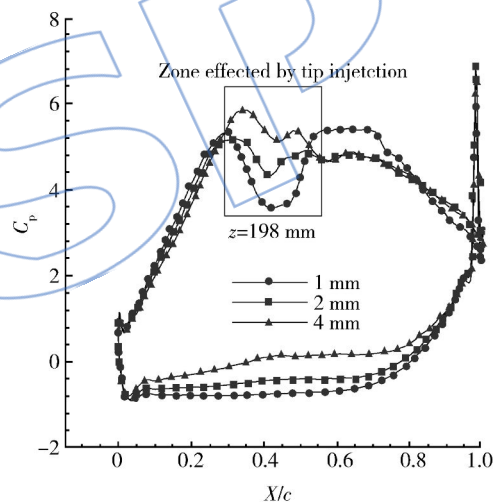
表 4 比较了不同叶顶间隙条件下,有、无自发射流对单个叶片周向载荷的影响。结果表明:间隙高度为 0.5% H 时,自发射流的引入能够明显增加叶片的周向载荷,在此计算工况下,与无自发射流相比载荷增加 1.39%。随着叶顶间隙增加,自发射流对载荷增加的贡献越来越小,到间隙高度为 2% H 时,与无自发射流相比,载荷增加仅为 0.2%,自发射流对载荷的贡献可以忽略。

图 7 对比了不同叶顶间隙高度,有、无自发射流时,99% H 与 50% H 静压系数沿轴向弦长分布,用以说明自发射流及叶顶间隙高度对叶片载荷分布的影响。比较发现:3 种间隙下 50% H 处压力面和吸力面静压系数分布基本相同,说明叶顶间隙高度及自发射流对叶片载荷分布的影响没有深入到叶片中部以下。而在 99% H 处,叶顶间隙高度及自发射流对压力面和吸力面静压系数分布有较大影响,同时自发射流对叶片吸力面静压系数分布的影响显著高过其对压力面静压系数分布的影响。在射流孔的正下游,静压系数存在一个明显的波谷区,而且间隙越小波谷的峰值越大,影

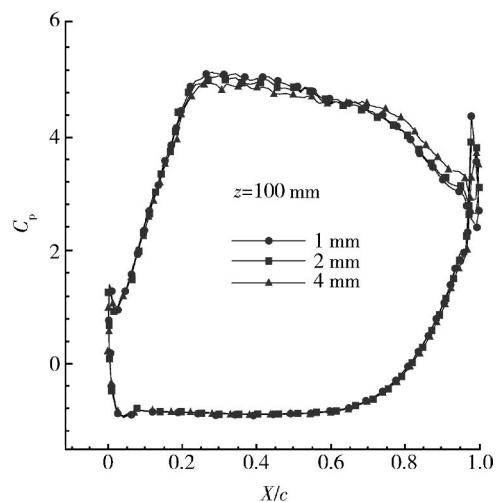
响区域越大,而这主要是因为自发射流在其后形成扇形低速区造成的,而在自发射流影响区之前,不同间隙下的静压系数分布基本一致。

表 4 不同条件下叶片周向载荷比较
Table 4 Comparison of blade circumferential load on different conditions

$(t/H)/\%$	叶尖射流	单个叶片周向载荷/N	载荷增加百分比/%
0.5	无	193.9	1.39
	有	196.7	
1	无	193.1	0.62
	有	194.3	
2	无	180.6	0.2
	有	181.1	



(a) 不同间隙高度下 99% H 处静压系数分布



(b) 不同间隙高度下 50% H 处静压系数分布

图 7 间隙高度对叶片载荷分布的影响
Fig. 7 Influence of tip clearance height on distribution of blade circumferential load

3 结 论

本文以 Durham 平面叶栅为原型,运用数值手段分析了叶尖单孔自发射流条件下,间隙高度对叶尖流场、叶尖泄漏量及叶片载荷的影响,得到以下主要结论:

1) 间隙高度对利用叶尖自发射流抑制泄漏流有效性有重要影响,间隙高度越小射流对泄漏流的阻碍效果越好,当间隙高度增大到 $2\% H$ 时,阻碍作用基本丧失。

2) 间隙高度对泄漏涡卷起的起始点位置有较大影响,间隙高度越大,泄漏涡形成的起点离前缘越远,同时泄漏流与主流交汇线与吸力面的夹角也越大。

3) 间隙高度对自发射流条件下的叶尖泄漏量有明显影响。计算表明:在叶顶间隙高度为 $0.5\% H$ 时,自发射流对泄漏流有明显的抑制作用,自发射流造成工质损耗的负面效应与对泄漏流抑制的正面效应相比,可以忽略,降低叶顶间隙高度既可减小泄漏流量,又可降低因流动分离造成的流动损失。

4) 间隙高度对自发射流条件下叶片周向载荷提升有明显影响,间隙高度越小,载荷提升效果越明显。在单孔射流、叶顶间隙高度为 $0.5\% H$ 时,周向载荷可以提升 1.39% 。自发射流对流场的影响主要集中在叶尖附近,很难深入到中截面以下。间隙高度越小,自发射流对叶尖载荷分布影响越剧烈。

5) 通过流场解析发现:自发射流下游区出现类似卡门涡街的涡分布,这是在满足特定流动状态下的流动现象,可以预期:随着流动条件发生变化,扇形区会出现其他流动形式,从而会对下游流场特性产生影响,这点还需要更加深入地计算验证。

参考文献:

- [1] Booth T C. Importance of tip clearance flows in turbine design[R]. VKI Lecture Series 1985-05, 1985.
- [2] Bindon J P. The measurement and formation of tip clearance loss[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1990, 111(3): 257-263.
- [3] 李钢,徐燕骥,林彬,等. 利用介质阻挡放电等离子体控制压气机叶栅端壁二次流[J]. 中国科学:技术科学, 2009, 39(11): 1843-1849.
LI Gang, XU Yanji, LIN Bin, et al. Stability analysis of dielectric elastomer film actuator[J]. Scientia Sinica Technologica, 2009, 39(11): 1843-1849. (in Chinese)
- [4] Rao N M, Camci C. Axial turbine tip desensitization by injection from a tip trench: Part I effect of injection mass flow rate[R]. ASME Paper GT-2004-53256, 2004.
- [5] Harvey N W, Newman D A, Haselbach F, et al. An investigation into a novel turbine rotor winglet: Part 2 numerical simulation and experimental results[R]. ASME Paper GT-2006-90459, 2006.
- [6] Lee S W, Kim S U, Kim K H. Aerodynamic performance of winglets covering the tip gap inlet in a turbine cascade[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2012, 34: 36-46.
- [7] 胡建军,徐进良,曹海亮,等. 超微型涡轮中极低展弦比静叶栅流场特性的数值研究[J]. 动力工程, 2009, 29(7): 656-663.
HU Jianjun, XU Jinliang, CAO Hailiang, et al. Flow field characteristics of stator cascade with extremely low aspect ratio in an ultra-micro gas turbine[J]. Journal of Power Engineering, 2009, 29(7): 656-663. (in Chinese)
- [8] 胡建军,徐进良,曹海亮,等. 超微涡轮动叶栅叶顶间隙对流场影响的数值模拟[J]. 热能动力工程, 2010, 25(2): 134-140.
HU Jianjun, XU Jinliang, CAO Hailiang, et al. Numerical simulation of the influence of the blade tip clearance on the flow field of an ultra-micro turbine rotating cascade[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2010, 25(2): 134-140. (in Chinese)
- [9] 蔡晋,陈波,闫雪,等. 带小翼肋条的涡轮叶尖泄漏流场的数值模拟[J]. 动力工程学报, 2010, 30(12): 919-925.
CAI Jin, CHEN Bo, YAN Xue, et al. Numerical simulation on tip leakage flow of turbine blade with suction-side winglet ribs[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2010, 30(12): 919-925. (in Chinese)
- [10] 李伟,乔渭阳,许开富,等. 涡轮叶尖泄漏流被动控制数值模拟[J]. 推进技术, 2008, 29(5): 591-597.
LI Wei, QIAO Weiyang, XU Kaifu, et al. Numerical simulation of passive control on tip leakage flow in axial turbine[J]. Journal of Propulsion Technology, 2008, 29(5): 591-597. (in Chinese)
- [11] Auxier T A. Aerodynamic tip sealing for rotor blades: USA, 5,403,158[P]. 1995-04-04.
- [12] Hamik M, Willinger R. An innovative passive tip-leakage control method for axial turbines: basic concept and performance potential[J]. Journal of Thermal Science, 2007, 16(3): 215-222.
- [13] 曹传军,黄国平,夏晨. 一种减小涡轮叶尖泄漏流的方法[J]. 航空动力学报, 2011, 26(1): 99-107.
CAO Chuanjun, HUANG Guoping, XIA Chen. Method for reducing tip clearance leakage of turbine[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(1): 99-107. (in Chinese)
- [14] FLUENT Inc. FLUENT user's guide[M]. Version 6.2. Lebanon, NH: Fluent Inc., Centerra Resource Park, 2005.
- [15] Gregory-Smith D G, Cleak J G E. Secondary flow measurements in a turbine cascade with high inlet turbulence[J]. Journal of Turbomachinery, 1992, 114(1): 173-183.