

基于光强测量毛细超高压水射流集束性的实验研究^{*}

杨敏官, 龚 辰, 王育立, 陆金刚

(江苏大学 能源与动力工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘 要: 准确划分射流集束段和雾化段是研究射流集束性的前提。设计了一种基于光强定量测量集束性的方法。基于该方法对具有尖锐边缘孔口和类流线型出口流道的喷嘴, 在超高压喷射条件下形成的水射流结构形态进行分析, 并与直柱型出口流道喷嘴射流对比分析。结果表明: 光强测量法能够比较准确地划分射流集束段和雾化段, 区分雾化段中核心区和气液混合区; 毛细超高压水射流的集束性在雷诺数影响下由喷嘴孔口结构、出口流道结构的综合作用决定; 在一定雷诺数范围内, 具有尖锐边缘孔口和类流线型出口流道的喷嘴有良好的集束性, 当雷诺数达到 $1.8 \times 10^4 \sim 1.9 \times 10^4$ 时, 射流集束段长度趋于恒定; 喷嘴出口流道结构通过气流调节, 对射流集束性的影响在高雷诺数下可以忽略, 空气动力扰动在高雷诺数下对射流集束性影响程度显著降低。

关键词: 超高压水射流; 喷嘴结构; 湍流; 光学测量

中图分类号: TP69

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2014) 01-0087-06

Experimental Study of Ultra-High Pressure Capillary Water Jet Based on Image Intensity

YANG Min-guan, GONG Chen, WANG Yu-li, LU Jin-gang

(School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: In order to study the fluidic beam concentration (FBC) of ultra-high pressure water jet, its intact section and mixture section should be distinguished firstly. A method was developed so that FBC could be measured through images of jets. The experimental nozzle has a sharp-edge orifice and a streamline like exit structure. The jet configuration study under ultra-high pressure based on intensity analysis was presented and was compared with the jets whose nozzle has a right circular cylinder exit structure. The results show that the present method can recognize the intact section and atomization section of the water jets and it can distinguish the core part and the mixture part within the atomization section based on light intensity. The FBC of ultra-high pressure water jet was determined by the Reynolds numbers and the structure of orifice and exit. The water jets from the nozzle with sharp-edge orifice and streamline like exit structure have better FBC within limits, and the FBC of water jets will no longer change when the Reynolds number is over a certain range (18000 ~ 19000). The effects of air regulation by exit structure on the FBC are not significant when the Reynolds number is large enough. The jet FBC affected by aerodynamic disturbance will decrease under large Reynolds numbers.

Key words: Ultra-high pressure water jet; Nozzle configuration; Turbulence; Optical measurement

^{*} 收稿日期: 2013-03-25; 修订日期: 2013-05-24。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51176065); 江苏省研究生科研创新基金项目 (CXZZ11 0567)。

作者简介: 杨敏官 (1952—), 男, 教授, 博士, 研究领域为流体机械的性能、内流分析及实验技术。

E-mail: geld33@163.com

1 引言

高压水射流是一种新兴技术,具有环保、节能、高效等优点。为实现射流稳定性调控,近十年来国内外学者对自由液体射流进行了广泛的实验和理论研究。周磊^[1]采用大涡模拟捕捉到了喷雾场中湍流涡的随机性三维复杂结构。王雄辉^[2]利用高速摄影实验方法得到了横向气流场中圆形射流袋式破碎长度与 We 数的线性关系。洪流^[3]研究了真空环境中液体射流雾化特性,得出闪蒸为该环境下射流雾化的主要因素。Shinjo J^[4]采用直接数值模拟(DNS)清晰的捕捉到了高速液体射流液带(ligament)和液滴的形成。Portillo J E^[5]借助高速数码及图像后处理技术,测量了喷嘴出口附近液体射流表面波,认为喷嘴出口附近的绝对不稳定是存在不稳定波最重要原因。冯守义^[6]利用粒子图像测速系统以及数字图像处理技术研究了横向高温气流中的喷雾场,结果显示雾化初始阶段气流速度对烃雾化起主要作用,而在下游气流蒸发作用占主导。当射流进入空气后,射流与周围空气的相对运动使射流表面产生波动与振荡,形成不同尺度和结构的表面波,当表面波的振幅增大到一定程度时,液体射流就会发生破碎,分离出大量的液带液滴,如果液滴超过临界尺寸,则会破碎成更小的液滴。目前普遍接受比较成熟的理论是空气动力扰动学说,即认为射流破碎是气流与液体射流之间强烈的相互作用造成的,射流破碎存在 4 种模式^[7],分别是瑞利模式、第一风诱导模式、第二风诱导模式以及雾化模式。然而近些年国内外学者研究发现,喷嘴的几何形状与结构尺寸、喷口的粗糙程度以及喷嘴内部的扰动等因素对射流破碎雾化具有显著的影响,这些空气动力扰动学说无法给予明晰的解释。由于毛细超高压射流流速极高(300MPa 对应射流速度约为 750m/s),尺度小(喷嘴孔口直径 0.25mm),对研究工作的展开形成了巨大阻力。尽管如此,笔者还是利用现有条件对其进行了探索。前期研究发现,即使不与射流直接接触的喷嘴出口流道结构也对射流破碎具有显著影响^[8]。但这种影响受工作压力约束,当压力增大到一定值时,影响会弱化,而评价这种影响的关键是准确划分射流的集束段与雾化段,定量研究射流集束性。近年来,随着高速数码技术的发展,使得人们可以捕捉记录射流的宏观结构,一些学者在这个方面进行了有益的探索,王长园^[9]利用高速摄影纹影法对射流贯穿距随时间变化的规律进行了研究。周乃

军^[10]借助高速摄影技术以及 C#语言开发的图像处理软件研究了宏观燃油喷雾特性。赵陆明^[11]利用高速摄像机对燃油喷雾进行捕捉,并利用电子测量工具“E-ruler”对所捕捉图像中雾化射流贯穿距及锥角进行测量。贾丽冬^[12]利用 Matlab 软件对高数摄影捕捉到的射流图像进行处理,测量了射流贯穿距和锥角。赵琳^[13]使用高速摄影仪和激光粒度仪对射流进行拍摄和测量,通过定量分析液滴粒径和定性观察喷雾形态判断煤油雾化状况。上述测量方法为射流研究提供了参考,但如何处理捕捉到的射流图像,准确划分射流的集束段和雾化段,仍是极富挑战的。

为此,本文对一种具有尖锐边缘孔口和类流线型出口流道的喷嘴,在一定工作压力范围内的射流形态进行捕捉,提出一种新的后处理方法对所捕捉到图像进行处理,划分射流集束段与雾化段。最后,结合直柱型出口流道喷嘴,数值模拟比较分析尖锐边缘孔口、出口流道结构以及雷诺数对射流破碎的影响。

2 实验方案及实验装置

2.1 喷嘴结构方案

图 1 给出实验所用两种喷嘴结构。(a)为工业生产中通常使用的直柱型出口流道喷嘴,(b)为类流线型出口流道喷嘴(笔者前期研究显示,在一定压力范围内,这种喷嘴结构射流具有较好集束性^[14]),红宝石内圆柱孔即为喷嘴孔口,喷孔直径为 0.25mm,长为 1mm。孔口下游为出口流道结构,由直圆柱段和圆锥形渐扩段组成,渐扩段扩散角为 90°,直圆柱段与圆锥渐扩段长度均为 1mm。直圆柱段直径为 1mm。工作压力 20MPa ~ 300MPa。

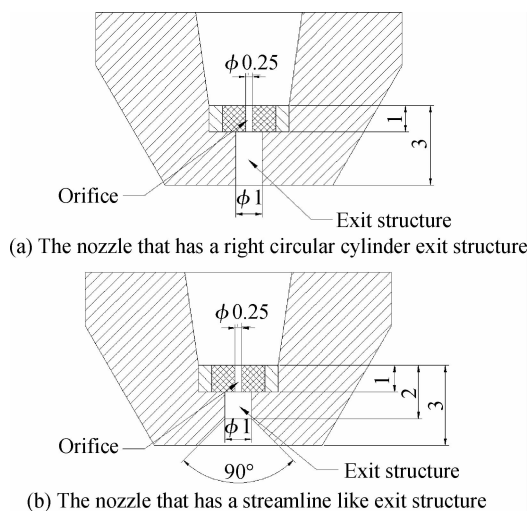


Fig. 1 Nozzle structures/mm

2.2 实验装置

图 2 为实验原理图,实验中所用高速数码相机为 OLYMPUS I - SPEED 3,镜头为 100mm F2.8MacroD,图像尺寸 1280 × 1024pixels,分辨率 0.06mm/pixel。实验曝光时间为 1/300s,每个工况捕捉 100 张射流图片。采用 LED 光源,并通过亚克力扩散板获得均匀面光源。配合面光源及实验所选曝光时间,能够滤除所捕捉图像中背景的影响,使图片中背景呈现黑色,突出射流主体形态。射流击穿木质盖板进入水槽,木质盖板能有效避免水槽中飞溅的水滴对所捕捉射流造成的影响。实验关注从喷嘴出口至出口下游 50mm 之间这一段射流。实验进给系统为 DWJ1520-FA 悬臂式数控水切割机 (Dardi International Inc.), 三维最大行程 $X(+)$ 向行程 1.5m, $Y(+)$ 向行程 2m, $Z(+)$ 行程 0.3m; 增压系统为 DIPS9-3040 超高压系统 (Dardi International Inc.) 最高安全压力 400MPa; 最大流量 3.7L/min; 功率 30kW。

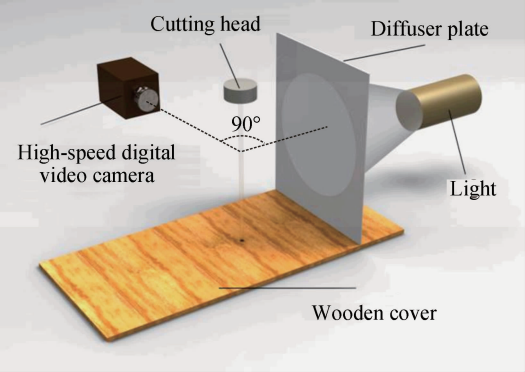


Fig. 2 Experimental setup

2.3 测量方法

准确划分射流的集束段和雾化段是定量研究射流集束性的关键,本文基于光强分析借助图像处理软件,提出一种新的后处理方法。

射流在集束段尚未破碎,可近似看作透明圆柱形水柱。射流表面存在两个反射光较少的部分,见图 3:(1)通过圆心的光线与断面圆周的两个交点,通过圆心的光线入射角为 0°,这使得两交点处垂直光线方向的反射光分量几乎为 0,高速数码摄像机与光源位置垂直,因而图像中这两处像素灰度很小;(2)光线与断面圆周相切的两点,这两点的入射角为 180°,垂直光线方向的反射光分量也很小。

图 3 中反射光相对较少的两部分,分别对应图 4 中射流主体中心轴位置和射流与空气的界面。而在雾化段,射流主体周围存在许多因破碎而产生的小液

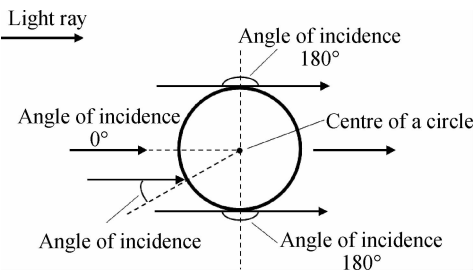


Fig. 3 Light ray analysis of cross section

滴和小气泡,气泡和液滴浓度沿径向变化,不同浓度区域对光线反射能力不同,图片上表现为不同径向位置光强不同。

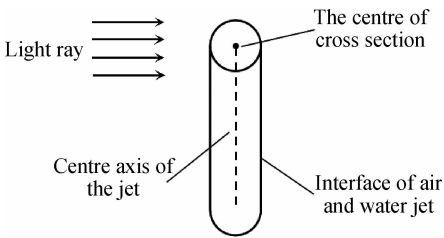


Fig. 4 Light ray analysis of the jet

图 5 左侧图(a)为喷嘴出口附近,即射流集束段射流图像,图中射流与空气边界分明,射流主体对称轴相对射流较暗。图 5 右侧图(b)为射流下游雾化段形态,射流与空气边界线模糊,中心轴处为亮白区,向两侧渐渐变暗。

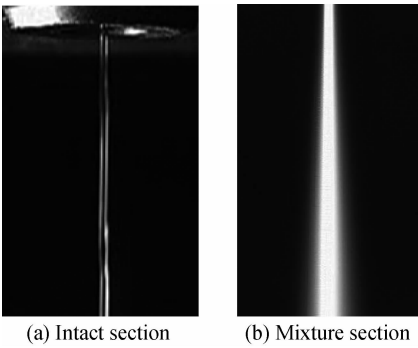


Fig. 5 Images of the intact section and the mixture section

图像信息的实质是数字信号,图像后处理的本质是对这些数字信号的数学处理。利用图像后处理软件对一条直线上所有像素点灰度值进行类光密度处理,并将结果读入图表中。计算公式如下

$$I(x,y) = -\lg \frac{G(x,y)}{255}$$

(1)

式中 $I(x,y)$ 为坐标 (x,y) 处像素的光强, G

(x, y) 为坐标 (x, y) 处像素的灰度值。

图 6(a)、(c) 分别为工作压力为 20MPa 和 300MPa 下的射流外形图, 在距离喷嘴出口垂直距离为 50mm 处, 对应图中 829 个像素长度, 测量一条线段上所有像素点光强, 线段长度大于此处射流宽度。图 6(b)、(d) 为图 6(a)、(c) 对应光强曲线, 横轴为所测线段上像素点的坐标, 纵轴为对应点光强。像素点灰度值越大即越接近全白, 其光强值越低。图中背景像素点灰度值为定值, 对应光强曲线两端的水平直线。图 6(b) 中, 曲线中有三个高于两端直线的波峰, 低于两端直线的波谷, 这表明射流与空气之间过渡迅速, 边界分明。三个波峰分别对应射流与空气的界面以及射流中心轴。图 6(d) 中, 曲线中间为较为平滑的波谷, 且谷底有一段近似水平直线。300MPa 下射流在 50mm 处已经雾化, 光强与液滴气泡浓度分布有关, 射流雾化段核心区浓度最高, 光强值最低, 对应图 6(d) 中波谷直线部分; 汽液混合区液滴气泡浓度由中心向两侧递减, 对应两侧渐变曲线。

根据以上分析, 射流划分办法如下: 从喷嘴出口至下游 50mm 处作一系列光强测量直线, 光强线形如图 6(b) 则为集束段, 形如图 6(d) 则为雾化段。

2.4 误差分析

实验对从集束段到雾化段的整个射流发展形态进行研究, 受现有相机最大像素值以及镜头的限制, 实验无法同时兼顾射流整体形态和出口附近的微细变化, 因而喷嘴出口处射流所占像素个数较少。超高压射流是湍流运动, 射流宏观形态随着不规则湍流脉动时刻变化, 实验通过较短曝光时间 (1/300s) 和较大图片基数 (每个工况捕捉 100 张) 来减小误差。因为湍流, 即使在集束段, 射流表面也不是理想的光滑圆柱曲面。其表面存在波纹, 因而光线反射折射与理想状态下存在偏差, 使得实验所得光强图与理想情况存在一定的误差。实验喷嘴尺寸小, 结构特殊, 加工

工艺和精度要求高, 实验工作压力极端, 喷嘴机械形变将直接对射流产生影响, 然而目前的加工制造, 无法完全满足要求。此外, 实验室环境温度、含湿量、空气质量对射流形态捕捉也有一定影响。而在目前的实验条件下, 很难有可以显著提高微细超高压射流的可视化研究精度的方法。

3 集束性研究

图 7 为类流线型喷嘴在工作压力为 20MPa, 80MPa, 270MPa, 300MPa 下射流形态。20MPa 时, 整段射流的直径变化很小, 且射流有比较明显的“黑色轴线”。80MPa 时, 整段射流直径明显变大, 但与空气之间边界线仍比较清晰。从 80MPa 开始, 射流自下而上边界线逐渐模糊。270MPa 时射流只有出口附近仍为边界分明的集束段, 下游已完全雾化, 边界模糊, 此时起射流形态基本稳定, 基本不随压力而变化, 如图 7 所示, 270MPa 与 300MPa 射流形态差异甚微。

实验工作压力 20MPa ~ 300MPa 对应雷诺数为 $4.96 \times 10^4 \sim 1.92 \times 10^5$ (基于喷嘴直径和出口流速)。图 8 为射流集束段长度随雷诺数变化图, 其中纵轴为集束段长度 L 与出口流道直柱段直径 D 比值。根据曲线变化规律可大致分为 4 个部分: (1) 雷诺数小于 10^5 , 图中这一段为直线, 这表明雷诺数小于 10^5 时, 射流集束段长度大于 50mm。(2) 雷诺数 10^5 至 1.5×10^5 , 图中这一段曲线斜率近似为 -50° , 射流集束段长度随着雷诺数增大迅速减小。(3) 雷诺数 1.5×10^5 至 1.8×10^5 , 这一段曲线斜率近似为 -25° , 射流集束段长度随着雷诺数增大而减小的速度明显减缓。(4) 雷诺数 1.82×10^5 至 1.92×10^5 , 射流集束段长度基本不随雷诺数变化。综上所述, 射流集束段长度随雷诺数增大而减小, 但减小速度逐渐减缓, 当雷诺数高于一定值 $1.8 \times 10^4 \sim 1.9 \times 10^4$ 时射流集束段长度基本不再变化。

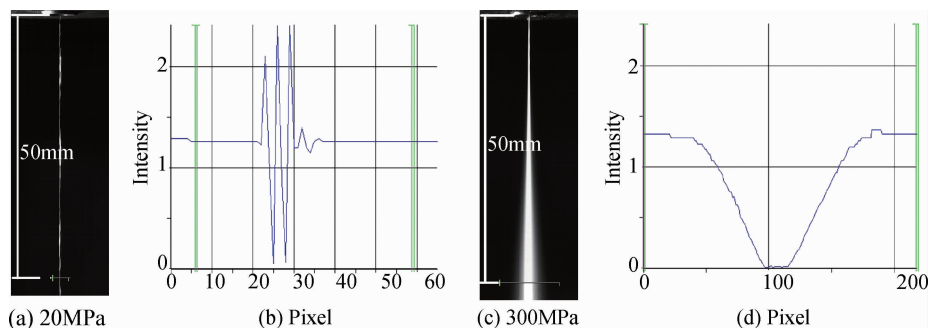


Fig. 6 Configurations and intensities of the jet on the pressure of 20MPa and 300MPa

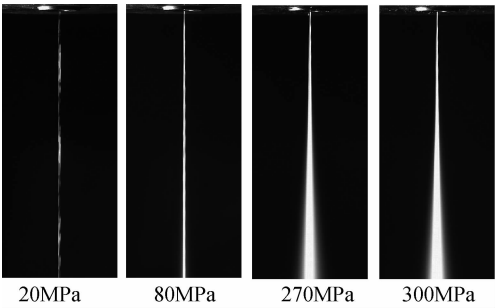


Fig. 7 Images of jet that under different pressure

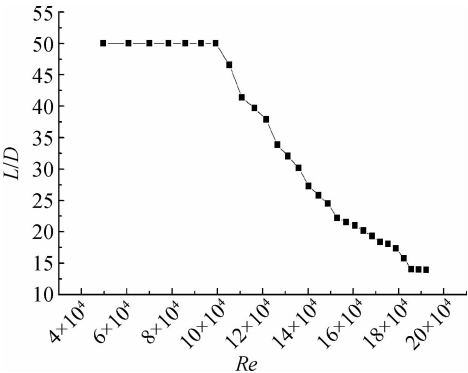


Fig. 8 Lengths of the intact section with different Reynolds numbers

4 结果分析

在一定压力条件下,流经孔口边缘的射流会在孔口内产生空化,如图 9(a) 所示(图中红色部分为射流);当空化云增长到达孔口出口时,孔口内射流将与壁面分离,即发生如图 9(b) 所示的“水跃”现象^[16]。文中使用的喷嘴孔口几何结构和实验工作压力使得孔口内发生了“水跃”,它使射流与孔口内壁分离,从而避免了射流与壁面的摩擦,更重要的是,下游空气进入孔口替代了原来的空化区,抑制了射流的空化,同时压缩了射流,在一定雷诺数范围内这很大程度上降低了射流初始扰动,并增加了射流稳定段长度。但当雷诺数超过一定值后,射流可能再度附着在喷嘴孔口内壁上,从而迅速降低射流集束段长度。

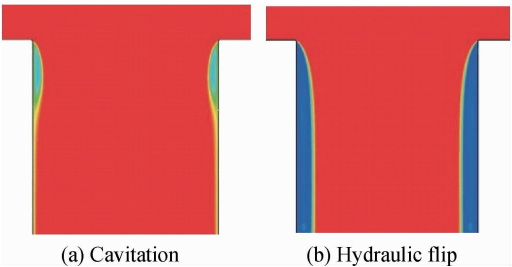


Fig. 9 Cavitation and hydraulic flip^[15] (the red part is water jet)

为进一步分析喷嘴出口流道对射流集束性影响,对两种喷嘴结构进行数值模拟,对比分析。利用 VOF 多相流模型对喷嘴内外气液两相流场进行数值计算。选用连续方程、动量方程和体积分数方程作为控制方程,引入 Realizable $k-\varepsilon$ 双方程模型计算射流中湍流。根据喷嘴的实际结构建立内部流道的二维轴对称模型。采用结构化网格划分整个计算域,在喷嘴内部及出口附近的压力速度梯度较大,因此网格进行加密。高压水从压力入口流入,再由外部空间的压力出口流出。喷嘴内壁及外壁均设为无滑移壁面,壁面接触角为 90° 。使用 Fluent 中的分离求解器进行计算,采用 SIMPLEC 算法实现压力场和速度场的耦合,PRESTO 格式用于对压力方程的离散,QUICK 格式用于两相体积分数方程的离散。动量方程及与湍流相关的标量方程均采用二阶迎风格式进行离散。由于喷嘴内外压力梯度较大,迭代开始时先采用亚松弛方法,待残差稳定后逐步增加松弛因子。代数多重网格方案用于改善迭代的稳定性和收敛性。具体数值方法见文献^[17],这里不再赘述。

图 10(a)、(b) 分别为直柱型和类流线型出口流道喷嘴出口附近流线及湍流强度。根据空气动力扰动学说,气流与液体射流之间强烈的相互作用是射流破碎的主要原因,而涡为气流与液体射流之间能量传输的重要媒介,同时也是能量耗散的重要形式。因此气液两相的湍动能和涡运动是评价能量耗散的重要参考。如图 10(b) 类流线型出口流道喷嘴内射流没有明显展向涡也不存在明显的空气旋涡,这表明类流

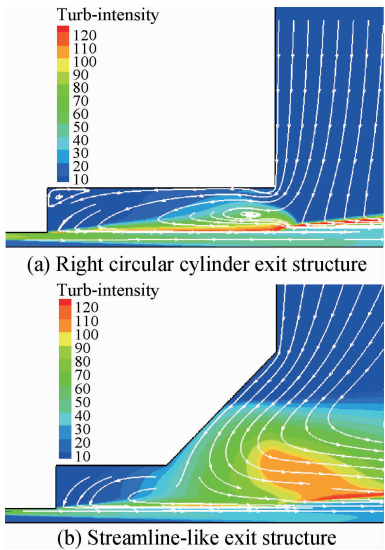


Fig. 10 Streamline and turbulence intensity of different nozzle exit structure

线型出口流道结构相对直柱型出口流道喷嘴对空气有一定的整流作用,削弱了周围空气与射流的剪切。在一定雷诺数范围内,类流线型出口流道喷嘴射流集束性优于直柱型喷嘴;但类流线型出口流道结构喷嘴出口附近的湍流强度区域要明显大于直柱形喷嘴。在高雷诺数下,射流界面附近湍动能对射流集束性的影响变得更为显著。

5 结 论

通过本文研究,得出如下结论:

(1)射流集束段、雾化段以及雾化段中的核心区与气液混合区所包含液滴、气泡浓度不同,反射光能力有显著区别,利用这一特点划分了射流结构。

(2)射流集束段长度随雷诺数增大而减小,且减小速率逐渐减缓,本研究中雷诺数高于 $1.8 \times 10^4 \sim 1.9 \times 10^4$ 时,射流集束段长度不再变化。

(3)低湍动能情况下,喷嘴流道结构能提高射流集束性,但当射流附近的湍流随雷诺数增大而增强时,喷嘴流道结构对集束性的调制效应减弱。

参考文献:

- [1] 洪 流,池保华,李龙飞,等.模拟空间环境下射流雾化特性实验[J].推进技术,2012,33(5):765-770. (HONG Liu, CHI Bao-hua, LI Long-fei, et al. Experimental Study on Atomization Characteristics of Liquid Injection in Simulated Space Environment[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2012, 33(5): 765-770.)
- [2] 周 磊,解茂昭,贾 明,等.高压燃油喷雾雾化与蒸发过程的大涡模拟[J].内燃机学报,2010,28(3).
- [3] 王雄辉,黄 勇,王 方,等.横向气流中液体射流袋式破碎机理[J].推进技术,2012,33(2):198-204. (WANG Xiong-hui, HUANG Yong, WANG Fang, et al. Bag Breakup of Round Liquid Jets in Crossflow[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2012, 33(2): 198-204.)
- [4] Shinjo J, Umemura A. Simulation of Liquid Jet Primary Breakup: Dynamics of Ligament and Droplet Formation[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2010, 36(7): 513-532.
- [5] Portillo J E, Collicott S H, Blaisdell G A. Measurements of Axial Instability Waves in the Near Exit Region of a High Speed Liquid Jet[J]. *Physics of Fluid*, 2011, 23(12): 1-13.

- [6] 冯守义,牛志刚,费立群,等.高密度烃燃料雾化特性试验[J].推进技术,2011,32(4):512-519. (FENG Shou-yi, NIU Zhi-gang, FEI Li-qun, et al. Experiment on Atomization Characteristics of High Density Hydrocarbon[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2011, 32(4): 512-519.)
- [7] Lin S P, Reitz R D. Drop and Spray Formation from a Liquid Jet[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1998, 30: 85-105.
- [8] Yang F C. The Effect of Orifice Lead Cutting Edge Distance and Fluid Viscosity on Jet Performance in High-Velocity Waterjet Cutting Systems[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, 40(3).
- [9] 王长园,刘福水,吴文峰.高压甲烷气体碰壁射流扩散与卷吸特性的试验[J].内燃机学报,2012,30(5).
- [10] 周乃君,杨晓力,邢志海,等.高压共轨燃油喷射雾化特性的数值预报[J].中南大学学报(自然科学版),2012,43(10):4063-4067.
- [11] 赵陆明,何 旭,郑 亮,等.高喷射压力下生物柴油喷雾特性试验与仿真[J].农业机械学报,2012,43(9).
- [12] 贾丽冬,姚春德,侯亚帮,等.甲醇低压喷射射流特征试验[J].机械工程学报,2012,48(20):153-158.
- [13] 赵 琳,范 玮,范珍涔,等.低压环境下过热流体喷雾特性实验[J].推进技术,2012,33(5):771-778. (ZHAO Lin, FAN Wei, FAN Zhen-cen, et al. Experimental Investigation on Spray Characteristics from Superheated Liquid Jets under Low Pressure[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2012, 33(5): 771-778.)
- [14] Wang Yu-li, YANG Min-guan, GAO Bo. Effect of Interfacial Flow on the Coherency of Ultra-High Speed Water Jet in Air[C]. *USA:ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference*, 2011.
- [15] Vahedi Tafreshi H, Pourdeyhimi B. Simulation of Cavitation and Hydraulic Flip Inside Hydroentangling Nozzles[J]. *Textile Research Journal*, 2004, 74(4).
- [16] Tafreshi H V, Pourdeyhimi B. The Effects of Nozzle Geometry on Waterjet Breakup at High Reynolds Numbers[J]. *Experiments in fluids*, 2003, 35(4): 364-371.
- [17] Wang Yu-li, YANG Min-guan, KANG Can, et al. Optimization Design of Water Jet Cutting Head Based on CFD Simulation and Experimental Study [C]. *USA:Proceedings of the 9th Pacific Rim International Conference on Water Jetting Technology*, 2009.

(编辑:张荣莉)