

# 壁面微缺陷影响下的介观尺度冲击射流流场特性

洪睿<sup>1,4</sup> 胡建军<sup>1,2\*</sup> 肖洋<sup>1</sup> 金瑶兰<sup>3</sup> 姚静<sup>2</sup> 孔祥东<sup>2</sup>

1. 燕山大学建筑工程与力学学院, 秦皇岛, 066004

2. 燕山大学机械工程学院, 秦皇岛, 066004

3. 中国船舶集团有限公司第七〇四研究所, 上海, 201612

4. 中国汽车工程研究院股份有限公司, 重庆, 401122

**摘要:**为研究射流管阀喷嘴-接受器前置级长期服役后, 冲蚀磨损及气穴气蚀现象造成的微缺陷对流场流动规律和流体能量转换特性的影响, 利用显微粒子图像测速技术对原始介观尺度近距离射流冲击微缺陷靶板时方腔内的流动结构和涡旋分布进行直接试验观测, 探究了微缺陷大小、形状与位置对涡旋形态及其演化规律的影响, 揭示了方腔内涡核分裂与归一现象背后蕴含的机理。研究结果表明: 壁面微缺陷的存在直接影响壁面射流能量的传递与耗散, 导致射流间隙和方腔内的涡旋结构和能量分布与无缺陷时显著不同; 随着微凹坑尺寸的增大, 两侧方腔内类圆形涡旋对呈现出逐渐分裂并远离底部壁面的趋势; 而随着微凸起尺寸的增大, 两侧方腔内类茧形涡旋对呈现出逐渐归一并靠近底部表面的演化规律。

**关键词:**射流管阀喷嘴; 介观尺度; 冲击射流; 微缺陷; 显微粒子图像测速(Micro-PIV)

**中图分类号:** TB126

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.10.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Flow Field Characteristics of Mesoscopic Impinging Jets under Influences of Wall Micro-defects

HONG Rui<sup>1,4</sup> HU Jianjun<sup>1,2\*</sup> XIAO Yang<sup>1</sup> JIN Yaolan<sup>3</sup> YAO Jing<sup>2</sup> KONG Xiangdong<sup>2</sup>

1. School of Civil Engineering and Mechanics, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei, 066004

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

3. The No. 704 Research Institute of China State Shipbuilding Corporation Limited, Shanghai, 201612

4. China Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd., Chongqing, 401122

**Abstract:** In order to study the effects of micro-defects caused by erosion wear and cavitation on flow field law and fluid energy conversion characteristics after long-term service of the nozzle-receiver pilot stage of the jet pipe servo valves. Micro-PIV technology was used to directly test the flow structure and vortex distribution in the square cavity when the original mesoscopic close-range jet impacted the micro-defect target plate. The influences of micro-defect size, shape, and location on vortex morphology and the evolution were investigated, and the underlying mechanism governing the splitting and merging phenomena of vortex cores within a square cavity were elucidated. The results show that the existence of wall micro-defects directly affects the energy transfer and dissipation of the wall jets, leading to a significantly different vortex structure and energy distribution in the jet gap and square cavity than that when there are no defects. As the size of the micro-concave increases, the circular-like vortex pairs in the square cavity on both sides show a tendency to gradually split and move away from the bottom wall. While as the size of micro-convex increases, the cocoon-like vortex pairs in the square cavity on both sides show an evolutionary law of gradually normalization and moving closer to that of the bottom wall.

**Key words:** jet pipe servo valves; meso scale; impingement jet; micro-defect; micro-particle image velocimetry(Micro-PIV)

### 0 引言

射流管伺服阀在航空航天、舰船以及各种军事装备的高精度液压伺服系统中应用广泛<sup>[1-2]</sup>, 在

服役过程中可能会因磨损、疲劳、腐蚀等原因而性能恶化, 其中油质劣化会导致液压元件出现卡滞、泄漏、磨损退化等故障现象<sup>[3-6]</sup>。即使配置有全流通的非旁路型滤油器, 但长期服役过程中难免有“漏网”的污染物进入喷嘴-接受器前置级。

阎耀保等<sup>[7]</sup>对服役五年后返厂的CSDY型射流管伺服阀进行拆解, 发现接受器劈尖和滑阀阀

收稿日期: 2024-05-20

基金项目: 国家自然科学基金(51890881); 中央引导地方科技发展资金(226Z1902G)

芯表面发生了严重的局部冲蚀磨损现象,劈尖冲蚀磨损高度为0.2 mm。褚渊博等<sup>[8]</sup>对射流管接受器开展了冲蚀磨损的数值模拟,发现左右接收孔所夹中间内壁位置磨损最为严重。LI等<sup>[9]</sup>利用数字显微镜和高速摄像技术对喷嘴挡板阀前置级流场的气穴现象进行了直接实验观测。ZHAO等<sup>[10]</sup>建立轴向柱塞泵动态CFD模型,模拟了淹没空化射流气泡溃灭导致回球面阀板和缸体表面的剥蚀过程。OKITA等<sup>[11]</sup>通过流固耦合模拟发现,液压系统中近壁面气泡溃灭会引起壁面内部形成高等应力区域,进而引起固体表面气蚀损伤。高压液压系统能满足大载荷和轻量化的需求,但也会带来严重的气蚀问题,进而降低系统的稳定性、可靠性和输出精度。严重的冲蚀磨损以及气穴气蚀现象会造成射流管伺服阀服役性能下降、零偏与零漂的工作点变动以及失效等现象。

在认识到冲蚀磨损和气蚀现象存在的不利影响后,国内外学者针对其背后蕴含的机理和抑制方法开展了大量研究。TRUMMLER等<sup>[12]</sup>采用嵌入均匀混合物模型的正压平衡空化方法对空化液体射流的冲蚀势能进行了数值模拟。KATSUMATA等<sup>[13]</sup>利用不同形状微米尺度氧化铝颗粒进行射流冲蚀试验,发现冲蚀速度和冲蚀表面的形貌强烈依赖于冲蚀颗粒的大小和形状。YE等<sup>[14-16]</sup>通过超声空蚀试验分析了不同空化条件下材料的表面形貌、粗糙度和维氏硬度的变化,基于球面压痕理论进行超声空化试验与反演分析,确定了微射流冲击下材料表面形成的微凹坑径深比与微射流速度及直径的定量关系。还有研究人员提出通过改变喷嘴挡板阀挡板形状<sup>[17]</sup>、利用连续微射流<sup>[18]</sup>以及采用三角形喷嘴<sup>[19]</sup>来抑制喷嘴挡板阀前置级内的气穴现象。

已有研究主要聚焦于冲蚀磨损和气穴气蚀现象的生成机理及抑制方法,污染颗粒物、气泡溃灭以及零件毛刺造成的微缺陷对流场流动规律和流体能量转换特性的影响尚待揭示。本文以射流管伺服阀为研究载体,针对具有不同形状、大小与位置的壁面微缺陷,利用微粒粒子图像测速(micro-particle image velocimetry, Micro-PIV)技术对强受限空间内介观尺度冲击射流中方腔内的流动结构和涡旋分布进行直接试验观测,探究了微缺陷几何特征对涡旋形态及其演化规律的影响,揭示了方腔内涡核的分裂与归一现象背后蕴含的机理,从而为射流管伺服阀关键技术突破提供理论参考。

## 1 试验集成块设计

### 1.1 试验集成块的结构及封装

射流管伺服阀的核心工作元件是由射流管-喷嘴组件和接受器构成的射流放大器。喷嘴-接受器前置级内部流动存在显著的跨尺度流动特征,即流域的总体尺度还处在宏观尺度,但射流本身及冲击区特征尺寸仅在几十到几百微米量级,即处在宏观和微观之间的介观尺度。因此,前置级内部流动具有高压高速、几何结构复杂、跨尺度流动的特点。

为了测量喷嘴-接受器前置级的流场,本文设计加工了一个接受器-喷嘴集成块,集成块由6010铝合金制成。图1为集成块半剖结构的3D爆炸图,详细展示了其结构设计中主要部件的组装细节及其相对位置关系。

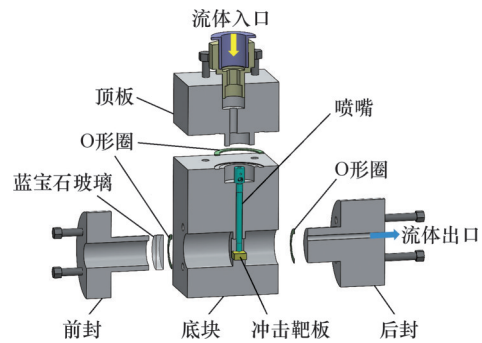


图1 集成块3D-CAD爆炸图

Fig.1 Integrated block 3D-CAD explosion diagram

集成块由进水顶板、喷嘴-冲击靶板组件、蓝宝石玻璃观察窗和具有冲击方腔的底块组成,各连接部件之间设置O形圈来确保方腔的密封性。进水口设置250目尼龙滤网以滤除水中的污染物。

为了应对物理空间封闭、介观尺度、高压高速带来的三重挑战,在集成块的待测区域开一个观察窗口,将蓝宝石镜片镶嵌在开窗位置,实现观测和承压的双重功能。

这种封装几何结构实现了强受限空间内介观尺度近距离淹没冲击射流,射流通过快插进入集成块蓄水池,沿射流管进入微喷嘴,冲击靶板后进入方腔,最终从集成块后上方的孔口流出,进入回收水箱。

### 1.2 喷嘴及冲击靶板的几何描述

本试验基于动力学相似(雷诺相似准则)原理及原始介观尺度简化抽取前置级模型,雷诺相似准则为

$$\frac{\rho_p v_p l_p}{\mu_p} = \frac{\rho_m v_m l_m}{\mu_m} \quad (1)$$

式中： $\rho$ 为流体密度； $v$ 为流体速度； $l$ 为特征长度，本文指喷嘴孔径； $\mu$ 为流体动力黏性系数；下标p和m分别表示原型阀和试验模型。

图2展示了集成块待测面的详细几何参数和PIV待测面的位置，通过在冲击靶板下方添加不同厚度的垫片来调整喷嘴与靶板之间的冲击距离<sup>[20]</sup>。为了精准测量间隙高度，利用显微镜镜头根据喷嘴及方腔尺寸大小进行自标定。如图2所示，待测面是通过喷孔和微缺陷中心的平面，实际尺寸为5 mm×5 mm，定义喷嘴与冲击靶板之间的间隙高度为 $H$ ，微缺陷直径为 $D$ ，喷嘴直径为 $d$ 。在射流冲击力和剪切力作用下，缺陷边缘往往呈现为圆弧状，因此本文设置微缺陷形状为半球形微凹坑和微凸起。依据文献[7]中劈尖实际冲蚀磨损尺寸，综合考虑射流管阀服役时间和缺

陷加工精度，对缺陷尺寸进行适当放大，直径分别为 $2d$ 、 $4d$ 、 $6d$ 。考虑到CCD相机的同轴光模块透射波长大于570 nm的荧光，液压油与荧光示踪粒子的反射光波段都处于该区间，采用液压油作为流动介质时，CCD相机无法从拍摄图像中获取粒子位移信息，因此试验模型采用水作为流动介质，根据式(1)进行等效，几何参数和工作参数如表1所示。试验集成块实物喷嘴及冲击靶板的详细尺寸参数如图3所示，所用的射流管由上海衡拓液压控制技术有限公司生产，射流管直径为2.3 mm，喷嘴孔径为0.2 mm。由于激光和显微镜镜头的同轴照射与成像会在射流管管壁产生强烈光反射现象，为避免观测区域背景白噪声对粒子图像的处理分析形成干扰，对集成块整体进行发黑处理。

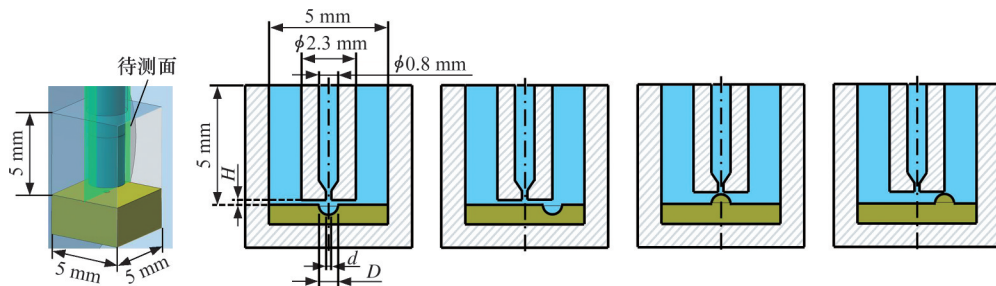


图2 射流冲击微缺陷靶板原理图

Fig.2 Diagram of jet impingement on micro-defect target plate

表1 雷诺相似计算

Tab.1 Reynolds similarity calculation

参数	原始模型	试验模型
工作介质	15号航空液压油	水
密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	855	998.2
动力黏度 $\mu / (\text{Pa} \cdot \text{s})$	0.0125	0.001 003
喷嘴孔径 $d / \text{mm}$	0.2	0.2
流量 $q_v / (\text{mL} \cdot \text{min}^{-1})$	450	29.99

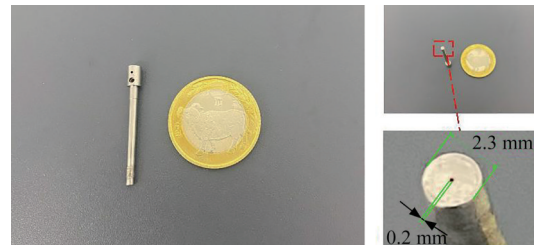
## 2 试验系统及分析方法

### 2.1 Micro-PIV 系统

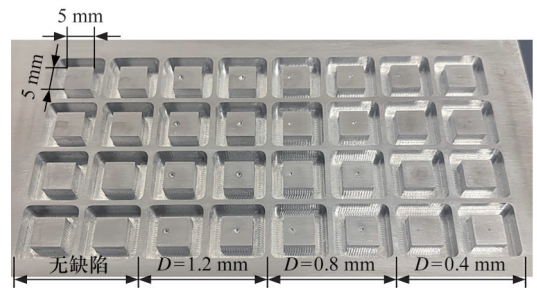
本文主要研究壁面微缺陷影响下的介观尺度近距离冲击射流流动特性。图4所示为搭建的1:1比例还原的介观尺度冲击射流试验台，主要由SMC气源系统和Micro-PIV系统组成。

SMC气源系统由螺杆式空气压缩机、储气罐、电压控制模块、计算机、气-液罐组成，采用LabVIEW编制数据采集界面NI系统进行实时压力数据监测与控制，经试验数据验证，基于均匀流场测量的压力系统测量误差小于0.001 MPa，可以实现维持高精度恒压的目的。

如图4所示，螺杆式空气压缩机、储气罐作为



(a) 喷嘴实物

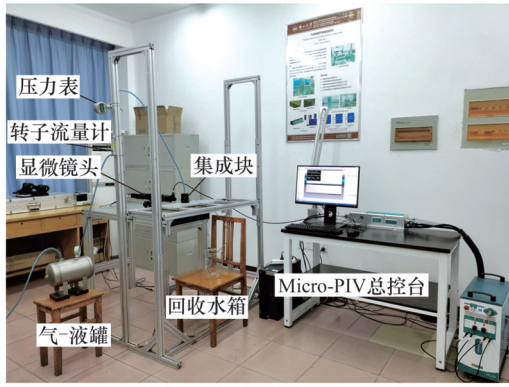


(b) 具有微缺陷的冲击靶板实物

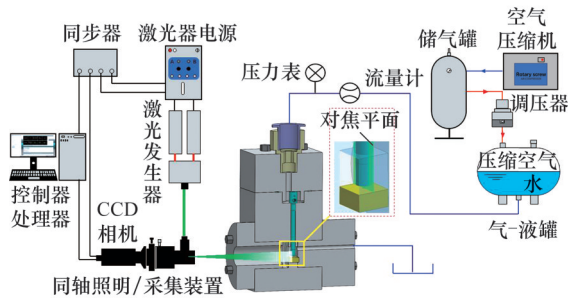
图3 喷嘴和冲击靶板的详细尺寸

Fig.3 Detailed schematic diagram of nozzle and impact target dimensions

气源向气-液罐中注入压力维持极为稳定的空气，推动均匀播撒荧光示踪粒子(1~20  $\mu\text{m}$ , PMMA-RhB-Frak-Particles)的水注入集成块入口完成测量，流量通过调节气源压力来实现精密控制，设置



(a) 介观冲击射流试验台



(b) 原理示意图

图4 冲击射流试验系统

Fig.4 Impact jet test system

数字压力表和玻璃转子流量计来实时监控集成块入口压力与流量。

本文将 Dantec 公司生产的低频 2D-PIV 系统经改造装载介观尺度显微镜镜头及同轴照明光路形成 Micro-PIV 试验系统,该系统主要由光学照明系统、图像采集系统和图像处理系统组成。光学照明系统采用双谐振脉冲 Nd:YAG 固体激光器,输出波长为 532 nm 的绿色可见光。图像采集系统为 FlowSense 2M CCD 相机,配有 K2 长工作距离显微镜镜头,分辨率为 1600 pixels×1200 pixels。信号同步器控制 CCD 相机和激光脉冲的触发延迟,光学照明系统和图像采集系统通过液态导光臂和 CF-2 物镜连接实现同轴照明与成像,同轴光模块透射波长大于 570 nm 的粉红色荧光,通过移动焦平面捕捉待测平面的流动图像。图像处理系统依托于 Dynamic Studio 软件进行数据采集控制并对原始粒子图像进行分析处理。

试验中,激光器设置触发频率为 15 Hz,跨帧时间根据连续两个曝光时间内示踪粒子最大位移约为查问区边长 1/3~1/2 来确定。低能量激光与相机显微镜镜头同轴照射流场待测区域,捕捉荧光示踪粒子在焦平面内的高速位移,CCD 相机在双帧双曝光模式下连续拍摄包含粒子位移信息的原始图像对,原始图像后处理流程如图 5 所示。

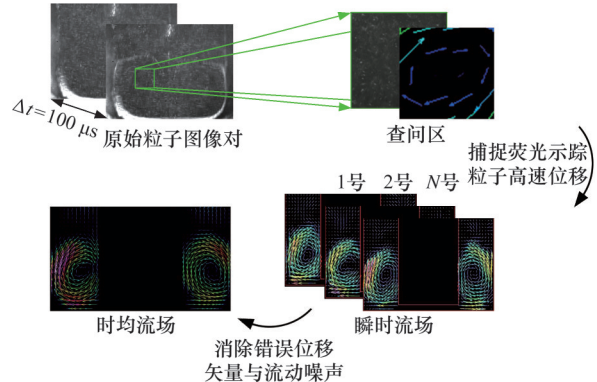


图5 图像后处理流程

Fig.5 Image post-processing process

## 2.2 涡识别方法

湍流流动中的能量主要分布于大尺度拟序结构中,这对湍动能的产生及湍流的维持具有决定性作用<sup>[19]</sup>。不同尺度拟序结构瞬息万变的生成、发展和破碎过程存在能量的传递和耗散,涡旋运动剧烈的区域也是能量传递和耗散的主要区域<sup>[21-25]</sup>。由于 Micro-PIV 试验结果的图像后处理一般面临粒子浓度低、图像质量差、布朗运动影响等问题<sup>[26-27]</sup>,因此对试验结果进行涡核识别是一种有效提取流场特性的后处理方法。

研究人员试图利用涡量来识别涡核,获得湍流流动中的拟序结构。第一代涡识别办法即为涡量法,然而,现代流体力学研究表明“涡量”与“涡”虽然同为矢量,但二者的方向和大小是两个截然不同的概念。因此,为了更准确有效地捕捉涡结构,人们相继提出了一系列以特征值为基础的第二代涡识别方法<sup>[28-30]</sup>,但在实际应用中又都存在一些先天性的缺陷,如阈值的选择、剪切污染的存在、不具备涡结构的方向信息、无法同时识别强涡和弱涡等<sup>[31]</sup>。

为克服第一代和第二代涡识别方法存在的问题,2016年,LIU等<sup>[32]</sup>提出了第三代涡识别方法,其中 $\Omega$ 涡识别方法将涡量 $\omega$ 分解为旋转部分和非旋转部分,即

$$\omega = R + S \quad (2)$$

其中, $R$ 为旋转部分涡量; $S$ 为非旋转部分涡量,即纯剪切。引入参数 $\Omega$ ,代表旋转部分涡量大小占总涡量大小的比例,估算 $\Omega$ 的公式如下:

$$\Omega = \frac{\|B\|_F^2}{\|A\|_F^2 + \|B\|_F^2 + \epsilon} \quad (3)$$

式中, $\|\cdot\|_F$ 表示矩阵的 Frobenius 范数; $A$ 为对称张量; $B$ 为反对称张量;分母项 $\epsilon$ 为一个小的正数,防止计算出现分母为极小数时误差极大的问题。

显然有  $0 \leq \Omega \leq 1$ , 可以将其理解为涡量的浓度, 一般采用  $\Omega = 0.52$  来作为涡旋边界的判据。经验证, 第三代涡识别方法可以有效克服第二代涡识别方法的先天性缺陷, 特别是对阈值不敏感, 能同时捕捉到强涡和弱涡, 因此本文选用  $\Omega$  方法来识别流场中的涡结构<sup>[32]</sup>。

### 3 结果与讨论

由于试验过程中无法同时精确捕捉方腔和间隙内的流动基本结构, 因此对原始拍摄图像进行分区, 将间隙区域定义为遮挡面, 只分析占据主要视场范围的方腔区域。在本文采集的大量照片对

中, 将流场稳定后的照片对设定为初始照片对, 其采集时间设定为  $t = 0$ , 时间间隔  $\Delta t = 67 \text{ ms}$ , 取 13.3 s 内采集的 200 对连续照片的统计平均结果, 查问区设置为  $32 \text{ pixels} \times 32 \text{ pixels}$ 。本文基于时均速度场的试验结果进行进一步研究。

#### 3.1 微缺陷形状的影响

在微缺陷直径  $D/d = 4$  的情况下, 设置微缺陷形状为下凹半球弧面和上拱半球弧面, 考虑到微凸起直径对喷嘴孔口的遮挡作用, 控制喷嘴端面到靶板的冲击距离  $H$  最小为  $0.5 \text{ mm}$ , 即间隙高度  $H/d = 2.5$ 。两侧方腔产生的特殊流动现象及涡核分布如图 6、图 7 所示。

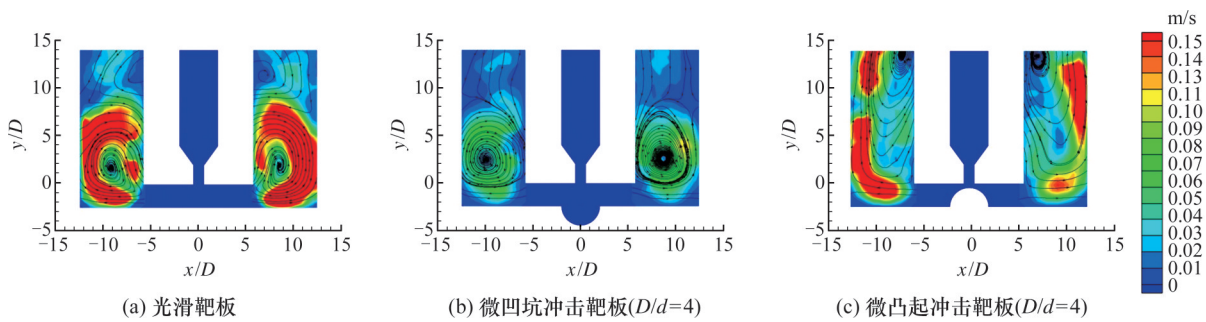


图 6 不同微缺陷下腔内时均速度场 ( $H/d = 2.5$ )

Fig.6 Time-averaged velocity field inside the cavity under different micro-defects ( $H/d = 2.5$ )

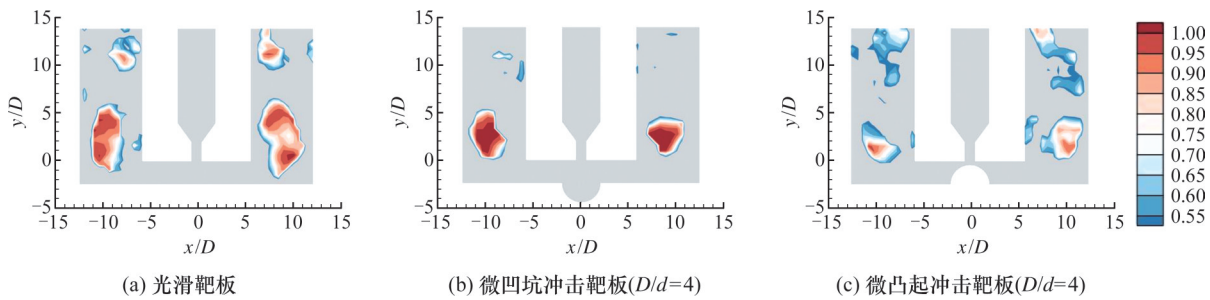


图 7 不同微缺陷下腔内涡核分布 ( $H/d = 2.5$ )

Fig.7 Vortex distribution inside the cavity under different microdefects ( $H/d = 2.5$ )

观察图 6、图 7 可知, 当冲击靶板为不具有微缺陷的光滑靶板时, 在两侧方腔形成占据  $2/3$  方腔大小、方向相反的对称类圆形涡旋对。自间隙逸出的壁面射流脱离射流管端壁约束并高速撞击方腔侧壁, 动能急剧减小, 实现了能量的迁移, 同时位于方腔上方远离间隙的流体受到壁面射流的诱导与剪切作用形成涡旋对。

对于微凹坑靶板工况, 两侧方腔同样形成了占据  $2/3$  腔体大小、方向相反的对称类圆形涡旋对, 但涡旋对的转速显著小于光滑靶板工况。这是因为微凹坑导致高速冲击射流的速度滞止区的位置发生迁移, 冲击射流在间隙以及向下凹陷的半球弧面空间得以发展, 撞击到微凹坑半球弧面底部后才紊动扩散发展, 虽然两侧方腔仍旧形成了对称类圆形涡旋对, 但其蕴含的能量已大不如

光滑靶板工况。

不同于微凹坑靶板工况下呈现的小转速涡旋对试验结果, 微凸起靶板工况中形成了占据整个方腔的高速对转类茧形涡旋对, 同时涡核识别结果显示两侧方腔有发展成上下双涡核结构的趋势。这是因为主射流一脱离喷嘴立即撞击到向上凸起的半球弧面, 随即沿着凸起弧面进入间隙形成壁面射流, 向外界方腔传递了大量的能量, 并形成高转速类茧形涡旋对。

可以看到两种形状微缺陷的试验结果并不一致, 因此后续分析需针对两种形态的微缺陷工况分别进行探讨。

#### 3.2 微缺陷大小的影响

在本节中, 对两种形状的微缺陷分别定义尺寸为  $D/d = 2$ 、 $D/d = 4$ 、 $D/d = 6$ 。对于微凹坑靶

板,为稳定维持喷嘴孔口流量,控制喷嘴端面到靶板的距离 $H$ 最小为0.2 mm,即间隙高度 $H/d=1$ ;对于微凸起靶板,考虑到微凸起直径对喷嘴孔口

的遮挡作用,控制喷嘴端面到靶板的距离 $H$ 最小为0.7 mm,即间隙高度 $H/d=3.5$ 。所获得的有效测量数据如图8、图9所示。

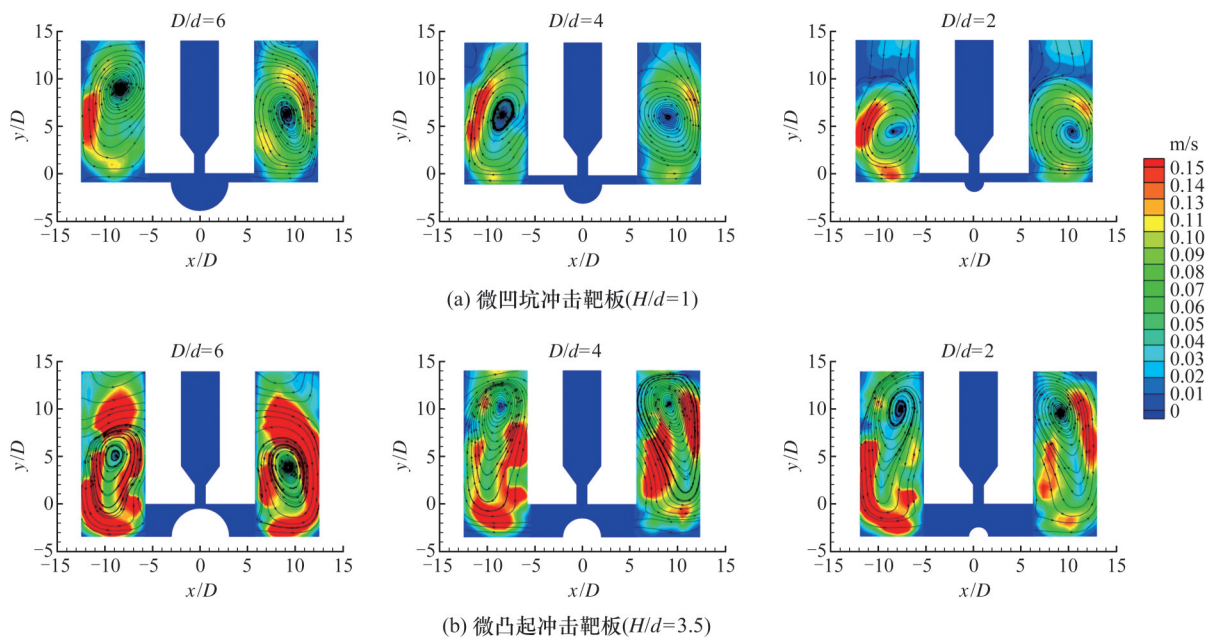


图8 不同微缺陷大小下腔内时均速度场

Fig.8 Velocity field inside the cavity under different sizes of micro-defects

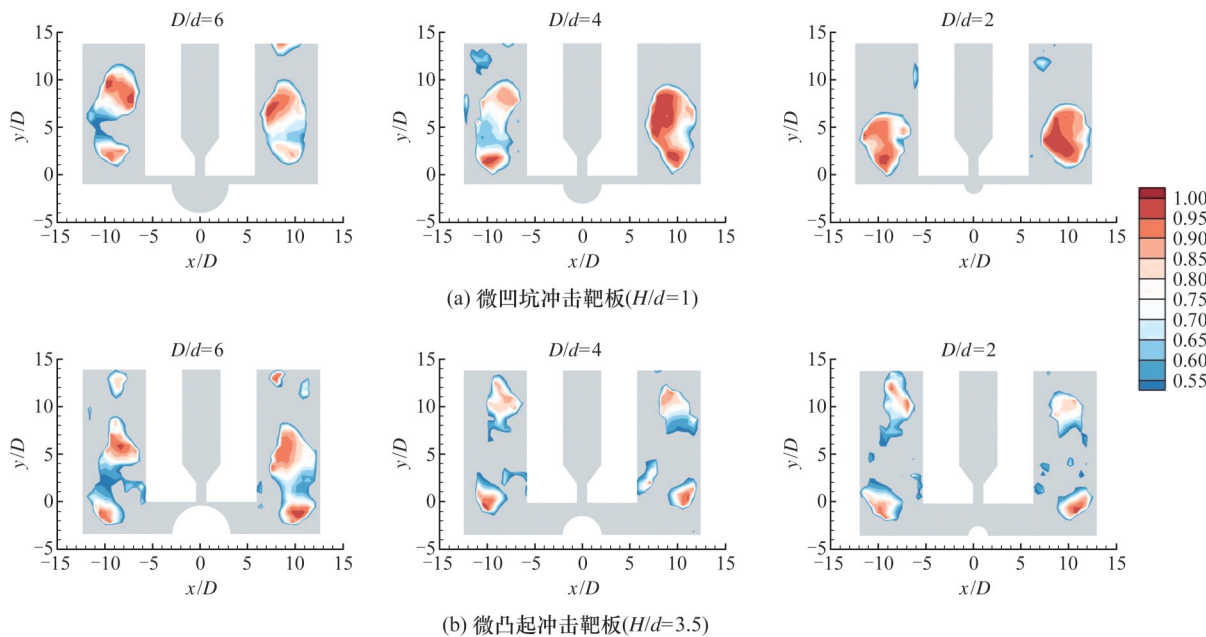


图9 不同微缺陷大小下的方腔涡核分布

Fig.9 Vortex distribution inside the cavity under different sizes of micro-defects

在间隙高度 $H/d=1$ 条件下,随着微凹坑尺寸的增大,方腔内流场结构中的两侧类圆形涡旋对逐渐变化为类茧形涡旋对,涡核呈现出远离方腔底部壁面的趋势。从图9中涡核的分布情况中可以看出,随着微凹坑尺寸的增大,方腔中的涡核由单一涡核逐渐分裂为两个主要的涡核。涡核分裂现象出现的原因可能是,随着微凹坑尺寸的增大,单位径向长度的弧面曲度变小,间隙空

间变大,使得冲击射流核心区内的流体有向两侧运动的趋势,进而导致壁面射流中蕴含的能量进一步增大,与方腔内低流速流体的剪切作用增强,使得方腔中涡旋更大,涡核也更远离方腔底部壁面。

在间隙高度 $H/d=3.5$ 条件下,随着微凸起尺寸的增大,方腔内涡旋的分布范围反而越来越小,由类茧形涡旋对逐渐变化为类圆形涡旋对。从图

9中同样可以看出,随着微凸起尺寸的增大,方腔中的两个涡核结构逐渐靠近演化为单涡核结构。涡核归一现象出现的原因可能是,由于微凸起尺寸增大,间隙空间减小,抑制了自由射流区的形成,使得冲击射流未完全发展,减小了壁面射流中蕴含的能量,进一步使得方腔中涡旋的强度降低,这也与涡核的表现一致。

### 3.3 微缺陷位置的影响

当微缺陷直径  $D/d=4$  时,对微缺陷在不同位置(与喷嘴同轴和移动到间隙边缘)时的两侧方腔流场进行试验观测,分为间隙高度  $H/d=1$  的微凹坑靶板工况以及间隙高度  $H/d=2.5$  的微凸起靶板工况。微缺陷不同位置下的方腔时均速度场和涡核分布结果如图 10、图 11 所示。

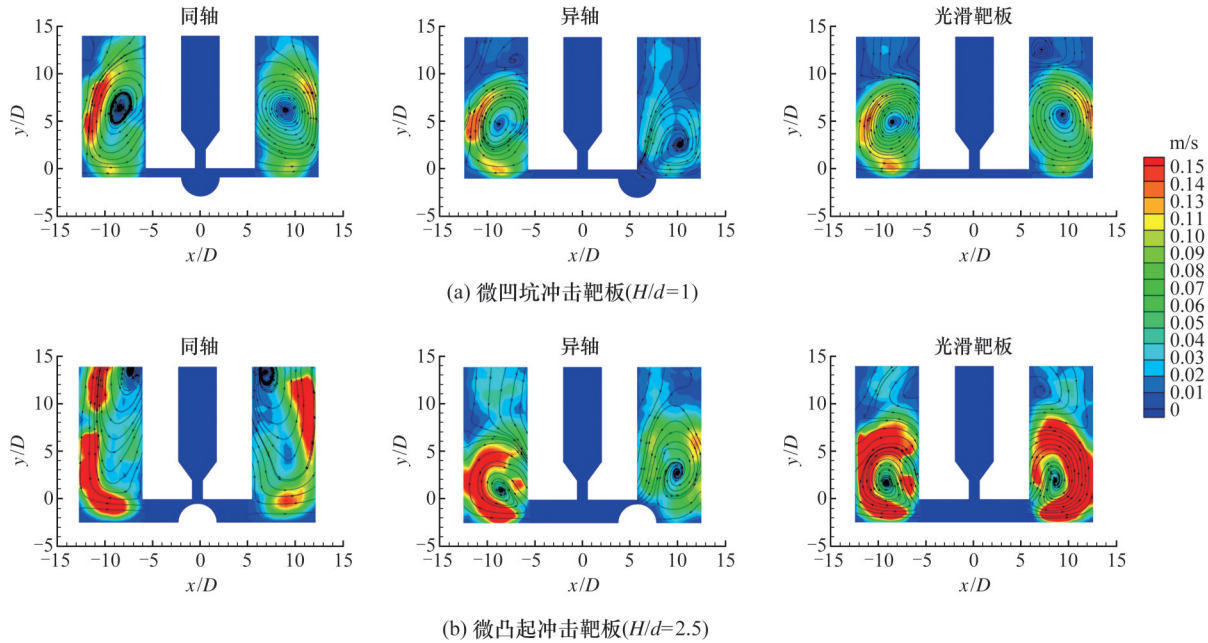


图 10 不同微缺陷位置下腔内时均速度场( $D/d=4$ )

Fig.10 Velocity field inside the cavity under different micro-defect positions( $D/d=4$ )

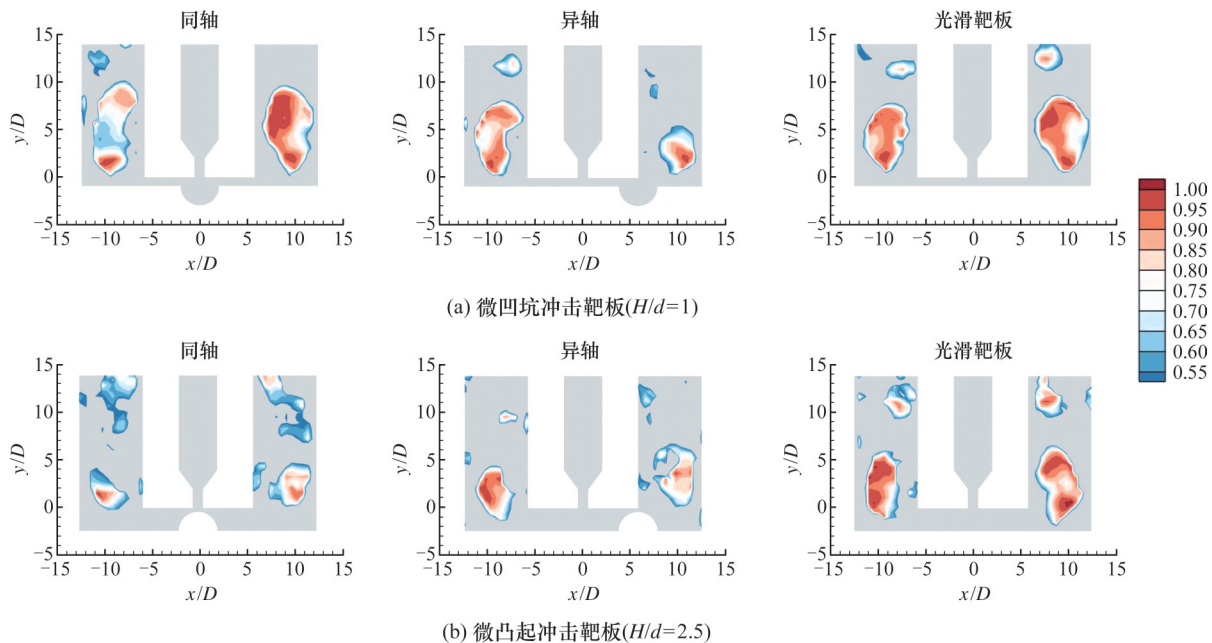


图 11 不同微缺陷位置下腔内涡核分布( $D/d=4$ )

Fig.11 Vortex distribution inside the cavity under different micro-defect positions( $D/d=4$ )

喷嘴与微缺陷同轴时,方腔两侧的流场特性如前文所述,无论缺陷是微凹坑还是微凸起,方腔两侧流场内均呈现对称类茧形涡旋对。但当缺陷位置偏移到间隙边缘时,方腔两侧流场分布情况

和流动结构出现了显著的不对称现象。无微缺陷的左侧方腔形成占据腔体  $2/3$  大小的类圆形涡旋,这与光滑平板工况中的方腔流场结构一致;而与微缺陷同侧的右侧方腔内,其流域中速度场量

级与涡旋强度皆小于左侧方腔,仅在右侧方腔形成一个较小的涡旋。

对于微凹坑靶板工况,不对称涡旋对的形成是因为右侧间隙的壁面射流高速流经凹坑顶部时,由于突然失去边界层黏滞力的约束,壁面射流被部分破坏,在进入右侧方腔前一部分壁面射流被卷吸进凹坑内,其余壁面射流流速显著下降后仍注入方腔内。此时方腔内的低速流体不仅受到微凹坑内高速旋转小涡的诱导,同时受到壁面射流的剪切,使得方腔内形成一个较小的涡旋。而在无微缺陷的左侧方腔,壁面射流未受到微缺陷的干扰,它在方腔内形成一个较大的类圆形涡旋。

对于微凸起靶板工况,虽然流动现象同为不对称涡旋对,但其形成机理与微凹坑靶板工况并不完全一致。对于存在微缺陷的右侧方腔,其较小涡旋的形成是因为壁面射流高速撞击微凸起,绝大多数流体只能从其两侧绕开进而脱离了焦平面,较少的流体即使从微凸起上方的夹缝中挤入方腔,动能也耗散得所剩无几;同时方腔与间隙里的流场相对较割裂,使得右侧方腔内的流体也无法从微凸起正上方卷吸进间隙内。因此观测平面内左右方腔形成了不完全对称涡旋对。

#### 4 结论

本文运用显微粒子图像测速(Micro-PIV)技术探索强受限空间介观尺度冲击射流中方腔内的流动结构和涡旋分布,针对壁面微缺陷形状(微凹坑和微凸起)、大小( $D/d=2,4,6$ )、位置(与喷嘴同轴和移动到间隙边缘)影响下的流场特性进行了直接试验观测,得到以下结论:

1)无论是光滑冲击靶板还是在正对喷嘴的位置存在凹凸形状的微缺陷靶板,方腔内的流动结构都是对称的,区别在于微缺陷形状直接影响到壁面射流能量传递与耗散,进一步导致间隙外方腔内的对称涡旋形状与能量分布不一致。

2)微凹坑靶板在间隙高度 $H/d=1$ 时,随着微缺陷尺寸的增大,方腔两侧类圆形涡旋对会逐渐变化为类茧形涡旋对,涡核呈现出远离方腔底部壁面的趋势,且单一涡核逐渐分裂为上下两个主要的涡核。

3)微凸起靶板在间隙高度 $H/d=3.5$ 时,随着微凸起尺寸的增大,方腔内涡旋的分布范围反而越小,由类茧形涡旋对逐渐变化为类圆形涡旋对,且上下双涡核结构逐渐靠近归一为单涡核结构。

4)当缺陷位置偏移到间隙边缘时,方腔两侧

流场分布情况和流动结构出现了显著的不对称现象。无微缺陷的左侧方腔形成占据腔体 $2/3$ 大小的类圆形涡旋;而与微缺陷同侧的右侧方腔内,其流域中速度场量级与涡旋强度皆小于左侧方腔,仅在右侧方腔形成一个较小的涡旋。

#### 参考文献:

- [1] 李跃松,朱玉川,吴洪涛,等.超磁致伸缩执行器驱动的射流伺服阀参数优化[J].航空学报,2011,32(7):1336-1344.  
LI Yuesong, ZHU Yuchuan, WU Hongtao, et al. Parameter Optimization of Jet-pipe Servovalve Driven by Giant Magnetostrictive Actuator [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(7): 1336-1344.
- [2] 朱玉川,李跃松.射流伺服阀用放大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 for Amplified Giant Magnetostrictive Actuator Applied to Jet-pipe Electro-hydraulic Servovalve [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(11):3156-3165.
- [3] XU Q, ZHU Y. Reliability Modeling of Uncertain Random Fractional Differential Systems with Competitive Failures [J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2022, 162: 112476.
- [4] JIAO Z, ZHANG H, SHANG Y, et al. A Power-by-wire Aircraft Brake System Based on High-speed On-off Valves [J]. Aerospace Science and Technology, 2020, 106: 106177.
- [5] 金桐彤,杨兆军,王大川,等.重型机床液压元件油液污染退化量分布剖面可靠性建模[J].中国机械工程,2020,31(13):1613-1620.  
JIN Tongtong, YANG Zhaojun, WANG Dachuan, et al. Reliability Modeling for Hydraulic Components of Heavy Duty Machine Tools in Distribution of Degradation Amount for Oil Contamination Profile [J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(13): 1613-1620.
- [6] 赵开宇,袁朝辉,张颖.射流管式伺服阀反馈弹簧组件分析[J].中国机械工程,2013,24(19):2606-2610.  
ZHAO Kaiyu, YUAN Zhaohui, ZHANG Ying. Analysis of Jet Pipe Servo Valve Feedback Spring Components [J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(19): 2606-2610.
- [7] 周耀保,付嘉华,金瑶兰.射流管伺服阀前置级冲蚀磨损数值模拟[J].浙江大学学报(工学版),2015,49(12):2252-2260.

- YIN Yaobao, FU Jiahua, JIN Yaolan. Numerical Simulation of Erosion Wear of Pre-stage of Jet Pipe Servo Valve[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2015, 49(12): 2252-2260.
- [8] 褚渊博, 袁朝辉, 张颖. 射流管式伺服阀冲蚀磨损特性[J]. 航空学报, 2015, 36(5): 1548-1555.
- CHU Yuanbo, YUAN Zhaohui, ZHANG Ying. Erosion Wear Characteristic of Jet Pipe Servo Valve [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(5): 1548-1555.
- [9] LI S, AUNG N Z, ZHANG S, et al. Experimental and Numerical Investigation of Cavitation Phenomenon in Flapper-nozzle Pilot Stage of an Electrohydraulic Servo-valve[J]. Computers & Fluids, 2013, 88: 590-598.
- [10] ZHAO B, GUO W, QUAN L. Cavitation of a Submerged Jet at the Spherical Valve Plate/Cylinder Block Interface for Axial Piston Pump[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2020, 33(5): 207-221.
- [11] OKITA K, MIYAMOTO Y, FURUKAWA T, et al. Numerical Study on Stress in a Solid Wall Caused by the Collapse of a Cavitation Bubble Cloud in Hydraulic Fluid[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2022, 150: 103965.
- [12] TRUMMLER T, SCHMIDT S J, ADAMS N A. Numerical Prediction of Erosion due to a Cavitating Jet[J]. Wear, 2022, 498: 204304.
- [13] KATSUMATA T, MATSUBARA T, YAMAMOTO K, et al. Evaluation of Coating Properties with a Micro Slurry-jet Erosion (MSE) Test: Effects of the Shape and Size of Eroding Particles on Erosion Behaviors of TiN Coating[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 421: 127443.
- [14] YE L, ZHU X. Analysis of the Effect of Impact of Near-wall Acoustic Bubble Collapse Micro-jet on Al 1060 [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2017, 36: 507-516.
- [15] YE L, ZHU X, WEI X. Damage Characteristics and Surface Description of Near-wall Materials Subjected to Ultrasonic Cavitation[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 67: 105175.
- [16] YE L, ZHU X, HE Y, et al. Ultrasonic Cavitation Damage Characteristics of Materials and a Prediction Model of Cavitation Impact Load Based on Size Effect [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 66: 105115.
- [17] AUNG N Z, LI S. A Numerical Study of Cavitation Phenomenon in a Flapper-nozzle Pilot Stage of an Electrohydraulic Servo-valve with an Innovative Flapper Shape[J]. Energy Conversion and Management, 2014(77): 31-39.
- [18] YANG H, WANG W, LU K, et al. Cavitation Reduction of a Flapper-nozzle Pilot Valve Using Continuous Microjets[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019(133): 1099-1109.
- [19] YANG H, XU Y, CHEN Z, et al. Cavitation Suppression in the Nozzle-flapper Valves of the Aircraft Hydraulic System Using Triangular Nozzle Exits [J]. Aerospace Science and Technology, 2021, 112: 106598.
- [20] HU J J, KONG X D, LI Z X, et al. Experimental Investigation of Aerodynamic Interaction between Tip Leakage Flow and Spontaneous Tip Injection Flow Using 2D-PIV[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2014, 54: 127-135.
- [21] BERRY M G, MAGSTADT A S, GLAUSER M N. Application of POD on Time-resolved Schlieren in Supersonic Multi-stream Rectangular Jets [J]. Physics of Fluids, 2017, 29(2): 020706.
- [22] BURGESS B H, SCOTT R K. Robustness of Vortex Populations in the Two-dimensional Inverse Energy Cascade [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2018, 850: 844-874.
- [23] CARBONE M, BRAGG A D. Is Vortex Stretching the Main Cause of the Turbulent Energy Cascade? [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2020, 883: 923.
- [24] 胡建军, 朱晴, 孔祥东, 等. 近距离下射流冲击平板 PIV 实验研究[J]. 力学学报, 2020, 52(5): 1350-1361.
- HU Jianjun, ZHU Qing, KONG Xiangdong, et al. PIV Measurement of Close Impinging Jet on Flat Plate [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2020, 52(5): 1350-1361.
- [25] 胡建军, 杨子文, 孔祥东, 等. 近距离淹没冲击射流动态流场特性[J]. 机械工程学报, 2020, 56(22): 263-270.
- HU Jianjun, YANG Ziwen, KONG Xiangdong, et al. Dynamic Flow-field Characteristics of Close-range Submerged Impinging Jet[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(22): 263-270.
- [26] MARIOTTI A, GALLETTI C, MAURI R, et al. Effect of Stratification on the Mixing and Reaction Yield in a T-shaped Micro-mixer[J]. Physical Review Fluids, 2021, 6(2): 024202.
- [27] KITZHOFFER J, NONN T, BRÜCKER C. Generation and Visualization of Volumetric PIV Data Fields[J]. Experiments in Fluids, 2011, 51(6): 1471-1492.
- [28] JEONG J, HUSSAIN F. On the Identification of a Vortex[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1995, 285: 69-94.