DOI: 10.3901/JME.2020.22.263

近距离淹没冲击射流动态流场特性*

胡建军^{1,2} 杨子文¹ 金瑶兰³ 王思民³ 孔祥东²

(1. 燕山大学河北省土木工程绿色建筑与智能运维重点实验室 秦皇岛 066004;

2. 燕山大学机械工程学院 秦皇岛 066004;

3. 上海衡拓液压控制技术有限公司 上海 201612)

摘要: 近距离下淹没冲击射流具有重要的应用前景,但有关其动态流场特性的研究尚不充分。利用粒子图像测速技术(Particle image velocimetry, PIV)对冲击距离为 $H/D=1$ 时的动态流场特性进行测量,研究雷诺数 Re 和喷嘴端面轮廓(壁面约束)对间隙内旋涡生成的影响,并对试验数据进行涡量分析与本征正交分解方法(Proper orthogonal decomposition, POD)分析。结果表明,雷诺数 Re 对不同喷嘴端面轮廓(壁面约束)的旋涡生成和迁移影响规律不同。雷诺数对直角型喷嘴的双涡环模式流态影响较小,但对圆角型喷嘴卷吸流态影响较大,且随雷诺数的增大流场出现动态对称涡旋,该对称涡旋逐渐向间隙外迁移且呈现出明显的周期性变化特征。涡量分析得到时均场的涡量大小与分布情况,通过与 POD 分析中瞬态场的含能大尺度结构分布相结合,揭示间隙外涡旋能量的来源与变化规律。通过前 4 阶瞬态脉动速度场重构,可以从微观时间尺度进一步说明瞬态速度场的突变性与周期性。研究成果将有助于加深对冲击射流本质的理解。

关键词: 冲击射流; 淹没; PIV; 近距离; 动态流场

中图分类号: TB126

Dynamic Flow-field Characteristics of Close-range Submerged Impinging Jet

HU Jianjun^{1,2} YANG Ziwen¹ JIN Yaolan³ WANG Simin³ KONG Xiangdong²

(1. Key Laboratory of Green Construction and Intelligent Maintenance for Civil Engineering of Hebei Province,

Yanshan University, Qinhuangdao 066004;

2. School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004;

3. Shanghai Hunter Hydraulic Control Technology Co., Ltd., Shanghai 201612)

Abstract: Submerged impact jet at close range has important application in many fields, but the research on the dynamic flow-field characteristics is not yet sufficient. Particle image velocimetry(PIV) is used to measure the dynamic flow-field characteristics of impinging jet when the impact distance is $H/D=1$. The effects of Reynolds number Re and the nozzle end-profile (wall constraints) on the vortex generation and migration inside and outside the gap are studied. The experimental data are analyzed by vorticity analysis and proper orthogonal decomposition(POD) method. The results show that the Reynolds number has different effects on the vortex generation and migration of different nozzle end profile (wall constraint). The Reynolds number has little effect on the flow pattern of the double vortex ring mode of the right-angle nozzle, but has a greater influence on the flow pattern of the round angle nozzle, and the dynamic symmetric vortex appears with the increase of the Reynolds number. The symmetrical vortex gradually migrated out of the gap and exhibited obvious periodic variation characteristics. The vorticity analysis obtains the vorticity size and distribution of the time-averaged field. By combining with the distribution of the energetic large-scale structure of the transient field in the POD analysis, the source and variation of the vortex energy outside the gap are revealed. By the reconstruction of the first four orders transient pulsating velocity field, the abrupt change and periodicity of the transient velocity field can be further explained based on the microscopic time scale. This result is helpful to deepen the understanding of impingement jets.

Key words: impingement jet; submerged; PIV; close-range impingement; dynamic flow-field

* 国家自然科学基金资助项目(51705446, 51890881)。20200113 收到初稿, 20200527 收到修改稿

0 前言

冲击射流有着广泛的应用领域,如计算机芯片散热、机翼除冰、岩石破碎、燃气轮机冷却等,因此一直是人们关注研究的重点^[1-6]。同时由于冲击射流流场存在着复杂的动态特性和众多的影响因素(角度、形状、间距等),这为冲击射流研究提供了众多的背景与视角^[7-9]。

研究者们将多种研究方法应用于冲击射流的各个方向。在理论研究中,ROGER^[10]研究了平面射流(片状)到带有滑动的实心平板上的流动。WANG 等^[11]同样从理论上分析了由圆形射流撞击旋转盘所形成的自由表面流,研究探索了旋转和惯性对薄膜流动的影响,发现了边界层高度和膜厚度都随着旋转速度而减小。基于理论研究的抽象性,利用计算机仿真技术,WILKE 等^[12]对雷诺数分别为 3 300 和 8 000 的亚音速和超音速撞击射流进行了直接数值模拟,研究了马赫数、雷诺数和环境温度对平均速度和温度场的影响。同样,DAIRAY 等^[13]使用高阶数值方法,在高空间分辨率下,对具有两个射流直径的喷嘴到板的距离和雷诺数为 10 000 的射流进行直接数值模拟,解释了停滞区域中 Nusselt 数的非单调径向演化,但主要研究的是非稳态过程。通过试验,XU 等^[14]利用时间分辨粒子图像测速技术研究了撞击在具有不同几何形状的多孔壁上的合成层流涡环,揭示了涡旋结构的演化。GRECO 等^[15]研究了 Strouhal 数和孔板间距对撞击零净质量流的影响,结果表明 Strouhal 数决定了涡旋环和尾随射流在流场上的存在和相对重要性,孔板间距决定了这些结构的下游演化。ASSELIN 等^[16]研究了下降涡旋对的涡旋动力变化,并观察到涡-壁相互作用的两种运动模式,但研究尺度较为宏观。刘璐璐等^[17]应用 PIV 技术对 Re 为 1 743 和 5 400 时的平板湍流边界层的流向-法向平面流场进行了测试研究,研究表明发卡涡和雷诺应力的分布特征具有高度相关性。结合仿真与试验,VITO 等^[18]利用大涡模拟与试验对比,研究分析了高雷诺数下冲击波/湍流边界层相互作用的低频动力学,结果表明相互作用带的内在机制是造成低频不稳定的原因。

已有研究主要集中在大冲击距离下,针对射流形态、压力分布以及传热特性等开展研究。囿于研究手段的限制,目前对近距离冲击射流(特别是冲击距离在 $H/D=1$ 量级时)的研究还较少。而目前这方

面的应用已经越来越多,如生物无针注射^[19],射流切割^[20],射流元件^[21]等,产生了对近距离冲击射流特性获取的极大需求。

本文在冲击距离 $H/D=1$ 时,利用 PIV 技术对淹没近距离冲击射流的动态流场特性开展研究,对包括流态、涡量分布、含能大尺度结构和瞬时脉动速度场进行了分析,探索了间隙内的流动结构及其演化规律与射流棒端面约束的关系,揭示了冲击射流间隙内涡旋动力学特征,本文研究有助于进一步加深对冲击射流特性的理解。

1 试验装置与测试系统

1.1 喷嘴模型的选择

本试验模型源于射流管式电液伺服阀先导级模型,该伺服阀是基于近距离射流原理开发的流体动力控制元件,广泛应用在工业液压控制^[21]和航空作动器控制领域^[22]。因其实际流场具有高压(高达 21 MPa)、高速(高达 200 m/s)以及亚毫米尺度,现有技术尚无法开展直接测量。因此对其采用动力学相似(雷诺相似准则)原理对其进行了转换,进行了几何放大,降低了压力和流速,从而得到了目前的喷嘴试验装置模型。相似放大后的喷嘴尺寸如图 1 所示,喷嘴总长为 50 mm,上端有 10 mm 的螺纹用于与射流棒连接。其外径为 23 mm,内径为 8 mm,在距喷嘴出口 14.7 mm 处收缩,喷嘴出口处直径为 2.2 mm,其与喷嘴内径之间的角度变化为 30° 。试验所用喷嘴材质为 7020 硬铝材料。由于试验所用喷嘴表面具有高反射性,为减少试验中激光的反射对流域和拍照的影响,因此对喷嘴表面进行黑化处理。为了研究不同喷嘴轮廓对近距离冲击射流流场特性的改变,因此选择了两种轮廓进行研究。一种为喷嘴出口平面与立面成 90° 的直角;另一种为喷嘴出口平面与立面成 45° 的圆角,圆角半径为 5.5 mm。

图 1 喷嘴模型与实物

1.2 PIV 测试系统

图 2a 为近距离冲击射流流场测试系统。试验系

统包括流量计、微型潜水泵、测试喷嘴、套筒、水箱、Dantec PIV 流场测量组成。射流套筒内径 150 mm、高 70 mm、壁厚 5 mm, 材质为石英玻璃, 其出水口位置位于与测量平面正交平面的最远端, 以减小出流对间隙及其附近流场的影响, 同时保证了测量平面为具有物理对称性的平面。柱形转子流量计量程为 0.06 L/min 至 0.6 L/min, 用以调节控制射流流量。本文中 $Re=1\ 056$ 、 $1\ 585$ 、 $3\ 167$ 时的流量分别为 0.1 L/min、0.15 L/min、0.3 L/min。微型潜水泵扬程为 15 m, 放置在水箱中, 用以提供射流流量。

PIV 系统为 Dantec 公司设计生产的高频

2D-PIV 系统。系统配有图丽微距激光镜头, 信号同步器, Dynamic Studio 5.1 软件和 Nd: YLF 激光系统组成, 最大触发频率为 2 929 Hz。系统所发出激光片光宽度小于 250 ns。本试验所用 2D-PIV 系统的测量误差约为 1%。试验中, 以平均直径 5 μm 的聚酰胺作为示踪物质(psp-5)。如图 2b 所示, 激光光源垂直平面向上, 使激光平分喷嘴出口圆孔。激光最窄光腰位于喷嘴与底板间的流域中, 厚度约为 1 mm。将 CCD 相机垂直于片光源。在拍摄前, 将精度为 0.1 mm 的不锈钢刻度尺放置在激光片光处, 进行距离标定, 以减少套筒曲率对刻度的影响。

图 2 试验装置与 PIV 测试系统

试验流域图像由 CCD 照相机在单帧模式下获得, 图像像素为 $1\ 280 \times 800$ 。相机拍照频率为 400 Hz, 在连续拍照数中, 每张照片间的时间间隔为 0.002 5 s, 取 60 张照片为一个时刻, 对应的流动时间为 0.15 s。用 PIV 系统内置的处理工具进行处理, 即可获得速度矢量、涡量与流域中的含能大尺度结构等。

2 结果与分析

2.1 喷嘴端面倒角的影响

对 PIV 拍摄结果进行处理, 其试验结果速度云图如图 3 所示。由图 3a 可知, 0.1 L/min 流量下, 自喷嘴口射出的射流与间隙内的其他流体具有较大速度梯度, 存在较强的剪切作用力。因此诱导喷嘴壁上靠近出口处的流体向射流主体靠近并随之移动。当射流撞击到壁面, 射流中心处的速度变为零, 成为滞止点, 射流边界处的流体沿壁面流动, 由于喷嘴与壁面的约束, 沿壁面流动的流体向上内旋, 发展为一次涡环。同时, 在一次涡环外的间隙内产生与一次涡环旋向相反的二次涡环, 二次涡环可称为一次涡环的伴随涡。

在 0.1 L/min 流量下, 二次涡距离间隙外沿无充分空间发展三次涡, 因此在间隙外产生伴随涡。随着流量的增加, 一次涡与二次涡尺度扩大, 直到二尺涡扩展到间隙外延, 间隙外伴随涡消失, 流场诱导向下流动。如图 3b 所示, 到 0.3 L/min 流量时, 一次涡与二次涡最大, 二次涡到达间隙外沿。此结果与本课题组之前的试验结果一致。

当喷嘴为圆角型喷嘴时, 间隙内的流场结构发生变化。如图 3c 所示, 0.1 L/min 流量时, 喷嘴壁面约束的变化改变了冲击射流的受限条件, 因此间隙内外流体的流动模式发生了改变。在间隙内, 一次涡与二尺涡同时消失, 圆角型喷嘴的轮廓使得间隙外的流体可以被卷吸到间隙内, 这抑制了涡环的发生, 使得间隙内的流动模式变化为卷吸模式; 在间隙外, 靠近喷嘴壁面的流体沿壁面卷吸进间隙, 并随射流沿壁面射出, 形成壁面射流。间隙外远离喷嘴壁面的流体, 也因壁面射流的诱导与剪切作用, 向下流动, 并扩大了壁面射流的厚度。增加射流流量, 当流量仅扩大到 0.15 L/min 时, 流场随即发生显著变化。在喷嘴两侧的间隙外流域出现两对对称涡旋, 为了解涡旋产生的原因, 对此流量下的流场进行更加深入的研究。

图3 不同轮廓与不同流量时均速度云图

2.2 间隙流场的瞬态变化

在间隙流场中, 涡旋的迁移过程发展十分迅速, 为更好地对其分析研究, 本文从大量试验数据中, 完整地截取了一段连续的时间序列图片, 总共有180张, 与之对应的物理时间为0.45 s, 经处理得到图4。图4中的3个时刻其实为3个连续的微时间段, 每个微时间段里均包含60张照片, 每张图均为连续微时间段内的均处理结果。

图4 不同时刻时均速度云图

由图4可知, 间隙外涡旋位置呈现出空间的动态变化。在间隙外流域靠近喷嘴外沿处, 壁面射流具有较高的速度, 因此会与周围流体发生剧烈的剪切作用, 导致产生尺寸较小的涡旋。随着壁面射流的向下发展, 涡旋也随之向下运动, 并不断远离壁面。在发展过程中, 涡旋不断的与周围流体相互掺混, 吸收壁面射流的能量, 使尺寸也不断变大。随

着涡旋的增大, 对间隙外流域的扰动也随之变大。壁面射流速度的降低, 导致涡旋能量的减少, 同时涡旋与周围流体的剪切与摩擦消耗了涡旋中的能量, 使得涡旋的速度减少, 并最终消失。

图4a中1时刻时, 间隙外流域中出现两对对称涡旋。以左侧为例, 其中小涡旋位于壁面处, 并靠近喷嘴, 横坐标为30 mm; 大涡旋位于远离壁面的流域中, 其中心坐标为14 mm。图4b中2时刻时, 仍以左侧为例, 间隙外流域出现三个涡旋。最小涡旋出现在横坐标为32 mm处, 是剪切作用产生的最新涡旋。此时, 1时刻的两个涡旋已分别向下发展运动。其1时刻小涡旋坐标为24 mm, 大涡旋坐标为12 mm。图4c中3时刻时, 左侧流域中仅有二个涡旋, 其表现形态与1时刻速度云图一致, 两个涡旋的坐标分别为26 mm和10 mm。从以上3个时刻时均速度云图中的不同涡旋的位置与迁移变化中可以看出, 涡旋产生、发展和消亡呈现出与时间和空间的周期性特征。本例中, 一个涡旋的存在周期约为0.6 s, 在空间上呈现出其从喷嘴外沿产生到逐渐远离间隙, 并最终耗散掉的周期性迁移现象。

2.3 间隙流场的涡量分析

在涡旋运动中, 流场中存在着不同大小的涡, 其位置与运动方向均不一致。为更好地揭示本试验中涡旋运动的规律, 特对图4中不同时刻时均速度场进行涡量分析, 以对涡旋进行进一步解析。涡量被定义为流体运动速度的旋度, 其表达式如式(1)所示, 由于本文流场为2D-PIV系统拍摄所得, 其二维流场中的涡量方向垂直于X-Y平面, 正方向为垂直平面向外。所以, 其涡量表达式如式(2)所示

$$\Omega = \nabla \times \mathbf{v} = 2\omega \quad (1)$$

$$\Omega_z = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \quad (2)$$

从图 5 时均涡量分布图可以看出, 喷嘴两侧间隙外流场的涡量大小和方向与速度云图中的涡旋的位置与旋向高度相关。流场中涡旋处涡量绝对值最大, 正负由其旋向决定, 顺时针转动时为负值, 逆时针转动时为正值。涡旋处涡量等值线近似分布为同心圆, 其绝对值大小由内向外依次减小。同时在涡旋周围的涡量矢量与其涡量矢量旋向相反, 其绝对值大小略小于涡旋处的涡量值。这充分说明了流体中能量较高的涡旋与周围流体发生的剧烈剪切作用, 同时还导致附近可能产生相反的涡旋。

图 5 不同时刻时均涡量分布图

在间隙与喷嘴外沿处, 均存在涡量值为 0 的等值线。沿间隙向外, 主要涡量的绝对值先变大后减小。较大的涡量均靠近壁面, 较小的涡量远离壁面。这充分说明了含能较高的壁面射流由于与周围流体的剧烈剪切与掺混作用, 促使了能量的交换, 使得靠近壁面处的涡量值较大; 随后在涡旋向外发展中, 与周围流体的剪切耗散了能量, 使得涡量值变小。

流域中涡量的大小与位置随时间在不断的变化迁移。以图 5 喷嘴右侧为例。图 5a 中 1 时刻时, 主涡 1 在 X 轴上位于 68 mm 处, 其涡量最大值为 600 s^{-1} , 主涡 2 位于 X 轴上位于 84 mm 处, 其涡量最大值为 400 s^{-1} ; 图 5b 中 2 时刻时, 主涡 1 在 X 轴上位于 70 mm 处, 开始远离壁面。其涡量最大值为 600 s^{-1} , 但其最大涡量的面积减少, 主涡 2 在 X 轴上位于 85 mm 处, 其横向运动, 其涡量最大值为 400 s^{-1} , 同样涡量最大值面积减少。图 5c 中 3

时刻时, 涡继续迁移。主涡 1 位于 X 轴 74 mm 处, 涡量最大值保持不变, 面积进一步减小, 而主涡 2 迁移至 X 轴 87 mm 处, 涡量最大值减小为 300 s^{-1} 。以上涡量值的变化都表现出与时间相关的动态特性, 这与时均速度场云图表现出相似的规律。

2.4 间隙流场的 POD 分析

本征正交分解(POD)方法对于研究复杂随机场具有很好的效果。它于 1967 年由 LUMLEY 等^[23]应用于湍流流场研究中。通过降阶分解, 提取出前几阶含能大尺度结构, 能对流场变化特性进行高效研究。本节将利用 POD 方法对采用 PIV 技术拍摄的流场瞬态照片进行分析, 研究近距离冲击射流涡旋迁移过程瞬态场中的含能大尺度分布特点。在连续流场中, 对截取的每一时刻进行 POD 方法处理, 每个时刻可得到 60 阶模态和其所对应的特征值。特征值的大小表征为占总能量的百分比, 随模态的增加而减少。因此本节选择前 20 阶模态的特性值进行研究分析。

由图 6 可知, 1 阶模态所含能量均在 10% 以上, 1 时刻 1 阶含能最高, 大约 22.5%。2 阶至高阶模态, 不同时刻特征值大小高度一致, 特征值变化情况呈现出相同的规律, 均单调递减。前 4 阶模态均具有突出的能量, 其在动态流场变化中占主要地位, 高阶模态含能较少且较为均匀, 对流场影响较小。

图 6 不同时刻前 20 阶特征值

对流场进行进一步分析, 选取 2 时刻进行含能大尺度结构研究。利用 POD 方法得到其瞬态场前 4 阶空间模态的含能云图。从图 7a 可以看出, 含能最大的第 1 阶模态中的含能大尺度结构存在于喷嘴外沿靠近壁面处, 并且在喷嘴两侧对称存在。从图中可以看出, 第 1 阶模态中的含能大尺度结构有向外扩散发展的趋势, 这在第 2 阶模态含能大尺度结构的形状和范围中可以印证。由图 7b 可知, 第 2 阶模态含能大尺度结构相比于第 1 阶, 其含能核心更加

远离喷嘴外沿与壁面,含能大尺度结构面积也更大,向外运动的趋势也更加明显。第 3 阶与第 4 阶的含能大尺度结构更加集中于间隙与喷嘴外沿,其变化发展趋势也表现出相同的特点。从以上可以看出,

在前 4 阶空间模态中,含能大尺度结构均主要存在于喷嘴外沿和间隙内,间隙外的含能大尺度较小且分散,这很好地揭示了涡旋产生的能量来源及其耗散过程。

图 7 2 时刻前 4 阶空间模态

通过对瞬态速度场进行前 4 阶重构,我们能进一步分析脉动速度的变化情况,进而了解近距离冲击射流的流动特性。图 8 为前 4 阶模态重构瞬时脉动速度场。从图 8 中可以看出,脉动速度核心位于间隙内和喷嘴外沿靠近壁面处,速度大小均存在向外减弱的趋势,这与图 7 中含能大尺度结构的位置与变化高度一致。在图 8a 中,速度核心值较大,面积较小且位于喷嘴外沿靠近壁面处,外流域中,脉

动速度值较小。而在下一个瞬态脉动速度场中,速度核心值减小,面积向外扩大,且位置向外流域迁移。外流域中脉动速度值进一步变大,存在面积扩大的趋势,如图 8b 所示。在图 8c 中,脉动速度核心值又重新变大,间隙内与喷嘴外沿均存在,随后脉动速度值又迅速下降,如图 8d 所示。这种脉动速度峰值大小的快速变化表现出脉动速度场的突变性,其周期性迁移变化规律与时均速度场一致。

图 8 2 时刻前 4 阶模态重构脉动速度场

3 结论

利用 PIV 技术对冲击距离 $H/D=1$ 时的射流流场开展了试验测量,揭示了近距离下冲击射流的动态流场特性,主要结论如下。

(1) 雷诺数 Re 对不同喷嘴端面轮廓(壁面约束)的旋涡生成和迁移影响规律不同。 Re 对直角型喷嘴

的双涡环模式流态影响较小,但对圆角型喷嘴卷吸流态影响较大,当雷诺数增大到一定程度,射流间隙内出现动态对称涡旋对。

(2) 圆角型喷嘴射流冲击产生的动态对称涡旋,其产生、发展和消亡过程呈现出与时间和空间的周期性特征。在涡旋迁移过程,其时间周期相对固定,周期大小与具体试验工况有关。在空间上呈现出从喷嘴外沿产生到逐渐远离间隙,并最终耗散

掉到外流场的周期性迁移现象。

(3) 涡量分析得到了近距离冲击射流时均场的涡量大小与分布情况, 揭示了动态涡旋产生的能量来源。同时, 也表明了间隙中不同时刻涡量的变化情况以及涡旋能量的耗散过程。

(4) 通过 POD 分析, 识别了瞬态场中间隙内不同模态的含能大尺度结构的位置分布, 从微观时间尺度揭示了间隙外涡旋产生的能量来源与变化规律。同时前几阶模态重构脉动速度场的峰值变化进一步说明瞬态速度场的突变性与周期性特征。

参 考 文 献

- [1] SABATO M, FREGNI A, STALIO E, et al. Numerical study of submerged impinging jets for power electronics cooling[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 141: 707-718.
- [2] RAIZNER M, RINSKY V, GROSSMAN G, et al. The effect of jet pulsation on the flow field of a round impinging jet and the radially expanding wall jet[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 140: 606-619.
- [3] CALISKAN S, BASKAYA S, CALISIR T. Experimental and numerical investigation of geometry effects on multiple impinging air jets[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 75: 685-703.
- [4] 马鹏程, 唐志国, 刘轻轻, 等. 新型单圆锥体热沉单孔射流散热数值模拟[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(24): 136-141.
MA Pengcheng, TANG Zhiguo, LIU Qingqing, et al. Numerical simulation of characteristic of heat transfer for jet impingement with new single cone heat sink through single spray nozzle[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(24): 136-141.
- [5] CHANG S W, SHEN H D. Heat transfer of impinging jet array with web-patterned grooves on nozzle plate[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 141: 129-144.
- [6] 谢军龙, 张祎, 郭宝坤, 等. 射流冲击圆锥噪声特性试验及数值分析[J]. *工程热物理学报*, 2016, 37(6): 1212-1217.
XIE Junlong, ZHANG Yi, GUO Baokun, et al. Experimental and numerical analysis of jet impact cone noise characteristics[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2016, 37(6): 1212-1217.
- [7] LI Y M, LI B K, QI F S, et al. Flow and heat transfer of parallel multiple jets obliquely impinging on a flat surface[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 133: 588-603.
- [8] LI S Y, ZHANG Y Y, XU B. Correlation analysis of superheated liquid jet breakup to bubble formation in a transparent slit nozzle[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2015, 68: 452-458.
- [9] 焦磊, 王乐勤, 徐如良, 等. 冲击高度对淹没冲击射流影响的数值预测[J]. *工程热物理学报*, 2005(5): 773-775.
JIAO Lei, WANG Leqin, XU Ruliang, et al. Numerical prediction of influence of impact height on submerged impact jet[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2005(5): 773-775.
- [10] ROGER E K. Impinging planar jet flow on a horizontal surface with slip[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2016, 808: 258-289.
- [11] WANG Y P, ROGER E K. Impinging jet flow and hydraulic jump on a rotating disk[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2018, 839: 525-560.
- [12] WILKE R, JORN S. Statistics of fully turbulent impinging jets[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2017, 825: 795-824.
- [13] DAIRAY T, FORTUNE V, LAMBALLAIS E, et al. Direct numerical simulation of a turbulent jet impinging on a heated wall[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2015, 764: 362-394.
- [14] XU Y, WANG J J, FENG L H, et al. Laminar vortex rings impinging onto porous walls with a constant porosity[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2018, 837: 729-764.
- [15] GRECO C S, CARDONE G, SORIA J. On the behavior of impinging zero-net-mass-flux jets[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2017, 810: 25-59.
- [16] ASSELIN D J, WILLIAMSON C H K. Influence of a wall on the three-dimensional dynamics of a vortex pair[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2017, 817: 339-373.
- [17] 刘璐璐, 翟树成, 张国平, 等. 平板湍流边界层流向—法向平面发卡涡的 PIV 试验研究[J]. *船舶力学*, 2016, 20(Z1): 23-30.
LIU Lulu, ZHAI Shucheng, ZHANG Guoping, et al. PIV experimental study on the flow direction of the flat turbulent boundary layer and the normal plane hairpin vortex[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2016, 20(Z1): 23-30.
- [18] VITO P, HICKEL S, NIKOLAUS A A. Unsteady effects

- of strong shock-wave/boundary-layer interaction at high Reynolds number[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2017, 823: 617-657.
- [19] 肖毅,熊良才. 无针注射射流穿透表皮机理理论研究[J]. *机械与电子*, 2012(4): 12-14.
XIAO Yi, XIONG Liangcai. Theoretical study on the mechanism of needle-free injection jet penetrating the epidermis[J]. *Machinery and Electronics*, 2012(4): 12-14.
- [20] 李登,李晓红,康勇,等. 风琴管喷嘴内表面粗糙度对高压射流特性的影响试验研究[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(17): 169-176.
LI Deng, LI Xiaohong, KANG Yong, et al. Experimental investigation on the influence of internal surface roughness of organ pipe nozzle on the characteristics of high pressure jet[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(17): 169-176.
- [21] WANG S Q, AHMAD B, LUCIEN B, et al. On the modelling of the switching mechanisms of a Coanda fluidic oscillator[J]. *Sensors and Actuators: A. Physical*, 2019, 299: 111618.
- [22] 朱玉川,李跃松. 射流伺服阀用放大型超磁致伸缩执行器建模及分析[J]. *航空学报*, 2014, 35(11): 3156-3165.
ZHU Yuchuan, LI Yuesong. Modeling and analysis of enlarged giant magnetostrictive actuator for jet servo valve [J]. *Acta Aeronautica*, 2014, 35 (11): 3156-3165.
- [23] LUMLEY J L, HOLMES P, BERKOOZ G. The proper orthogonal de-composition in the analysis of turbulent flows[J]. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 1993, 25: 539-575.

作者简介: 胡建军(通信作者),男,1982年出生,博士,副教授,博士研究生导师。主要研究方向为液压流体力学。

E-mail: kewe729@163.com

杨子文,男,1995年出生。主要研究方向为流体力学。

E-mail: cq.yangziwen@qq.com