

文章编号: 1672-9897(2011)01-0007-06

# 环形水射流流场的实验研究与统计分析

康 灿, 张 峰, 杨敏官, 肖胜男

(江苏大学能源与动力工程学院, 江苏镇江 212013)

**摘要:** 在 11、12 和 15MPa 射流压力下对环形自由水射流流场进行实验研究, 以获得该射流场的能量特征与液滴尺寸分布规律。运用相位多普勒粒子测速(PDPA)技术对射流流场中的速度分布和液滴粒径分布进行测量, 并对通过不同位置控制体的单个液滴行为进行了统计分析。研究表明: 环形射流束中心存在着较宽的高速区域, 且射流能量沿着射流方向衰减缓慢; 距离喷嘴的轴向距离越大, 射流横断面上的速度与液滴粒径分布越平坦; 射流压力对流束中心的轴向速度变化影响较大, 对液滴粒径分布的影响不明显; 射流流束中心区的湍流脉动较弱, 但通过位于射流中心位置的控制体的液滴粒径谱较宽。

**关键词:** 环形射流; PDPA; 脉动速度; 粒径; 控制体; 统计方法

**中图分类号:** TB126; O358      **文献标识码:** A

## Experimental and statistical analysis of water jet discharged from an annular nozzle

KANG Can, ZHANG Feng, YANG Min-guan, XIAO Sheng-nan

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

**Abstract:** Under jet pressures of 11, 12 and 15MPa, free water jet discharged from an annular nozzle was experimentally studied. The objective is to obtain energy distribution and droplet diameter distribution in the jet flow field. Phase Doppler Particle Anemometry (PDPA) was applied in measurement of velocity and droplet diameter distributions. Statistical analysis of those droplets passing through control volumes at different locations was performed. The results indicate that a relatively wide high-velocity zone exists near the jet axis and energy dissipation is slow along the jet direction. Both velocity and droplet diameter distributions get smoother when the distance between the transverse section and the nozzle becomes larger. Jet pressure has a comparatively evident influence on velocity increase near the jet axis. But the impact exerted on droplet diameter distribution by increase of jet pressure is unremarkable. Weak turbulent fluctuation occurs near the jet axis where droplet diameter covers a wide range.

**Key words:** annular jet; PDPA; fluctuating velocity; droplet diameter; control volume; statistical method

## 0 引言

环形射流是一种新型射流, 多被应用在航空航天和动力工程领域, 近年来环形射流在工业清洗领域内被尝试并取得了较好的应用效果。在三维空间, 液流自环形喷嘴喷出后首先形成具有一定厚度的圆环, 在离开喷嘴一定距离后, 圆环开始沿径向扩散, 圆环的中心由空心变为充满着液体<sup>[1]</sup>。环形液体射流中存在着射流稳定性、射流束聚并、液滴撞击和液滴破碎等难题<sup>[2-3]</sup>。从目前的数值模拟水平来看, 高速环形

射流场的高精度数值模拟和多尺度流动结构的求解均具有较大的难度<sup>[4]</sup>。而目前针对环形射流的定量实验研究报道也较少。

当射流压力达到 10MPa 时, 液体的速度一般会达到 100m/s<sup>[5]</sup>。在这类较高流速的射流场中, 能量分布是评价射流场品质的重要指标, 更是决定射流作业能力的关键因素, 这一点不同于低压圆柱射流和双流体雾化<sup>[6]</sup>。同时, 流场中的液滴尺寸分布对射流流体施加到被作用物体表面的打击作用有着重要的影响<sup>[7-8]</sup>。

对一环形喷嘴的自由射流流场进行实验研究,设定3种射流压力 $p=11,12$ 和 $15\text{ MPa}$ ,对不同射流压力下的射流流场进行PDPA光学测量。测量流场中的单点平均速度和脉动速度,以说明射流能量的沿程衰减和流场的湍动性能。通过对液滴粒径分布的测量来衡量该流场内的液滴破碎机制。对通过特定位控制体的单个液滴粒径和速度进行统计分析,以描述群体液滴表现出的统计规律。

## 1 实验系统

采用的实验系统如图1所示,水的压能由功率为 $9\text{ kW}$ 的三缸柱塞泵提供,柱塞泵出口和喷嘴通过高压软管相连,高压软管内的能量损失由柱塞泵出口和喷嘴入口的压差反映。实验中采用的环形喷嘴如图2所示,其出口直径为 $1.68\text{ mm}$ ,中心圆柱的直径为 $1.0\text{ mm}$ ,中心圆柱的下游端距离喷嘴出口断面的轴向距离为 $1\text{ mm}$ ,采用该缩进形式的目的是为了缩短圆环中心充满液流所需的轴向距离。射流出口的环境压力为当地大气压。在距喷嘴出口不同轴向距离处选取6个测量断面以进行射流场测量与分析。

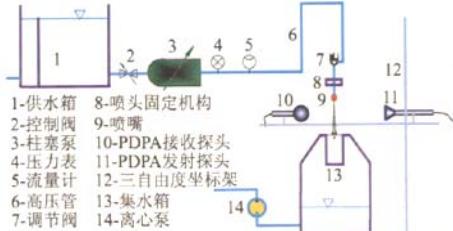


图1 实验系统组成  
Fig. 1 Sketch of the experiment system

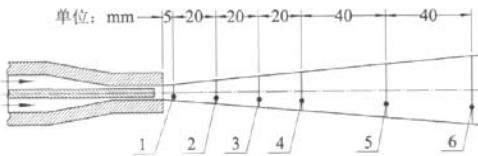


图2 环形喷嘴型式及射流断面选取  
Fig. 2 Annular nozzle and transverse sections

## 2 PDPA参数

PDPA的基本原理是散射光干涉原理,即测量物体散射光线时产生的多普勒频移以获得物体的移动速度,与激光多普勒测速(LDA)技术最大的不同在于其接收光学单元有3个探测器且其位置不能与发射光束的对称轴同线,在测量多维速度分量的同时,亦可通过测量信号的相位得到示踪粒子的粒径<sup>[9]</sup>。本实验中采用丹麦Dantec公司生产的PDPA系统,

该系统由最大功率为 $5\text{ W}$ 的氩离子激光光源、二维绿光及蓝光发射探头、接收探头、光纤驱动器、光电接收器、信号处理器、控制软件BSA Flow以及智能三维位移机构等组成。实验中在前侧向布置接收器,接收散射角为 $35^\circ$ 。该系统的主要性能参数如表1所示。

表1 PDPA系统的性能参数  
Table 1 Primary parameters of PDPA system

项目	参数
激光束间距/mm	38
激光束直径/mm	1.35
干涉条纹间距/ $\mu\text{m}$	6.775(绿光) 6.426(蓝光)
测量体体积/ $\text{mm} \times \text{mm} \times \text{mm}$	$2.176 \times 0.243 \times 0.243$ (绿光) $2.176 \times 0.230 \times 0.230$ (蓝光)

测量时,激光光源产生的单色激光束经光纤驱动器后分成波长分别为 $514.5$ 和 $488.0\text{ nm}$ 的绿光和蓝光,经过耦合传输后,进入焦距为 $500\text{ mm}$ 的发射探头。上下分射的两束绿光可测量液滴轴向速度分量及液滴索太尔平均粒径,水平分射的两束蓝光可对径向速度分量进行测量。4束光聚集在流场中的某一点,形成一个椭球测量体(如图3所示)。测量时,发射探头和接收探头固定在智能三维坐标架上,其同步移动由计算机控制,最小移动步长为 $0.1\text{ mm}$ 。每次采样过程中的样本液滴数设定为2000个,通过PDPA采样验证,液滴数符合测量精度要求。

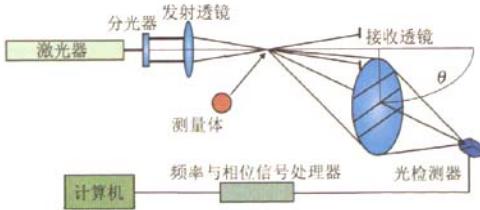


图3 PDPA 原理图  
Fig. 3 Schematic diagram of PDPA

## 3 速度分布

### 3.1 轴向速度分布

轴向速度是表征射流能量的最重要指标,图4表示出了在 $11\text{ MPa}$ 射流压力条件下,6个射流断面上的轴向速度分布。本文采用有量纲的表达方法,一是为了说明所研究射流的速度量级,二是在本研究中,射流的半扩展厚 $\rightarrow$ 宽度难以精确确定,因为在对流束边缘进行PDPA采样时,存在着一定的采样误差。

由图4可以看出,由截面1~6,速度分布曲线在径向的跨度增加,同时流束边缘的速度分布趋于平坦。由距离喷嘴较近的截面1和2来看,环形射流在圆环中心发生聚并后,迅速发展成为圆柱射流。同时

在截面1和2的速度分布图上可发现射流中心的核心区较宽,且与核心区外层间存在着较大的速度梯度。自截面1~6,断面最大轴向速度衰减百分比仅为0.62%,射流能量得到很好地保持。

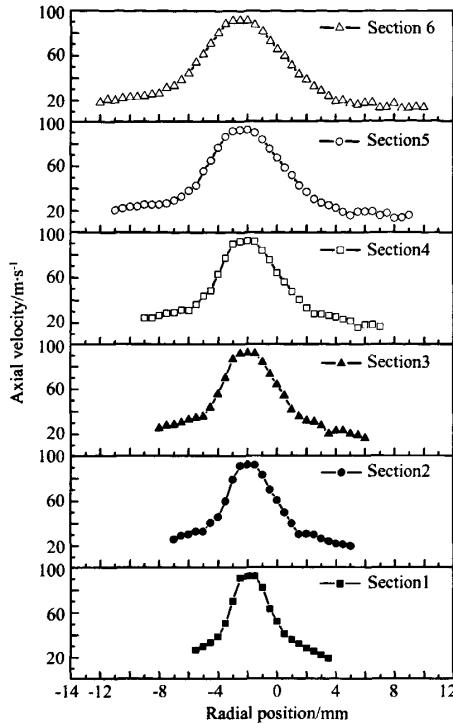


图4 轴向速度分布( $p=11\text{ MPa}$ )

Fig. 4 Axial velocity distribution under jet pressure of 11MPa

### 3.2 射流压力对轴向速度分布的影响

图5表示出截面1和6的轴向速度分布随射流压力的变化情况。如图5(a)所示,随着射流压力的提高,截面1的轴向速度分布曲线基本上向纵轴整体平移,流束中心部分平移的量更大一些。在图5(b)中,在不同压力下,截面6上的轴向速度分布呈现光滑的二次曲线形式。远离喷嘴,射流束在径向的扩散增强。随着射流压力的提高,流束中间的射流流体加速更为明显。在截面6的边缘,不同压力下的分布曲线交织在一起,说明混合层内液体与空气的相互作用更为强烈。

### 3.3 径向平均速度分布

在较高压力下的射流场中,径向速度通常被忽略,但该文研究的圆环射流流束的直径较大,径向速度分布在分析流束扩散程度和流束外缘液滴运动特性时起着重要的作用,故将6个截面上的径向速度分布表示在图6中。可以看出,每个截面上的径向流速分布都基本保持对称,且由截面1~6,径向平均速度

分布曲线趋于平坦。同时,由截面1~6,截面边缘处的径向速度逐渐减小,一方面,水射流与周围空气的摩擦使射流流体能量不断衰减,另一方面,在流束边缘处,大尺度液滴的破碎使液滴表面和空气的接触面积增加,液滴的径向运动受到进一步阻滞。

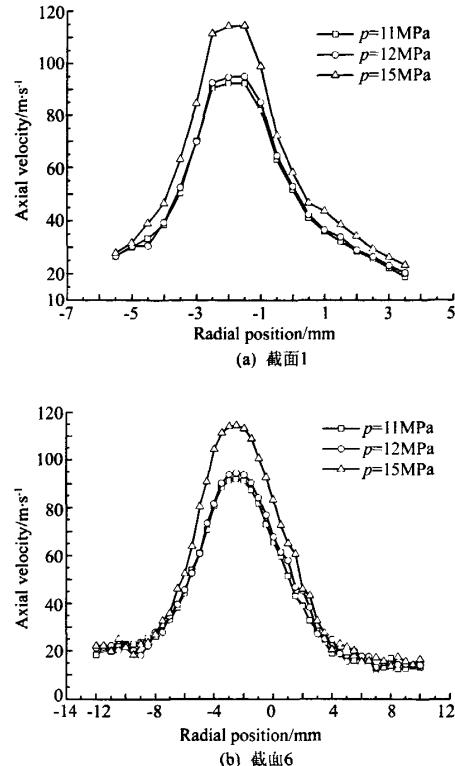


图5 不同压力下的轴向速度分布曲线  
Fig. 5 Axial velocity distributions under different jet pressures

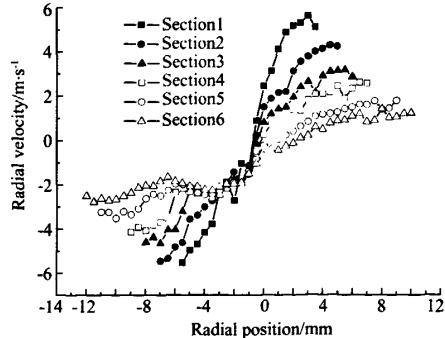


图6 径向速度分布( $p=11\text{ MPa}$ )  
Fig. 6 Radial velocity distribution under jet pressure of 11MPa

## 4 湍流脉动分析

### 4.1 轴向均方根速度

均方根速度是表征湍流脉动程度的重要参数,图7表示出了在11 MPa射流压力条件下,截面1、3和5

上的轴向均方根速度分布情况。在每个截面上的射流中心区，轴向均方根速度分布曲线均存在着明显的波谷，而该波谷对应着每个截面上轴向速度最大的区域。从另一角度看，在射流中心区外围，分布着两个轴向均方根速度的波峰，该处对应着液体与周围空气开始发生强烈剪切作用的位置。

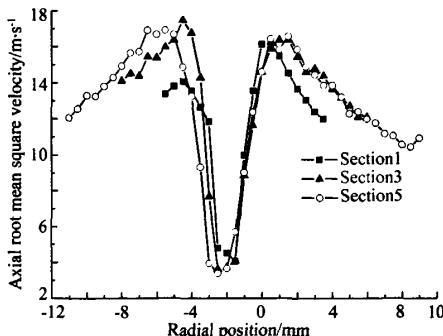


图 7 轴向均方根速度分布( $\rho=11 \text{ MPa}$ )  
Fig. 7 Axial root mean square velocity distribution under jet pressure of 11 MPa

#### 4.2 径向均方根速度

对应于图 6 的径向速度分布, 图 8 给出了截面 1、3 和 5 上的径向均方根速度分布。从径向均方根速度的量值来看, 其与径向速度的大小相当, 说明液滴的径向湍流脉动很强烈。而从分布曲线来看, 在远离喷嘴的截面 5 上, 径向均方根速度分布趋于平坦。在截面 1 和 3 处, 截面边缘处的径向均方根速度分布梯度较大, 且射流束中心的径向均方根速度较小。

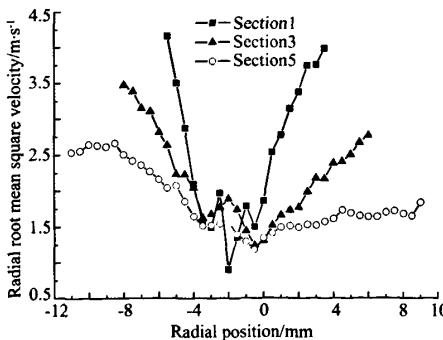


图 8 径向均方根速度分布( $\rho=11 \text{ MPa}$ )  
Fig. 8 Radial root mean square velocity distribution under jet pressure of 11 MPa

## 5 液滴粒径分布

液滴是射流能量的载体, 其尺寸及尺寸分布直接影响着射流的作用效果, 在 PDPA 采样过程中, 对通过不同位置控制体的每个液滴都进行了记录。液滴尺寸的表达主要采用两个参数: 液滴数平均粒径和索

太尔平均粒径。液滴数平均粒径的定义为

$$d_{10} = \frac{\sum_{i=1}^m n_i d_i}{\sum_{i=1}^m n_i} \quad (1)$$

其中,  $n_i$  为表示粒度的液滴个数分布; 设  $\bar{d}_i$  为第  $i$  粒径区间上液滴的平均粒径, 可表示为

$$\bar{d}_i = \sqrt{d_{i-1} d_i} \quad (2)$$

索太尔平均粒径可定义为

$$d_{32} = \frac{\sum_{i=1}^m n_i \bar{d}_i^3}{\sum_{i=1}^m n_i \bar{d}_i^2} \quad (3)$$

由于不同的粒径表示方法得到的结果可能存在较大的差异, 故图 9 中同时表示出了 11 MPa 射流压力下的液滴数平均粒径和索太尔平均粒径分布。可以看出, 由截面 1~4, 液滴数平均粒径在流束中心呈现略微下凹的分布形态, 在接近射流流束外缘时, 液滴数平均粒径分布较为平坦。在截面 5 和 6 上, 在流束外缘, 随着距射流轴线的径向距离增加, 液滴数平均粒径又出现增大的趋势。而索太尔平均粒径分布则基本上与图 7 中的轴向均方根速度分布相对应, 在射流流束中心区, 湍动程度小, 液滴的索太尔平均粒径大; 而在流束外缘, 湍动程度大, 且液滴与周围空气相互作用剧烈, 液滴破碎几率增大, 故小尺寸液滴增加。

接近流束中心, 液滴数平均粒径和索太尔平均粒径之间存在着明显的差异, 而在截面 1 的流束中心, 这种差异最为显著, 说明该处的粒径谱较宽, 液滴尺寸分布不均匀。由于环形喷嘴的中心为一圆柱体, 高速液流经过时在圆柱体尾部形成滞止区, 在滞止区的外层存在着较大的速度梯度, 高速和低速流体之间不断发生剪切作用, 而环形射流流束又在径向迅速扩散, 喷嘴附近出现滞止区外层剥落和流动干涉, 这是导致此处液滴尺寸不均匀分布的重要因素之一。

## 6 液滴统计分析

为进一步讨论流场中的液滴行为及尺寸特征, 在更短的时间尺度和更小的空间尺度条件下对液滴参数进行统计分析。对在截面 1 和 6 的中心点和边缘点处设置的控制体进行监测, 对不同时刻通过控制体的单个液滴的粒径和轴向速度进行统计分析。

### 6.1 粒径百分比

液滴粒径与液滴数百分比之间的对应关系如图

10所示。对于截面1的中心点和边缘点处的控制体,其通过的不同粒径液滴所占的百分比关系呈现明显的统计特征,通过中心点控制体的液滴覆盖的尺寸范围更大,8 $\mu\text{m}$ 左右的液滴数量最多,约占整个样本数量的10%,且压力升高对不同粒径液滴所占的百分比影响不大。通过截面1边缘点处设置的控制体的液滴数量百分比与液滴粒径的关系呈尖峰分布,占最大比例的液滴尺寸约为18 $\mu\text{m}$ ,占样本数量的24%左右,且射流压力升高到15MPa时,该尺寸液滴所占比例增加至29%左右。

在图10(b)中,截面6的液滴数量百分比与液滴粒径的关系受射流压力的影响同样不明显,且与截面1表现出相似的分布特征。对于中心点处的控制体,其通过的液滴的数量与尺寸对应关系更为平坦。而对于边缘点,其关系曲线的峰值对应的液滴粒径达到36 $\mu\text{m}$ 左右,数量百分比却下降至11%左右。射流压力增加到15MPa时,占最大百分比的液滴的粒径略有减小,百分比的峰值却增加至13.5%左右。

## 6.2 粒径与速度统计关系

液滴数百分比与液滴轴向速度间的对应关系如图11所示。相对于截面6的边缘点,在截面1的边

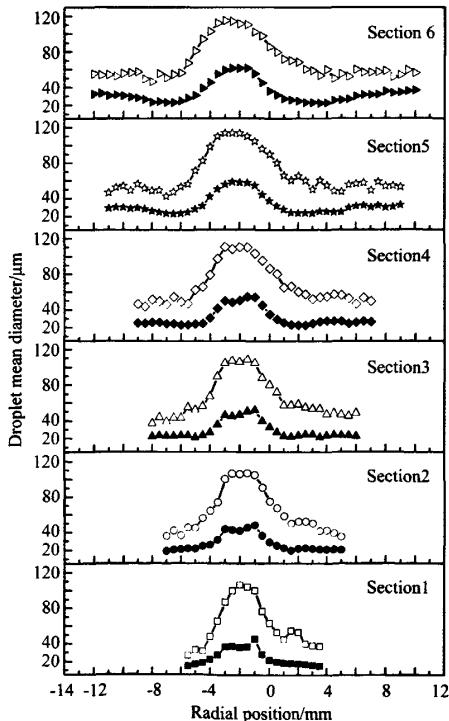


图9 液滴平均粒径(实心符号)和索太尔平均粒径(空心符号)分布

Fig. 9 Distributions of droplet mean diameter (filled symbol) and Sauter mean diameter (empty symbol)

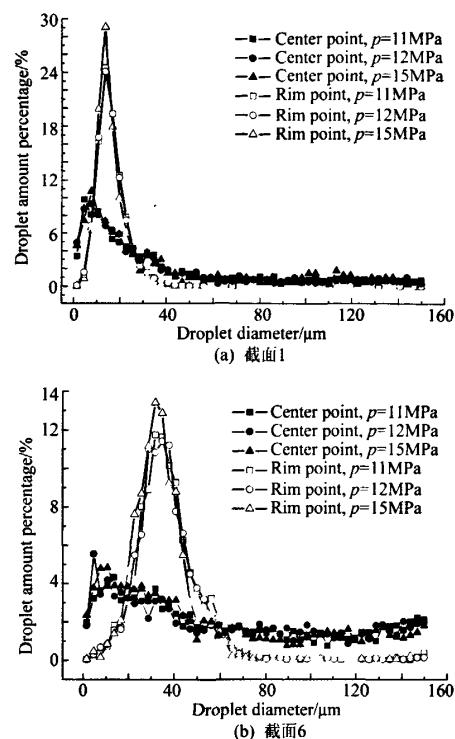


图10 不同粒径液滴的数量百分比  
Fig. 10 Percentage of droplets with different diameters

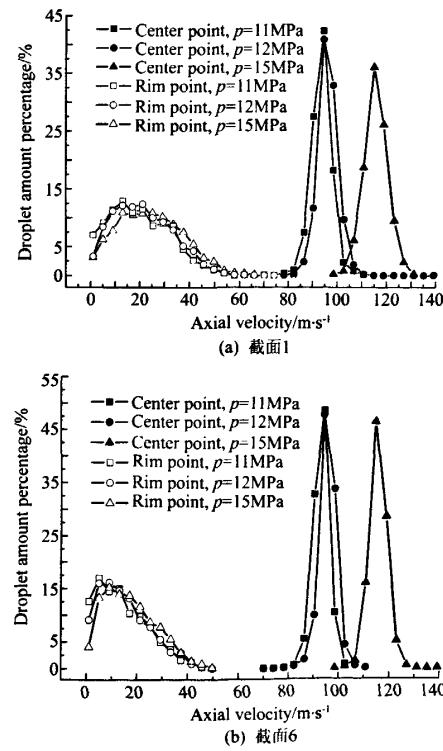


图11 不同轴向速度对应的液滴数百分比  
Fig. 11 Relation between droplet percentage and axial velocity

缘点处,液滴数百分比曲线覆盖的液滴轴向速度范围较大,且曲线峰值对应的液滴轴向速度量值较大。射流压力对边缘点处液滴数百分比曲线的形态没有明显的影响。而对于两个截面的中心点,射流压力的增加使液滴数百分比曲线向横坐标的正向平移,且在中心点处,最大液滴数百分比的值均在40%左右,当射流压力增加到15MPa时,该峰值略有下降。

## 7 结 论

(1) 实验压力条件下,环形射流的能量沿射流方向衰减缓慢,且射流流束中心的高速区较宽,该高速区内的轴向和径向的湍流脉动程度均较弱;

(2) 接近流束中心,液滴数平均粒径和索太尔平均粒径存在着较大的差异,尤其是在距喷嘴最近的截面中心位置,该差异更为显著,说明射流流束中心的液滴粒径谱较宽;

(3) 通过截面边缘控制体的小尺寸液滴占有绝对的数量优势,随着距喷嘴的轴向距离增加,占最大数量比例的液滴的尺寸有所增加。通过射流中心位置控制体的高速液滴的数量占绝对优势,而边缘控制体处的液滴数百分比与液滴轴向速度关系呈现明显的二次曲线分布,具有明显的统计特征。研究结果为环形射流在更深层面的应用提供了参考。

## 参考文献:

- [1] GEORGIOU G. Annular liquid jets at high Reynolds number[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2003, 42:117-130.
- [2] 刘宁,张相炎. 高速环形射流破碎雾化特性及动态喷雾模拟[J]. 弹道学报, 2008, 20(1):11-14.
- [3] BROECKHOVEN T, BROUNS M, VANHERZEELE J, et al. PIV measurements of a double annular jet for validation of numerical simulations[C]. 13th Int Symp. on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Portugal, 26-29 June, 2006.
- [4] CHRISTIAN DEL T, LARS B, JURG G, et al. Numerical and experimental investigation of an annular jet flow with large blockage[J]. Journal of Fluids Engineering, 2004, 126:375-384.
- [5] 薛胜雄. 高压水射流技术工程[M]. 安徽合肥:合肥工业大学出版社, 2006.
- [6] 宫伟力,赵海燕,安里千. 高压水射流结构的红外热像特征[J]. 实验流体力学, 2008, 22(3):31-35.
- [7] 张玉荣,金玉明,余志刚. 高压下液体射流破碎雾化特性实验研究[J]. 航空动力学报, 1999, 14(4):409-412.
- [8] 万云霞,黄勇,朱英. 液体圆柱射流破碎过程的实验[J]. 航空动力学报, 2008, 23(2):208-214.
- [9] 沈熊,魏乃龙,彭涛. 应用激光相位-多普勒系统测量雾化液滴颗粒和流动特性[J]. 流体力学实验与测量, 2000, 14(2):54-60.

## 作者简介:



康 灿(1978-),男,河北宁晋人。江苏大学能源与动力工程学院副教授。研究方向:流体机械内部多相流动、高压水射流脉动特性等。通讯地址:江苏省镇江市学府路301号江苏大学能动学院(212013)。联系电话:0511-88780214-8213, E-mail:kangcan@ujs.edu.cn