

DOI:10.16356/j.1005-2615.2019.04.009

喷雾器喷嘴出口喷流流场特性的实验研究

章 敏 张召明 陈 尹

(南京航空航天大学航空学院,南京,210016)

摘要: 通过定性定量实验手段研究了以水为单介质流体的某农用喷雾器喷嘴出口流场。首先采用单反相机常规拍摄方法,记录了喷雾压力在 50~4 000 Pa 范围内的喷嘴出口流场,发现了随着喷雾压力增大,喷嘴出口射流的形状经历了形成液泡到液泡破裂的过程,以及射流发展及最终稳定过程。然后通过 PIV 测速技术对喷雾压力在 1 000~4 000 Pa 范围内的喷嘴出口流场进行了定量测量实验研究,获得了在纵向截面上,喷嘴出口速度随喷雾压力增大而增大,且在中心线上的速度随着离喷嘴距离的增加均呈现振荡衰减的变化规律。在同一位置横向截面上,随着喷雾压力的增加,旋流强度越强,流速越大;而在同一喷雾压力下,离喷嘴出口距离越近的横截面处旋流强度越大,流速也越大。本文实验研究结果验证了 PIV 测速技术可以用于水雾滴的速度场测量。

关键词: 农用喷雾器;喷雾流场;PIV 测速;流场观察

中图分类号:V211.7

文献标志码:A

文章编号:1005-2615(2019)04-0493-10

Experimental Study on Characteristics of Jet Field Flow at Nozzle Outlet of Sprayer

ZHANG Min, ZHANG Zhaoming, CHEN Yin

(College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: The outlet flow field of an agricultural sprayer nozzle with water as single medium fluid is studied by qualitative and quantitative experiments. Firstly, conventional shooting method using a single-lens reflex camera is used to record the outflow field of the nozzle with the spray pressure ranging from 50 Pa to 4 000 Pa. As the spray pressure increases, the shape of the jet flow at the outlet of the nozzle undergoes a process of bubble formation to corruption, as well as the development and final stabilization of the jet. Then, quantitative measurement is carried out on the outlet flow field of the nozzle with the spray pressure of 1 000—4 000 Pa, using PIV velocity measurement technique. A quantitative measurement experiment is conducted to obtain that on the longitudinal section, the outlet velocity of the nozzle increases with the spray pressure, and the velocity along the center line shows an oscillating attenuation decrease with the increase of the distance from the nozzle. At the same transverse section, with the increase of the spray pressure, the stronger the swirl strength is, the greater the flow velocity will be; while at the same spray pressure, the closer the cross section to the nozzle outlet is, the stronger the swirl strength and the greater the flow velocity will be. The experimental results in this paper show an important reference value to the design of spray nozzles and similar atomizer nozzles. It is also verified that the PIV velocity measurement technique can be used to measure the velocity field of water droplets.

Key words: agricultural sprayer; spray flow field; PIV velocity measurement; flow field observation

基金项目: 江苏高校优势学科建设工程(PAPD)资助项目。

收稿日期: 2018-06-19; **修订日期:** 2018-11-11

通信作者: 张召明,男,研究员,博士生导师,E-mail: zzm603nuaa@163.com。

引用格式: 章敏,张召明,陈尹. 喷雾器喷嘴出口喷流流场特性的实验研究[J]. 南京航空航天大学学报,2019,51(4): 493-502. ZHANG Min, ZHANG Zhaoming, CHEN Yin, et al. Experimental Study on Characteristics of Jet Field Flow at Nozzle Outlet of Sprayer[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 51(4): 493-502.

液体雾化是能源动力、化工、农业和环境工程中一个广泛性的流体力学课题,在燃油燃烧器、结冰风洞水雾化、农作物的喷淋、杀虫剂的喷洒、烟气脱硫中都有广泛应用。

农用喷雾器喷嘴是实现液体雾化的装置,其喷雾流场对喷雾器喷雾效率、效果均有重要作用,其工作原理是将流体的压力能转换为流体的动能,并在喷嘴出口处形成锥体状的雾滴群,并在与空气相互作用下,形成液滴进一步雾化。Lefebvre^[1]和金如山等^[2]采用激光散射技术测量了液滴平均直径。Hebrard等^[3]和顾洪斌^[4]采用激光多普勒分析仪(PDA)对模型燃烧室内喷雾流场中喷嘴出口处的轴向、径向、切向速度等进行了测量。Rizk等^[5]运用实验和数值模拟相结合的方法研究了燃油雾化、液滴湍流扩散、液滴蒸发以及燃烧等一些参数的变化情况,并总结了有一定应用范围的经验公式。王振国等^[6]采用计算流体力学的方法对气液同轴离心式喷嘴冷态液雾两相流场进行了数值模拟,并与气液同轴离心式喷嘴冷态液雾实验结果进行了对比。Holtzclaw等^[7]、Wang等^[8]和万吉安^[9]采用PIV技术研究了燃油喷嘴出口处的速度随着雾化压力的变化以及喷嘴结构对液膜厚度和喷雾锥角的影响。Jeng等^[10-11]采用计算流体力学的方法研究了压力雾化喷嘴液膜的射流情况。Smith等^[12]采用VOF多相流模型对气体雾化喷嘴的内流场进行模拟,研究了液膜厚度、喷嘴出口处液膜的变化、喷嘴出口处的速度以及喷雾锥角在不同雾化压力下的变化情况,并将数值模拟结果与实验结果进行了对比。周立新等^[13]采用单相流模型以及气液两相混合分数的概念建立了离心式喷嘴内流场的数学模型,给出了离心式喷嘴内部液膜与气涡共存的流场结构以及气液交界面的几何形状,并与Jeng等人的计算结果进行了对比。王国辉等^[14]对旋流式喷嘴进行了实验和数值模拟研究,并采用VOF多相流模型对喷嘴内三维气液两相流场进行了数值模拟,用该模型对喷嘴在不同结构尺寸下的流动过程进行了数值模拟,得出了旋流器螺旋角和槽道数会对喷嘴的雾化锥角产生显著的影响。张淑荣等^[15]采用Fluent软件对空气雾化燃油喷嘴的喷雾流场进行了数值模拟,讨论了喷嘴的结构对雾化效果的影响,并分析了喷嘴出口下游截面雾化粒径的分布情况,得出了喷嘴结构是影响雾化质量的重要因素之一。

目前关于农用喷雾器喷嘴的出口流场定量测量研究尚是空白,本文通过流场观察及PIV测速实验对喷雾器喷嘴出口流场特性开展定性和定量研究,可为农用喷雾器喷嘴或类似喷雾器喷嘴的设计

提供参考。

1 喷雾器与实验装置

1.1 某农用喷雾器

实验所采用的某农用喷雾器实物图如图1所示,其中图1(a)为某农用喷雾器,图1(b)为喷嘴外壳,图1(c)为喷嘴内部旋流内芯。

喷雾器用人工加压,通过观察其压力表值获得所需喷雾压力的大小。喷嘴由进液段、加速段、旋流段、密封圈、出口帽共5部分组成。喷雾介质由进液段进入喷嘴,在加速段受流通面积减小作用完成初始加速,经旋流段获得足够的周向速度,最终从出口帽上的喷嘴出口孔喷出。实验采用水做雾化介质,喷嘴出口外为静止的环境大气。实验喷嘴的尺寸参数见表1。



图1 实验喷雾器实物示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental sprayer

表1 实验喷嘴尺寸参数表

Tab. 1 Size parameter of the experimental nozzle

结构名称	尺寸参数
喷嘴出口孔直径/mm	1
喷嘴切向槽个数	2
喷嘴旋流室内径/mm	14

1.2 喷嘴出口处流场常规拍摄装置

本文通过NIKON D610全画幅数码单反相机拍摄了喷雾压力从50~4 000 Pa喷嘴出口处的侧视流场图。拍摄装置如图2所示,拍摄时喷口朝下,背景使用黑布,相机垂直于黑布面,从侧面拍摄喷口流场。



图2 喷雾器喷嘴出口流场常规拍摄装置图

Fig. 2 Conventional shooting device diagram of the sprayer nozzle outlet flow field

1.3 PIV 测速实验装置

本文 PIV 测速系统的实验装置如图 3 所示,由某农用喷雾器、PIV 系统组成。

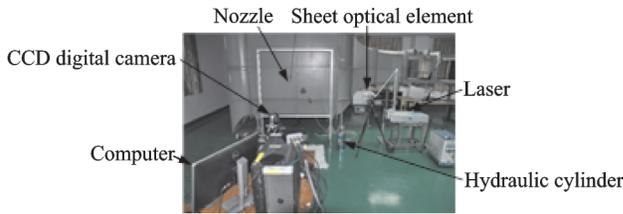


图 3 PIV 测速系统的实验装置图

Fig. 3 Test device diagram of PIV speed measurement system

其中,喷雾器包括了喷嘴、喷杆、阀门、液气缸、压力表、卸荷阀、打气棒等,作用是提供不同喷雾压力下的喷嘴口水射流。

PIV 系统包括了脉冲 Nd:YAG 激光器、片光光学元件、CCD 数字相机、同步器和软件操作系统等,其作用是以激光器作为光源,采用片光光学元件将脉冲激光光束转为片光照亮测试流场区域中的水粒子,通过对水粒子流场的连续两次照明,用 CCD 相机记录下两次曝光的粒子图像,曝光时间为 10 ns,再通过 DynamicStudio2016a 软件对图像进行分析处理,测量出图像上任一水粒子处的瞬时速度,最终可得到测试流场区域的速度场。

2 实验内容

2.1 喷雾器喷嘴出口流场常规拍摄实验

通过 NIKON D610 全画幅数码单反相机拍摄了喷雾压力从 50~4 000 Pa 喷嘴出口处流场图,实验状态见表 2。

表 2 常规拍摄所进行的实验状态

Tab. 2 Test status of regular shooting

喷雾压力/ kPa	0.05	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1	2	3	4
相机拍摄	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√

2.2 喷雾器喷嘴出口流场 PIV 测速实验

通过 PIV 测速系统对喷雾器喷嘴出口喷流流场进行速度场的定量测量,图 4 为本文通过 PIV 测速技术测量的流场截面示意图,纵向截面为雾化器喷嘴出口中心对称截面,横向截面为距离雾化器喷嘴出口 10, 30 和 60 mm 处的截面, α 为靠近喷嘴出口处气液两相边界线的夹角,即称为喷嘴雾化角,而喷嘴雾化角反映了喷流离开喷嘴以后分布的范围,是评估喷雾质量的重要参数。较大的喷嘴雾化

角具有更大的液滴散射面积,有利于提高喷淋的效率。实验状态见表 3。

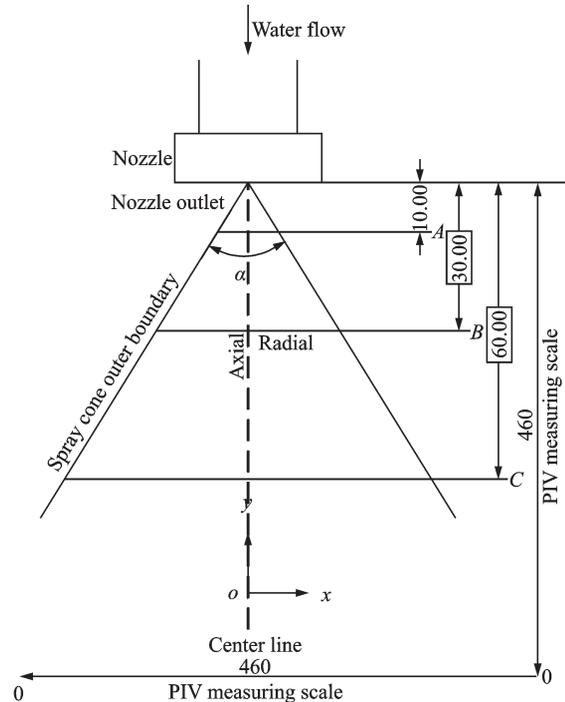


图 4 喷嘴出口喷流流场纵向和横向截面示意图(单位: mm)

Fig. 4 Schematic diagram of the longitudinal and transverse sections of the jet flow field at the nozzle outlet (unit: mm)

表 3 PIV 测速系统所进行的实验状态

Tab. 3 Test status of PIV speed measurement system

喷雾压力/kPa	1	2	3	4
纵向截面	√	√	√	√
横向截面				
A 10 mm	√	√	√	√
B 30 mm	√	√	√	√
C 60 mm	√	√	√	√

3 实验结果和分析

3.1 不同喷雾压力对喷雾器喷嘴出口流场流态的影响

图 5 为在不同喷雾压力下喷雾器喷嘴出口流动形态的演变图,表 4 列出在不同喷雾压力下喷雾器喷嘴出口雾化角随喷雾压力的变化值。从图 5 和表 4 可知,喷雾压力在 50~200 Pa 范围内,随着喷雾压力增大,雾化器喷嘴出口射流流动形态经历了形成液泡到液泡破裂的过程,液泡破裂的临界压力约为 200 Pa;喷雾压力在 200~1 000 Pa 范围内,随着喷雾压力增大,雾化进一步发展,喷嘴雾化角逐渐增大,到 1 000 Pa 时雾化流场基本趋于稳定;喷雾压力在 1 000~4 000 Pa 范围内,随着喷雾压力的增大,雾化角增加的幅度逐渐减小。由此可知,

喷雾器正常工作的最低喷雾压力应为1 000 Pa,所以喷雾压力在1 000 Pa以上,有利于提高喷淋的效率。而喷雾流场的这种变化是由于随着喷雾压力的增加,旋流内芯出口处的切向速度逐渐增大,引

起喷嘴出口外部雾化流场周向速度增大,因此雾化角也随之增大。当喷雾压力大于1 000 Pa时,周向速度受空气阻碍耗散较大,因此雾化角增幅相对减小。

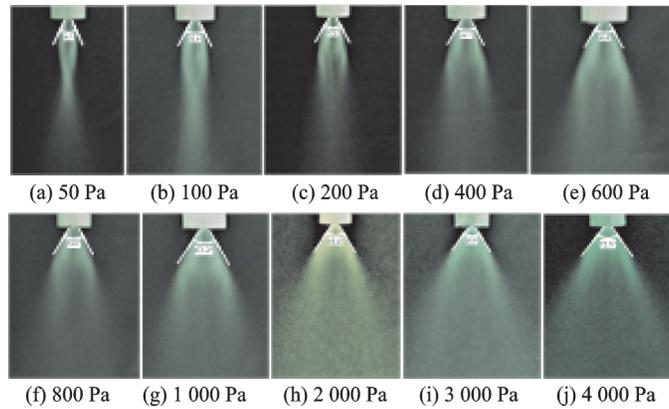


图5 不同喷雾压力下喷雾器喷嘴出口流动形态图

Fig. 5 Flow pattern of nozzle exit of sprayer under different spray pressures

表4 雾化角随喷雾压力的变化

Tab. 4 Variation of atomization angle with spray pressure

喷雾压力/kPa	0.05	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1	2	3	4
雾化角/(°)	54.7	55.0	57.4	58.2	60.4	59.8	63.2	65.4	69.7	72.6

根据流态观测结果,本文主要对喷雾压力在1 000~4 000 Pa范围内喷雾器喷嘴出口充分发展的喷雾流场进行PIV测速实验。

3.2 不同喷雾压力对喷雾器喷嘴出口纵截面处流场特性的影响

图6为喷雾压力在1 000~4 000 Pa范围内,在激光片光照亮下,通过CCD相机拍摄的水粒子图像

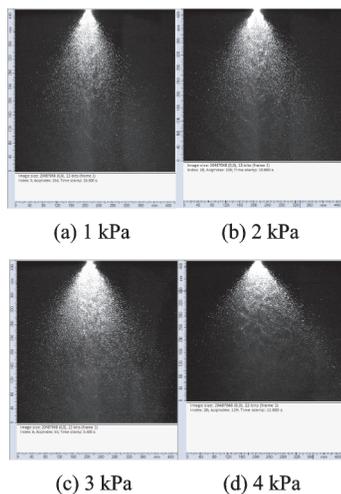


图6 CCD高速相机在不同喷雾压力下拍摄的水粒子图像
Fig. 6 Water particle image taken by CCD high speed camera under different spray pressures

像,从图像结果可以得出,水粒子分布于整个扇形面内,因此,喷流是一个雾状锥体。

图7为通过PIV测速系统测量所得喷嘴出口中心纵向对称截面处的速度云图、速度矢量图和流线图。图8为纵向对称截面中心线上随离喷嘴出口距离变化的速度分布图。从图7中速度云图及速度矢量图可以看出,随着喷雾压力的增加,喷嘴出口处雾化介质的速度逐渐增加,且通过流线图表明喷流向下游呈锥体状扩散,并减速;从图8可以看出,在喷嘴出口中心线上的速度随着离喷嘴出口距离的增加,喷流速度出现明显的振荡衰减。

3.3 不同喷雾压力对离喷雾器喷嘴出口10,30和60 mm横截面处流场特性的影响

图9—11分别为距离喷嘴出口10,30和60 mm横截面处不同喷雾压力下的PIV流场测量结果。在同一截面处,通过观察速度矢量图发现,在不同喷雾压力下各截面上均有漩涡出现,并且随着喷雾压力的增加,漩涡强度越强,流速越大。在同一喷雾压力下,通过观察各截面处的速度矢量图和流线图发现,随着离喷嘴出口的距离增加,速度逐渐减小,旋流强度逐渐减弱。

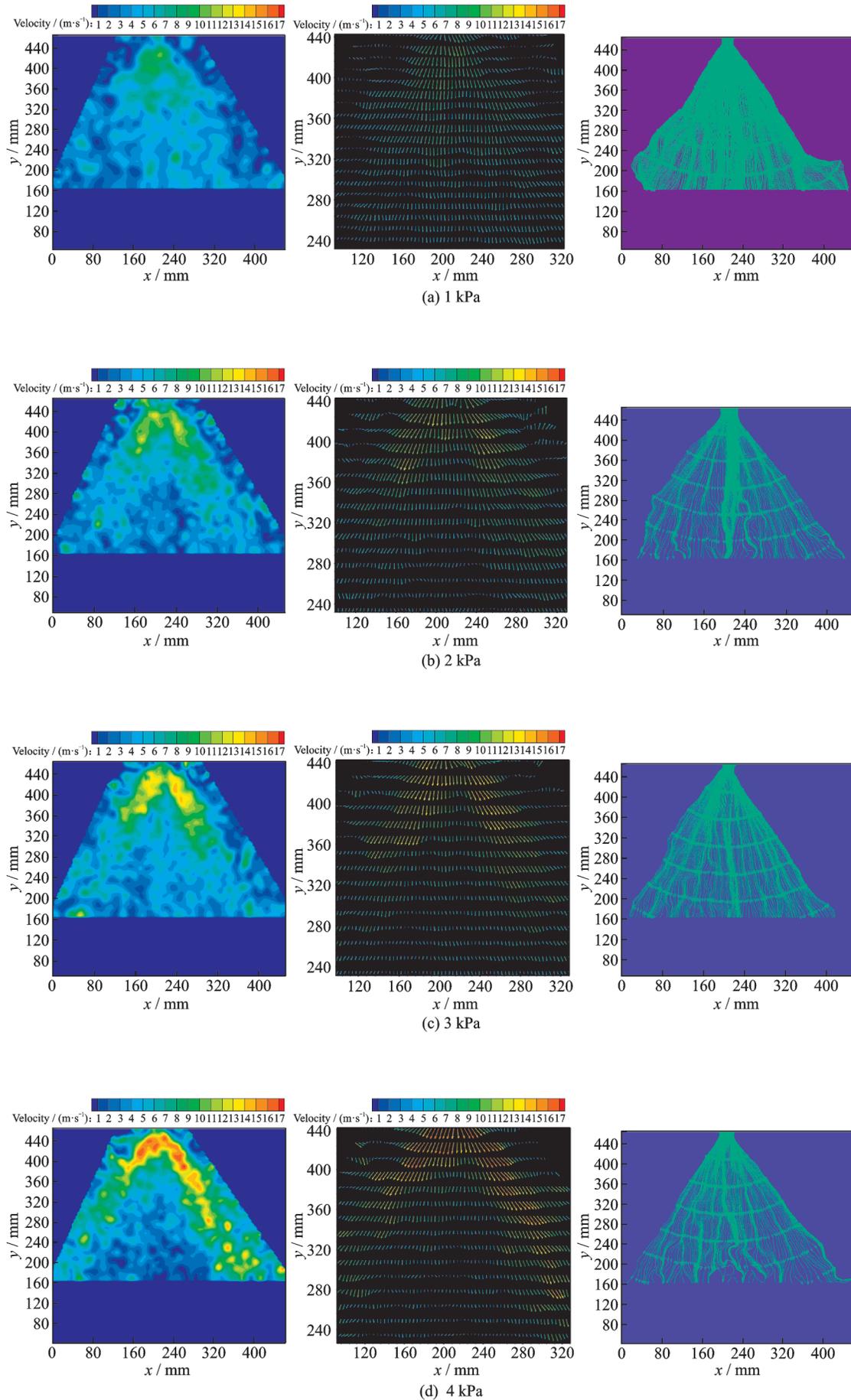


图 7 喷嘴中心对称面处不同喷雾压力下的 PIV 瞬时流场

Fig. 7 PIV instantaneous flow field at different spray pressures at the center of nozzle

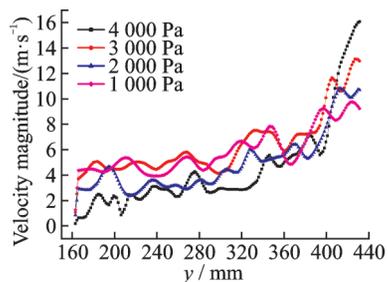
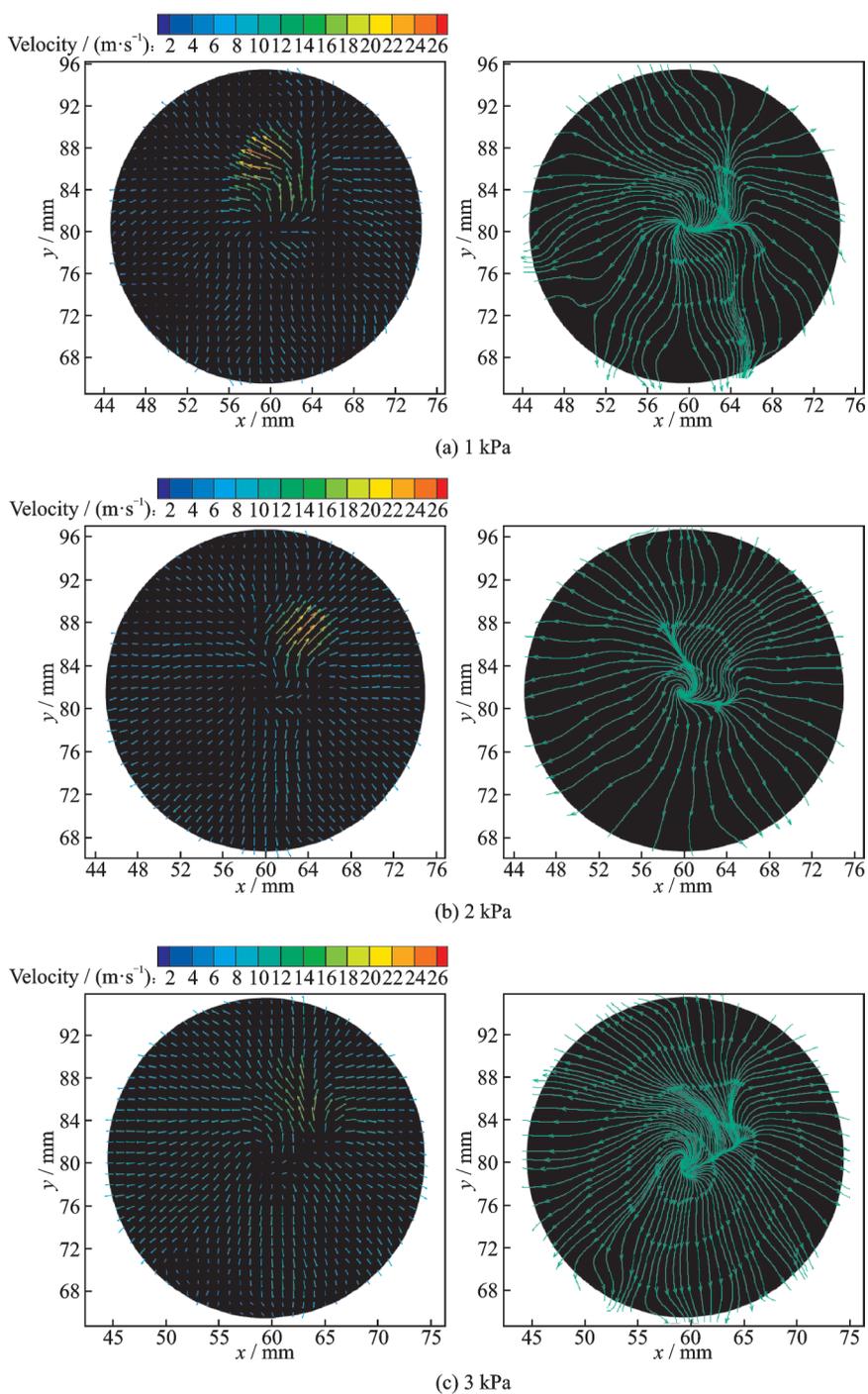


图8 纵向对称截面中心线上的速度大小分布

Fig. 8 Velocity magnitude on the centerline of the longitudinally symmetric section



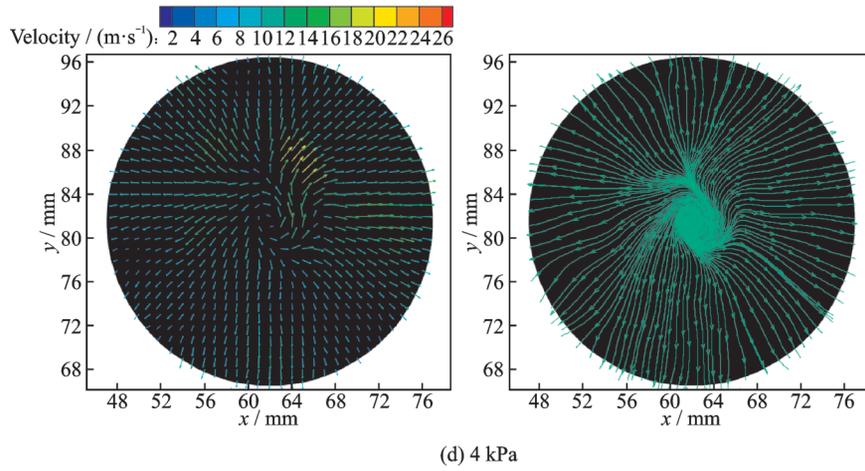
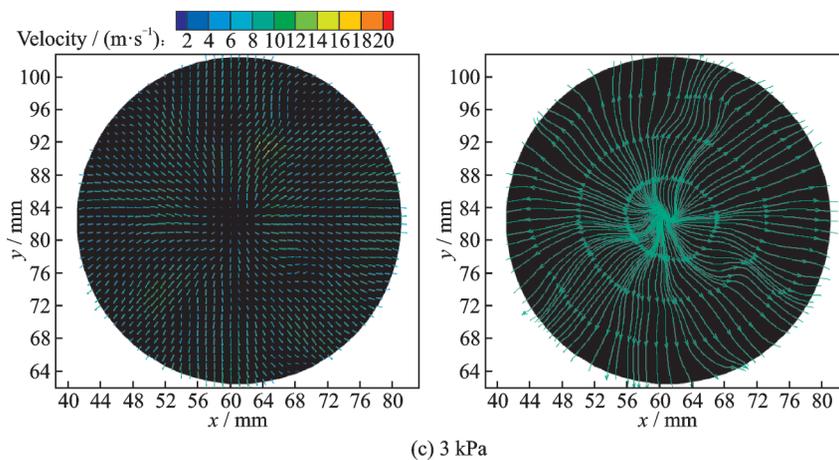
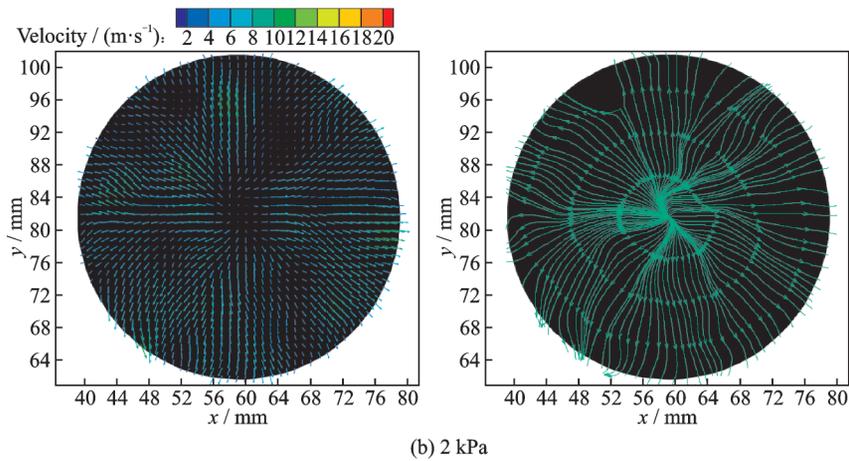
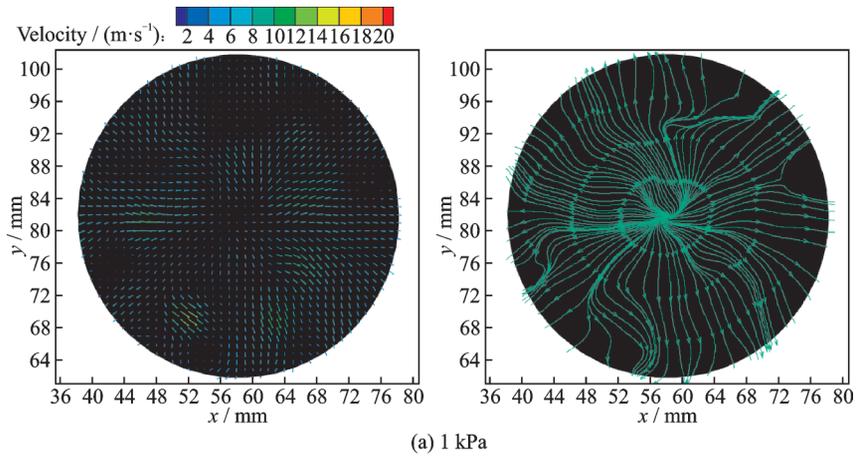


图 9 距离喷嘴出口 10 mm 横截面处不同喷雾压力的 PIV 流场测量结果

Fig. 9 PIV flow field measurement results for different spray pressures at a 10 mm cross section from nozzle outlet



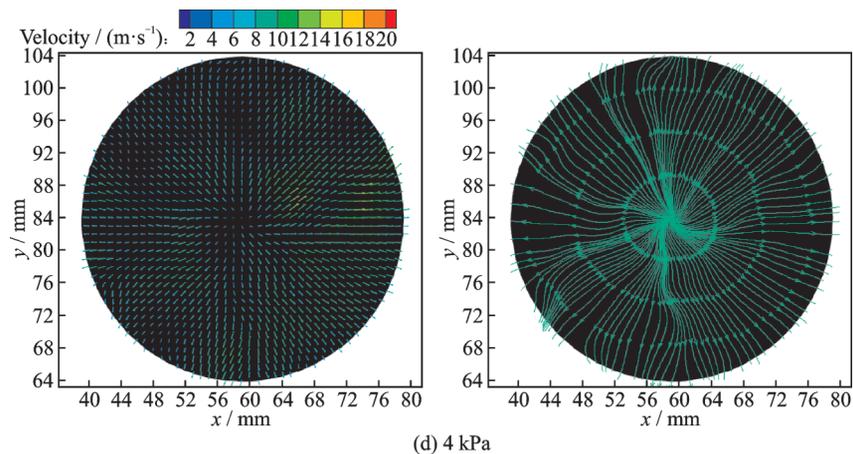
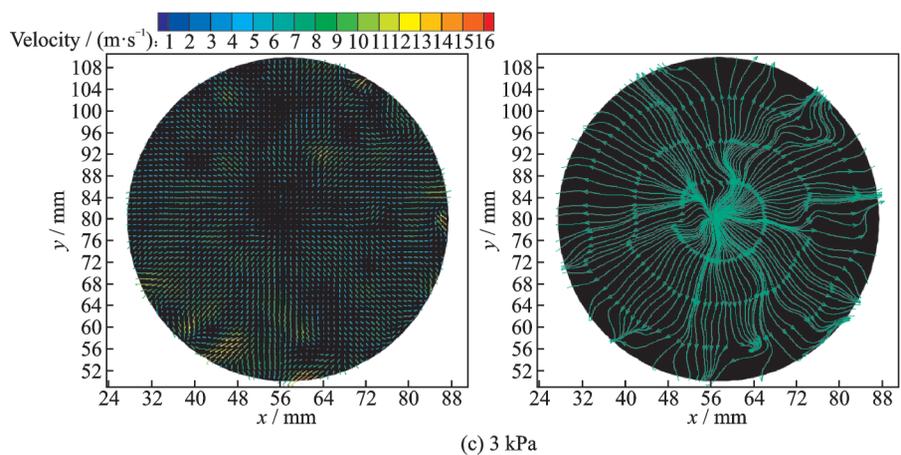
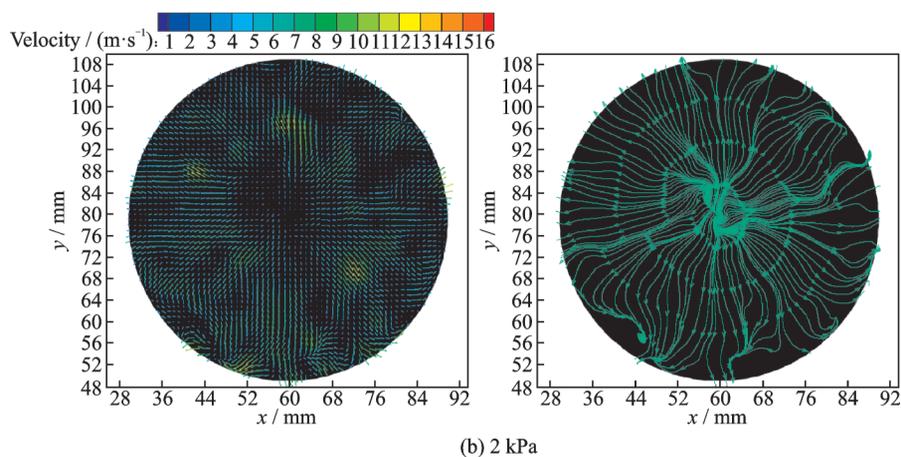
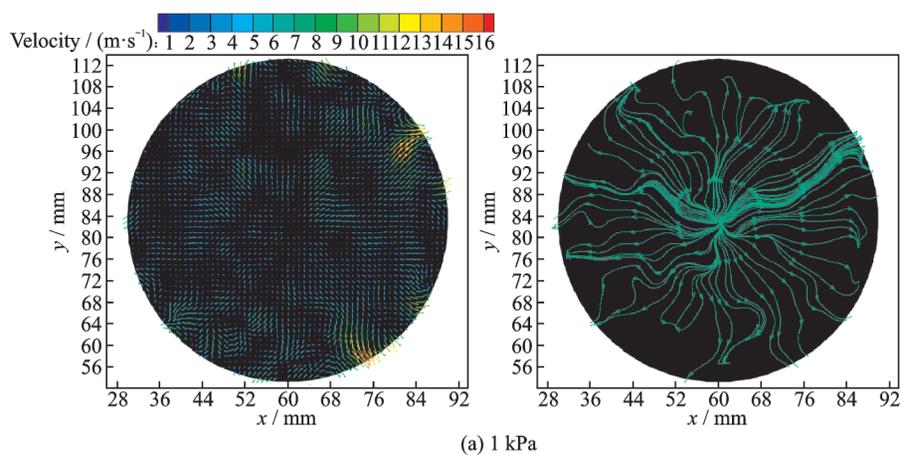


图10 距离喷嘴出口30 mm横截面处不同喷雾压力的PIV 流场测量结果

Fig. 10 PIV flow field measurement results for different spray pressures at a 30 mm cross section from nozzle outlet



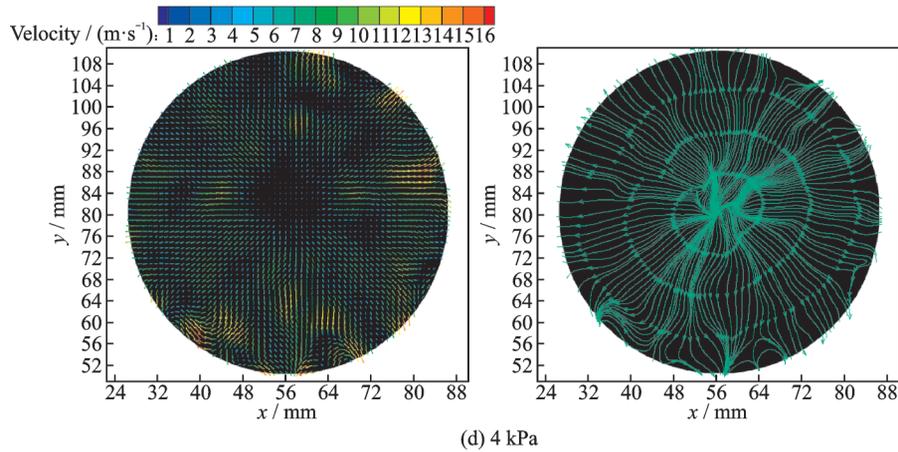


图11 距离喷嘴出口60 mm横截面处不同喷雾压力的PIV流场测量结果

Fig. 11 PIV flow field measurement results for different spray pressures at a 60 mm cross section from nozzle outlet

4 结 论

通过对某农用喷雾器喷嘴出口流场观察及速度场的测量与分析,可以得出以下结论:

(1) 通过常规流场观察和PIV测速方法得到了某农用喷雾器喷嘴出口流场的定性和定量的实验结果。

(2) 对于某农用喷雾器喷嘴,通过流场观察发现,随着喷雾压力的增加,喷嘴出口射流的形状经历了形成液泡到液泡破裂的过程,其临界压力约为200 Pa;喷雾压力在200~1 000 Pa的范围内,喷流雾化角逐渐扩展,到1 000 Pa时形成基本稳定雾化射流;喷雾压力在1 000~4 000 Pa的范围内,喷嘴出口流场的雾化角小幅增大。

(3) 从喷流纵截面PIV测速结果表明,喷流形状为锥体状;喷雾压力越大,喷嘴出口流场速度越大,且随着离喷嘴出口距离的增加喷流速度逐渐振荡衰减。

(4) 从喷流横截面PIV测速结果发现,横向截面上的流场存在旋流;在同一横截面处,随着喷雾压力增大,旋流强度增大,速度增大;而在同一喷雾压力下,离喷嘴出口距离越近的横截面上,旋流越明显,速度越大。

(5) 验证了PIV测速技术可用于水雾滴的速度场测量中。

参考文献:

[1] LEFEBVRE A H. Atomization and spray[M]. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1989.
 [2] 赵云惠,侯木玉,孔祥祯,等. 喷嘴雾化液滴尺寸分布的研究[J]. 北京航空航天大学学报, 1984(3):

47-61.

ZHAO Yunhui, HOU Muyu, KONG Xiangzhen, et al. Investigation on drop size distribution[J]. Journal of Beijing Institute of Aeronautics and Astronautics, 1984(3): 47-61.

[3] HEBRARD H, TRIHET P. Spray characterization and gas phase interaction downstream of a simplified atomizer[J]. AIAA Journal, 1992, 33(11): 3230-3237.

[4] 顾洪斌. 燃烧室内喷嘴雾化机理的研究[D]. 北京:北京航空航天大学, 2000.

GU Hongbin. Investigation of structure of spray in combustor and atomization mechanics of liquid film[D]. Beijing: Beihang University, 2000.

[5] RIZK N K, CHIN J S. Comprehensive fuel nozzle mode[J]. AIAA Journal, 1994, 94: 94-3278.

[6] 王振国,吴晋湘,鄢小清,等. 气液同轴离心式喷嘴喷雾流场数值模拟[J]. 推进技术, 1996, 17(3): 43-49.

WANG Zhenguo, WU Jinxiang, YAN Xiaoqing, et al. Numerical simulation of spray flow processes in coaxial swirling injector[J]. Journal of Propulsion Technology, 1996, 17(3): 43-49.

[7] HOLTZCLAW D, SAKMAN T. Investigation of flow in a simplex fuel nozzle[J]. AIAA Journal, 1997, 31(12): 2790-2796.

[8] WANG Dexin, MA Zhanhua. Experimental study on large-scale simplex nozzle[J]. AIAA Journal, 1999, 30(10): 2401-2408.

[9] 万吉安. 柴油机燃油高压喷雾PIV测量及数值模拟[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.

WAN Ji'an. PIV measurement and numerical simulation of fuel high pressure injection process of diesel engine[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2004.

[10] JENG S M, SAKMAN A T. A numerical parametric

- study of simplex fuel nozzle internal flow and performance[J]. AIAA Journal, 1998, 8(9): 3906-3910.
- [11] JENG S M, JOG M A, BENJAMIN M A. Computational and experimental study of liquid sheet emanating from simplex fuel nozzle [J]. AIAA Journal, 1998, 36(2): 201-207.
- [12] SMITH S, BRETZ D. Application of two-phase CFD analysis to a prefilming pure-airblast atomizer [J]. AIAA Journal, 2001, 26(4): 3938-3946.
- [13] 周立新, 张会强, 雷凡培, 等. 离心式喷嘴内流场特性的数值模拟[J]. 推进技术, 2002, 23(6): 480-484.
ZHOU Lixin, ZHANG Huiqiang, LEI Fanpei, et al. Numerical simulation of internal flow of swirl nozzle [J]. Journal of Propulsion Technology, 2002, 23(6): 480-484.
- [14] 王国辉, 蔡体敏, 何国强, 等. 一种旋流式喷嘴的实验和数值研究[J]. 推进技术, 2003, 24(1): 28-32.
WANG Guohui, CAI Timin, HE Guoqiang, et al. Experimental and numerical investigation of a swirl atomizer [J]. Journal of Propulsion Technology, 2003, 24(1): 28-32.
- [15] 张淑荣, 尹洪超. 空气雾化燃油喷嘴的喷雾数值模拟[J]. 能源技术, 2007, 28(1): 14-16.
ZHANG Shurong, YIN Hongchao. Spray numerical simulation of air blast fuel-oil atomizer [J]. Energy Technology, 2007, 28(1): 14-16.

(编辑:夏道家)