

涡旋射流控制逆压梯度平板边界层 分离的涡结构研究

张荻¹, 樊涛², 蓝吉兵¹, 谢永慧¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 中国电力工程顾问集团西北电力设计院, 710075, 西安)

摘要: 为了研究涡旋射流控制边界层分离的物理机理, 设计、搭建了涡旋射流控制逆压梯度平板边界层分离实验台, 在此基础上对低雷诺数下平板边界层分离及射流控制进行了实验和数值研究. 通过对比不同射流控制方式的统计特性及射流控制效果, 揭示了射流流场大尺度相干结构的演化规律. 射流瞬时流动细节的研究表明: 发卡涡和类发卡涡是逆压梯度环境下直射流和斜射流中比较典型的涡结构; 在斜射流中, 随着类发卡涡的发展, 射流孔下游发展成熟的类发卡涡涡腿外侧出现了不断增强的次生流向涡结构; 次生涡结构对壁面附近能量的增大和质量的输运、耗散具有重要的作用. 经对比发现, 斜射流控制流动分离的效果明显优于直射流.

关键词: 流动控制; 涡旋射流; 大涡模拟; 粒子成像测速

中图分类号: TK262 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)01-0001-08

Study on the Special Vortical Structure Development During Flow Separation Control by VGJs in Boundary Layer of Flat Plate with Adverse Pressure Gradient

ZHANG Di¹, FAN Tao², LAN Jibing¹, XIE Yonghui¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. CPECC North-West Electric Power Design Institute, Xi'an 710075, China)

Abstract: Experimental and numerical studies were performed at low Reynolds number using VGJs on flat plates with adverse pressure gradient to investigate the physical mechanism of flow separation control by VGJs in boundary layers. The control effects and the statistical characteristics of different control modes were analyzed to explore the development of the large-scale coherent structure. The instantaneous flow analyses show that the hairpin or hairpin-like vortices are two classical vortical structures formed from vertical and angled VGJs in adverse pressure gradient. In downstream of angled VGJs, the additional flow structures are generated as a consequence of the hairpin-like vortices. Its formation could increase the transport of energy and mass, and then improve the dissipation effectively. In addition, the angled VGJs provides more effective separation control than the vertical VGJs.

Keywords: flow control; vortex generator jets; large eddy simulation; particle image velocimetry

近年来, 为了降低生产成本、减少叶片数而发展起来的低压、高负荷叶片, 在较低雷诺数($10^4 \sim$

10^5)下边界层内的大部分区域均为层流流动,而在高负荷下叶片吸力面的逆压梯度增大,边界层增厚并极易出现分离.边界层一旦发生分离,气动损失则会很大,做功能力降低,从而导致涡轮性能迅速下降.发生分离的层流边界层如果在叶片吸力面没有出现再附,则会在叶片吸力面形成开式分离(分离尺寸大于分离泡尺度).因此,分析、预测分离泡的发生和结构,对分离流场实施主动流动控制,在低雷诺数下进一步研究低压、高负荷叶片的流动控制理论及其工程应用方面具有重要的意义.

射流式涡流发生器(VGJs)是基于固体涡旋生成器原理发展起来的一种边界层分离主动控制方法,它可在各种工况下快速、连续和准确地为边界层分离控制提供所需要的喷射流量,使得流场中的附加阻力损失^[1]很小.

Bons^[2-3]等最先利用 VGJs 技术对低压涡轮叶片的流动分离控制进行了研究,指出 VGJs 能够有效地控制叶片表面的流动分离,进而减小叶片尾迹动量亏损,若采用脉冲 VGJs,则在更低的质量流率下也能够获得相同的控制效果.在此之后,许多研究机构和知名大学,例如美国空气技术研究院^[4]、Arizona 大学^[5]、Ohio State 大学^[6]、Brigham Young 大学^[7-8],以及国内的西北工业大学等^[9-10],纷纷开展了低压叶片流动分离控制的相关研究工作,但是它们的工作重点大多集中于不同射流方式下控制效果的比较与讨论,以及射流孔几何参数对流动控制的影响,很少涉及到低雷诺数下采用射流来控制涡轮叶片流动分离的机理问题.

涡结构是边界层转捩后期和湍流边界层相干结构的核心,除此以外的相干结构与涡结构的形成、发展和破裂紧密相关. Δ 涡是在湍流及转捩边界层中起主导作用的典型涡结构,因此通过对 Δ 涡的发生与演化规律进行研究,可以为边界层内的流动及流动分离控制提供更合理的解释.

本文在粒子成像测速(PIV)实验测量的基础上,采用大涡模拟(LES)方法对低雷诺数下逆压梯度平板边界层分离进行了数值模拟,分析了层流分离泡的发生机理与结构,并在多种工况下采用射流对层流分离泡进行了流动控制.通过比较直射流和斜射流的统计特性及射流控制效果,结合三维涡结构,分析了射流流场大尺度相干结构的演化规律,揭示了射流流场中发卡涡、 Δ 涡的生成机理,以及射流的流动分离控制机理.

1 实验方法和装置

1.1 实验设计方法

由于透平叶片排存在着出口斜切部分,所以近吸力面出口处总是存在着逆压梯度.对于常规涡轮叶片,其吸力面出口处的逆压梯度较小,而对于高负荷、低压透平叶片,其吸力面出口附近的逆压梯度很大且雷诺数较低,所以边界层的大部分流动区域是层流的,并常常伴随有流动分离.在这种情况下,逆压梯度便成为影响透平叶片效率的主要因素.为了获得低压、高负荷下叶片的层流分离区域,实验中通过一个楔形结构使平板上产生与叶片吸力面相同的逆压梯度,进而采用 VGJs 对分离区进行流动控制.图1为逆压梯度下平板流动分离实验示意图.

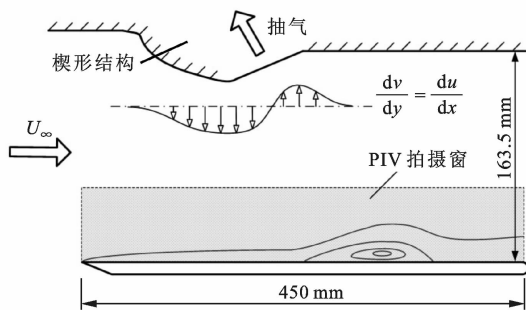


图1 逆压梯度下平板流动分离实验示意图

在与尖前缘平板相对的壁面上安装了一个特殊的楔形结构,这与 Volino 等^[11]的低压涡轮叶片分离转捩测量实验的楔形结构相类似,它可以较好地模拟 Pak-B 型低压涡轮叶片吸力面的压力梯度.

1.2 实验装置和系统

逆压梯度平板流动控制实验是在 FY-800 低速风洞中进行的,实验平板为一厚 0.02 m、宽 0.69 m、长 0.45 m 的有机玻璃材质的尖前缘平板.如图2所示,在距离前缘 0.096 m 处,沿展向等距开有3个竖直和倾斜的射流孔,斜射流的倾斜角为 30° 、偏斜角为 90° .为了便于讨论,设定 x 、 y 和 z 方向分别表示流向、法向和展向.实验平板水平安装在低速风洞实验段之内,安装高度与风洞的中心标高保持一致,以保证主气流来流均匀.实验中主流 Re 为 10^5 (基于自由来流条件,特征长度为 Pak-B 叶片吸力面长度),射流速度比 R_u 分别取 0.707、1、2.射流的气源由小型涡旋气泵提供.为了抑制上壁面的流动分离,可以在楔形结构的后端抽出部分空气.射流路和抽气路的气体流量分别采用涡轮流量计和

孔板流量计测量,测量数据通过数据采集系统输入计算机进行处理.

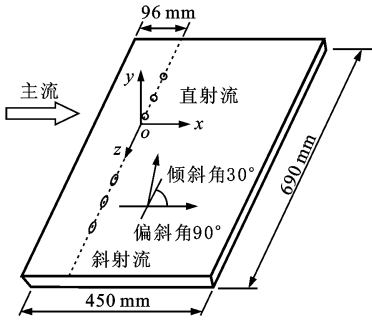


图 2 带有 VGJs 的平板示意图

PIV 测试设备采用德国 LaVision 公司生产的 PIV 系统,由光源、采集系统和后处理软件组成.该系统速度场测量精度为 0.1 像素,测速范围为 0.01~600 m/s.光源采用 Newwave 公司的 2 台独立的 YAG 脉冲激光器,脉冲能量可达 200 mJ.实验中需要保证 2 台脉冲激光器形成的片光源具有较好的重合度,且脉冲强度相似.脉冲光采用 Qswitch 触发方式获得,脉冲宽度为 5 ns,输出的可见绿光的波长为 532 nm.采集系统主要包括 Kodak Megaplust 数字相机,分辨率为 2 048×2 048 像素,镜头为标准的 100 mm Nikon 镜头.实验中通过调节镜头使 CCD 相机的焦平面和被测平面保持一致.后处理图像分析软件为 DAVIS 图像控制系统,它包括实时粒子图像测速、粒子跟踪测速计算等模块.通过 DAVIS 的软件界面,可以实时控制 PIV 系统数据的采集、处理和显示.图像分析中查询区设置为 32×32 像素,重叠率为 25%.图 3 为 PIV 逆压梯度平板的实验装置.

依据 Bons 等^[2,12]对 Pak-B 平面叶栅涡旋射流控制实验的相关结论, VGJs 射流孔位于叶片吸力面分离点上游可有效控制流动分离,因此本文在平板侧分离点上游设置了涡旋射流发生器,以控制流动分离.

2 数值计算方法

2.1 物理模型和网格划分

无射流控制工况下逆压梯度平板的计算域及网格如图 4 所示.计算域采用非均匀网格,壁面第一层网格的 $y^+ < 1$.靠近壁面处网格的密集度最大,距壁面越远,网格稀疏程度越大.计算域的大小为 0.762 m×0.180 m×0.048 m,对应的网格数为 500×140×60,总网格数约为 420 万.

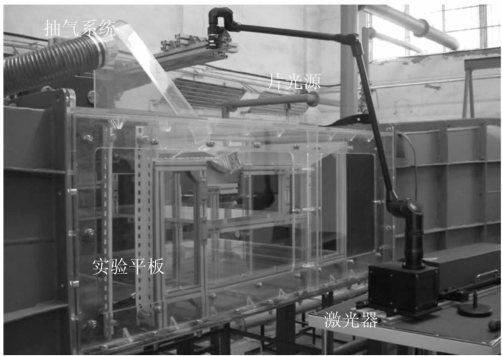


图 3 PIV 逆压梯度平板的实验装置

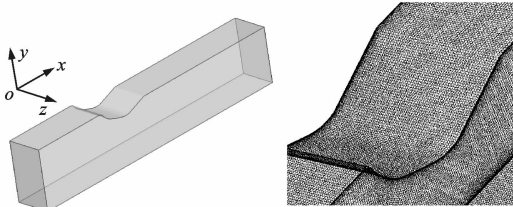


图 4 无射流控制工况下逆压梯度平板的计算域及网格示意

射流控制工况与实验保持一致.经过多种计算工况的对比分析确定,射流孔直径 $d=0.004$ m,射流孔位于分离点上游 $2d$ 处,射流孔间距与射流孔径的比值为 12.射流控制工况下射流孔的局部网格如图 5 所示,该射流孔周围的网格类型为 O 型,并进行了局部加密.

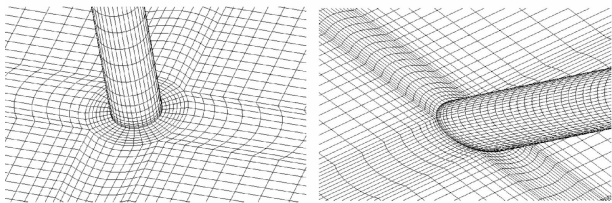


图 5 射流控制工况下射流孔的局部网格

2.2 数值方法

非定常流动的连续方程和 N-S 方程的张量形式为

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial(\rho \tau_{ij})}{\partial x_j} \tag{2}$$

式中: $i, j=1, 2, 3$; $\bar{u}$ 为速度的大尺度分量; t 为时间; ρ 为流体密度; p 为流体压力的大尺度分量; τ_{ij} 为亚格子应力.经过滤波后的亚格子雷诺应力需要进行模化,目前使用最为广泛的亚格子应力模型为涡黏模型,表达式为

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3}\delta_{ij}\tau_{kk} = -\mu_t \bar{S}_{ij} \quad (3)$$

式中: δ_{ij} 为 Kronecker 的 δ 函数; μ_t 为亚格子湍流黏性系数; $\bar{S}_{ij}$ 为亚格子尺度的应变率张量. 有关参数的表达式如下

$$\mu_t = [C_s \Delta]^2 |\bar{\mathbf{S}}| \quad (4)$$

$$|\bar{\mathbf{S}}| = (2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij})^{1/2} \quad (5)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

式中: Δ 为滤波的波长; C_s 为 Smagorinsky 常数, 本文的 $C_s=0.1$.

本文基于 Fluent 软件、采用有限容积法对控制方程进行了离散, 压力-速度耦合基于 SIMPLEC 算法, 空间离散采用中心差分格式, 控制方程中的时间项应用二阶欧拉向后差分. 计算的时间步长满足 CFL 条件, 计算的雷诺数与实验保持一致, 时间步长取 2.5×10^{-5} s. 流场达到统计稳定状态时进行统计平均计算.

2.3 边界条件

对于无射流控制工况, 入口的边界条件为速度, 出口的为压力. 上壁面抽吸处的速度为入口速度, 下壁面为绝热无滑移壁面, 展向为周期性的, 计算条件与实验保持一致. 采用 VGJs 控制时, 射流入口速度恒定不变.

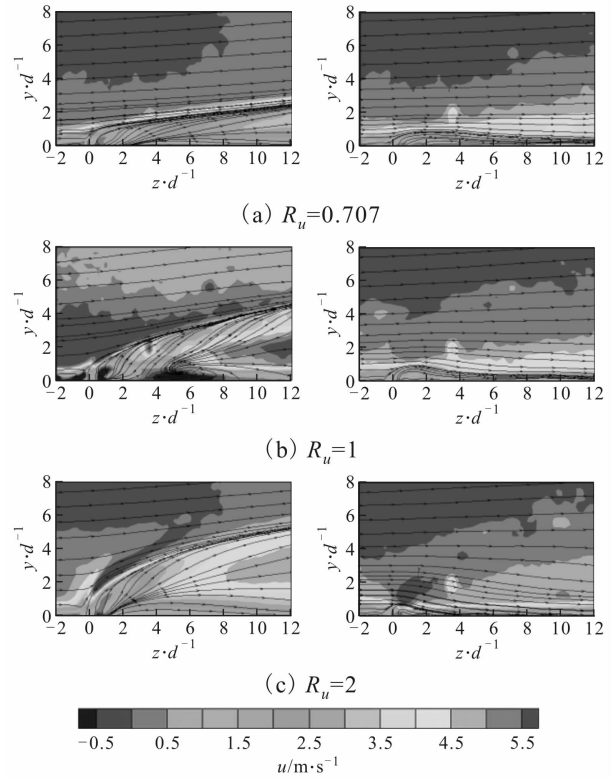
3 结果与讨论

3.1 PIV 测量结果分析

实验中由 PIV 测量获得的大量瞬时图像采用互相关算法进行分析, 同一流态下的多个瞬态流场经时均化处理后可以得到直射流和斜射流在 3 个工况下的时均流场分布. 图 6 为实验中 PIV 测量获得的直射流和斜射流在射流孔中心截面上的流线(速度着色). 从图 6 可以看出, 不论是直射流还是斜射流, 当主通过射流孔时, 不同方向上的主流与射流之间均存在强烈的相互作用, 射流轨迹线在主流的作用下出现弯曲, 主流在射流的作用下减速并形成绕流. 对于直射流, 随着 R_u 的增大, 射流轨迹线升高; 对于斜射流, 当 R_u 增大时, 由于射流角的存在, 使得射流的展向速度分量增大, 射流轨迹线向展向偏转, 因此从射流孔中心截面观察到的射流轨迹线逐渐降低.

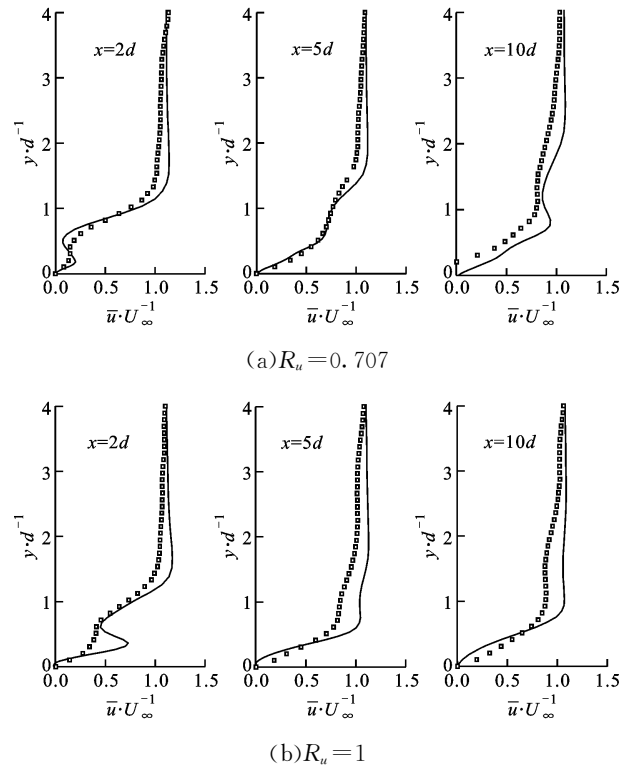
为了验证数值计算方法的准确性, 结合斜射流流场实验中的 PIV 测量, 在不同 R_u 下对大涡模拟的计算结果与实验测量结果进行了定量比较. 图 7

为斜射流在射流孔中心截面上的流向及速度分布.



左图:直射流; 右图:斜射流

图 6 不同 R_u 工况下射流孔中心截面上的流线(PIV)



—:实验结果; □:数值模拟结果

图 7 射流在射流孔中心截面上的流向速度分布(PIV-LES)

从图 7 可以看出,数值模拟获得的流向速度分布与实验测量结果较为一致,说明大涡模拟可以较为准确地预测低雷诺数下射流流动和涡旋结构的特征。

3.2 无射流控制下平板边界层分离

图 8 为无射流控制下计算域流向速度分布。从图 8 可以看出,通道从 $x=-24d$ 处开始逐渐收缩,流动处于顺压力梯度环境,流体不断加速,当 $x>-3d$ 时,通道扩张,流动逐渐扩压,在黏性和逆压梯度的作用下,下壁面出现流动分离,壁面处出现低速分离区,分离点位置为 $x\approx 2d$ 。流动分离后,剪切层离开近壁面。由于速度剖面不稳定,剪切层失稳,由此产生了大尺度相干结构,其裹入能量使边界层出现再附,就此形成了分离泡。

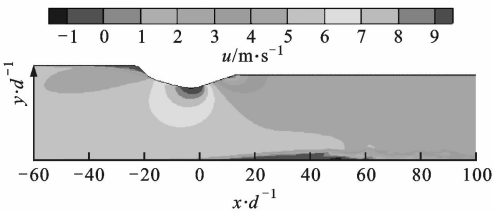


图 8 无射流控制下计算域流向速度分布(LES)

图 9 为壁面压力系数 C_{pw} 的流向分布。 $C_{pw} = 2(p - p_\infty) / \rho u_\infty^2$, 其中 p_∞ 和 u_∞ 分别为计算域入口的静压和速度, p 为下壁面静压。通道经过收缩、扩张,壁面压力系数先增后减,当 $x \approx -17d$ 时,压力系数最小,当 $x > -17$ 时,逆压梯度出现。当 $10d < x < 40d$ 时,出现一个压力平台区,这与分离泡中剪切层的“死水区”相对应^[13]。由于再附的作用,当 $x > 4d$ 时,壁面压力系数迅速增大。

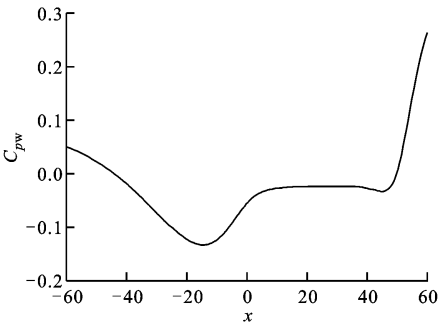


图 9 壁面压力系数的流向分布(LES)

对数值模拟数据进行三维涡结构的识别和分析,可以获悉流场中大尺度结构的演化过程。关于三维流场涡区域的识别,Jeong 等^[14]提出了一种考虑压力极小值的湍流相干涡结构的判定方法。该方法是通过张量 $S^2 + \Omega^2$ 是否具有 2 个负特征值的连通域来辨别涡核的,其中 S 为应变率张量, Ω 为旋转率张量,这种方法又被称之为 λ_2 定义。本文根据

λ_2 定义来识别流场的三维涡结构。

图 10 为无射流控制下 $\lambda_2 = -20\,000$ 的瞬时等值面。层流分离泡分离的再附区域具有大量的随机分布的涡结构,这些涡结构大致分为以下 2 种。

(1)标记为 A 和 B 的展向涡,它的产生机制类似于平面混合层中的展向涡^[15]。分离泡外侧存在着具有拐点的速度剖面, Kelvin-Helmholtz 失稳卷起了二维展向涡,同时受流场中三维扰动的干扰,该二维展向涡出现了较小的扭曲并沿法向突起,而突起部分受到展向涡自身旋转的诱导效应而逐渐向上抬起。在平均剪切流场的作用下,二维展向涡拉伸、弯曲,使之与旋转方向相反的左右 2 个展向涡交联在一起,并发展成为三维的上端封闭、下端开口的 Λ 涡。图 10 中的 B 涡就是典型的展向 Λ 涡, Λ 涡的出现表明转换已经接近尾声,此时 Λ 涡的涡腿明显伸长,其在平均流的推动下沿流向向下游运动。 Λ 涡突起的部分(涡头)翘起形成了局部的高剪切层。待剪切层失稳后,涡头破碎,猝发成小尺度结构的湍流,此时流场逐渐进入湍流阶段。

(2)标记为 C 的流向涡。展向涡在卷起且向下游运动的过程中,受边界层内、外速度梯度和相邻展向涡之间拉伸作用的影响,致使近壁面上产生了大量的流向涡。流向涡在向下游运动的过程中沿拉伸方向涡量增加,并与分离的壁面边界层作用,从而诱导失稳。

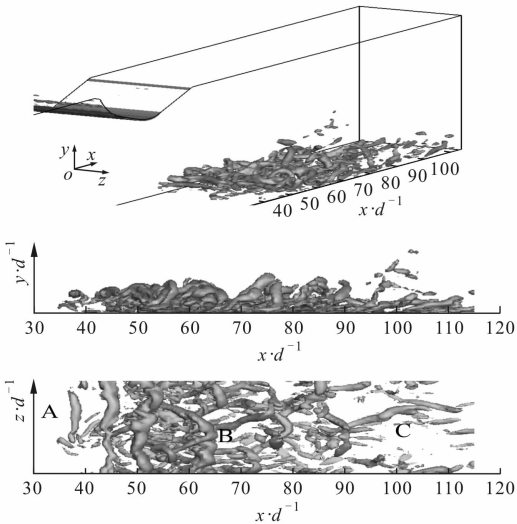


图 10 无射流控制下 $\lambda_2 = -20\,000$ 的瞬时等值面(LES)

与图 8 比较发现,流动附着区域产生了明显的 Λ 涡,在 Λ 涡的下游流场,流动不再分离。 Λ 涡有 2 个作用^[16]:①在其 2 个涡腿之间产生上升流,在 2 个涡腿之外产生下扫流,同时产生法向动量交换和正雷诺应力;②拉伸的涡腿使得 Λ 涡从周围流体吸

收能量而转化为湍流.

3.3 射流控制下逆压梯度平板边界层分离

图 11 为 $R_u=0.707$ 工况下直射流和斜射流在 $t=0.3\text{ s}$ 时 $\lambda_2=-20\ 000$ 的瞬时等值面. 为了便于对比, 图中还标记出了平均再附的位置. 从图 11 可以看出, 直射流在射流孔口处周期性地产生上端封闭、下端开口的发卡涡, 斜射流则产生类发卡涡. 随着射流向下游发展, 对于直射流, 当 $x=20d$ 时, 沿展向出现了非稳定的流动, 这种流动是由连续的发卡涡头部破碎并猝发成小尺度结构组成的. 对于斜射流, 这种非稳定的流动相比直射流更早地接触壁面. 另外, 不论是直射流还是斜射流, 平均再附点均与产生大量非稳定涡的区域的起始点存在着一段距离, 这表明由纵向涡破裂形成的湍流并不能提供足够的动量而使得主流快速再附.

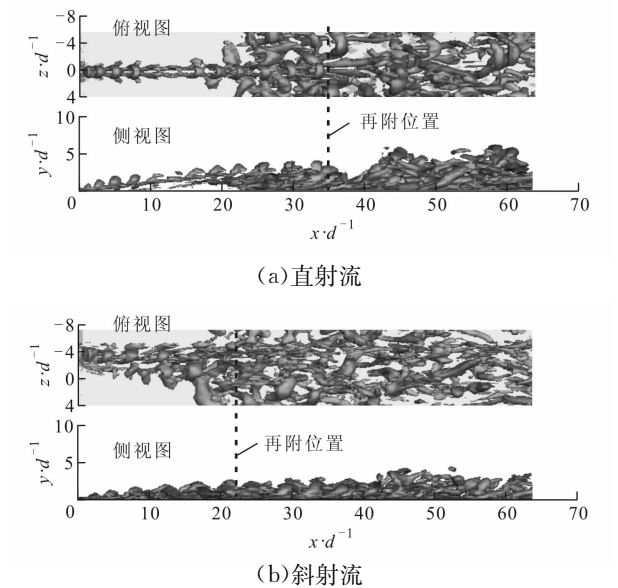


图 11 射流在 $t=0.3\text{ s}$ 时 $\lambda_2=-20\ 000$ 的瞬时等值面(LES)

发卡涡和类发卡涡是直射流和斜射流中比较明显的涡旋结构. 图 12 为直射流发卡涡随时间发展的历程. 从图 12 可以看出, 当 $t=0.007\ 5\text{ s}$ 时, 射流孔口处生成了一个标记为 A 的发卡涡, 该涡的涡头比较明显, 具有向上抬升的趋势, 涡头的尾部有 2 个细长的管状后涡腿. 随着时间的推移, 抬升的涡头沿流向进一步向前突出, A 涡两侧受壁面黏性和边界层底层慢速流的作用而无法以相同的速度向前运动, 这样整个结构逐渐沿流向拉伸. 当 $t=0.012\ 5\text{ s}$ 时, A 涡涡头抬起并向前突出, 其两侧逐渐拉伸而形成发卡涡的 2 条前涡腿. 在之后的时间中, A 涡离开射流口向下游移动, 其前涡腿逐渐卷起, 形成开环结构, 后涡腿随着前涡腿的卷起而收回. 当 $t=$

$0.012\ 5\text{ s}$ 时, 标记为 B 的发卡涡开始重复 A 涡脱离孔口流动的过程. B 涡在即将脱落时 ($t=0.017\text{ s}$), 一个新的标记为 C 的发卡涡开始形成.

从发卡涡随时间发展的历程中可以看出, 发卡涡的前平行涡腿从出现到靠拢、收起, 直至合并、消失, 整个涡的发展是一个开环的涡环结构. 发卡涡的生成原因可以解释为: 射流孔后缘与射流下游之间存在着压力梯度, 使得涡旋在射流孔后缘区域形成, 这个涡旋离开壁面向上运动时会受到展向速度梯度的影响, 涡旋中心区域的速度高, 两侧速度低, 从而使近壁区边界层内的涡由于扭曲而转变成沿流向的涡, 进而形成了发卡涡的 2 条前涡腿. 与零压力梯度环境相比, 逆压梯度环境下的边界层更厚, 涡结构流向拉伸力更强, 更有利于发卡涡的形成.

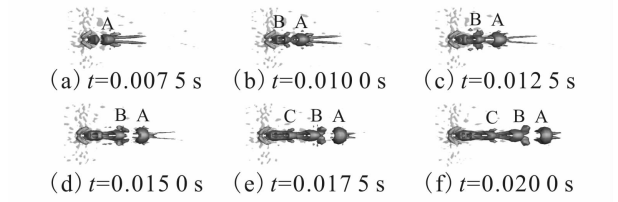


图 12 直射流发卡涡随时间发展的历程(LES)

图 13 为斜射流类发卡涡随时间发展的历程. 类发卡涡的生成机制与发卡涡是相同的. 与直射流的标准发卡涡有所不同, 由于斜射流展向速度梯度较大, 使得类发卡涡的前涡腿的形成不明显. 从图 13 可以看出, 在斜射流孔口处存在着沿流向单侧拉长的马蹄涡, 这种马蹄涡在时间进程中将不断地演化出一系列的次生涡.

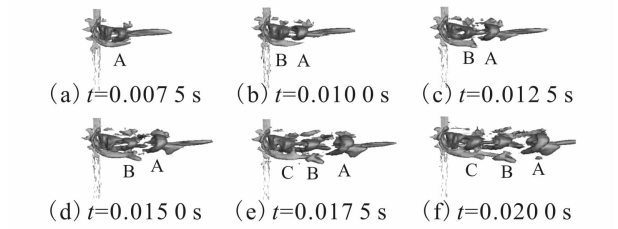


图 13 斜射流类发卡涡随时间发展历程(LES)

图 14 为 $t=0.017\ 5\text{ s}$ 时瞬时斜射流流向截面速度分布. 从图 14 可以看出, 在前涡腿的诱导下, 下壁面边界层中的流体在绕着发卡涡涡腿旋转的同时, 不断地被卷入到 2 个前涡腿之间的区域. 受流体黏性的影响, 壁面边界层中的流体流向速度较低. 流体在发卡涡卷吸的作用下进入到发卡涡的前涡腿, 从而形成了局部的低速条带, 该低速区域将一直延伸至距下游较远的位置, 从此发卡涡扭曲并相继发生破裂, 主流流体与射流流体互相掺混, 流向

速度将提高,但在 $x/d=16$ 的截面上还能依稀看到低速区域.一般认为,低速区域是导致射流孔下游流场局部速度亏损的主要因素^[17].

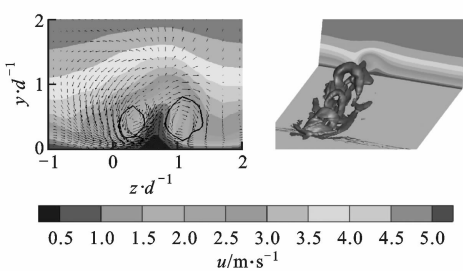


图 14 $t=0.0175$ s 时瞬时斜射流向截面速度分布(LES)

图 15 为展向平均雷诺正应力 τ_x 、 τ_y 、 τ_z 和湍动能最大值 $K_{\max}$ 沿流向的分布.从图 15 可以看出,雷诺正应力沿流向逐渐增大,在再附点附近达到最大.这说明无论是直射流还是斜射流,最大湍流均发生在分离再附点附近,较之直射流,斜射流在流向上较早地达到了峰值,亦即斜射流能更快地破裂成小尺度涡.

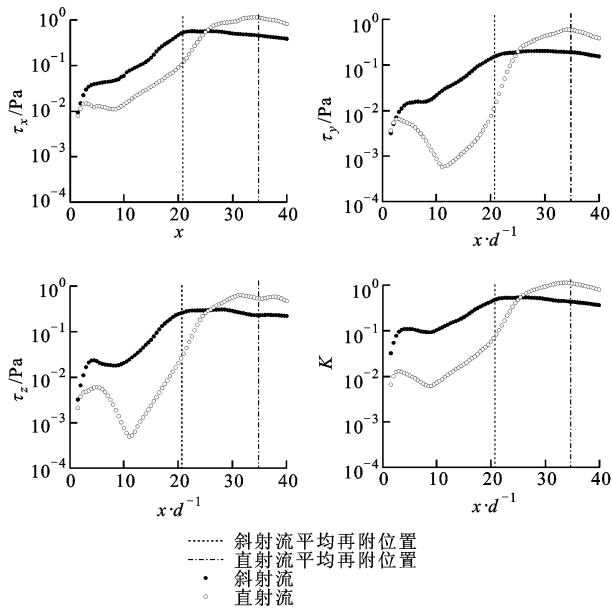


图 15 展向平均雷诺应力及湍动能最大值沿流向的分布

图 16 为 $R_u=1$ 时射流在 $\lambda_2=-20\,000$ 的 3 个瞬态等值面,其揭示了斜射流中存在着一系列特殊的流动结构.随着类发卡涡的发展,在射流孔下游发展成熟的类发卡涡的涡腿外侧出现了不断增强的次生流向涡.该涡在直射流的发卡涡中从未发现过,很大程度上它是由斜射流的类发卡涡的旋转和剪切作用带动了附近区域的流体脱离壁面而向上移动形成的,并随着向下游发展逐渐演化为大尺度涡,大尺度涡的强度比连续生成的主发卡涡更大.虽然

这 2 种流动结构在图中被清晰地显示出来,但还不能完全判定它们的来源机制.目前至少可以确定,在射流孔下游,斜射流较直射流会更快、更剧烈地破碎为湍流.次生涡对壁面附近的能量和质量的输运、耗散必然起着重要的作用.

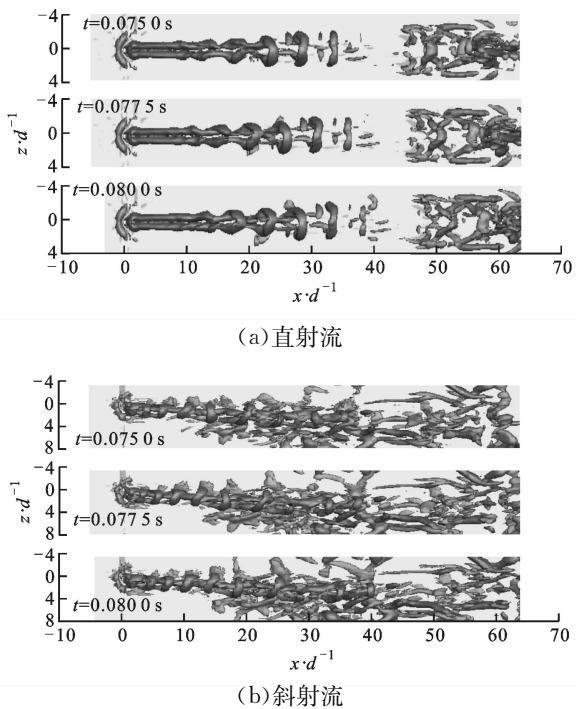


图 16 $R_u=1$ 时射流在 $\lambda_2=-20\,000$ 的 3 个瞬态等值面(LES)

4 结 论

本文采用 PIV 和 LES 方法对低雷诺数下逆压梯度平板边界层分离进行了实验和数值研究,分析了层流分离泡的发生与结构,采用射流对分离泡进行了流动控制,比较了不同射流控制方式下的统计特性及射流控制效果.应用三维涡结构的方法分析了射流流场大尺度相干结构的演化规律,结果如下.

(1)对于无射流控制的平板边界层,由于 Kelvin-Helmholtz 失稳卷起了二维展向涡,所以在流场扰动及自身旋转运动的诱导下,二维展向涡发展成为三维的上端封闭、下端开口的 Δ 涡,最后破碎为湍流.

(2)通过探讨发卡涡的形成和发展规律得出,在逆压梯度环境下,发卡涡和类发卡涡是直射流和斜射流中比较明显的涡旋结构.通过进一步对比 2 种射流的瞬时流动细节,揭示了斜射流中的类发卡涡的发展,即射流孔下游发展成熟的类发卡涡在涡腿外侧出现了不断增强的次生流向涡,该涡对壁面附近的能量与质量的输运、耗散起着重要的作用.

(3)不同射流的控制效果对比表明,斜射流控制流动分离的效果明显优于直射流。

参考文献:

- [1] 谢永慧,樊涛,张荻,等.矩形扩压通道内流动控制的实验与数值研究[J].中国电机工程学报,2010,30(5):92-99.
XIE Yonghui, FAN Tao, ZHANG Di, et al. Experimental and numerical study on flow separation control in rectangle diffuser[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(5): 92-99.
- [2] BONS J P, SONDERGAARD R, RIVIR R B. Control of low-pressure turbine separation using vortex generator jets, AIAA 99-0367 [R]. Reston, USA: AIAA, 1999.
- [3] BONS J P, SONDERGAARD R, RIVIR R B. Turbine separation control using pulsed vortex generator jets [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2001, 123 (2):198-206.
- [4] RIVIR R B, SONDERGAARD R, BONS J P, et al. Control of separation in turbine boundary layers, AIAA 2004-2201 [R]. Reston, USA: AIAA, 2004.
- [5] GROSS A, FASEL H F. Numerical investigation of low-pressure turbine separation control, AIAA 2008-4321 [R]. Reston, USA: AIAA, 2008.
- [6] MEMORY C, SNYDER D O, BONS J. Numerical simulation of vortex generating jets in zero and adverse pressure gradients, AIAA 2008-558 [R]. Reston, USA: AIAA, 2008.
- [7] HANSEN L, BONS J. Flow measurements of vortex generator jets in separating boundary layer [J]. Journal of Propulsion and Power, 2006, 22 (3): 558-566.
- [8] REIMANN D, BLOXHAM M, CRAPO K L, et al. Influence of jet-induced transition on separating low-pressure turbine boundary layers [J]. Journal of Propulsion and Power, 2007, 23 (5):996-1006.
- [9] 伊进宝,乔渭阳,孙大伟.低压涡轮叶栅流动分离主动控制实验研究 [J]. 航空学报,2007,28 (5): 1055-1061.
YIN Jinbao, QIAO Weiyang, SUN Dawei. Experimental investigation of active control of flow separation at low-pressure turbine cascade [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28 (5): 1055-1061.
- [10] 伊进宝,乔渭阳.低雷诺数下涡轮叶栅流动分离实验与数值模拟 [J]. 推进技术,2008,29 (2): 208-213.
YIN Jinbao, QIAO Weiyang. Experimental and numerical investigation on flow separation in turbine cas-

cade with low Reynolds number [J]. Journal of Propulsion Technology, 2008, 29 (2): 208-213.

- [11] VOLINO R J, HULTGREN L S. Measurements in separated and transitional boundary layers under low-pressure turbine airfoil conditions [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2001, 123(2): 189-197.
- [12] SONDERGAARD R, RIVIR R B, BONS J P. Control of low-pressure turbine separation using vortex-generator jets[J]. Journal of Propulsion and Power, 2002, 18 (4): 889-895.
- [13] 李雪松,徐建中.低压高负荷涡轮叶栅的大涡模拟 [J]. 工程热物理学报,2007,28 (3): 403-405.
LI Xuesong, XU Jianzhong. Large eddy simulation for low-pressure highloaded turbine blade[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007, 28 (3): 403-405.
- [14] JEONG J, HUSSAIN F. On the definition of a vortex [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1995, 285: 69-94.
- [15] 叶建,邹正平.逆压梯度下层流分离泡转捩的大涡模拟 [J]. 工程热物理学报,2006,27 (3): 402-404.
YE Jian, ZOU Zhengping. Large-eddy simulation of laminar separation bubble transition under adverse pressure gradient [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2006, 27 (3): 402-404.
- [16] 连祺祥.湍流边界层拟序结构的实验研究 [J]. 力学进展,2006,36 (3):373-388.
LIAN Qixiang. Experimental studies on coherent structures in turbulent boundary layers [J]. Advances in Mechanics, 2006, 36 (3):373-388.
- [17] TYAGI M, ACHARYA S. Large eddy simulation of film cooling flow from an inclined cylindrical jet[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2003, 125 (4): 734-742.

[本刊相关文献链接]

- 合成射流控制下低压高负荷透平叶片边界层分离大涡模拟. 2011, 45(3): 58-64.
- 定常与脉冲涡旋射流下矩形扩压器流动分离控制研究. 2010, 45(11): 1-5.
- 采用球窝控制边界层分离流动的大涡模拟. 2010, 44(9): 27-32.
- 低温余热回收用涡旋膨胀机性能模拟研究. 2009, 43(7): 88-91.
- 涡旋压缩机轴向动态间隙的实验测量. 2008, 42(7): 795-798.
- 散热对无油涡旋空气压缩机性能影响的实验研究. 2008, 42 (1): 5-8.

(编辑 苗凌)