

基于 PIV 技术的单圆孔脉冲射流流场特征

沈鑫垚¹, 毛军逵¹, 刘方圆¹, 范俊², 韩省思¹

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院 江苏省航空动力系统重点实验室, 南京 210016;
2. 陆军航空兵学院 陆军航空兵研究所, 北京 101121)

摘 要: 对稳态射流及脉冲射流冲击靶板时的流场特性结构进行了探索和分析。采用高频粒子图像测速技术,在射流管口到冲击靶板间距为 6 倍管径的条件下,对稳态射流进口雷诺数为 6000 的稳态射流及脉冲频率为 20 Hz 的脉冲射流进行了实验测量,得到了射流核心区、壁面射流区及滞止区内的速度分布。研究发现:①由于射流剪切作用的影响,脉冲射流核心区的最大轴向脉动速度为稳态射流的 3 倍。②滞止区内,由于射流的剪切作用和壁面的滞止作用,导致了脉冲射流轴向速度梯度最大为稳态射流的 2 倍,同时,滞止区内的最大脉动速度是稳态射流脉动速度的 3 倍。③脉冲射流对壁面的卷吸以及旋涡的产生和传播过程,破坏了壁面射流区稳定的速度边界层。相比稳态射流,脉冲射流的流场增加了湍流相干结构的含能并产生周期性的大尺度卷吸涡。

关 键 词: 冲击射流; 脉冲射流; 粒子图像测速; 流场特性; 旋涡结构
中图分类号: V231.3 **文献标志码:** A

Flow field characteristics of single round hole pulsed jet based on PIV technology

SHEN Xinyao¹, MAO Junkui¹, LIU Fangyuan¹, FAN Jun², HAN Xingsi¹

(1. Jiangsu Province Key Laboratory of Aerospace Power System,
College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. Army Aviation Institution, Army Aviation School, Beijing 101121, China)

Abstract: The flow field characteristic structure of steady and pulsed jet impinging on the target plate was investigated. High frequency particle image velocity measurement technology was used to measure a steady jet and a pulsed jet with a frequency of 20 Hz. Besides, the distance between the jet nozzle and the target plate was 6 times the diameter of the nozzle, and the steady jet inlet Reynolds number was 6000 for both steady and pulsed jet flows. The experiment obtained velocity distribution of the core jet zone, the wall jet zone, and the stagnation zone. The results show that: (1) due to the shear action of the jet, maximum axial fluctuation velocity in the core jet zone of the pulsed jet was nearly three times that of the steady jet. (2) In the stagnation zone, the maximum gradient of the axial velocity of the pulsed jet was approximately twice that of the steady jet, which resulted from the shear action of the jet and the stagnation action of the wall. Furthermore, the maximum fluctuation

收稿日期:2020-02-03
基金项目:国家科技重大专项(2017-Ⅲ-0010-0036)
作者简介:沈鑫垚(1996—),男,硕士生,主要从事航空发动机传热传质研究。
引用格式:沈鑫垚,毛军逵,刘方圆,等. 基于 PIV 技术的单圆孔脉冲射流流场特征[J]. 航空动力学报,2020,35(9):1845-1855.
SHEN Xinyao, MAO Junkui, LIU Fangyuan, et al. Flow field characteristics of single round hole pulsed jet based on PIV technology[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(9): 1845-1855.

velocity in the stagnation zone was nearly three times that of the steady jet. (3) The entrainment of the pulsed jet and the propagation of the vortex led to the destruction of the velocity boundary layer in the wall jet region. Compared with the steady jet, the flow field of the pulsed jet increased the energy of the turbulent coherent structure and generated periodic large-scale vortex.

Key words: impinging jet; pulsed jet; particle image velocity measurement; flow field characteristics; vortex structure

射流冲击是强化局部换热的一种有效技术途径,在航空航天领域等许多工程技术领域有着广泛的应用^[1],如航空发动机热端部件的强化冷却^[2]和飞机系统的热气除冰^[3]等。从机理上看,强化换热与流动之间密不可分,研究流动特征有助于进一步深入了解冲击射流换热的机理,因此不少学者都致力于冲击射流的流动结构实验研究。

Fleischer 等^[4]利用烟线法,通过流线显示了冲击射流流场结构。毛军逵等^[5]针对单圆孔(内径为 30 mm)射流冲击凹面靶板,通过烟线法发现,当稳态射流进口雷诺数 Re 和冲击高度比 H/D (H 为冲击高度, D 为圆孔射流管内径)较大时,在凸面靶板周向两侧形成了稳定的旋涡结构。徐惊雷等^[6]针对圆孔射流($D=26$ mm)冲击靶板,利用热线风速仪测试了射流核心区的流速,发现流动结构在 $H/D=6, 8$ 时变化很大,射流核心区的高端流度使流动结构发生变化。

随着计算机技术以及图像处理技术的快速发展,粒子图像测速(PIV)作为一种先进的无扰动流场测量技术^[7],也在冲击射流的流场结构和流动特征研究中得到了广泛应用。熊霏等^[8]针对不同冲击高度($H=2D, 3D, 6D, 8D$)的圆孔冲击射流($D=10$ mm),利用 PIV 测试了冲击射流流场结构,发现冲击射流的流场结构有螺旋模式和轴对称模式。同样针对圆孔射流($D=25$ mm),Kalifa 等^[9]利用 PIV,重点探究了射流主要特征区域(射流核心区和壁面射流区)的速度分布。

近年来,因为脉冲射流能有效地破坏射流边界层,具有潜在强化换热的能力,在强化换热领域得到了越来越多的关注^[10-13]。这些研究中,仿真模拟居多,对其流场结构和流动特性的实验研究相对较少。耿丽萍等^[14]针对单圆孔($D=15$ mm)脉冲射流,利用 PIV 定性分析了脉冲射流的流场分布,发现靶板始终处于脉冲射流强烈冲击下,在脉冲射流转变为壁面射流向外扩张的过程中,主旋涡会与周围流体进行混合。同样工况条件下,

周静伟等^[15]利用 PIV 获取了脉冲射流的相位平均速度矢量图,展示了旋涡的演化过程。Ghadi 等^[16]对于圆孔(内径为 100 mm)冲击射流,利用烟线法研究了冲击靶面处的涡结构,脉冲射流会产生较大的旋涡。Herwig 等^[17]用 PIV 对比分析了稳态射流和脉冲射流(脉冲频率 $f=1.25, 40$ Hz)流场的速度矢量图,认为急剧的速度变化产生了旋涡运动,但是旋涡的形成并不能充分解释脉冲射流强化传热的原因,需要从速度变化的角度来进行研究。Hsu 等^[18]利用烟线法和 PIV 研究了脉冲射流的时间平均速度矢量图,发现射流核心区的速度矢量比壁面射流区域的速度矢量大。Mladin 等^[19]对于不同稳态射流进口雷诺数($Re=1000, 5500, 11000$)下的稳态射流和脉冲射流,通过热线风速仪发现脉冲射流出口处的脉动速度可以达到 50% 的平均速度。

上述针对脉冲射流的研究中,对流场结构特征给出了较为详细的定性描述,也初步就射流核心区的速度分布开展了研究。但是脉冲射流核心区速度变化、近壁区脉动速度特征以及壁面流涡系演化规律,仍需要进一步深入的开展机理性研究和定量分析。

本文开展了脉冲频率 $f=20$ Hz 下单圆孔冲击射流的流动特性实验研究,针对脉冲射流流场结构开展定性特征分析和速度分布的定量研究,阐明脉冲射流核心区、壁面射流区及滞止区内的流动机制,为进一步深入了解脉冲射流换热的机理提供依据。

1 实验方案

1.1 物理模型

冲击射流实验段的物理模型如图 1 所示。圆孔射流管内径 $D=4.5$ mm,管壁厚为 1 mm,射流管出口到靶板之间的距离(即冲击高度) $H=6D$ 。为了保证射流出口截面上的流动充分发展,选取的射流管长度为 $70D$ 。此外,选用厚为 15 mm、面

积为 $20\text{ cm}\times 20\text{ cm}$ 的胶木板作为冲击靶板,并在靶板及射流管表面喷涂哑光黑漆,以减少激光反射。观测流场坐标系如下:冲击靶板表面的中心点(正对冲击射流滞止点)为坐标原点, x 轴为冲击靶板表面的中心线, y 轴为射流管的中轴线。采用激光平面(图 2 中绿色区域)照亮流场区域,在与该平面垂直的方向上用 CCD(charge coupled device)相机拍摄采集流场图片(如图 2 所示)。

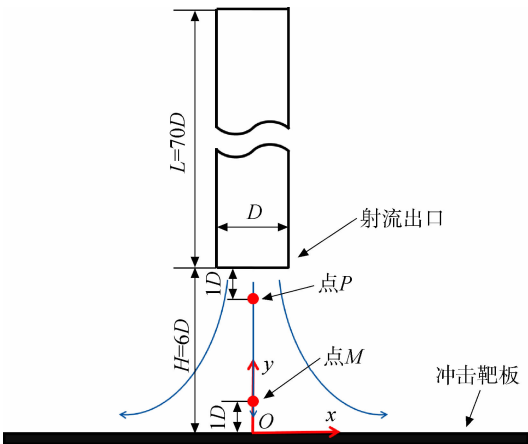


图 1 单圆孔冲击射流物理模型

Fig. 1 Physics model of a single-hole impinging jet

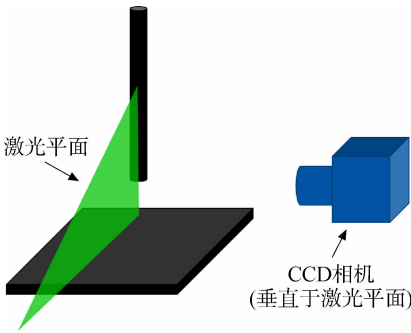


图 2 单圆孔冲击射流测量位置示意图

Fig. 2 Measurement location of a single-hole impinging jet

1.2 实验系统

进行流动研究的实验系统如图 3 所示,整套实验装置包括供气系统、稳压系统、控制系统、测量系统以及实验件,压气机(进气体积流量为 $0\sim 0.250\text{ m}^3/\text{min}$)提供的气流从左端进入稳压腔,稳压腔后端连接粒子发生器,再与高速脉冲电磁阀相连,其中高速脉冲电磁阀由控制系统驱动。控制系统由可编程逻辑控制器(PLC)、驱动放大单元和脉冲宽度调制(PWM)组成。通过控制系统对电磁阀两端的电压占空比进行调节,进而得到

按照特定规律周期性变化的脉冲出流。脉冲电磁阀后接瞬态流量计对瞬时体积流量进行监控,通过调节旁路上的节流阀和控制系统,产生特定频率和体积流量的脉冲射流,最终射流从射流管出口处冲击到靶板上。本实验中的测试设备有 PIV 系统,瞬态流量计,数据采集系统。瞬态流量计量程为 $0\sim 180\text{ m}^3/\text{h}$,精确度为 0.8% ;数据采集系统量程为 $0\sim 0.3\text{ MPa}$,精确度为 1% 。

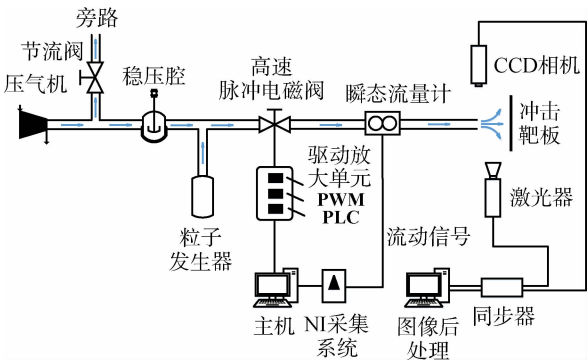


图 3 实验系统图

Fig. 3 Schematic of experimental system

本实验采用德国 Lavision 公司 Flowmaster 型号的二维高频 PIV 系统,光源为大功率集成化的 Nd:YLF 激光器,产生激光波长为 527 nm ,脉冲频率为 $1\,000\text{ Hz}$ 。CCD 相机为 Phantom 高速摄像机,分辨率为 $1\,200\text{ 像素}\times 800\text{ 像素}$,双帧频为 14 帧/s ,镜头为 TOKINA 微距镜头,焦距为 100 mm 。示踪粒子平均粒径约为 $1\text{ }\mu\text{m}$,它能保证对流场较好的跟随性。PIV 系统的控制 and 数据分析是基于 Windows NT 4.0 操作系统的 Davis 软件。对采集到的图像进行互相关统计分析以及快速傅里叶变换,可得到流动的速度场等。

1.3 实验工况及处理公式

稳态射流进口雷诺数 Re 定义和计算公式如下:

Re = (rho * U * D) / mu = (4 * m_dot) / (pi * mu * D) (1)

其中 ρ 为气流密度, U 为圆管出口处速度, μ 为气流动力黏度, $\dot{m}$ 为出口气流质量流量。

实验中,脉冲频率 $f=20\text{ Hz}$ 。为了对比脉冲射流和稳态射流的流动特性,保持它们出口时均速度一致,定义脉冲射流进口雷诺数 Re_p

Re_p = { 2Re (on) / 0 (off) } (2)

其中 on 表示电磁阀处于开启状态, off 表示电磁

阀处于断开状态。

时均流场不足以准确反映脉冲射流的流动特征,因此,对脉冲射流的流动特征用相位平均来研究,引入无量纲时间变量 t^+ 来表示不同的相位, t^+ 公式如下:

$$t^+ = \tau/T \tag{3}$$

其中 τ 为相位触发后一个周期内所经过的时间, T 则为一个脉冲信号变化的周期。取 $t^+ = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9$ 共十个相位进行分析。

稳态射流进口雷诺数 Re 设为 6 000,脉冲射流所占占比设为 50%,脉冲射流进口雷诺数 Re_p 在电磁阀开启状态时为稳态射流进口雷诺数 Re 的 2 倍,脉冲射流频率 $f=20\text{ Hz}$,共拍摄了 200 周期(10 s),10 000 张瞬时照片,通过图像互相关处理后在平均后可以得到不同相位下所需信息。

2 实验结果分析

2.1 稳态射流实验结果准确性验证

实验中,首先进行了实验系统和测试方法的可靠性验证。针对 Cooper 实验^[20]模型,本文开展了稳态射流的流场测试。图 4 为稳态射流在核心区中轴线上的轴向平均速度和轴向脉动速度。保证实验的稳态射流进口雷诺数和 Cooper 实验^[20]相同,将中轴线上轴向平均速度 V_y 及轴向脉动速度 V'_y 和 Cooper 实验数据进行对比,其中黑色实验点为 PIV 测量值,红色实验点为 Cooper 实验数据,横坐标无量纲化为 Y/D ,其中 Y 为射流到冲击靶板的距离。图 4(a)的纵坐标无量纲化为 V_y/V_b ,其中 V_b 为稳态射流出口轴向速度。图 4(b)的纵坐标无量纲化为 V'_y/V_b 。

通过将 PIV 测量数据和 Cooper^[20]通过热线风速仪所测实验值进行对比后,可以发现所测轴

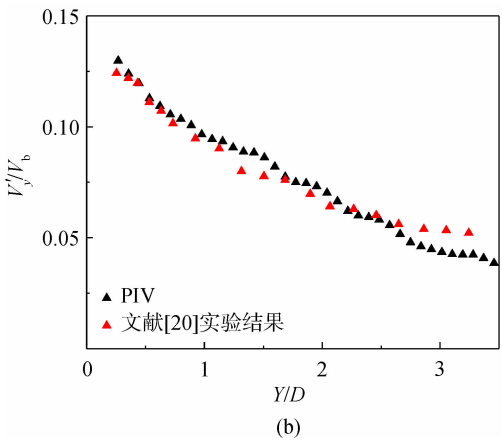
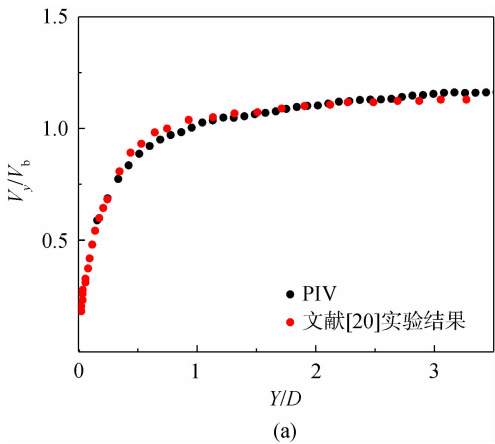


图 4 射流核心区轴向平均速度和轴向脉动速度对比
Fig. 4 Comparison diagram of averaged axial velocity and axial pulsation velocity in core jet zone

向平均速度和轴向脉动速度与参考实验值基本吻合,通过稳态射流的 PIV 实验验证了本文采用的 PIV 测量方法的准确性。从图 4(a)中可以看出,轴向平均速度在射流核心区内维持稳定,在 $Y/D<1$ 时也就是滞止区内迅速减小直至为零,PIV 实验值和参考实验值的平均误差为 1.3%。从图 4(b)中可以看出,轴向脉动速度基本维持线性变化,越靠近靶板,轴向脉动速度越大,平均误差为 4.1%。上述比对结果,表明本文的测试系统和方法具有良好的可信度。

2.2 脉冲供气特征验证

为了保证脉冲射流进口条件的可靠性,本文还进行供气特征验证测试。图 5 为使用 PIV 测量脉冲电磁阀后射流出口 $1D$ 位置点 P 上的轴向平均速度随时间 t 的变化规律图。其中 $Re=6\,000$,脉冲频率 $f=20\text{ Hz}$ 。

如图 5 所示,对于连续射流,管道出口的轴向

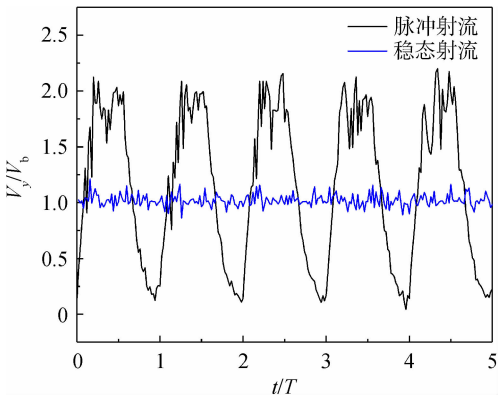


图 5 射流出口气流轴向平均速度随时间的变化规律
Fig. 5 Change law of averaged axial velocity at outlet with time

平均速度存在微弱的变化,但总体可以视为是连续稳定的;对于脉冲射流,在不同周期上具有良好的周期重复性。前 $1/2$ 个周期内($0\sim 0.5T$),阀门处于开启状态, $t=0\text{ s}$ 时刻,阀门开启,射流刚从射流管口射出,出口位置处的轴向平均速度逐渐升高至最大,脉冲射流的轴向平均速度 V_y 为稳态射流出口轴向速度 V_b 的 2 倍, V_y 有一些波动,这是由于射流管内的气流惯性以及气源供气品质所致。后 $1/2$ 个周期内($0.5T\sim T$),阀门闭合,脉冲射流出口中心位置处的轴向平均速度会逐渐减弱至 0 m/s 。总体上看,本实验的脉冲电磁阀产生的周期性脉冲信号是可行的。

2.3 脉冲射流的流场特征

图 6 为 $Re=6\,000$ 时, $f=20\text{ Hz}$ 的脉冲射流在某一个周期 T 内不同时刻的瞬时流场可视化图片(如图中左半幅所示),并和相同 Re 下的稳态射流(如图中右半幅所示)进行对比。其中横坐标无量纲化为 X/D , X 为从驻点向两边扩展距离。

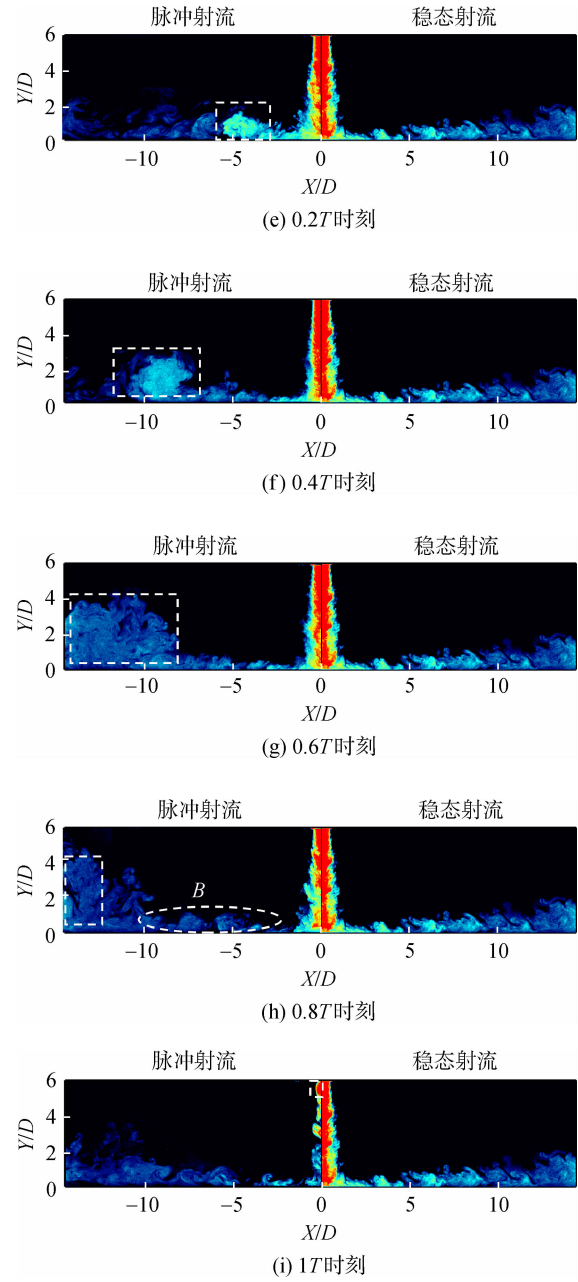
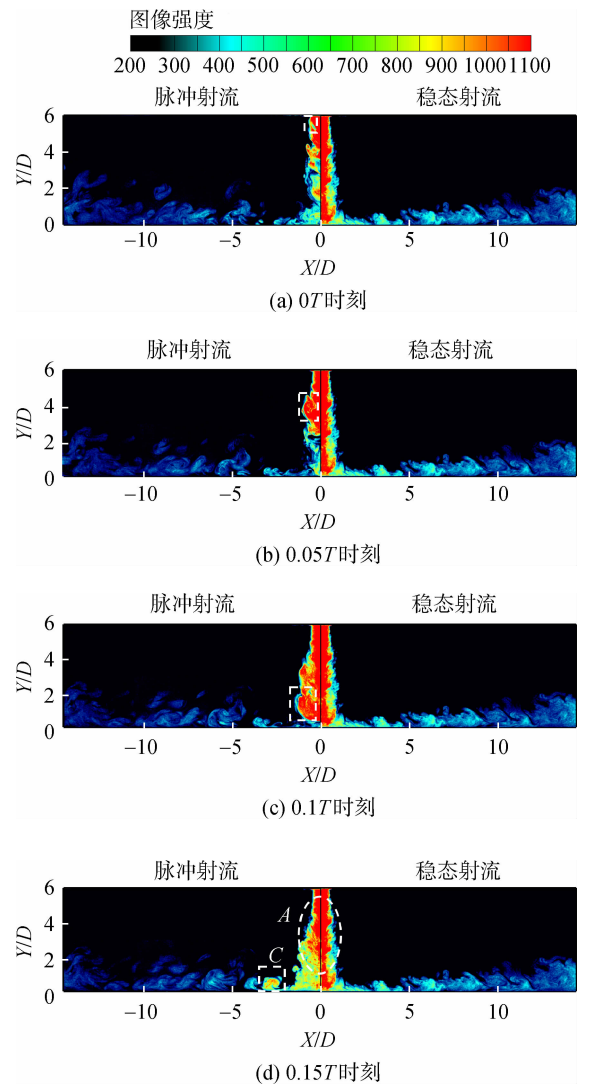


图 6 脉冲射流及稳态射流流动可视化对比图
($Re=6\,000, H/D=6$)
Fig. 6 Flow visualization of the pulsed jet and steady jet
($Re=6\,000, H/D=6$)

从图 6 中左半幅可观察到脉冲射流对周围流体的卷吸,旋涡的形成、传播、扩散以及旋涡沿靶板壁面发展的过程。

$0T$ 时刻,脉冲射流从管口射出后对周围空气进行夹带和卷吸,在射流核心区和周围流体交界处能捕捉到较强的旋涡,并沿核心区传播,从 $0.05T$ 时刻和 $0.1T$ 时刻的瞬时流场图中明显可见。 $0.1T$ 时刻,旋涡传播到距靶板 $1D$ 的位置,旋涡随着射流与周围流体的剪切以及中心区域的夹带而增大,并且在图中可以清晰地观察到剪切

作用下射流产生的串列涡结构。

在 $0.15T$ 时刻后,脉冲射流撞击靶板表面后,壁面射流区 B 内的旋涡仍然向周围流体卷曲,并沿径向扩散,与稳态射流壁面射流区不同。在 $0.15T \sim 0.8T$ 时刻,壁面始终处于脉冲射流的强烈冲击和旋涡的传播、扩散作用之下,在 $0.15T \sim 0.4T$ 时刻,旋涡会和周围流体进行混合,旋涡的影响区域不断增大。在 $0.6T$ 时刻,阀门已关闭,此时射流核心区的气流在消散,只因流体的惯性残留部分气流,同时壁面旋涡的强度也在减弱,从 $0.6T$ 及 $0.8T$ 时刻的瞬时图中可以看出。由此可见,本文采用高频 PIV 可清晰地捕捉到旋涡的生成发展过程和运动轨迹。

对比脉冲射流和稳态射流,可以发现在加入 20 Hz 脉冲信号后,流场结构变得更复杂(如流体的夹带、旋涡的产生和扩散),特别是在壁面流区域,稳态射流并不会产生如区域 B 、 C 所示的周期性旋涡空间演化。这些旋涡的生成、发展和耗散过程证明了阶跃变化的脉冲信号促进了脉冲射流的卷吸作用。同时,在不同的时刻处,射流核心区的速度也会发生变化,这一点,将在后面进行定量分析。

为了更好地说明脉冲射流的流场特征,本文也进一步将脉冲射流在不同相位处的速度矢量图(如图中左半幅所示)和相同 Re 下的稳态射流(如图中右半幅所示)进行对比,如图 7 所示。其中对于脉冲射流选择 $t^+ = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.6, 0.8$ 相位的速度矢量图。

从图 7 中可以发现,在阀门开启后的 $t^+ = 0.1$ 相位处,脉冲射流和周围环境的流体会发生剪切作用,导致气流发生偏转,产生小的顺时针旋涡。在 $t^+ = 0.2$ 相位时,射流会和壁面产生作用,速度发生较大偏转,在旋涡沿径向扩散时,顺时针

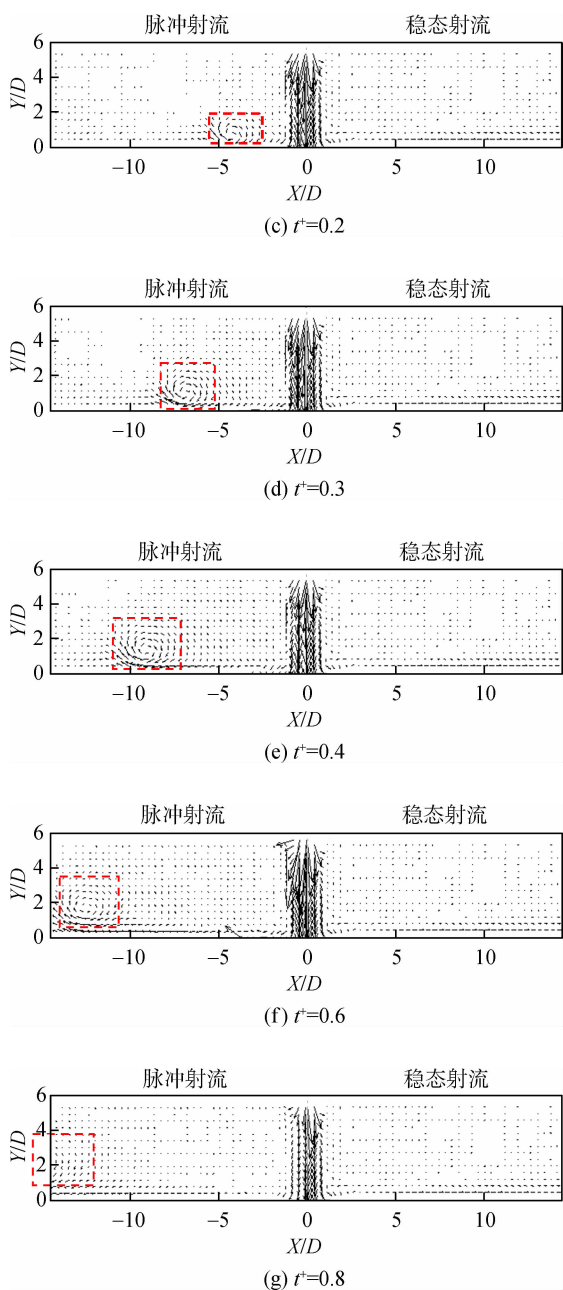


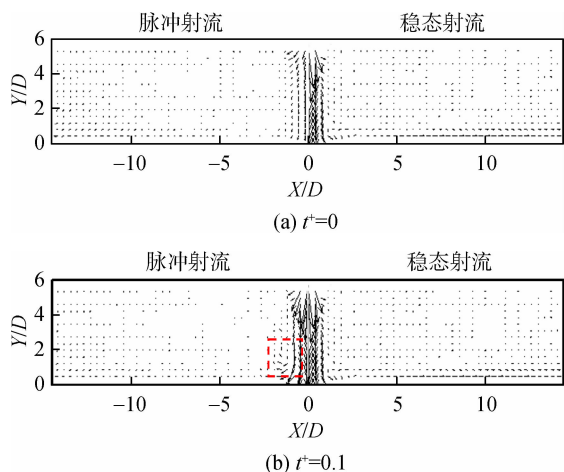
图 7 速度矢量对比图

Fig. 7 Comparison diagram of velocity vector

旋涡的范围也会变得更大,在有旋涡处的径向速度明显增大,这些在右半边的稳态射流对比图中并未观察到。

将瞬时照片经过相位平均后得到图 8,脉冲射流和稳态射流的旋流强度 λ_{ci} 对比图。其中选择了脉冲射流 $t^+ = 0.4$ 相位处的旋流强度和稳态射流进行对比。

旋流强度 λ_{ci} 是用来标识湍流旋涡结构的主流方法,是速度梯度张量特征值的虚部,能够标识出具有旋涡结构的流体区域, λ_{ci} 越大,涡的强度越强^[21]。图 8 中可以看到:在射流核心区 A 处,相



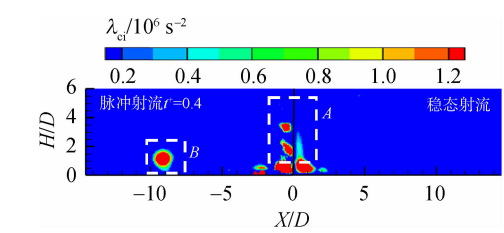


图 8 旋流强度对比图

Fig. 8 Comparison diagram of swirl strength

比于稳态射流,加入 20 Hz 脉冲信号后, λ_{ci} 较大的区域增多,流场湍流特性增强。同时,在壁面射流区 $X/D=-9$ 处存在一处旋流强度较大的区域,说明冲击形成的壁面流在发展的过程中,和周围环境空气存在明显的剪切作用,上一时刻小尺度涡旋逐步汇聚,在此处产生较大尺度的旋涡,并最终耗散于环境大气中。

图 9 为脉冲射流和稳态射流在射流核心区和滞止区内的应变率对比图。其中选择了脉冲射流 $t^+=0.4$ 相位处的旋流强度和稳态射流进行对比。

从图 9 中可以看到,相比于稳态射流,加入 20 Hz 脉冲信号后,在射流核心区和滞止区内的应变率 S_{12} 明显增大,脉冲射流和周围空气的剪切作用也越强,加上近壁面的滞止作用,射流速度在滞止区内将会衰减得更快。

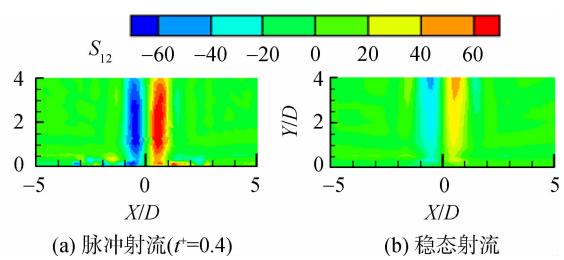


图 9 应变率对比图

Fig. 9 Comparison diagram of strain rate

2.4 脉冲射流的时均速度特征

为了观察到不同相位时射流核心区的速度变化,在流场中选择了射流核心区中轴线上距靶面 1D 位置处的点 M,作出它不同相位处的沿轴向的轴向平均速度分布,如图 10 所示。

从图 10 中,可以观察到,在脉冲射流不同相位处,点 M 处的轴向平均速度会发生很大变化, $t^+=0$ 相位时,阀门开启,气流还未到达点 M 处,轴向平均速度几乎为 0 m/s。点 M 处的轴向平均速度随时间不断增大,直至 $t^+=0.4$ 时刻达到最大,为同 Re 下稳态射流的 2 倍,在轴向平均速度比稳态射流高的相位时刻,射流对靶面的冲击也

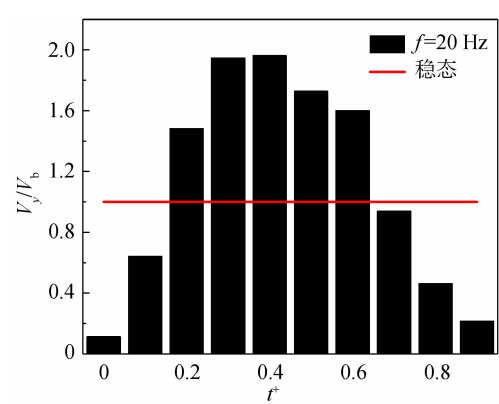


图 10 不同相位处轴向平均速度分布

Fig. 10 Averaged axial velocity distribution at different phases

会更强。 $t^+=0.5$ 相位时,阀门闭合,点 M 处的轴向平均速度逐渐降低,在 $t^+=0.8$ 时,轴向平均速度只有稳态射流的 40%。在接下来的分析中,选择 $t^+=0$ (阀门开启,气流刚从管口射出),0.4 (脉冲射流速度最大),0.8 (阀门已闭合) 3 个相位处的脉冲射流进行分析。

图 11 给出了脉冲射流核心区中轴线上的 3 个不同相位处的轴向平均速度进行定量分析。

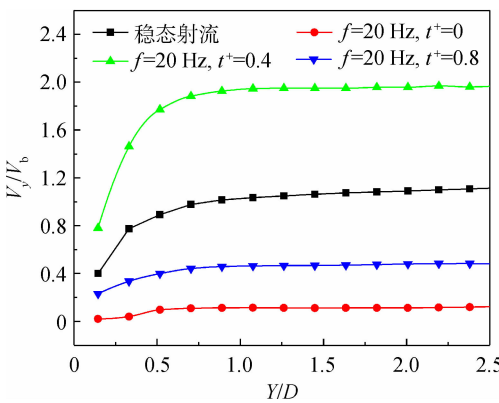


图 11 射流核心区中轴线轴向平均速度对比图

Fig. 11 Comparison diagram of averaged axial velocity on the axis of core jet zone

在滞止区,也就是 $Y/D<1$ 范围内,脉冲射流和稳态射流的轴向平均速度存在下降趋势,但降低的速度梯度不同。脉冲射流在 $t^+=0.4$ 相位时速度梯度为稳态射流速度梯度的 2 倍,在 $t^+=0$ 相位时,此时刚刚供气,射流还未到达壁面区域,而 $t^+=0.8$ 相位时,此时上游供气阀门已关闭,射流维持即将消失,所以在滞止区的速度梯度都小于稳态射流。因此,在 $f=20$ Hz 时,脉冲射流在滞止区的衰减速度梯度最大为稳态射流的 2 倍。

图 12 为稳态射流和 $f=20$ Hz 脉冲射流在

$Y/D=1.5, 1, 0.5$ 处的轴向平均速度对比。

在稳态射流和脉冲射流的 $t^+=0, 0.8$ 相位时, 壁面射流区的轴向平均速度基本为 0 m/s 。而在 $t^+=0.4$ 相位时, 近壁面处的轴向平均速度会出现较大波动, 这是因为脉冲射流的不稳定性导致了壁面流的卷吸, 产生的旋涡, 如图 6 中所示, 相比于稳态射流, 脉冲射流会破坏壁面射流区稳定的速度边界层。

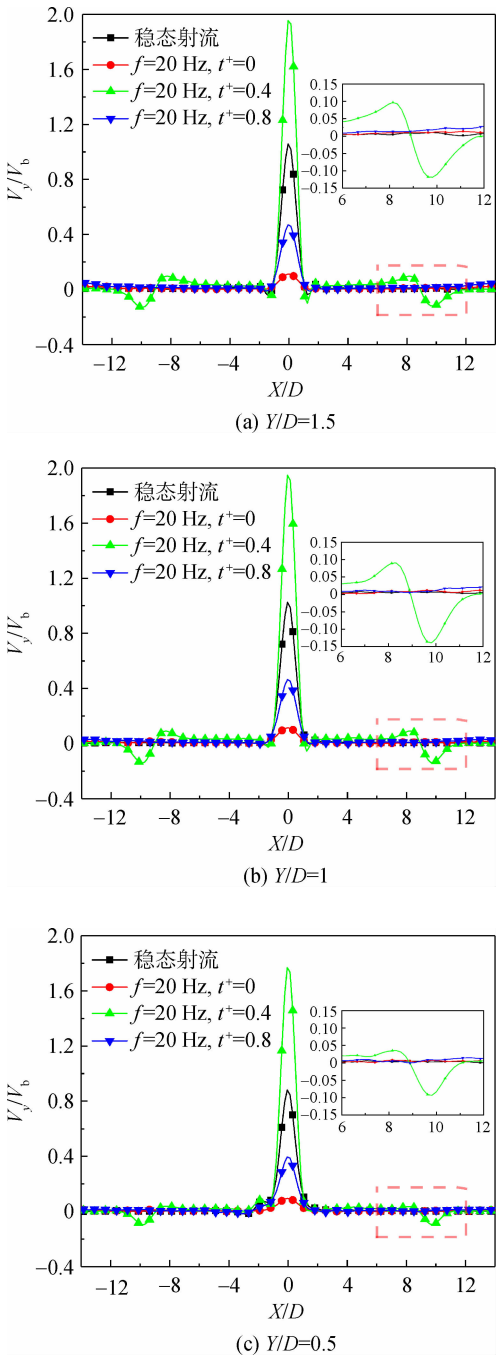


图 12 不同 Y/D 位置处轴向平均速度的对比
Fig. 12 Comparison diagram of averaged axial velocity at different Y/D positions

观察 $Y/D=1.5, 1, 0.5$ 处壁面射流区的轴向平均速度, 由于受到旋涡结构的影响。壁面附近轴向平均速度出现较强的正负交替现象, 从图 6 中可以观察到旋涡中心在距离壁面 $1D$ 位置处, 这就解释了在 $Y/D=1$ 时, 壁面射流区的轴向平均速度波动为最大, 其中最大值为稳态射流轴向平均速度的 15% 。

2.5 脉冲射流的脉动速度特征

图 13 是对脉冲射流核心区中轴线上的不同相位时的轴向脉动速度进行定量分析。

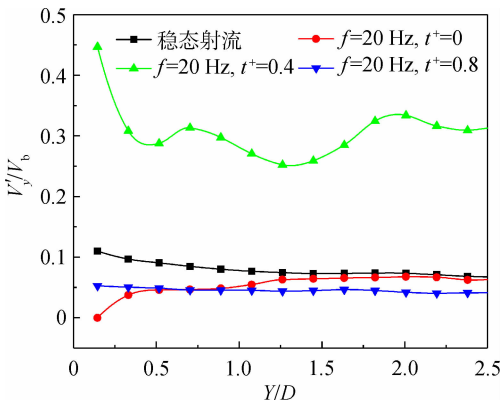


图 13 射流核心区中轴线轴向脉动速度对比图
Fig. 13 Comparison diagram of axial pulsed velocity in core jet zone

在射流核心区, 在 $t^+=0$ 时, 射流核心区的轴向脉动速度几乎为 0 m/s 。在 $t^+=0.4$ 时, 轴向脉动速度会增大, 因为脉冲射流的非定常特性, 和周围空气的剪切作用, 导致轴向脉动速度为稳态射流轴向脉动速度的 3 倍, 同时, 核心区内轴向脉动速度不断波动, 体现了脉冲射流的不稳定性。在 $t^+=0.8$ 时, 核心区的轴向脉动速度会减小到稳态射流的一半。

在滞止区内, 可以看到 $t^+=0.4$ 相位时刻, 越靠近壁面处, 滞止区内的轴向脉动速度越高, 体现出的脉动越强。

图 14 为稳态射流和 $f=20\text{ Hz}$ 脉冲射流在 $Y/D=1.5, 1, 0.5$ 处的轴向脉动速度对比。

在图 14 中, 从不同 Y/D 位置处能观测到稳态射流核心区内存在明显的双峰现象, 体现了射流和周围环境空气的剪切作用, 而在加入脉冲信号后, 在 $t^+=0.4$ 相位处并未发现双峰现象, 这是因为脉冲射流核心区的能量增强, 大于射流和周围空气的剪切作用, 这一点之后可以从功率谱图中看出。

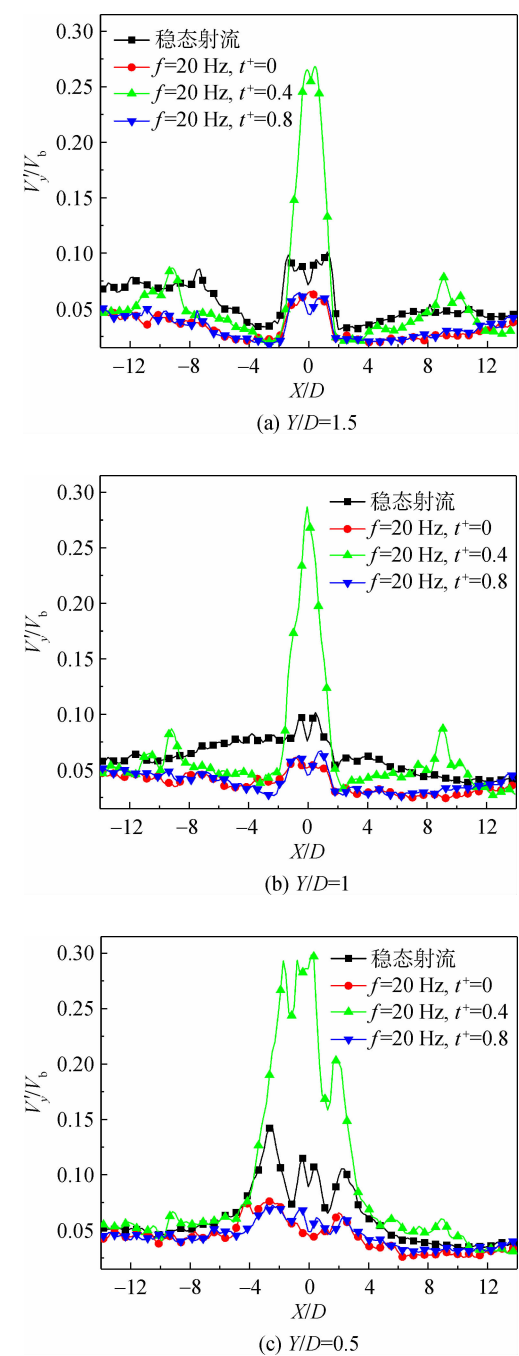


图 14 不同 Y/D 位置处轴向脉动速度的对比图
Fig. 14 Comparison diagram of axial pulsed velocity at different Y/D positions

从 $t^+=0.4$ 相位处曲线可以观测到, $Y/D=0.5$ 位置, 滞止区内的轴向脉动速度最大值是稳态射流轴向脉动速度的 3 倍, 同时可以看到绿色曲线波峰波谷处的趋势和其他时刻一致, 但在波峰处, 也就是滞止区内出现了不对称问题, 这是由于脉冲射流对壁面的强烈冲击作用, 使得滞止区内的脉动增强, 轴向脉动速度变化不稳定。在 $t^+=0, 0.8$ 相位, 因为流场中气流较少的原因, 此时滞止区内轴向脉动速度较小。

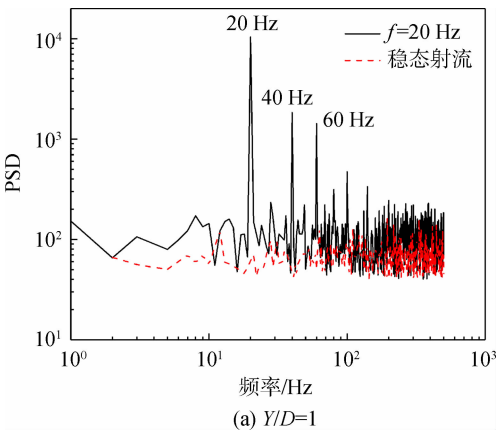
在壁面射流区, 现象和图 12 所示相同。 $t^+=0, 0.8$ 相位时, 壁面射流区的轴向脉动速度基本保持稳定, 在 $t^+=0.4$ 相位时, 轴向脉动速度会出现波动, 产生的旋涡破坏了壁面处的速度边界层。在旋涡的位置 $X/D=9$ 处, 轴向速度脉动增强, 导致了轴向脉动速度在 $X/D=9$ 存在一个峰值, 在 $Y/D=1$ 时, 这个峰值最高, 为稳态射流轴向脉动速度的 2 倍。

在越靠近壁面处, 脉冲射流对壁面的强烈的冲击使得滞止区内的脉动增强, 气流会出现强烈的动量交换, 轴向脉动速度变化不稳定, 这不稳定的轴向脉动速度变化也导致了左侧壁面处的轴向脉动速度会稍高于右侧, 出现一定的不对称现象。所以从图 14 中可以观察到, 图 14(a) 和图 14(b) 所展示离壁面相对较远的区域 ($Y/D=1.5, 1.0$), 两侧轴向脉动速度基本还是比较对称的, 而在靠近壁面较近的区域 ($Y/D=0.5$), 两侧轴向脉动速度分布出现了一定的不对称情况。

为进一步分析流动的不稳定性, 本文应用了功率谱方法^[22]。图 15 为脉冲频率 $f=20\text{ Hz}$ 时的功率谱图。选取了射流核心区内 3 个距壁面不同的位置, 其中横坐标为脉冲射流的频率特性, 纵坐标为功率谱密度 (power spectral density, PSD)。

PSD 是由测量的速度值经过快速傅里叶变换得到的。在相同的实验条件下, 稳态射流的功率谱以虚线形式叠加在每个图上进行比较。脉冲射流的 PSD 在不同位置处都有一个主峰, 这个主峰的频率就是脉冲射流本身的脉冲频率 20 Hz 。其他的二次峰值均是由于射流的脉冲频率以及流体自身固有频率的谐振产生, 而频率越高对应流场中端流尺度越小, 相应的涡结构含能越小, 导致功率谱密度峰值随着频率的增加而逐渐降低。

图 15 不同位置的功率谱图还显示, 脉冲射流相比稳态射流具有明显的主频, 且主频以及谐波



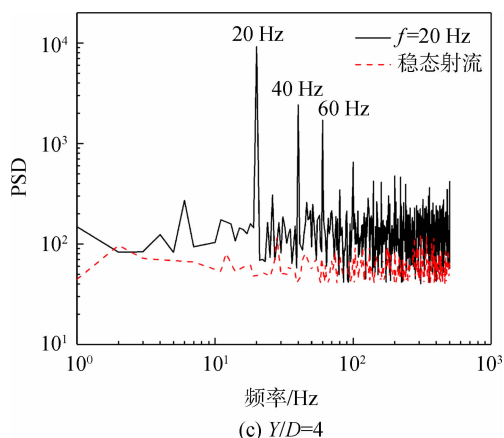
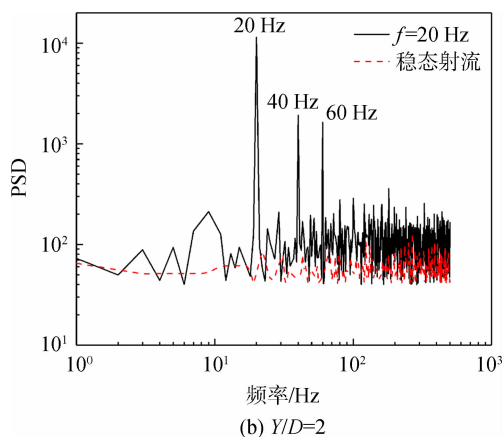


图 15 $f=20$ Hz 脉冲射流功率谱

Fig. 15 Pulsed jet power spectrum at $f=20$ Hz

频率具有较高的 PSD 值。由于主频主要是由流场中的湍流大尺度结构的不稳定性产生,结合图 6 可以发现,脉冲射流的流场相比稳态射流增加了湍流相干结构的含能并产生周期性的大尺度卷吸涡,因此这也表明脉冲射流可以增加流场中的含能大尺度结构,而这也势必会对冲击靶板的换热特性及其分布带来显著的影响。

3 结 论

本文主要针对相同稳态射流进口雷诺数下的稳态射流和脉冲频率 $f=20$ Hz 的脉冲射流进行了流动特性的实验研究,结果表明:

1) 射流核心区内,对于相同 Re 的稳态射流和脉冲射流,于射流剪切作用的影响,脉冲射流的最大轴向脉动速度为稳态射流的 3 倍。

2) 滞止区内,越靠近壁面处,脉冲射流的轴向速度会逐渐降低,速度梯度远大于稳态射流, $f=20$ Hz 时,脉冲射流在滞止区的轴向速度衰减梯度最大为稳态射流的 2 倍。同时,由于脉冲射流的剪切作用和壁面处的滞止作用,导致滞止区

内存在很大的脉动特性,越靠近壁面处,滞止区内的轴向脉动速度越高,滞止区内的最大轴向脉动速度是稳态射流轴向脉动速度的 3 倍。

3) 阶跃变化的脉冲信号促进了脉冲射流对壁面的卷吸及旋涡的产生和传播过程,破坏了近壁面处稳定的速度边界层。通过高频 PIV 可以观察到旋涡的发展过程。

4) 脉冲射流的流场相比稳态射流增加了湍流相干结构的含能并产生周期性的大尺度卷吸涡,因此这也表明脉冲射流可以增加流场中的含能大尺度结构。

参考文献:

- [1] VISKANTA R. Heat transfer to impinging isothermal gas and flame jets[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1993, 6(2): 111-134.
- [2] BUNKER R S. Gas turbine heat transfer: ten remaining hot gas path challenges[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2007, 129(2): 193-201.
- [3] FREGEAU M, GABR M, PARASCHIVOIU I, et al. Simulation of heat transfer from hot-air jets impinging a three-dimensional concave surface[J]. *Journal of Aircraft*, 2009, 46(2): 721-726.
- [4] FLEISCHER A S, KRAMER K, GOLDSTEIN R J. Dynamics of the vortex structure of a jet impinging on a convex surface[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2001, 24(3/4): 169-175.
- [5] 毛军逵, 刘震雄, 郭文. 小间距单孔冲击凸面靶板流场结构实验[J]. *航空动力学报*, 2007, 22(10): 1598-1603.
MAO Junkui, LIU Zhenxiong, GUO Wen. Experimental investigations on round jet impingement on flow structures of convex surface target with narrow space[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2007, 22(10): 1598-1603. (in Chinese)
- [6] 徐惊雷, 徐忠. 冲击高度对半封闭紊流冲击射流流场影响的实验研究[J]. *实验力学*, 2000, 15(4): 466-472.
XU Jinglei, XU Zhong. Experimental study on the influence of impact height on the flow field of semi-closed turbulent impinging jet[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2000, 15(4): 466-472. (in Chinese)
- [7] ADRIAN R J. Twenty years of particle image velocimetry [J]. *Experiments in Fluids*, 2005, 39(2): 159-169.
- [8] 熊霏, 姚朝晖, 郝鹏飞, 等. 冲击射流的 PIV 实验研究[J]. *实验流体力学*, 2004, 18(3): 68-72.
XIONG Fei, YAO Zhaohui, HAO Pengfei, et al. PIV investigation of impinging jet[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2004, 18(3): 68-72. (in Chinese)
- [9] KALIFA R B, HABLIS, SAÏD N M, et al. Parametric analysis of a round jet impingement on a heated plate[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2016, 57(11): 11-23.
- [10] BOVO M, ROJO B, GOLUBEV M. Measurements of a single pulse impinging jet: a CFD reference[C]// *Proceedings*

of European Physical Journal Web of Conferences. Kutna-hora,Czech;EDP Sciences,2014;02010. 1-02010. 8.

[11] HOFMANN H M,MOVILEANU D L,KIND M,et al. Influence of a pulsation on heat transfer and flow structure in submerged impinging jets[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2007,50(17/18):3638-3648.

[12] XU P,YU B,QU S,et al. Turbulent impinging jet heat transfer enhancement due to intermittent pulsation[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2010, 49 (7): 1247-1252.

[13] 吕元伟,张靖周,唐婵,等. 脉冲射流冲击平直表面的对流换热实验[J]. 航空学报,2018,39(4):119-127.
LÜ Yuanwei,ZHANG Jingzhou,TANG Chan,et al. Experiment of convective heat transfer of pulsed jet impingement on a flat surface[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2018,39(4):119-127. (in Chinese)

[14] 耿丽萍,周静伟,李文军,等. 周期性湍流射流冲击下的传热与流场特征[J]. 空气动力学报,2012,30(4):528-532.
GENG Liping,ZHOU Jingwei,LI Wenjun,et al. Characteristics of heat transfer and flow field under periodic turbulent jet impingement [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2012,30(4):528-532. (in Chinese)

[15] ZHOU J W,GENG L P,WANG Y G,et al. Experimental and numerical study on flow field and heat transfer characteristics for a periodically unsteady impinging jet[C] // Proceedings of 2010 14th International Heat Transfer Conference. Washington DC:American Society of Mechanical Engineers,2010;563-569.

[16] GHADI S,ESMAILPOUR K,HOSSEINALIPOUR S M,et al. Experimental study of formation and development of coherent vortical structures in pulsed turbulent impinging jet[J]. Experimental Thermal and Fluid Science,2015,74 (12):382-389.

[17] HERWIG H,MIDDELBERG G. The physics of unsteady jet impingement and its heat transfer performance[J]. Acta Mechanica,2008,201(1/2/3/4):171.

[18] HSU C M,JHAN W C,CHANG Y Y. Flow and heat transfer characteristics of a pulsed jet impinging on a flat plate[J]. Heat and Mass Transfer,2020,56(1):143-160.

[19] MLADIN E C,ZUMBRUNNEN D A. Alterations to coherent flow structures and heat transfer due to pulsations in an impinging air-jet[J]. International Journal of Thermal Sciences,2000,39(2):236-248.

[20] COOPER D,JACKSON D C,LAUNDER B E,et al. Impinging jet studies for turbulence model assessment: I flow-field experiments[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,1993,36(10):2675-2684.

[21] ZHU Z,NIU J,LI Y. Swirling-strength based large eddy simulation of turbulent flow around single square cylinder at low Reynolds numbers[J]. Applied Mathematics and Mechanics,2014,35(8):959-978.

[22] AZEVEDO L F A,WEBB B W,QUEIROZ M. Pulsed air jet impingement heat transfer[J]. Experimental Thermal and Fluid Science,1994,8(3):206-213.

(编辑:陈 越)