

李 雪, 陆岱鹏, 王士林, 等. 一种农用气液两相喷头的设计与喷雾特性仿真[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(3): 722-728.  
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2019.03.031

# 一种农用气液两相喷头的设计与喷雾特性仿真

李 雪<sup>1,2</sup>, 陆岱鹏<sup>1</sup>, 王士林<sup>1</sup>, 张美娜<sup>1</sup>, 雷晓晖<sup>1</sup>, 吕晓兰<sup>1,2</sup>

(1. 江苏省农业科学院农业设施与装备研究所, 江苏 南京 210014; 2. 农业部长江中下游设施农业工程重点实验室, 江苏 南京 210014)

**摘要:** 基于文丘里原理设计了一款农用气液两相喷头, 并采用  $k-\varepsilon$  湍流模型, 利用 FLUENT 和 CFX 求解器对喷头内部气流场进行了计算流体力学(CFD)仿真和试验验证。结果表明: 喷头出口平面中心区域的气流速度达到亚音速和超音速, 喷头出口的气流速度随着两相压力的增加而增加; 当气相入口压力一定时, 液相入口压力的增大可使喷头下方两侧气流朝喷头轴向集中, 喷头中心区域气流速度的实测值与仿真值的相对偏差  $\leq 10\%$ , 仿真结果真实可靠。雾滴粒径测试结果表明: 在 0.05 MPa 的恒定水压下, 雾滴粒径随着气压的增高而降低; 在常用工作气压下, 距喷头喷射距离 1.6 m 处, 粒径  $65\ \mu\text{m}$  以下的雾滴比例  $\geq 85\%$ , 雾滴体积中径( $D_{50}$ )  $< 50\ \mu\text{m}$ 。所设计的喷头雾化性能优异, 可获得烟雾级雾滴, 适用于在设施农业中进行整棚弥散性喷雾防治病虫害。

**关键词:** 气液两相; 喷头; 文丘里效应; 计算流体力学(CFD); 喷雾特性

**中图分类号:** S491 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2019)03-0722-07

## Design and simulation of an agricultural twin fluid nozzle

LI Xue<sup>1,2</sup>, LU Dai-peng<sup>1</sup>, WANG Shi-lin<sup>1</sup>, ZHANG Mei-na<sup>1</sup>, LEI Xiao-hui<sup>1</sup>, LYU Xiao-lan<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Agricultural Facilities and Equipment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2. Key Laboratory of Agricultural Engineering in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River, Nanjing 210014, China)

**Abstract:** An agricultural twin fluid nozzle was designed based on the Venturi principle. FLUENT and CFX solvers were used to perform computational fluid dynamics (CFD) simulation and experimental verification on the airflow field inside the nozzle was done as well. Results showed that the air velocity at the nozzle outlet in center area of the nozzle outlet reached subsonic and supersonic speeds. With the increase of the two-phase pressure, the air velocity increased accordingly. When the air pressure was constant, the air flow would concentrate towards the axial direction with the increase of water pressure. The relative deviation between the measured value and simulated value was not more than 10%, indicating the simulation results were reliable. The results of droplet particle size measurement showed that the particle size range of the droplets decreased with the increase of the air pressure at a constant water pressure of 0.05 MPa. Under the common working pressure, the ratio of droplets below  $65\ \mu\text{m}$  was not less than 85% at the distance of 1.6 m from the nozzle, and the volume median diameter ( $D_{50}$ ) was less than  $50\ \mu\text{m}$ . The twin fluid nozzle has an excellent atomization performance and can obtain droplets at smoke-level, which is suitable for diffused spray prevention of the pests and diseases in the entire greenhouse.

**Key words:** twin fluid; nozzle; Venturi effect; computational fluid dynamics (CFD); spray characteristic

收稿日期: 2018-10-05

基金项目: 国家梨产业技术体系项目(CARS-29-19); 国家重点研发计划项目(2018YFD0201400); 农业部长江中下游设施农业工程重点实验室开放课题; 江苏省农业科技自主创新基金项目[CX(18)1007]

作者简介: 李 雪(1987-), 女, 博士, 助理研究员, 主要从事植保机械与施药技术研究。(Tel) 15951638328; (E-mail) leexue99@qq.com

通讯作者: 吕晓兰, (E-mail) lxlan@126.com

喷头是决定植保机械喷雾性能的关键部件之一,

与雾滴粒径、雾滴分布均匀度和施药量等关键指标直接相关<sup>[1-3]</sup>。目前,中国植保机械上使用的喷头多为液力式圆锥雾喷头和扇形雾喷头,种类单调,生产规格不一,雾化质量参差不齐。国外除了常见的液力式圆锥雾和扇形雾喷头,还有专用的防飘失喷头和技术先进的变量喷头,品种多样,并具有相关的行业标准<sup>[4-7]</sup>。在喷头的研制上,中国落后于发达国家。特别是在设施农业领域,配套专用的植保机械和关键部件十分缺乏,喷雾方式多为大容量喷雾,这种作业方式的农药有效利用率不足 30%<sup>[8-10]</sup>,大量雾滴流失到地面,增加了土壤湿度,为病虫害多次爆发提供条件,同时引起环境污染和食品安全等问题,此外大容量喷雾在作物成株期,雾滴不容易穿透植株冠层,难以在叶片背面沉积,致使病虫害防治不彻底。

与大田和果园植保作业不同,设施植保作业在一个相对封闭的环境中进行,没有自然风的干扰,同时高温高湿的独特环境,在导致作物易患病虫害之外,还会使设施内部蚊蝇蛾等飞行虫害(适宜农药雾滴尺寸 $10\sim 30\ \mu\text{m}$ )频发<sup>[11-13]</sup>。因此,设施植保作业应主要考虑如何提升雾滴在整个棚室内部的弥散性,对棚室内部整个空间进行防治,而忽略雾滴飘失。较细雾滴[气雾(粒径 $\leq 50\ \mu\text{m}$ )、弥雾( $50\ \mu\text{m}<\text{粒径}\leq 100\ \mu\text{m}$ )]的弥散性以及固体表面的黏附性要显著优于较粗雾滴[常规雾( $100\ \mu\text{m}<\text{粒径}\leq 200\ \mu\text{m}$ )、粗雾滴(粒径 $>200\ \mu\text{m}$ )]<sup>[14]</sup>。而中国农用喷头常用压力下所产生的雾滴粒径一般为 $80\sim 200\ \mu\text{m}$ <sup>[15]</sup>,适合进行目标性强的作业,雾滴弥散性相对较差。因此,本研究针对设施栽培独有的环境特点和防治对象,研制一种能够产生烟雾级雾滴的农用气液两相喷头,并对喷头进行喷雾特性仿真与试验验证。

## 1 材料与方法

### 1.1 气液两相流雾化喷头的设计

基于文丘里原理(图 1)设计气液两相流雾化喷头。设计的喷头(图 2)主要由超声头、阀芯结构(内端头)、进气管、安装螺母等部件组成,材质为 SUS304。其中阀芯采用文丘里结构,为使液滴在阀芯喉管部整个截面上较快均匀分布,采用了径向内喷的供水方式,以增大气液两相速度差,同时减小流量,提高喷头的雾化性能。

超声头为圆柱体,靠近喷头出口处设有一同心盲孔,通过钢丝与超声头连接。超声头与进气管通

过螺纹连接并将阀芯结构固定在连接套管内部。进气管与后盖形成的套管间隙组成了水流通路。喷头内腔的低压气流在阀芯喉管处形成高速气流,高速气体和套管中被吸入的低压液体在狭窄真空区域充分混合和碰撞后以高速气雾流的形式喷出,喷出的气雾流再受到喷头尖的撞击进行二次雾化,形成烟雾状的细小雾滴。

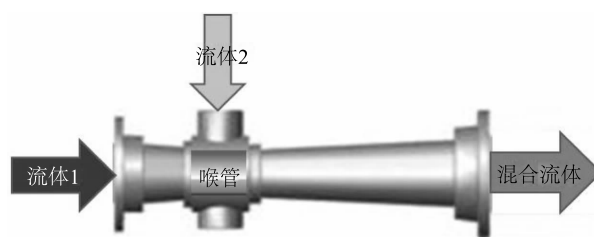


图 1 文丘里效应原理图

Fig.1 Schematic diagram of Venturi effect

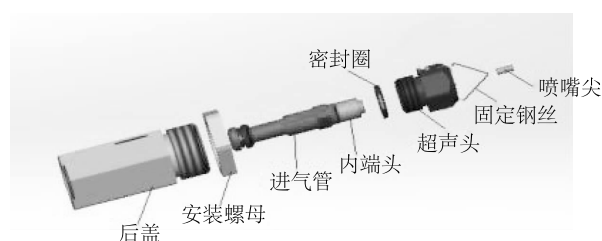


图 2 文丘里式两相流雾化喷头结构图

Fig.2 Structure chart of Venturi twin fluid nozzle

### 1.2 喷头喷雾特性试验

1.2.1 雾滴粒径测试 采用 Winner318B 工业喷雾激光粒度分析仪(济南微纳科技有限公司产品)对气液两相雾化喷头进行粒径测量,环境温度为 $26\sim 28\ ^\circ\text{C}$ 。测试时喷头的进气口经调压阀(台湾 AIRTAC 亚德客公司产品,型号 AR2000)与气泵(上海奥突斯工贸有限公司产品,型号 550W-30L)相连,进水口经调压阀与液泵(宁波雷诚泵业有限公司产品,型号 LS-0416)相连(图 3)。在水压恒定( $0.05\ \text{MPa}$ )的前提下测试不同气压下雾滴粒径的分布,喷头距离仪器  $1.6\ \text{m}$ ,每种工况重复 3 次。

1.2.2 喷头计算流体力学仿真试验 为了解喷头内部两相流体的运动情况,利用 FLUENT 和 CFX 求解器对喷头进行计算流体力学(Computational fluid dynamics,CFD)仿真<sup>[16-17]</sup>,建立喷头的气流场三维模型,分析不同气压下气流速度的变化特性。由于



图3 两相流雾化喷头粒径谱测试装置图

Fig.3 Droplet size test site of twin-fluid nozzle

喷头的气液两相流动涉及高压压缩空气和液相水,为了观察喷头流道内外的气液两相分布情况,采用VOF模型<sup>[18]</sup>进行气液两相非稳态流动模拟。因此,仿真分为2部分:①对喷口气雾流速度起决定性作用的气流速度进行仿真,分析不同压力下喷头截面速度变化和出口平面气流速度分布;②气液两相非稳态流动仿真,分析气雾的分布情况。

1.2.2.1 喷头气流速度仿真 选择标准  $k-\varepsilon$  双方程<sup>[19-20]</sup>湍流模型进行非稳态流动模拟,喷头的气相入口压力从 0.2 MPa 变化至 0.5 MPa,将气体物理属性设为可压缩理想气体。在 Gambit 软件中建立喷头的气流场模型,喷头长度为 64.0 mm,分别有气相和液相 2 个圆形入口,其直径分别为 13.4 mm 和 12.0 mm,喷头出口直径为 2.2 mm 的圆形平面,其下方约 3.5 mm 处有内径为 2.0 mm、外径为 2.6 mm、高度为 3.3 mm 的一空芯圆柱,底面封闭,用于液滴二次雾化。喷头气流场模型如图 4 所示。

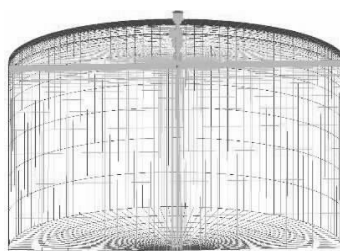


图4 两相流雾化喷头气流场模型

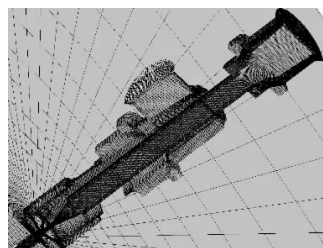
Fig.4 Flow field model of twin fluid nozzle

喷头在气相和液相进口面的铅垂面具有面对称特性,因此选择喷头几何模型的一半作为研究对象。为了模拟气相从喷头入口至流向大气环境的流场特

性,建立喷头出口处的大气环境计算域,并对整个流场计算域进行结构化网格划分,在壁面及喷头出口处附近区域进行网格加密,网格节点总数约为  $5.0 \times 10^5$  (图 5)。根据喷头后期试验工况,分别选定气压 0.2 MPa、0.3 MPa、0.4 MPa 及 0.5 MPa 4 个工况进行气相模拟。喷头气相非稳态流动数值模拟边界条件设置如下:(1)气相入口压力 0.2 MPa、0.3 MPa、0.4 MPa 及 0.5 MPa;(2)几何对称面,对称边界条件;(3)气相出口压力为环境大气压 1 atm;(4)其他为无滑移壁面边界条件。



喷头大气环境计算域网格图



喷头计算域局部放大图

图5 两相流雾化喷头计算域网格

Fig.5 Computational domain grid of the twin fluid nozzle

1.2.2.2 气液两相非稳态流动仿真 喷头几何外形如图 4 所示,喷头气相流动经历了亚音速到超音速的过程,同时伴随液相流动,过程复杂。为提高仿真的精度,合理缩减仿真时间,根据几何对称性对喷头外形进行简化,选取喷头圆周方向的 1/8 作为研究对象。气液两相流动计算域由喷头出口面下方 100 mm 和喷头出口面平面外延半径 150 mm 组成的扇形区域,两侧面(对称面)的夹角为  $45^\circ$ ,对计算域进行全结构网格划分,全局网格节点约  $1.7 \times 10^5$  (图 6)。

用 CFX 求解器对喷头喷口周围的气液两相流场分布特性进行仿真计算,湍流模型选择标准  $k-\varepsilon$  双方程模型,气相和液相表面视为均匀相自由表面,气体选择可压缩理想气体,同时考虑水的表面张力

为  $0.072 \text{ N/m}$ , 主相为气体。相应边界条件设置如下: (1) 气相入口边界条件设置见表 1; (2) 液相入口边界条件设置见表 2, 液相温度设置为  $300 \text{ K}$ ; (3)

两侧对称面为对称边界条件; (4) 圆柱面及底部扇形面为出口边界条件, 环境大气压为  $1 \text{ atm}$ , 环境温度为  $300 \text{ K}$ ; (5) 其他为无滑移的壁面边界条件。

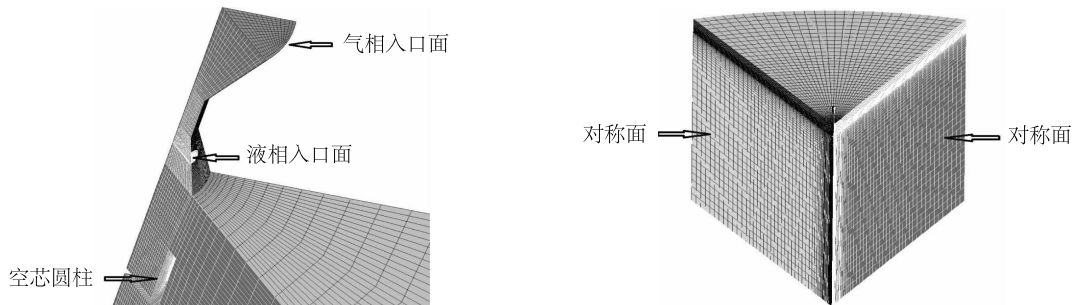


图 6 喷头气液两相计算域及网格

Fig.6 Computational domain and grid of the nozzle

表 1 气相入口边界条件设置

Table 1 Settlement conditions of air entrance

工况序号	气相入口压力 (MPa)	质量流量 (kg/s)	温度 (K)
1	0.3	$1.776 \times 10^{-4}$	338
2	0.4	$1.908 \times 10^{-4}$	340
3	0.5	$7.980 \times 10^{-4}$	342

表 2 支管液相入口速度

Table 2 Liquid inlet velocity of branch pipe

工况序号	液相入口压力 (MPa)	液相入口速度 (m/s)
1	0.05	4.569 0
2	0.10	8.257 7

1.2.3 气流仿真结果验证试验 为了验证仿真的准确性, 对气液两相喷头出气口速度随喷头气液入口压力变化的规律进行试验。试验方法: 在喷头工作后, 利用气流稳压缓冲装置 (图 7), 在恒定气压下, 用热敏式风速仪 (智标 GM8903) 测定装置出气口处界面气流速度, 待风速仪上数值稳定后, 记录数据, 试验重复 3 次。塑料管口的速度记为  $V_{\text{试}}$ , 塑料管内孔面积为  $S_{\text{管}}$ , 喷头出口的速度为  $V_{\text{喷}}$ , 喷头出口的面积  $S_{\text{喷}}$ , 则  $V_{\text{试}} \times S_{\text{管}} = V_{\text{喷}} \times S_{\text{喷}}$ ,  $V_{\text{喷}} = V_{\text{试}} \times (D_{\text{管}} / D_{\text{喷}})^2$ , 式中, 塑料管内径  $D_{\text{管}} = 20.0 \text{ mm}$ , 喷头出气口直径  $D_{\text{喷}} = 2.2 \text{ mm}$ 。



图 7 气流稳压缓冲装置

Fig.7 Air flow buffer stabilizer

## 2 结果与分析

### 2.1 气液两相流雾化喷头的雾滴粒径

当喷雾液的静止试验水压  $P_1 = 0.05 \text{ MPa}$  时, 不同气压  $P_0$  ( $0.2 \text{ MPa}$ 、 $0.3 \text{ MPa}$  及  $0.4 \text{ MPa}$ ) 下雾滴粒

径的分布百分比见表 3。由表 3 可知, 当气压在  $0.2 \text{ MPa}$  和  $0.3 \text{ MPa}$  时, 粒径  $65 \mu\text{m}$  以下的雾滴占比在 85% 以上; 而当气压达到  $0.4 \text{ MPa}$  时,  $65 \mu\text{m}$  以下的雾滴占比高达 98%。雾滴的体积中径  $D_{50}$  均小于  $50 \mu\text{m}$ 。雾滴达到烟雾级水平, 雾滴图谱见图 8。

表 3 不同气压下两相流喷头的雾滴分布

Table 3 Distribution of droplet particle size of twin fluid nozzle at different air pressure

气压 (MPa)	不同粒径( <i>d</i> )雾滴所占比例(%)					雾滴体积中径 ( <i>D</i> <sub>50</sub> )(μm)
	0< <i>d</i> <3 μm	3 μm≤ <i>d</i> <32 μm	32 μm≤ <i>d</i> <65 μm	65 μm≤ <i>d</i> <80 μm	<i>d</i> ≥80 μm	
0.2	0	13.200	73.134	10.048	3.618	45.64
0.3	0	16.308	75.690	6.730	1.272	43.16
0.4	0.335	29.569	69.087	1.009	0	36.75

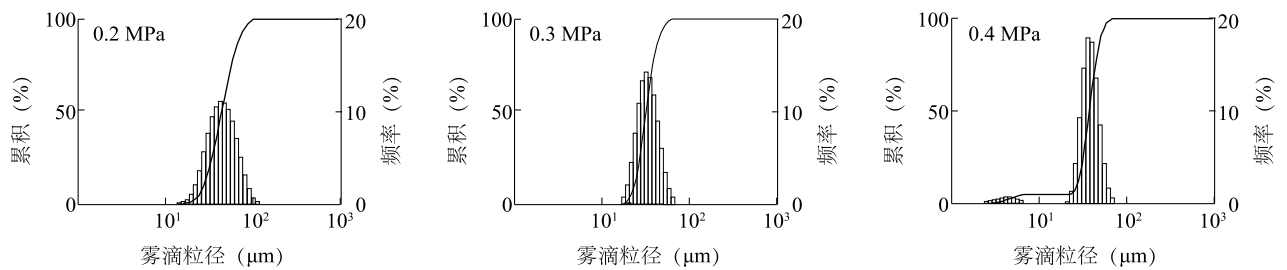


图 8 不同气压下两相流喷头的雾滴谱图  
Fig.8 Droplets spectrum of twin-fluid nozzle at different air pressure

2.2 喷头计算流体力学仿真结果

2.2.1 气流速度仿真结果 随着压缩气体在流道内流动,压能转化为动能并在喷头喉部区域使气流速度达到最大,接近 500 m/s。在喷头出口处平面的中心区域速度最大,而在壁面附近区域速度则明显偏低。由于高速气体的流出导致在喷头出口区域形成明显负压,致使喷头外部气体在喷头出口靠近壁面的区域形成回流,呈喇叭状分布。

为了解不同压力下气流速度的空间分布情况,选择对称面上距离喷头出口平面下方 1 mm、10 mm、50 mm 以及 100 mm 处直线位置(图 9),观察喷头两侧的速度分布。速度在各直线上的分布曲线如图 10 所示。由图 10 可知,距喷头出口平面 1 mm 位置处速度最大可达到 450 m/s,速度在喷头两侧的分布具有明显的对称性,速度最大值出现在喷头正下方区域,且随着距离增大速度衰减幅度随之增大,当距喷头出口平面 100 mm 时最大速度已降至 10 m/s 以下。

由 4 个工况的仿真结果可知,气压为 0.2 MPa、0.3 MPa、0.4 MPa 及 0.5 MPa 时,喷头出口中心区域气流速度分别为 338 m/s、410 m/s、426 m/s 和 450 m/s。说明所设计的气液两相流雾化喷头能够产生超音速气流,喷头的设计结构对增大气液两相速度差具有显著效果。

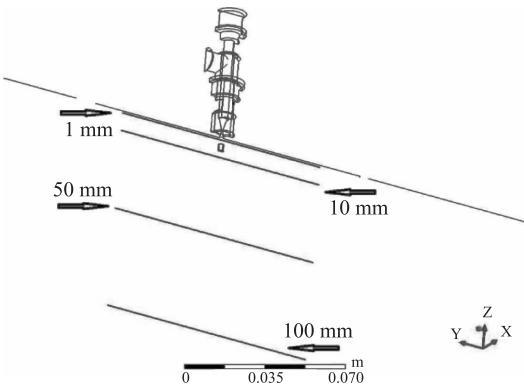


图 9 观测线位置  
Fig.9 Position of guide lines

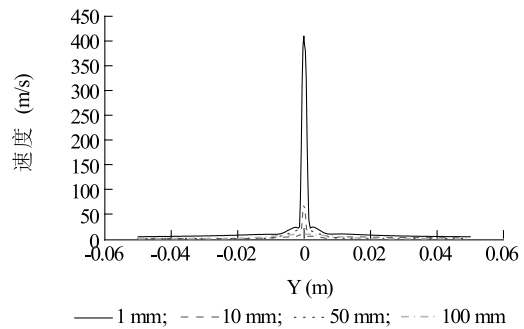


图 10 0.3 MPa 下气流各线速度随 Y 轴坐标的分布  
Fig.10 Airflow velocity distribution of guide lines along Y-axis at air pressure of 0.3 MPa

2.2.2 气液两相非稳态流动仿真结果 采用非稳态计算,计算时间步长为 $2.0 \times 10^{-5}$  s,计算总时长为0.02 s。 $t=0$  s时整个计算域处于初始状态,计算域内的流场速度和湍流强度等参数均为0,气体体积分数为1.0,环境温度为300 K,共计算6个工况(气压0.3 MPa, 液压0.05 MPa; 气压0.3 MPa, 液压0.10 MPa; 气压0.4 MPa, 液压0.05 MPa; 气压0.4 MPa, 液压0.10 MPa; 气压0.5 MPa, 液压0.05 MPa; 气压0.5 MPa, 液压0.10 MPa)。由仿真结果分析得出,气流自入口面进入,在喷头喉部的速度达到最大,约为540 m/s至630 m/s;在喉部下方,由于受喷头两侧水流的影响,气流高速区主要集中在中间区域,而两侧速度很小,形成较大的速度梯度,气体从喷头出口面喷出,径直喷向下方的空芯圆柱,但由于受到空芯圆柱底部壁面的阻挡,气流发生反向流动从空芯圆柱上表面流出后向两侧流动,随着离喷头出口面距离的变大,气流速度的衰减逐渐增大。从速度分布特征还可以得出,当气相入口压力一定时,液相入口压力的增大可使喷头下方的两侧气流朝喷头轴向集中,液相分布同样也具有这一特征。

### 2.3 气液两相流雾化喷头的气流仿真结果验证

喷头气流速度测试结果与仿真结果(表4)显示,喷头出口气流速度均达到超音速,且喷头出口气流速度随着两相压力的增加而增加,实测值与仿真值的相对偏差 $\leq 10\%$ 。说明喷头流场的仿真分析结果与喷头实际喷雾特性的一致性较高。

表4 喷头喷口气流速度随两相压力的变化

Table 4 Changes of airflow velocity of nozzle with air-water inlets pressure

液压 (MPa)	气压 (MPa)	喷口中心 速度实测值 (m/s)	喷口中心 速度仿真值 (m/s)	相对偏差 (%)
不通液体	0.2	307	338	9.2
	0.3	442	410	7.8
	0.4	468	426	9.8
0.05	0.2	400	401	0
	0.3	463	421	10.0
	0.4	482	445	8.3
0.10	0.2	388	431	10.0
	0.3	521	568	8.3
	0.4	583	609	4.3

## 3 结 论

设施农业棚室内部高温高湿,蚊蝇蛾等飞行虫害频发,而飞行虫害的防治对植保机械喷雾性能的要求较高,适宜的雾滴粒径在10  $\mu\text{m}$ 至30  $\mu\text{m}$ 之间。因此,设施植保作业应主要考虑提升雾滴在整个棚室内部的弥散性,对棚室内部整个空间进行防治,不用考虑雾滴飘失问题。本研究基于文丘里原理设计了一款农用气液两相喷头,并对喷头进行了喷雾特性仿真与试验验证,得到以下结论:(1)通过雾滴粒径测试试验测得,0.05 MPa的恒定水压下,雾滴粒径随着气压的增高而降低,65  $\mu\text{m}$ 以下的雾滴占比 $\geq 85\%$ ,雾滴体积中径( $D_{50}$ ) $< 50$   $\mu\text{m}$ ,喷头雾化性能优异,能够获得烟雾级雾滴,可进行超低容量喷雾;(2)喷头气流速度场的CFD仿真和试验验证结果说明,喷头能够产生超音速气流,喷头的设计结构对增大气液两相速度差具有显著效果,有利于雾滴的超细雾化。(3)当气相入口压力一定时,液相入口压力的增大可促使喷头下方两侧的气流朝喷头轴向集中,喷头出口的气流速度随着两相压力的增加而增加,气流速度实测值与仿真值的相对偏差 $\leq 10\%$ ,仿真结果可靠。

### 参考文献:

- [1] 吕晓兰,何雄奎,宋坚利,等. 标准扇形雾喷头雾化过程测试分析[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9):95-100.
- [2] 王双双,何雄奎,宋坚利,等. 农用喷头雾化粒径测试方法比较及分布函数拟合[J]. 农业工程学报, 2014,30(20):34-42.
- [3] 祁力钧,胡锦涛,史 岩,等. 喷雾参数与飘移相关性分析[J]. 农业工程学报, 2004, 20(5):122-125.
- [4] 樊 荣,师帅兵,杨福增,等. 我国植保机械常用喷头的研究现状及发展趋势[J]. 农机化研究, 2014,36(6):6-9.
- [5] 董福龙,周宏平.国外植保喷头技术开发进展[J]. 江西农业大学学报, 2018, 40(4):1-11.
- [6] 何雄奎. 改变我国植保机械和施药技术严重落后的现状[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1):13-15.
- [7] 曹兴乔. 我国植保机械发展现状及趋势分析[J]. 农业科技与装备, 2011(12):63-64.
- [8] 祁力钧,傅泽田,史 岩. 化学农药施用技术与粮食安全[J]. 农业工程学报, 2002, 18(6):203-206.
- [9] 邓 敏,邢子辉,李 卫.我国施药技术和施药机械的现状 & 问题[J]. 农机化研究, 2014, 36(5):235-238.
- [10] 傅锡敏,薛新宇. 我国施药技术与装备的现状及其发展思路[J]. 农业技术与装备, 2010(5):13-15.
- [11] 李中华,孙少磊,丁小明,等.我国设施园艺机械化水平现状与

- 评价研究[J]. 新疆农业科学, 2014, 51(6):1143-1148.
- [12] 蒋卫杰,邓 杰,余宏军. 设施园艺发展概况、存在问题与产业发展建议[J]. 中国农业科学, 2015, 48(17):3515-3523.
- [13] 郭世荣,孙 锦,束 胜,等. 我国设施园艺概况及发展趋势[J]. 中国蔬菜, 2012(18):1-14.
- [14] MATTHEWS G A. Pesticide application methods[M]. 3rd ed. Oxford: Blackwell Science Ltd, 2000.
- [15] 戴奋奋,袁会珠,张 玲,等. 植保机械与施药技术规范[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2002.
- [16] 袁寿其,朱兴业,李 红,等. 全射流喷头内部流场计算流体力学数值模拟[J]. 农业机械学报, 2005, 36(10):46-49.
- [17] 沈从举,贾首星,孟祥金,等. 基于 SolidWorks 的气泡雾化施药喷头 3D 设计与建模[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(1):359-362.
- [18] 张 健,方 杰,范波芹. VOF 方法理论与应用综述[J]. 水利水电科技进展, 2005, 25(2):67-70.
- [19] LAUNDER B E, SPALDING D B. Lectures in mathematical models of turbulence[M]. London: Academic Press, 1972.
- [20] 王福军. 计算流体力学分析-CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.

(责任编辑:张震林)