

引用格式:

汪福杰, 蒋蘋, 石毅新, 胡文武, 罗亚辉, 周书娴. 植保机在线混药系统的设计及混药性能试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2020, 46(2): 236–242.

WANG F J, JIANG P, SHI Y X, HU W W, LUO Y H, ZHOU S X. Design of online mixing system and performance test of mixed pesticides for the plant protection machine[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2020, 46(2): 236–242.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



植保机在线混药系统的设计及混药性能试验

汪福杰, 蒋蘋*, 石毅新, 胡文武, 罗亚辉, 周书娴

(湖南农业大学工学院, 湖南 长沙 410128)

摘 要: 为提高植保机喷雾作业中的农药利用率, 设计了一种在线混药系统。混药系统主要包括取水单元、取药单元、混合器和控制单元。系统工作时, 控制单元控制取水单元和取药单元抽取水溶液和农药, 注入混合器混合, 混合液经隔膜泵加压后经过喷头喷施。基于计算流体力学理论, 建立内置 7 块扰流板且注药口和注水口沿边壁垂直分布并正对第 1 块扰流板的圆柱形静态混合器模型, 运用 Fluent 软件对模型进行数值分析, 结果常压(0.1 MPa)时, 混合器出口处药水混合均匀性变异系数为 2.2%, 药水混合效果最佳, 但注药口有药剂回流现象, 故提出药剂加压的模拟方案。药剂加压 1 MPa 时, 注药口无药剂回流现象, 药水混合均匀性变异系数为 2.0%, 药水混合效果优于常压。用胭脂红溶液替代农药进行试验, 加压状态下, 混药系统喷头处混药稳定性最大相对误差为 4.301%, 药水混合变异系数最大, 为 3.989%, 混药性能优于常压, 与仿真结果基本吻合; 对在线混药系统进行隔膜泵工况试验, 结果水流量在 35~140 L/min 时, 药水配比为(1:300)~(1:3 000)时, 在线混药系统混合均匀性系数最大, 为 4.670%。

关 键 词: 植保机; 在线混药系统; 混合器; 数值模拟; 分光光度法; 变异系数

中图分类号: S493⁺.1 文献标志码: A 文章编号: 1007-1032(2020)02-0236-07

Design of online mixing system and performance test of mixed pesticides for the plant protection machine

WANG Fujie, JIANG Pin*, SHI Yixin, HU Wenwu, LUO Yahui, ZHOU Shuxian

(College of Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China)

Abstract: An online mixing system was designed to improve the effective utilization of pesticides in spray operations. The pesticide mixing system mainly includes a water taking unit, a pesticide taking unit, a mixer and a control unit. When the system is working, the control unit controls the water extraction unit and the pesticide extraction unit to extract the required dose of the water and the pesticide into the mixer. The mixed liquid is pressurized by the diaphragm pump and sprayed by the nozzle. Based on the theory of computational fluid dynamics, a cylindrical static mixer model with 7 built-in spoilers was established for numerical simulation analysis. The pesticide injection ports and the water injection ports of static mixer vertically distributed along the side wall and the pesticide injection ports facing the first spoiler. The test results show that when the normal pressure of the pesticide is 0.1 MPa, the variation coefficient of the pesticide in the nozzle is 2.2%. At this time, the best mixing effect of the mixer is obtained, but there is a phenomenon of pesticide backflow in the injection port. Therefore, a simulation scheme is proposed for drug pressurization. Under the pressurized

收稿日期: 2019-09-30

修回日期: 2020-01-08

基金项目: 教育部重点研发计划项目(2017YFD0700903-2); 湖南省科学技术厅重点研发计划项目(2018NK2063); 湖南省教育厅项目(2019NK2141)

作者简介: 汪福杰(1993—), 女, 河南周口人, 硕士研究生, 主要从事农业生产智能控制理论与技术研究, 1208963362@qq.com; *通信作者, 蒋蘋, 博士, 教授, 主要从事农业机械智能控制理论与技术研究, teacher_jp@163.com

1 MPa state, there is no reflux of the pesticide in the injection port, the variation coefficient of the pesticide mixture is 2.0%, and the mixer mixing effect is better than normal pressure. The carmine red solution was used to replace the pesticide, and the test was carried out by the ultraviolet spectrophotometry. The results showed that the maximum relative error of the mixed pesticide stability under pressure was 4.301%, and the variation coefficient of the pesticide was 3.989%. The mixing effect of the online mixing system under pressure is better than that under the normal pressure. The variation coefficient obtained by the test is basically consistent with the simulation results, and the online mixing system meets the design requirements. The diaphragm pump variable working condition test is carried out. When the ratio of the pesticide to water is varied from (1 : 300) to (1 : 3 000) with the water flow rate of 35-140 L/min, the mixing uniformity coefficient of the online mixing system is 4.670%.

Keywords: plant protection machine; online mixing system; mixer; numerical simulation; spectrophotometry; variation coefficient

传统喷雾机械的混药方式为预混式^[1], 作业前需将农药与水按比例注入药箱, 并搅拌均匀, 存在配比误差较大、农药浪费较多等问题。精准农业要求植保机械进行精准的配药和施药, 因而将药箱和水箱分开、实现药水分离的在线混药技术已经成为植保机械的发展趋势, 研发自动化程度高、混药效果好的在线混药系统已成为必然。

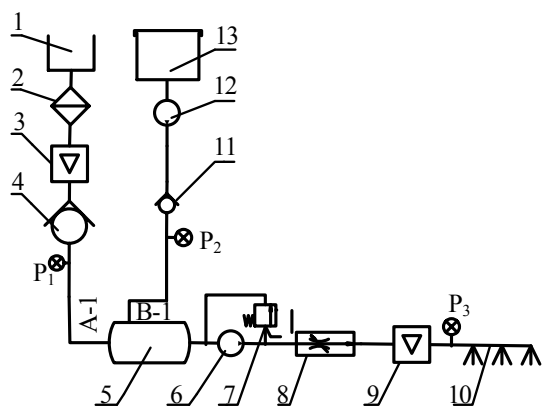
在线混药装置主要分为射流式和注入式两大类^[2-3]。1991 年 GHATE 等^[4]首次提出压缩空气式混药装置, 将药箱与水箱分离, 根据搭载机械行进速度调节水箱和药箱内部压力调控混合液浓度。ALBERT 等^[5]提出, SMRX 混合器内部放置足够的障碍物, 可以诱导无序流动, 促进混合且内置元件成 90°夹角时混合效果最佳。SARVANAN 等^[6]基于流体动力学方法对射流式混合器的结构参数进行分析, 发现喷嘴直径对射流混合器混合效果具有较大影响。尹红霞^[7]错排静态混合器内叶片, 发现错排角度可使混合均匀性得到明显改善且混合器内压力损失明显减小, 注药口与原水成 60°时混合性能最佳。何秀华等^[8]发现流道内周期性布置挡板结构, 可以增大流体接触面积, 诱发混沌对流, 增大雷诺系数, 提高对流强度, 当雷诺系数大于 20 时, 微混合器可实现液体完全混合。针对在线混药技术所开展的研究多集中于精准控制小流量农药的实时取药量上。张文昭等^[9]通过电控喷嘴调节药流量, 当药流量为 0.1~0.9 mL/s 时, 取药精度为±5%; 李晋阳等^[10]使用流量调节阀对药流量进行调控, 将小剂量农药取用相对偏差控制在 4%以内, 满足了在线混药浓度需求。对混合效果的检测方法较多, 郭敬坤^[11]利用高速摄影仪拍摄农药中示踪粒子在混合液中的分布并进行图像

处理, 分析其射流装置的混合效果, 但光源、气泡和管道表面曲率对试验结果具有一定影响。贾卫东等^[12]采用光电法, 基于农药的透光性对百草枯混合液进行定点试验, 确定其浓度, 但这种方法需要特定光源和药剂颜色, 不具有普适性。杨亚飞等^[13]在特定光源下根据不同液体折射率对混合效果进行检测。

为进一步提高在线混药系统的混药精准性和混合性能, 笔者依据高地隙植保机喷雾作业平台, 设计了一种在线混药系统, 采用 CFD 方法对多种混合器进行数值模拟, 确定最佳混合器结构参数, 并进行试验, 分析其混药性能, 以期植保机在线混药系统优化设计提供参考。

1 在线混药系统的结构及工作原理

在线混药系统结构如图 1 所示, 主要包括取水单元、取药单元、混合器、喷雾单元、控制单元及相关传感器、检测器件等。取水单元水泵选用隔膜泵, 流量范围 0~160 L/min, 通过电机驱动隔膜泵取水; 在隔膜泵出口处加装压力表读取实时水压, 压力表量程为 0~3 MPa, 精度为±2.5%; 在取水单元管路上安装 YF-DN40 水流量传感器, 传感器量程 5~150 L/min, 精度±3%, 通过开发板直接供电。取药单元中取药泵选用慧宇蠕动泵(BT100J-1A), 流量范围 0~0.46 L/min, 精度为±1%, 蠕动泵采用 220 V 交流电源供电。喷雾单元主要包括 YF-DN40 药水流量传感器、压力表和 FVP11003 喷头。在线混药系统工作时, 控制单元控制蠕动泵, 从药箱中抽取农药, 经单向阀注入混合器, 与经隔膜泵吸取进入混合器的水混合, 混合液经隔膜泵加压后经过喷头喷施。



1 水箱; 2 过滤器; 3 水流量计; 4 单向阀; 5 混合器; 6 隔膜泵; 7 溢流阀; 8 节流阀; 9 药水流量计; 10 喷头; 11 单向阀; 12 蠕动泵; 13 药箱; P_1 、 P_2 、 P_3 均为压力表; A-1 注水口; B-1 注药口。

图 1 在线混药系统的结构

Fig.1 Schematic diagram of the online mixing system

2 在线混药系统的设计

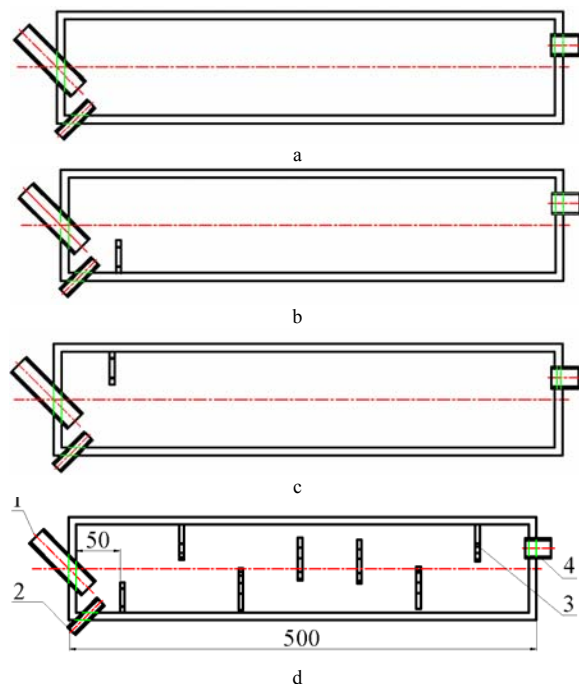
2.1 控制系统

为满足水流量检测与控制、药流量控制、高低液位状态异常蜂鸣器报警等功能需求,在线混药系统控制系统核心选用 STM32F103R8T6 开发板。控制系统工作时,通过电脑串口助手设置所需药水混合比例,单片机根据设置和接收到的实时水流量数据计算所需农药量,通过 RS-485 总线控制蠕动泵转速调节药流量,使得实际药水混合比符合预设值。同时通过 RS-485 总线调节变频器输出频率,改变电机转速,进而控制实时水流量。

2.2 混合器

2.2.1 结构

查阅相关文献^[14-17],选用内置扰流板式混合器进行优化设计。根据实际安装位置尺寸和隔膜泵、蠕动泵出口管径、所选水管管径,设计了 3 种混合器,其内部扰流板分布分别为单个扰流板、单个扰流板反向、多个扰流板。将 3 种模型和内部无扰流板的圆柱形静态混合器进行对比,如图 2 所示,混合器主体为直径 0.1 m、长 0.5 m 的圆柱,注水口直径为 0.02 m,注药口直径为 0.01 m,出水口直径为 0.02 m,第 1 块扰流板距离入口为 0.05 m。注水口和注药口垂直布置,确保药液通过注药口直接注入水中,混合器内分布特定结构和数量的扰流板。



1 注水口; 2 注药口; 3 扰流板; 4 出口。

a 内部无扰流板; b 单个扰流板; c 单个扰流板位置更改;

d 多个扰流板。

图 2 在线混药装置混药单元的结构

Fig.2 Schematic diagram of the mixing unit for the online mixing device

2.2.2 混合器数值模拟

1) CFD 数学建模。用 SolidWorks 软件对混合器进行 1:1 三维实体建模。已知叶片错排混合效果优于顺排^[17],在模型 d 内部依次增加扰流板个数,并使扰流板在管道内按照螺旋线等距错排,依次建立模型 d_1 、 d_2 、 d_3 、 d_4 ,其内部扰流板数量分别为 3、5、7、9 块。已知喷雾量为 140 L/min,药水比(1:300)~(1:3 000),根据雷诺系数^[18]式(1)、湍流强度公式^[19]式(2),计算混合器内部流场雷诺系数为 29 533,处于完全湍流区间,故该流场采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型。因模型为液-液两相混合,故选用 Fluent 中的欧拉模型和混合模型^[20]。

$$Re = \frac{D\rho}{\mu} \times \frac{v_1 + v_2}{\frac{1}{4}\pi D^2 \times 3600} \quad (1)$$

$$I = 0.16(Re)^{-\frac{1}{8}} \quad (2)$$

式中: v_1 、 v_2 为药、水的体积流量(m^3/h); D 为混合器直径; μ 为液体黏性系数; ρ 为液体的密度。

2) 边界条件及参数设置。根据实际药水配比需求,设置混合器边界条件,主要参数如表 1 所

示。注水口、注药口均设置为速度入口，分别为水相和药品相；出口设置为压力出口；设置注水口和注药口与混合器内部相交面为交界面；混合器管壁设置为固面。求解方程采用 Simple 算法，二阶迎风方程，使用出口处药液体积分数和残差作为监视器，收敛的精度设置为 10^{-5} ，计算 5 000 步以内收敛。

表 1 混药装置基本参数及边界条件

Table 1 Basic parameters and boundary condition settings		
项目	注水口	注药口
水力直径/mm	20	10
流速/(m·s ⁻¹)	7.4	0.1
密度/(kg·m ⁻³)	1 000	1 003
压力/MPa	0.1	1 或 0.1
湍流强度/%	5	5

3) 网格划分。采用 ANSYS16.0 中的 ICEM 模块划分混合器流体域网格。因混合器结构较为复杂，在网格划分时采用分块划分的方法，对混合器注药口、注水口及出口的网格进行细化。整个网格区域划分采用结构化网格^[19]和非结构化结合的方式。混合器网格数分别为 2 473 347、2 280 608、2 731 353、3 442 783、3 510 718、3 685 568、3 702 420。

4) 模拟结果。采用混合均匀性变异系数^[18]作为评价混合效果的指标。混合均匀性变异系数的取值范围为 0~1，当混合均匀性变异系数为 1 时，判定药水完全没有混合；当混合均匀性变异系数小于 5%时，判定药水完全混合。

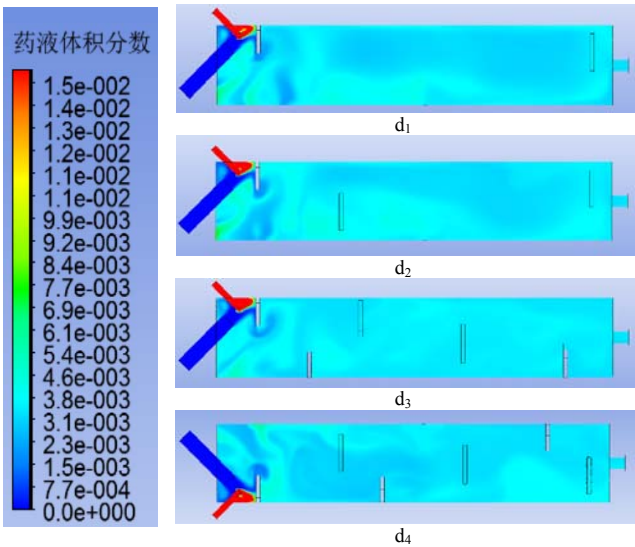
分析表 2，常压时，增加混合器内部扰流板数量增加有助于液体混合。当扰流板数量为 7 时，在距离注水口 220 mm 处混合均匀性变异系数为

表 2 常压下距离注水口不同距离处的混合均匀性变异系数模拟值

Table 2 Simulated values of the variation coefficient of mixed uniformity at different distances under 0.1 MPa								
模型	混合均匀性变异系数							
	100 mm	170 mm	220 mm	270 mm	320 mm	420 mm	470 mm	510 mm
a	0.866	0.634	0.528	0.462	0.414	0.397	0.372	0.308
b	0.856	0.629	0.518	0.451	0.410	0.385	0.365	0.301
c	0.877	0.693	0.561	0.486	0.447	0.422	0.405	0.352
d ₁	0.135	0.114	0.114	0.095	0.098	0.111	0.085	0.067
d ₂	0.162	0.132	0.097	0.060	0.054	0.063	0.065	0.070
d ₃	0.092	0.060	0.031	0.039	0.025	0.036	0.033	0.022
d ₄	0.140	0.084	0.064	0.087	0.042	0.075	0.159	0.029

0.031，在出口处混合均匀性变异系数为 0.022，符合设计需求。

模型 d 的 4 种优化模型在轴向中心剖面上的药液体积分数云图如图 3 所示。分析图 3 知，在模拟农药密度、黏度完全相同的情况下，增加混合器内部布置扰流板数量有助于液体混合，但存在畸变，当扰流板增加至一定数量后，混合性能变差，这与模拟数据相符。通过数值模拟发现混合器内部布置 7 块扰流板时混合效果最佳。

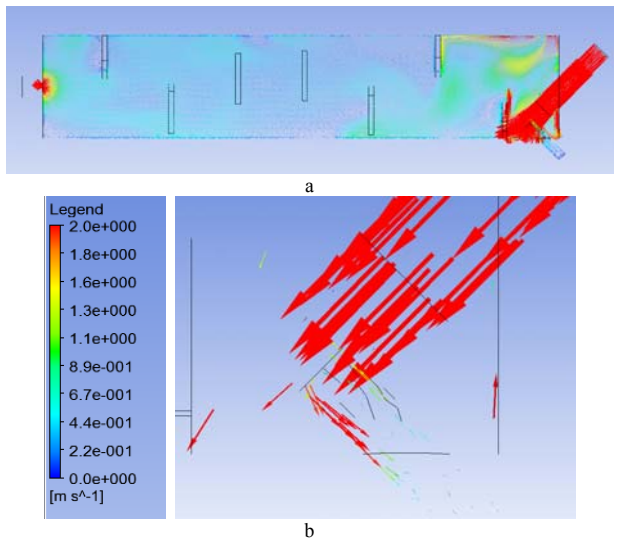


d₁ 内置 3 块扰流板；d₂ 内置 5 块扰流板；d₃ 内置 7 块扰流板；d₄ 内置 9 块扰流板。

图 3 沿管径方向药液体积分数云图

Fig.3 Mixer axial pesticide liquid integral number cloud

图 4 为混合器轴向药水速度流线图。分析发现，注药口有轻微药液回流现象，故提出药剂高



a 轴向速度流线图；b 注药口局部放大图。

图 4 轴向速度流线图

Fig.4 Diagram of axial velocity streamline

压注入混合器的在线混药系统。因选用喷头压力为 0.3 MPa, 整个在线混药系统回路中存在压力损失, 故注药口压力设置为 1 MPa, 并进行数值模拟, 混合均匀性变异系数列于表 3。

表 3 加压下距离注水口不同距离处的混合均匀性变异系数模拟值

Table 3 Simulated values of the variation coefficient of mixed uniformity at different distances under 1 MPa

模型	混合均匀性变异系数							
	100 mm	170 mm	220 mm	270 mm	320 mm	420 mm	470 mm	510 mm
a	0.865	0.632	0.524	0.457	0.413	0.394	0.367	0.307
b	0.821	0.621	0.476	0.431	0.234	0.271	0.283	0.134
c	0.921	0.647	0.512	0.440	0.409	0.383	0.371	0.302
d ₁	0.133	0.117	0.113	0.093	0.098	0.108	0.089	0.069
d ₂	0.161	0.130	0.096	0.056	0.049	0.072	0.076	0.076
d ₃	0.100	0.060	0.038	0.035	0.026	0.031	0.032	0.020
d ₄	0.147	0.079	0.061	0.084	0.043	0.059	0.104	0.030

分析表 3, 加压状态下混合器混合均匀性优于常压状态; 混药比为 1:300 时, 模型 d₄ 混合均匀性变异系数最小, 混合效果最好。在距离入水口 220 mm 处, 即第 3 块扰流板后药水混合均匀, 变异系数为 0.038, 在混合器出口处变异系数为 0.020。

增大药水混合比, 对内置 7 块扰流板的模型进行仿真分析, 在药水比 1:3 000 时, 混合器出口处混合均匀性变异系数为 0.018, 符合低于 5% 的要求; 因此, 选用内置 7 块扰流板的模型 d₄ 进行试验。

3 试验验证

3.1 试验条件

试验在湖南农业大学工学院智能农机实验室进行。根据在线混药系统混合器数值模拟结果, 提出药剂加压注入的在线混药方法, 考虑到选用喷头压力及管道压力损失, 将蠕动更换为电磁隔膜计量泵进行药剂加压试验。电磁隔膜计量泵压力 1 MPa, 流量 0~0.5 L/min, 工作电压 220 V, 精度±1%, 其控制方法和隔膜泵相同。试验分别在药剂常压和加压条件下进行。

3.2 试验方法

试验前, 建立胭脂红标准溶液曲线。配制 5 份质量浓度为 3 g/L 的胭脂红溶液代替水溶性农

药, 将样本溶液分别稀释至 1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 mg/L 的标准样品, 并以纯水作为空白对照。采用岛津公司 UVmini-1240 紫外可见分光光度计设定吸收波长为 507 nm^[20], 测定溶液的吸光度。运用 MATLAB 软件和最小二乘法对样本溶液吸光度数据进行处理。

按照药水配比需求输入配比系数, 控制单元读取水流量传感器采集的流量数据。根据实际配比需求, 通过 RS-485 总线控制蠕动泵转速, 按照所需比例调节实际农药流量。根据试验需求, 在喷头下放置量杯, 进行取样, 分别检测在不同注药压力、不同药水比例下在线混药系统的混合稳定性和均匀性。

3.3 混药稳定性试验

在药液常压和加压时, 分别在不同时间, 不同药液比下取样。在 3 个回路 18 个喷头下依次放置量杯采集混合液, 每间隔 30 s 取样 1 次, 每次取样 2 s, 18 个样本为 1 组, 结果取平均值。

常压下混药稳定性数据列于表 4。混合后药水实际质量浓度和预期质量浓度之间的最大相对误差为 6%。这可能是混药比过大时, 药剂需求量减小, 蠕动泵转速过小, 液体无法连续流动; 蠕动泵本身存在脉冲, 造成流速不稳; 药液压力小于混合器内部水流压力, 导致药剂无法完全按照实际需求注入混合器进行混合。

表 4 常压(0.1MPa)状态的混药稳定性

Table 4 Stability of mixed pesticides under 0.1 MPa

药液比	预期质量浓度/ (mg·L ⁻¹)	实际质量浓度/ (mg·L ⁻¹)	绝对误差/ (mg·L ⁻¹)	相对 误差/%
1:300	10.00	10.295	-0.295	2.950
1:600	5.00	4.977	0.023	0.460
1:900	3.33	3.263	0.067	2.010
1:1 000	3.00	2.912	0.088	2.930
1:1 500	2.00	1.954	0.046	2.300
1:2 000	1.50	1.516	-0.016	1.067
1:2 500	1.20	1.078	0.022	1.830
1:3 000	1.00	0.940	0.060	6.000

在药液加压系统下进行试验, 药剂经过电磁隔膜计量泵加压 1 MPa, 在药水比增大时仍可以顺利注入混合器。加压状态下混药稳定性试验结果列于表 5。

表 5 加压(1 MPa)状态下的混药稳定性

药液比	预期质量 浓度/(mg·L ⁻¹)	实际质量浓度/ (mg·L ⁻¹)	绝对误差/ (mg·L ⁻¹)	相对 误差/%
1 : 300	10.00	10.052	-0.052	0.517
1 : 600	5.00	5.081	-0.081	1.625
1 : 900	3.33	3.447	-0.117	3.520
1 : 1 000	3.00	3.126	-0.126	4.200
1 : 1 500	2.00	2.086	-0.086	4.301
1 : 2 000	1.50	1.491	0.090	0.622
1 : 2 500	1.20	1.246	-0.046	3.840
1 : 3 000	1.00	-0.011	1.071	1.011

加压至 1 MPa 时,最大相对误差为 4.301%,绝对误差小于 0.126 mg/L,绝对误差和相对误差比常压下均有改善。

3.4 混药均匀性试验

在药剂加压试验平台,改变药水混合比,在同一喷头下用量杯取样,每组取样 2 min,在每个取样周期内随机取样 10 次,单次取样时间 2 s。

不同混药比下的混合均匀性变异系数列于表 6。

表 6 加压(1 MPa)状态下的混药均匀性变异系数

药液比	质量浓度/ (mg·L ⁻¹)	标准差/ (mg·L ⁻¹)	变异系数/%
1 : 300	10.027	0.168	1.679
1 : 600	5.081	0.186	3.666
1 : 900	3.447	0.081	2.338
1 : 1 000	3.126	0.096	3.073
1 : 1 500	2.086	0.062	2.968
1 : 2 000	1.491	0.056	3.779
1 : 2 500	1.246	0.050	3.989
1 : 3 000	1.011	0.021	2.093

分析表 6 知,胭脂红混合液的实际质量浓度和预期的相近。混合均匀性变异系数低于 3.989%,满足设计要求,有较好的混合效果。加压状态下在线混药系统混合均匀性变异系数和模拟结果基本吻合,误差较小,说明试验结果符合预期,建立的 CFD 模型真实有效。

3.5 工况改变试验

为确保所设计混药系统具有良好混药效果,在各混药比下,改变隔膜泵取水量,对在线混药系统的混合性能进行试验。

在不同混药比下,改变水流量,分别用量杯在同一喷头取样,每次取样 2 min,在每个取样周

期内随机取样 10 次,单次取样时间 2 s,混药均匀性变异系数列于表 7。

表 7 不同水流量下混药系统的混合均匀性变异系数

药液比	混药均匀性变异系数/%			
	35 L/min	70 L/min	105 L/min	140 L/min
1 : 300	4.053	2.869	2.485	1.679
1 : 500	4.321	2.791	2.651	1.889
1 : 1 000	4.000	3.000	2.890	1.821
1 : 1 500	4.210	3.240	2.950	1.967
1 : 2 000	4.560	3.900	3.500	2.287
1 : 2 500	4.440	4.300	3.700	2.011
1 : 3 000	4.670	4.000	3.900	2.197

结果表明,在线混药系统混合均匀性系数随水流量增加而减小,这与水流量增加湍动能增大、液体混合效果改善的事实相符。水流量在 35~140 L/min 时,在线混药系统混合均匀性系数均小于 5%,说明所设计的在线混药系统混合效果良好。

4 结论

设计了一套精准在线混药系统,可提高植保机械喷雾作业中农药的有效利用率。对混药系统所采用的混合器进行数值模拟,混合器内部增加扰流板可改善混合均匀性,混合器内置 7 块扰流板,且药水流向正对第 1 块扰流板时的混合效果最佳。

对在线混药系统进行混合均匀性和稳定性试验,加压至 1 MPa 时,药水混合浓度相对误差最大为 4.301%,明显优于常压下的 6%,混合性能更优。加压 1 MPa 时,药水混合均匀性变异系数小于 3.989%,证明设计系统混药性能良好。

在线混药系统变工况试验表明,水流量在 35~140 L/min 时,在线混药系统混合均匀性系数均小于 5%,说明在线混合系统具有良好的混药效果。

参考文献:

[1] 袁琦堡,胡炼,罗锡文,等.在线实时混药喷雾系统设计与试验[J].农业机械学报,2016,47(S1):176-181.
YUAN Q B, HU L, LUO X W, et al. Design and experiment of online mixing spraying system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(S1): 176-181.
[2] 漆海霞,廖海,兰玉彬.农药自动混药装置的研究现

- 状与展望[J]. 中国农业科技导报: 2019, 21(7): 10–18.
- QI H X, LIAO H, LAN Y B. Research status and prospect of automatic pesticide mixing device[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2019, 21(7): 10–18.
- [3] 周良富, 傅锡敏, 薛新宇, 等. 基于 CFD 的射流式在线混药装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(S1): 107–112.
- ZHOU L F, FU X M, XUE X Y, et al. Design and experiment of jet mixing apparatus based on CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(S1): 107–112.
- [4] GHATE S R, PHATAK S C. A compressed air direct injection pesticide sprayer[J]. Applied Engineering in Agriculture, 1991, 7(2): 158–162.
- [5] ALBERT Renken, MARC Wehrli, THIERRY Meyer, et al. Numerical simulations of mixing in an SMRX static mixer[J]. Chemical Engineering Journal, 1996, 63(1): 117–126.
- [6] SARAVANAN K, SUNDARAMOORTHY N, MOHANKUMAR G, et al. Studies on some aspects of jet mixers I: hydrodynamics[J]. Modern Applied Science, 2010, 4(3): 51–59.
- [7] 尹红霞. 内置翼片静态混合器的三维流场模拟及结构优化[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- YIN H X, Simulation and optimization for tubular static mixer with roes of tabs[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.
- [8] 何秀华, 王岩, 高凌峰. 内置阻块和挡板微混合器的性能[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(12): 1282–1287.
- HE X H, WANG Y, GAO L F. Characteristics of micromixer with periodic blocks and baffles[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2018, 36(12): 1282–1287.
- [9] 张文昭, 刘志壮. 3WY-A3 型喷雾机变量喷雾实时混药控制试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(11): 130–133.
- ZHANG W Z, LIU Z Z. Experiment on variable rate spray with real-time mixing pesticide of 3WY-A3 sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(11): 130–133.
- [10] 李晋阳, 贾卫东, 魏新华. 基于流量调节阀和神经网络的植保机械在线混药装置[J]. 农业机械学报, 2014, 45(11): 98–103.
- LI J Y, JIA W D, WEI X H. On-line mixing pesticide device based on flow control valve and neural network[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery, 2014, 45(11): 98–103.
- [11] 郭敬坤. 农药药水在线混合效果的数字图像处理技术研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2008.
- GUO J K. Research on mixing degree of direct injection system for pesticide sprayer[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2008.
- [12] 贾卫东, 陈志刚, 赵鑫, 等. 基于农药光透性的混药比反馈在线混药装置[J]. 农业机械学报, 2013, 44(8): 90–93, 164.
- JIA W D, CHEN Z G, ZHAO X, et al. Online pesticide mixer with mixing ratio feedback based on light peamibility of pesticides[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery, 2013, 44(8): 90–93, 164.
- [13] 杨亚飞, 崔勇, 陶德清, 等. 混药浓度在线检测装置的设计与实验研究[J]. 中国农机化学报, 2015, 36(6): 112–115.
- YANG Y F, CUI Y, TAO D Q, et al. Design and experimental research of the online detection device for mixed drug concentration[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2015, 36(6): 112–115.
- [14] 周锐. 基于 FLUENT 对管式静态混合器的优化设计[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
- ZHOU R. Optimization design of tube type static mixer by using FLUENT[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.
- [15] 陈均凯. 静态管道混合器流场分布特性研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2015.
- CHEN J K, Characteristic study of flow field in static piping mixer[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2015.
- [16] 艾志久, 黄涛, 唐荣武, 等. 内置叶片型静态混合器结构优化研究[J]. 机械设计与制造, 2011(3): 123–125.
- AI Z J, HUANG T, TANG R W, et al. Study on optimized structure of built-in blade-type static mixer[J]. Machinery Design & Manufacture, 2011(3): 123–125.
- [17] 颜杰. 内置阻块 T 型微混合器内流动与混合特性研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
- YAN J. Characteristics of internal flow and micromixing performance of T-shaped micromixer with build-in baffles[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016.
- [18] 韩国军. 流体力学基础与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- HAN G J. Foundation and Application of Fluid Mechanics[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2012.
- [19] 张凯, 王瑞金, 王刚. Fluent 技术基础与应用实例[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- ZHANG K, WANG R J, WANG G. Fluent Technology Foundation and Application Example[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.
- [20] 董光华, 李建晴. 分光光度法同时测定柠檬黄和胭脂红[J]. 忻州师范学院学报, 2009, 25(2): 6–9.
- DONG GH, LI J Q. Simultaneous spectrophotometric determination of lemon yellow and carmine[J]. Journal of Xinzhou Teachers University, 2009, 25(2): 6–9.

责任编辑: 罗慧敏

英文编辑: 吴志立