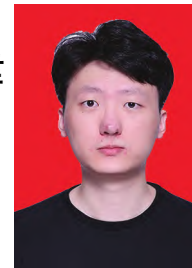




不同结构参数对喷头雾化特性的影响规律

冯静之¹, 朱兴业^{1,2*}, 华珊², 钱兆¹, 刘俊萍¹

(1. 江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心, 江苏 镇江 212013; 2. 农业农村部东南丘陵山地农业装备重点实验室(部省共建), 浙江 杭州 310022)



冯静之

摘要: 针对目前雾化喷嘴存在的雾化压力高、雾化范围小等问题, 设计了一种雾化喷头, 并分析了该喷头的雾化特性。利用激光粒度测试仪探究压力为 0.15~0.30 MPa、出口直径为 0.3~0.9 mm 等条件下对喷头雾化锥角、速度场和液滴粒径的影响, 获取了不同试验条件下流场流动特性的变化规律: 在低压力下, 雾化锥角受喷头出口直径的影响较大, 出口收缩角越大则雾化特性越优良; 出口直径为 0.9 mm 的喷头, 喷腔长孔比为 1、出口收缩角为 75° 时更能实现大范围的作业; 随着喷雾压力增大, 水滴速度最大值也显著增大, 但压力对雾化流场整体速度分布趋势的影响不大。水滴直径也随着喷头出口直径增大而增大, 且喷头出口直径对水滴直径影响显著, 但水滴直径相同时, 出口直径越大, 水滴速度越小。该结果为雾化喷头在中低压范围内的应用提供了理论参考。

关键词: 雾化喷头; 雾化特性; 液滴粒径; 雾化锥角; 出口直径; 出口收缩角

中图分类号: S277.9; S491 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2024)04-0426-07

DOI: 10.3969/j.issn.1674-8530.23.0019

冯静之, 朱兴业, 华珊, 等. 不同结构参数对喷头雾化特性的影响规律[J]. 排灌机械工程学报, 2024, 42(4): 426-432.

FENG Jingzhi, ZHU Xingye, HUA Shan, et al. Influence of different structural parameters on atomization characteristics of nozzle [J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering (JDIME), 2024, 42(4): 426-432. (in Chinese)

Influence of different structural parameters on atomization characteristics of nozzle

FENG Jingzhi¹, ZHU Xingye^{1,2*}, HUA Shan², QIAN Zhao¹, LIU Junping¹

(1. National Research Center of Pumps, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China; 2. Key Laboratory of Agricultural Equipment for Hilly and Mountainous Areas in Southeastern China (Co Construction by Ministry and Province), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Hangzhou, Zhejiang 310022, China)

Abstract: Aiming at solving the problems of high atomization pressure and small atomization range in the development of current atomization nozzles, a new atomization nozzle was designed, and its atomization characteristics were analyzed. A laser particle size tester was used to investigate the effects of pressure (0.15–0.30 MPa) and different outlet diameters (0.3–0.9 mm) on the nozzle atomization cone angle, velocity field, and droplet size, to obtain the changed rules of flow characteristics of the flow field under different test conditions. It is found that under low pressure, the atomization cone angle is greatly affected by the nozzle outlet diameter, and the larger the outlet contraction angle, the better the atomization characteristics. The nozzle with a outlet diameter of 0.9 mm can achieve a relatively wide range of operation when the length-to-diameter ratio of spray cavity is 1 and the outlet contraction

收稿日期: 2023-02-07; 修回日期: 2023-03-30; 网络出版时间: 2024-04-11

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/32.1814.TH.20240408.1416.004>

基金项目: 江苏省重点研发计划项目(BE2022351); 江苏大学农业装备学部项目(NZXB20210101); 农业农村部东南丘陵山地农业装备重点实验室(部省共建)开放基金项目(QSKF2023007)

第一作者简介: 冯静之(1997—), 男, 江苏镇江人, 硕士研究生(307521934@qq.com), 主要从事流体机械及排灌机械研究。

通信作者简介: 朱兴业(1982—), 男, 研究员, 博士生导师(zhuxy@ujs.edu.cn), 主要从事流体机械及排灌机械研究。

angle is 75° . With the increase of working pressure, the maximum value of droplet velocity also increases significantly, but the pressure has little influence on the overall velocity distribution of the atomization flow field. The droplet diameter also increases with the increase of outlet diameter, and the nozzle outlet diameter has a significant impact on the droplet diameter, but the larger the outlet diameter, the smaller the droplet velocity under the same droplet diameter. This result provides a reference for the application of nozzles in the medium and low pressure range.

Key words: atomization nozzle; atomization characteristics; droplet size; atomization cone angle; outlet diameter; outlet contraction angle

节水灌溉装备的研发升级和节水灌溉技术的进步是提高农业水资源利用率,实现中国农业可持续发展的必须手段^[1].而雾化喷头是一种相对于传统灌溉用喷头能够更高效地利用水资源并提高节水节能效率的装备,它对于改善农田生态环境能发挥非常重要的实际效益^[2-4].

目前雾化喷头的研究方法主要从雾化的原理切入,对液柱及液膜射流的破碎机理进行研究.GONZALEZ-JUEZ 等^[5]利用粒子筛选器和 CFD 软件得到液滴轨迹及液膜厚度的分布规律.HE 等^[6]借助高速摄影及相位多普勒干涉仪对喷雾特性进行测量,发现随环境压力的增加,喷雾区域和完整的液膜面积减小,喷雾角度变小、喷雾宽度和破碎长度缩短,液滴粒径(sauter mean diameter, SMD)沿径向逐渐增大.TURNER 等^[7]对经典雾化模型和直接数值模拟的替代模型进行建模,测试出与流动相关的 2 个液滴尺寸分布等局部信息参数.张林国等^[8]使用高速摄影设备和 Matlab 软件研究了孔径为 0.3, 0.5, 0.8 和 1.0 mm 的低压精细雾化喷头在 0.15 MPa 压力下的流量、雾化角和雾化粒径雾化特性.吴英亮等^[9]利用 Fluent 软件开展正交试验模拟,研究了喷头出口缩进距离、喷头出口直径、喷头气液夹角等参数对喷头雾化性能的影响.朱兴业等^[10]对低压雾化喷头进行了正交试验,得到影响射程的因素按主次顺序分别为孔径、压力、喷头和锥盘间距.侯诗文等^[11]采用 CFD 对滴头内部流场进行仿真计算,分析了滴头内部流场分布特性和滴头出入口流体物理参数变化特征.XIA 等^[12]利用高速摄影及相位多普勒风速仪发现 SMD 随空气动力学韦伯数的增加而呈指数变化.DONG 等^[13]对气液交界面进行追踪,预测出喷嘴出口雾化角变化及喷嘴液膜的形成对雾化特性的影响.吴进军等^[14]对直射式喷嘴采用试验和数值模拟的方式开展研究,发现压力增大对一次雾化的影响要比二次雾化的影响大.孙春华等^[15]建立了气泡雾化喷射可视化试验系统

以及喷嘴内部和雾化流场中的气液流动模型,发现液滴粒径分布范围随喷头出口轴向距离增大而增大,且液滴峰值的数量减少.段福义^[16]对喷头仰角调节结构以及可旋转雾化调节器进行优化设计,实现喷头流量与雾化射程的同步调整.杨超等^[17]通过喷雾试验对比分析了改进前后喷嘴的雾化效果,并探究了不同运行参数对拉瓦尔式结构喷嘴雾化性能的影响规律.

以上研究往往是通过对比液柱、液膜的破碎机理评价喷头性能的优劣,但关于不同工况及不同结构参数的喷头喷洒雾化特性之间的研究较少,可以采用多因素综合评价的方式对喷头的性能进行评价.因此,文中通过设计试验,探究不同结构参数对雾化特性的影响,利用 Tecplot 拟合不同工况下的时间平均速度云图进行后续分析,最后基于给出的分析,得出雾化效果最佳的组合.

1 材料与方法

1.1 喷头重要结构参数与试验平台搭建

试验采用低压雾化喷头(一种空心锥喷头).在一个稳定的雾化系统中,喷头出口直径及入口直径应为定值.图 1 为不同出口直径 D 的喷头实物图,从左到右喷头出口直径依次为 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 mm.



图 1 不同出口直径喷头实物图
Fig.1 Physical diagram of nozzle outlet diameter

喷腔长孔比及喷头出口收缩角示意如图 2 所示,图中 L 为喷头出口段长度; θ 为喷头出口收缩角.喷头出口段长孔比($\kappa=L/D$)是影响喷头的流量系数及流动阻力等射流状态的重要参数.当确定喷头出口直径 D 后,需要根据实际工程需求设计合理的

出口段长度 L ,使得雾化液滴的分布更加均匀.喷头出口收缩角 θ 决定了喷头流动阻力,若收缩角过小,则在喷射过程中出现一定的附壁现象,缩短了射流的连续长度,缩小了喷头雾化区域范围.

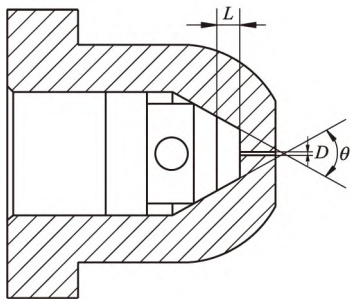
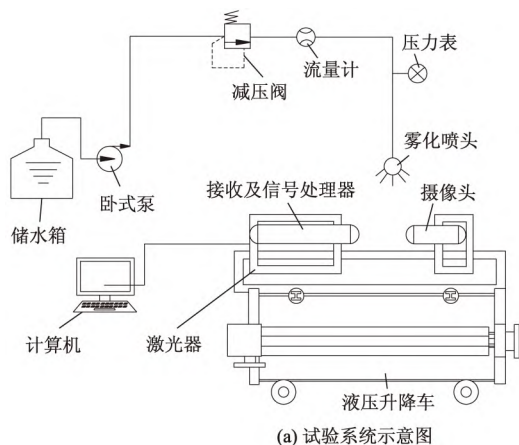
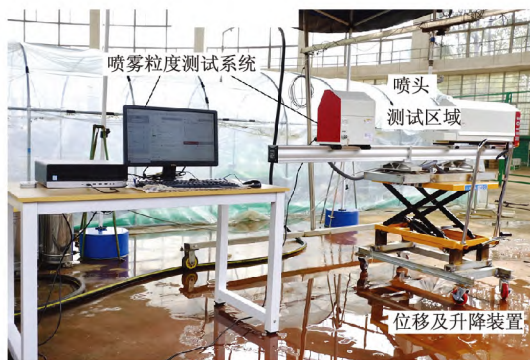


图 2 喷头喷腔长孔比、出口收缩角示意图
Fig.2 Schematic diagram of length-to-diameter ratio and outlet contraction angle of nozzle spray cavity



(a) 试验系统示意图



(b) 测试平台实物

图 3 喷雾粒径试验系统及平台实物图

Fig.3 Physical diagram of spray particle size test system and platform

1.2 试验方案

试验在江苏大学国家水泵系统及工程技术研究中心的室内无风喷灌试验室进行,以确保试验环境稳定.喷雾粒径试验前,首先利用风速仪测试风速,此处进行二次排查以排除任何可能影响试验结果的外部因素.在进行喷雾粒径试验时,首先打开激光粒度仪的测光系统进行精准对焦和背景设置,然后开启水泵,按照不同试验工况及条件调整水压等所需的运行参数.喷头开始工作,待 3 min 左右喷雾流场稳定,然后开启数据采集系统.确保测量数据的精度而不会发生较大的扭曲现象,在每一工况下均连续采集 3 次然后取其平均值.试验设定采集测量时间为 20 s,试验过程中的环境温度为常温,相对湿度为 30%~60%.

喷头喷雾雾滴特性随时间及空间的改变而发生变化.试验在中低压(0.15~0.30 MPa)下,利用先进 PIV 技术及激光粒度仪测量喷头雾化流场,设计

图 3 为文中自主改建的喷雾粒径试验系统及测试平台.该试验测试平台主要由喷雾系统、激光粒度测试系统和测试区域等 3 部分组成.

激光粒度测试系统用于完成测试区域喷雾流场内雾化液滴粒度的测量,采集液滴的粒度分布信息.文中利用搭建好的试验平台实施多压力工况下不同喷头结构的可视化试验测试工作.主要借助自行搭建的基于搭载 HELOS-VARIO 系统的激光粒度测试仪(德国 SYMPATEC,测试范围为 0.1~3 500 μm ,测试精度<0.3%)的开放式喷雾试验装置,对雾化喷头的喷雾流场通过激光衍射原理进行粒径测量.喷雾系统由水泵、流量计、压力表、储水箱、减压阀及雾化喷头等元器件组成,包括水管、支架及高精度温湿度测试仪等其他辅助元件.

优化雾化喷头的流动特性参数,探究不同结构参数(出口直径、喷腔长孔比、出口收缩角)对喷雾特性的影响,获取了不同试验条件下雾化流场的流动特性及其变化规律.

2 测试结果与讨论

2.1 喷头出口直径对雾化特性的影响

保证工质水压力为 0.20 MPa,同时其余的结构参数保持不变,得到了 0.20 MPa 时不同出口直径下的雾化流场时间平均速度云图,如图 4 所示.由图可知,雾化流场内高值区域随出口直径的增大出现向外扩张的趋势,中心区域与周边区域的速度差值减少.且出口直径较大的喷头雾化流场的时间平均速度 v 分布更为均匀,出口直径较小的喷头,其雾化流场中存在较为明显的束状高值区域.

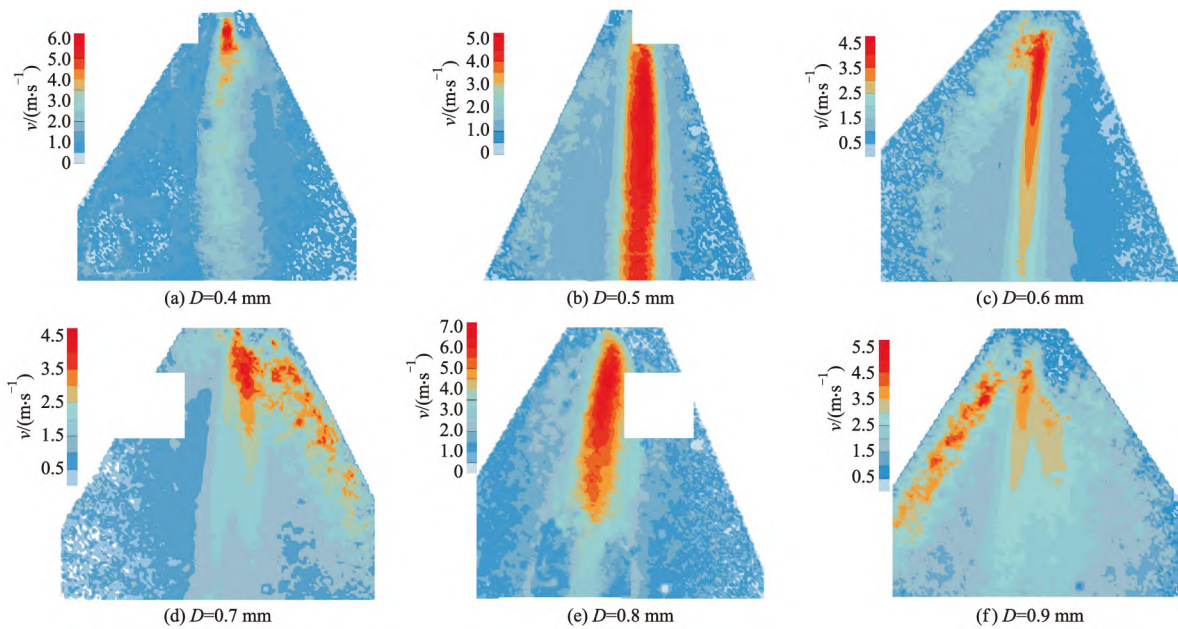


图 4 不同出口直径喷头 0.20 MPa 压力下时间平均速度云图
Fig.4 Time-average velocity cloud diagram of nozzles with different outlet diameters under pressure of 0.20 MPa

喷头雾化锥角 δ 可直观反映喷头的雾化射程,不同工质水压力 p 下喷头雾化锥角随喷头出口直径变化的曲线如图 5 所示。

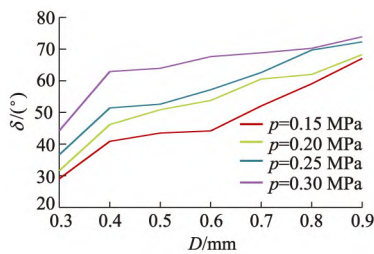


图 5 雾化锥角随喷头出口直径的变化
Fig.5 Atomization cone angle changes with outlet diameter of nozzle

由图 5 可知,当喷头出口直径由 0.3 mm 向 0.4 mm 变化时,在 4 种压力下,雾化锥角均表现出较大的增长,当孔径为 0.4~0.6 mm 时,雾化锥角的增长较为平缓。当 p 为 0.15 MPa 时,雾化锥角受喷头出口直径的影响较大;而当 p 为 0.30 MPa 时,喷头出口直径的增大对改变主流区域范围的正向促进作用不明显。当喷头出口直径为 0.3~0.9 mm。工质水压力为 0.15~0.30 MPa 时,液滴 SMD 在稳定截面上的变化情况如表 1 所示。可知随喷头出口直径增加, SMD 在稳定截面上逐渐增大,但在不同的压力下变化的幅度并不相同:在 0.15 MPa 压力下,喷头出口直径由 0.3 mm 增至 0.4 mm 时,液滴的 SMD 增幅较大,为 7.6%;在 0.30 MPa 压力下,喷头出口直径由

0.8 mm 增至 0.9 mm 时,液滴的 SMD 增幅较大,为 7.3%。

表 1 不同出口直径喷头液滴粒径分布情况
Tab.1 Droplet size distribution of nozzle with different outlet diameters

p/MPa	$SMD/\mu\text{m}$						
	$D=0.3\text{ mm}$	$D=0.4\text{ mm}$	$D=0.5\text{ mm}$	$D=0.6\text{ mm}$	$D=0.7\text{ mm}$	$D=0.8\text{ mm}$	$D=0.9\text{ mm}$
0.15	117.11	126.07	124.95	130.98	126.45	132.47	134.88
0.20	98.57	99.38	105.84	109.28	113.58	115.39	116.78
0.25	87.90	89.48	93.63	100.43	94.99	97.66	100.55
0.30	66.09	69.23	73.88	76.80	82.74	82.78	88.82

2.2 喷腔长孔比对喷头雾化特性的影响

图 6 为出口直径 0.5 mm 和 0.9 mm 的喷头在不同长孔比下时间平均速度云图。固定工质水压力 0.25 MPa 下,分别对出口直径为 0.5 mm 和 0.9 mm、出口收缩角为 75° 的喷头在不同长孔比结构尺寸下,计算各个雾化流场的时间平均速度、雾化锥角及 SMD ,探究喷腔长孔比 κ 对喷头雾化流场的影响规律。

由图 6 可知,速度高值整体分布在喷头出口处,且喷腔长孔比对喷头速度场有较大的影响。以 0.9 mm 出口直径喷头为例,随着长孔比的增大,速度分布越集中且更为接近射流式喷头喷形,导致射流液体黏性力增大,液滴在径向分离困难,导致速度沿径向拓展的区域较小,速度高值区域在喷头轴线方向上外延较大,流场主流区域的对称性较为显著。

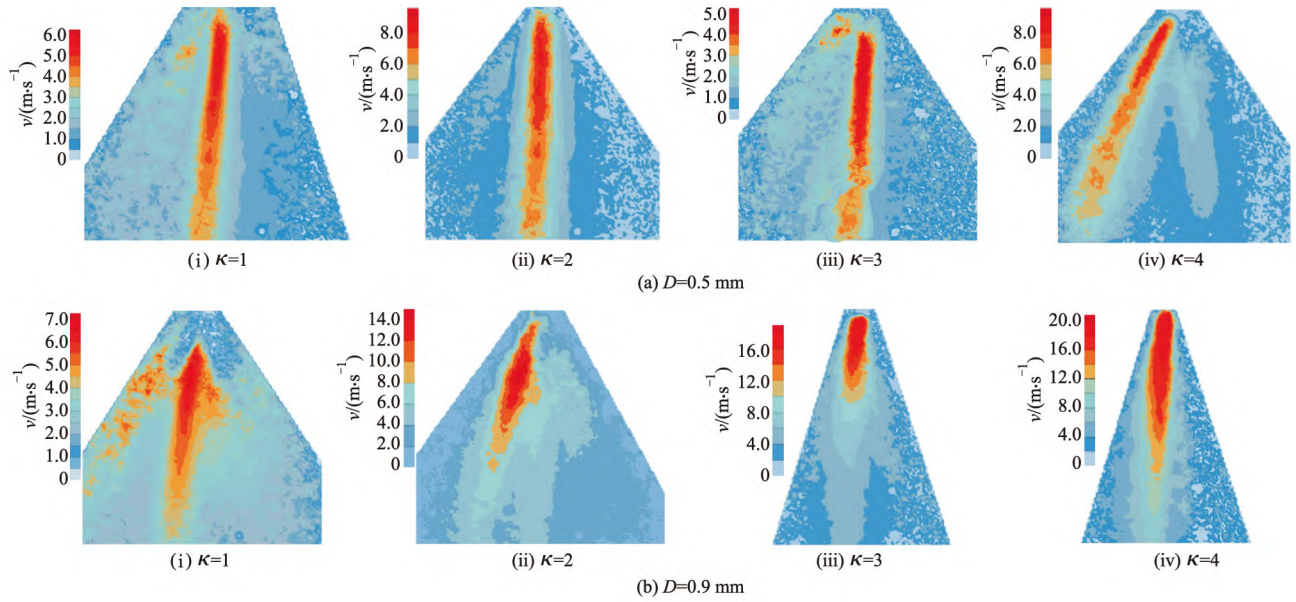


图 6 出口直径 0.5 mm 和 0.9 mm 的喷头在不同长孔比下时间平均速度云图

Fig.6 Time-average velocity cloud diagram of nozzles with outlet diameters of 0.5 mm and 0.9 mm under different length-to-diameter ratios

对出口直径为 $D=0.5$ mm 和 $D=0.9$ mm 的喷头在 0.25 MPa 工质水压力下的雾化流场进行分析,得到了雾化锥角随喷腔长孔比的变化曲线,如图 7 所示.

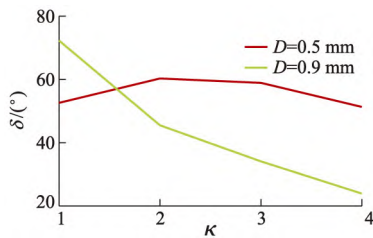


图 7 雾化锥角随喷腔长孔比的变化

Fig.7 Atomization cone angle changes with length-to-diameter of spray cavity

由图 7 可知,不同的喷腔长孔比对不同出口直径喷头的雾化锥角影响趋势并不一样.0.9 mm 出口直径的喷头,随喷腔长孔比增大,雾化锥角呈现逐渐减小的趋势,而 0.5 mm 出口直径的喷头流场的雾化锥角则呈先增大后减小的趋势.

2.3 出口收缩角对喷头雾化特性的影响

固定工质水压力为 0.25 MPa 时,分别对孔径为 0.4, 0.6 和 0.8 mm 以及喷腔长孔比为 2 的喷头在不同出口收缩角结构尺寸下,计算各个雾化流场的时间平均速度、主流区边界线以及雾化锥角,探究出口收缩角对喷头雾化流场的影响规律.

图 8 为出口直径 0.4, 0.6 和 0.8 mm 的喷头在不同出口收缩角下时间平均速度云图.

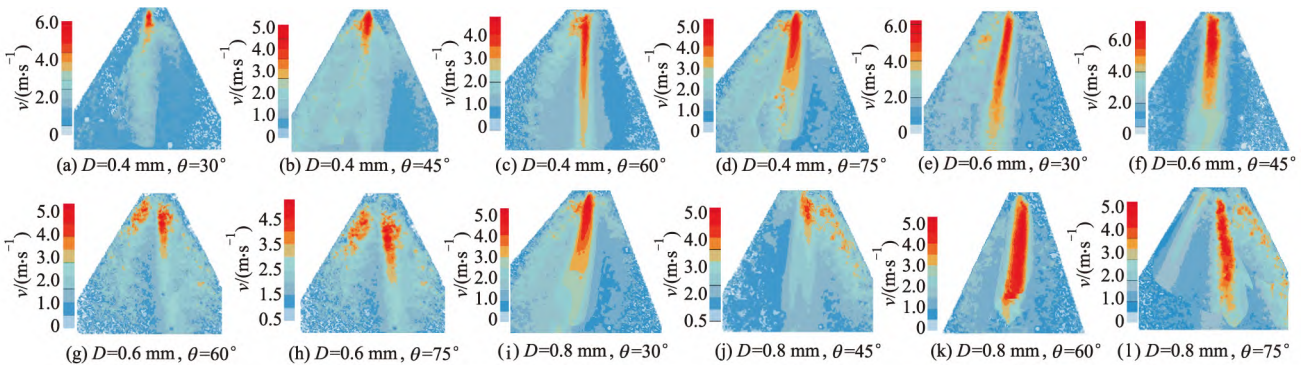


图 8 出口直径为 0.4, 0.6 和 0.8 mm 的喷头在不同出口收缩角下时间平均速度云图

Fig.8 Time-average velocity cloud diagram of nozzles with outlet diameters of 0.4, 0.6 and 0.8 mm under different outlet contraction angles

由图 8 看出,喷头出口速度及主流区随出口收缩角增加而增大,液滴的轴向速度波动并不明显.这

表明喷头出口收缩角对液滴脉动速度的影响并不大,出口处的最大速度值受到的影响较为显著。

图9为喷头雾化锥角随出口收缩角的变化,由图可知,不同出口直径的喷头雾化锥角随出口收缩角增大而增大,且出口直径大的喷头雾化锥角更容易受到出口收缩角的影响。

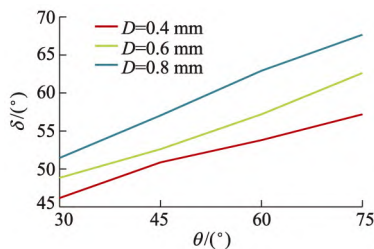


图9 雾化锥角随出口收缩角的变化

Fig.9 Atomization cone angle changes with outlet contraction angle

图10为喷头出口直径分别为0.4、0.6和0.8 mm,喷腔长孔比为2时在不同出口收缩角下的液滴SMD分布,由图可知,喷头液滴SMD随喷头出口收缩角的增大而增大。对于出口直径为0.6和0.8 mm的喷头均在出口收缩角30°~45°增幅较大,而在45°~75°增长较为平缓。而对于出口直径为0.4 mm的喷头,在收缩角60°~75°增幅较大,这表明该直径的喷头在较大收缩角结构下液滴粒径所受影响较大。

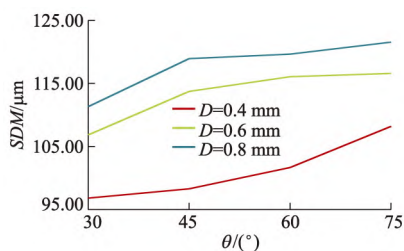


图10 $\kappa=2$ 时不同出口收缩角对液滴SMD分布的影响

Fig.10 Influence of different outlet contraction angles on droplet SMD distribution when $\kappa=2$

3 结论

1) 出口直径较小的喷头容易出现速度集中的现象,且小孔径喷头出口直径变化对雾化锥角的影响较为明显;液滴SMD在稳定截面上随喷头出口直径增加而逐渐增大,且压力越大,雾滴粒径越小,雾化质量越高。

2) 喷腔长孔比对喷头速度场和雾化锥角有较大的影响。随着长孔比增大,速度分布越集中且更为接近射流式喷头喷形,速度沿径向拓展的区域较

小,速度高值区域在喷头轴线方向上外延较大,流场主流区域的对称性较为显著。而随着长孔比增大,雾化锥角最终呈逐渐减小的趋势。

3) 出口收缩角对喷头的出口速度和雾化锥角有显著的影响,随着出口收缩角增大,出口速度和雾化锥角都呈增大的趋势。所以孔径为0.9 mm、喷腔长孔比为1、出口收缩角为75°的喷头更能实现大范围的作业,而对于出口直径较小的喷头则需要选择合适的长孔比才能使雾化液滴更均匀有效地分布在目标区域内,实现喷头雾化应用效果的最优化。

参考文献 (References)

- [1] 代志伟,程曼,袁洪波,等.温室灌溉控制策略研究进展[J].中国农机化学报,2022,43(9):63-72.
DAI Zhiwei, CHENG Man, YUAN Hongbo, et al. Review of irrigation control strategy for greenhouse[J]. Journal of Chinese agricultural mechanization, 2022, 43(9): 63-72. (in Chinese)
- [2] 李建平,茹煜,倪佳胜,等.梯形果园风送静电喷雾机仿真分析及试验[J].江苏大学学报(自然科学版),2023,44(1):45-51.
LI Jianping, RU Yu, NI Jiasheng, et al. Simulation analysis and experiment of trapezoidal orchard air delivery electrostatic spray machine [J]. Journal of Jiangsu University (natural science edition), 2023, 44(1): 45-51. (in Chinese)
- [3] 刘俊萍,朱兴业,袁寿其,等.中国农业节水喷灌装备研究进展及发展趋势[J].排灌机械工程学报,2022,40(1):87-96.
LIU Junping, ZHU Xingye, YUAN Shouqi, et al. Research and development trend of agricultural water-saving sprinkler and micro-irrigation equipment in China [J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2022, 40(1): 87-96. (in Chinese)
- [4] 王亚林,印祥,杨爽,等.基于PWM的电控精量喷雾控制系统设计与试验[J].中国农机化学报,2023,44(5):81-88.
WANG Yalin, YIN Xiang, YANG Shuang, et al. Design and experiment of electronically controlled precision spray control system based on PWM [J]. Journal of Chinese agricultural mechanization, 2023, 44(5): 81-88. (in Chinese)
- [5] GONZALEZ-JUEZ E D, KERSTEIN A R. Multiscale modeling of turbulent atomization: droplet-size sampling [J]. International journal of multiphase flow, 2020, 128: 103268.
- [6] HE X J, CHEN C, YANG Y, et al. Experimental study

- on the flow field distribution characteristics of an open-end swirl injector under ambient pressure[J]. *Aerospace science and technology*, 2020, 98: 105691.
- [7] TURNER M R, SAZHIN S S, HEALEY J J, et al. A breakup model for transient diesel fuel sprays[J]. *Fuel*, 2012, 97: 288-305.
- [8] 张林国, 朱兴业, 胡广, 等. 低压雾化喷头水力性能试验研究[J]. *中国农村水利水电*, 2018(10): 109-113.
ZHANG Linguo, ZHU Xingye, HU Guang, et al. Experimental research on the hydraulic performance of low-pressure atomization nozzle [J]. *China rural water and hydropower*, 2018(10): 109-113. (in Chinese)
- [9] 吴英亮, 钱炜, 王东昌. 基于 CFD 及正交试验的喷嘴雾化性能研究[J]. *农业装备与车辆工程*, 2020, 58(9): 104-107.
WU Yingliang, QIAN Wei, WANG Dongchang. Study on atomization performance of release agent nozzle based on CFD and orthogonal test [J]. *Agricultural equipment & vehicle engineering*, 2020, 58(9): 104-107.
- [10] 朱兴业, 张爱英, 张林国, 等. 低压雾化喷头雾化性能试验[J]. *排灌机械工程学报*, 2021, 39(2): 210-216.
ZHU Xingye, ZHANG Aiyong, ZHANG Linguo, et al. Research on atomization performance of low-pressure atomization nozzle [J]. *Journal of drainage and irrigation machinery engineering*, 2021, 39(2): 210-216. (in Chinese)
- [11] 侯诗文, 张朋杨, 李亮, 等. 基于 CFD 可调式微滴头流场特性分析[J]. *排灌机械工程学报*, 2020, 38(8): 855-860.
HOU Shiwen, ZHANG Pengyang, LI Liang, et al. Analysis of flow field characteristics of adjustable micro-dripper based on CFD [J]. *Journal of drainage and irrigation machinery engineering*, 2020, 38(8): 855-860. (in Chinese)
- [12] XIA Y, KHEZZAR L, ALSHEHHI M, et al. Droplet size and velocity characteristics of water-air impinging jet atomizer [J]. *International journal of multiphase flow*, 2017, 94: 31-43.
- [13] DONG Q, ISHIMA T, KAWASHIMA H, et al. A study on the spray characteristics of a piezo pintle-type injector for DI gasoline engines [J]. *Journal of mechanical science and technology*, 2013, 27(7): 1981-1993.
- [14] 吴进军, 常国强, 钱鑫. 压力对直射式喷嘴雾化影响的机理研究[J]. *现代机械*, 2019(6): 46-49.
WU Jinjun, CHANG Guoqiang, QIAN Xin. Effects of pressure on atomization mechanism of plain orifice atomizer [J]. *Modern machinery*, 2019(6): 46-49. (in Chinese)
- [15] 孙春华, 宁智, 乔信起, 等. 气泡雾化喷嘴泡状流喷雾特征试验与仿真[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(10): 367-374.
SUN Chunhua, NING Zhi, QIAO Xinqi, et al. Experiment and simulation on spray characteristics of effervescent atomizer within bubbly flow [J]. *Transactions of the CSAM*, 2019, 50(10): 367-374. (in Chinese)
- [16] 段福义. 流量可调式喷头理论研究及优化设计 [D]. 镇江: 江苏大学, 2019.
- [17] 杨超, 陈波, 姜万录, 等. 基于拉瓦尔效应的超音速喷嘴雾化性能分析与试验[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(19): 57-64.
YANG Chao, CHEN Bo, JIANG Wanlu, et al. Analysis and experiment on atomizing characteristics of supersonic nozzle based on Laval effect [J]. *Transactions of the CSEA*, 2016, 32(19): 57-64. (in Chinese)

(责任编辑 黄鑫鑫)