

喷雾机预混装置动态流场分析与参数优化

孙文峰 王 进 常晋恺 王 昊 卢佳琪 竹筱歆

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 针对喷雾机预混装置预混时间长、预混效果及均匀性参差不齐等植保作业中存在的实际问题,基于现有喷雾机预混装置,结合田间作业过程中1 000 L喷雾机农药制剂使用量和预混药液输送需求,确定了预混药箱、预混喷头、上药阀等关键部件的基础参数。采用ANSYS-Fluent对不同液面高度时预混动态流场特性进行分析,得到预混药箱内流场的动态分布规律;采用二次回归正交旋转中心组合优化试验方法,以预混喷头工作压力和空间位置参数为影响因素,药液均匀度变异系数为评价指标,利用多岛遗传算法优化获得预混效果较好的参数组合:预混喷头工作压力0.3 MPa、与底部平面距离200 mm、与背部垂直平面的距离70 mm。针对粉剂农药进行场地试验,结果表明:预混药液均匀度变异系数为32.99%;上药阀在压力0.2~0.5 MPa下稳定送药,无回流现象。

关键词: 喷雾机; 预混装置; 预混喷头; 上药阀

中图分类号: S49 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)04-0083-13 OSID: 

Dynamic Flow Field Analysis and Parameter Optimization of Premixing Device of Spray

SUN Wenfeng WANG Jin CHANG Jinkai WANG Hao LU Jiaqi ZHU Xiaoxin

(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In view of the practical problems existing in plant protection operations such as long premixing time, uneven premixing effect and uniformity of the premixing device of the spray, based on the existing sprayer premixing device, the basic parameters of key components such as premixing tank, premixing nozzle and feeding valve were determined by combining the pesticide formulation usage and premixing liquid delivery demand of 1 000 L sprayer in the field operation process. ANSYS-Fluent was used to analyze the dynamic flow field characteristics of premixing at different liquid level heights, and the dynamic distribution law of the flow field in the premixing tank was obtained. Using the quadratic regression orthogonal rotation center combination optimization test method, taking the working pressure and spatial position parameters of the premixed nozzle as the influencing factors, and the variation coefficient of the uniformity of the liquid pesticide as the evaluation index, the multi island genetic algorithm was used to optimize and obtain a better premixed parameter combination: the working pressure of the premixed nozzle is 0.3 MPa, the distance from the bottom plane is 200 mm, and the distance from the back vertical plane is 70 mm. Field tests were conducted on powdered pesticides, and the results showed that the coefficient of variation of uniformity of the premixed solution was 32.99%. The feeding valve delivers the pesticide stably at a pressure of 0.2~0.5 MPa without backflow.

Key words: boom sprayer; premixing device; premixed nozzle; feeding valve

0 引言

随着现代农业的快速发展,对植保机械的要求

不断提高,喷雾机在植保作业中因其农药利用率高、作业效果好被广泛使用^[1-4]。

由于喷雾机药箱容积较大,浓度较高的农药制

剂直接在药箱内混合存在混合时间长、均匀性较差等问题,使喷施到标靶上的雾滴所含原药量不一致,造成药害或降低施药质量^[5-8];同时农药制剂初步混合多在施药机具之外人工手动操作完成,操作者手动搅拌过程易增加农药中毒风险,因此在喷雾机外侧需加装预混装置,在农药制剂进入喷雾机药箱之前进行初次稀释与搅拌,对提高植保作业效率及施药质量具有重要意义。

在大容积容器内搅拌混合方面,现有研究多集中在化工领域,所使用的搅拌装置多为机械式搅拌器,SATJARITANUN 等^[9]利用田口方法对搅拌叶轮几何尺寸进行优化,以提高对固体颗粒的搅拌效率,但机械搅拌结构复杂、维护成本高。在混合评价指标方面,KAZEMZADEH 等^[10]通过 CFD 和层析成像相结合的方法确定容器中的均匀度状态。预混装置作为嵌入式部件在国外中大型喷雾机应用较多,如德国 AMAZONE 公司在其 UG 系列拖曳式喷雾机产品中将喷雾机预混装置作为模块化组件安装,美国 CASE 公司在其 PATRIOT 350 型自走式喷雾机内部安装感应转鼓,通过冲洗环和动力喷射器快速预混农药^[11]。但国内外学者及植保机械生产企业对于喷雾机预混装置的预混流场特性分析、运动状态下混合均匀度等方面理论研究较少,预混装置的结构参数设计与优化缺乏相应的理论依据。

本文结合喷雾机结构特点和植保农艺要求,基于现有的喷雾机预混装置,结合 CFD 流体仿真探索农药制剂动态预混流场的流体特性及规律,开展预混喷头参数优化,通过场地试验对其动态预混流场予以验证,以期对喷雾机预混装置设计及实际应用提供理论参考与技术支撑。

1 总体结构与工作原理

1.1 总体结构

喷雾机预混装置作为喷雾机嵌入式模块化组件安装在喷雾机侧部,结构如图 1 所示。农药制剂由

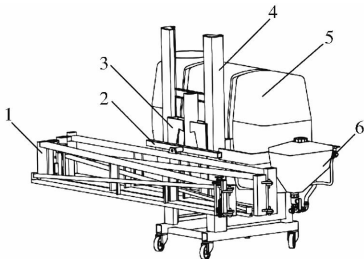


图 1 喷杆式喷雾机结构图

Fig. 1 Boom sprayer structure diagram

1. 喷杆 2. 悬挂机构 3. 升降机构 4. 主体支架 5. 喷雾机药箱 6. 预混装置

预混装置预混后,送入喷雾机药箱进一步混合,得到更均匀的药液喷施到标靶,可取得较理想的植保作业施药效果。

喷雾机预混装置由预混药箱、预混喷头、药瓶清洗机构、药箱清洗管、截止阀、上药阀和三路控制单元等组成,结构如图 2 所示。其中三路控制单元分别控制预混喷头、药瓶清洗机构和内壁清洗管的开闭。

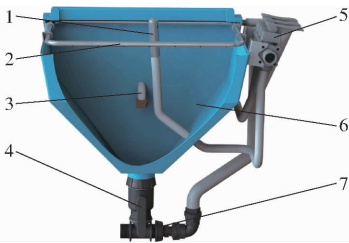


图 2 喷雾机预混装置结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of premixing device of boom sprayer

1. 药瓶清洗机构 2. 药箱内壁清洗管 3. 预混喷头 4. 截止阀 5. 三路控制单元 6. 预混药箱 7. 上药阀

1.2 预混装置工作原理

预混是农药制剂在预混药箱内不断稀释、混合的动态过程,预混装置管路连接如图 3 所示。高压流体的入口管道通过控制阀与施药泵主管路并联,上药阀出口管道与喷雾机药箱顶部联通,形成喷雾机农药制剂预混作业的闭环管路。

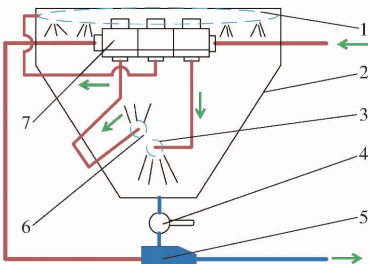


图 3 预混管路示意图

Fig. 3 Schematic of premixed pipeline

1. 药箱内壁清洗管 2. 预混药箱 3. 预混喷头 4. 截止阀 5. 上药阀 6. 药瓶清洗喷头 7. 三路控制单元

喷雾机预混工作时,将农药制剂置入预混药箱并通过药瓶清洗喷头清洗药瓶,药箱内壁清洗管注水至预混药箱 1/2 容积时,为预混喷头水流能有效搅动底部药液,及时开启预混喷头进行预混作业。

预混采用射流式混合搅拌原理,在卷吸效应作用下高速射流与预混药箱内的流体在其接触面位置发生动量交换,迫使预混药箱内流体随射流流体运动,在预混药箱内部形成动态混合涡流场,从而达到预混的目的,预混原理如图 4 所示。

预混药液接近满箱时,同时开启上药阀和药

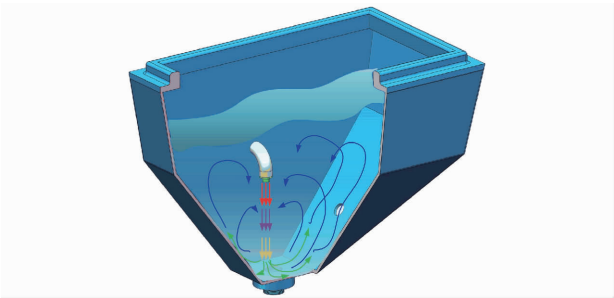


图 4 预混作业原理图

Fig. 4 Schematic of premixing operation principle

箱内壁清洗管开关。在上药阀抽取预混药液过程中,预混药箱内的液面逐渐下降,高压流体从药箱内壁清洗管各个喷口喷出并在预混药箱壁迅速散开平铺,相邻两个喷口喷出的流体在箱壁交叉,从而完整覆盖箱壁并将残留药液冲入预混药液中,如图 5 所示。

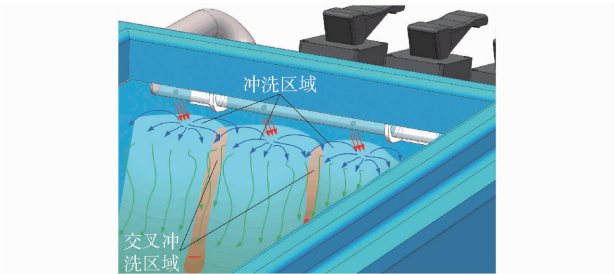


图 5 药箱清洗示意图

Fig. 5 Schematic of tank cleaning

上药阀是基于文丘里原理设计的液力式输送装置,内部安装有射流管,当高速高压流体经过射流管形成射流时,在射流管出口外部区域形成一定的负压,将预混药箱内的预混药液吸入上药阀出口管道并与高速射流流体进一步混合,二者发生动量交换

带动预混药液进入喷雾机药箱内,预混药液进入喷雾机药箱后将进行更充分的混合搅拌,上药阀工作原理如图 6 所示。

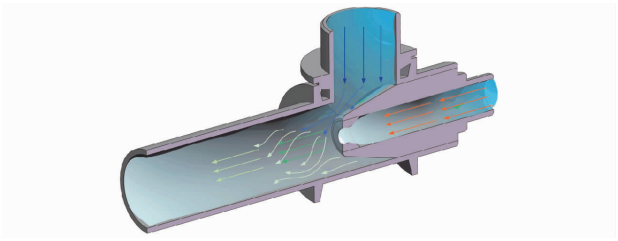


图 6 上药阀工作原理图

Fig. 6 Schematic of working principle of feeding valve

2 关键部件理论分析及基础参数确定

2.1 预混药箱

预混药箱作为初次稀释药液的容器,其容积和形状需与喷雾机药箱容积、农药使用剂量、农药剂型相配套。目前国内外喷雾机携带药箱容积多为 500 ~ 1 200 L^[12-14]。本文使用的预混装置是 1 000 L 喷雾机的配套组件,因此,预混药箱预混稀释的农药剂量需满足 1 000 L 以内的药箱喷施所用药量。

田间作业常用农药剂型的有效成分绝大多数不溶于水,农药制备过程中需加入乳化剂或分散剂来提高亲水性,混合后形成均一稳定的乳浊液或悬浊液^[15-17]。采用能使其形成均一稳定溶液的稀释倍数来计算预混药箱内稀释用水量^[18-20]。选取在大田作物植保作业中 12 种常规农药,通过稀释试验验证分别得到室温下农药最小稀释倍数^[21-23],作为确定混药箱容积的理论依据,结果如表 1 所示。

表 1 12 种农药制剂 1 000 L 药箱使用剂量与稀释用水量

Tab. 1 Dose and dilution water consumption of 1 000 L tank for 12 kinds of pesticide preparations

农药名称	剂型	使用方法	使用剂 量/mL	最小稀 释倍数	稀释用 水量/L	用途
苯甲·丙环唑(300 g/L)	乳油	300 ~ 375 mL/hm ² , 稀释 1 500 倍	666	30	20	水稻等杀菌
溴氯菊酯(25 g/L)	乳油	300 ~ 375 mL/hm ² , 稀释 1 250 倍	800	30	24	烟草、小麦、棉花等杀虫
精喹禾灵(15%)	乳油	300 ~ 450 mL/hm ² , 稀释 2 000 倍	500	30	15	白菜、花生、棉花等除草
肟菌·戊唑醇(30%)	悬浮剂	540 ~ 675 mL/hm ² , 稀释 800 倍	1 250	20	25	水稻、黄瓜、茄子等杀菌
噻虫·高氯氟(22%)	悬浮剂	60 ~ 75 mL/hm ² , 稀释 5 000 倍	200	20	4	马铃薯等杀虫
双氟·唑啉酰胺(58 g/L)	悬浮剂	135 ~ 210 mL/hm ² , 稀释 3 000 倍	333	20	6. 7	马铃薯、大豆等除草
肟菌·戊唑醇(30%)	悬浮剂	540 ~ 675 mL/hm ² , 稀释 1 250 倍	800	20	16	番茄、水稻、香蕉等杀菌
噻虫胺(30%)	悬浮剂	225 ~ 375 mL/hm ² , 稀释 1 500 倍	666	20	13. 3	水稻等杀虫
烟嘧磺隆(8%)	可分散油	450 ~ 750 mL/hm ² , 稀释 1 300 倍	770	30	23. 1	玉米等除草
	悬浮剂					
氟啶胺(500 g/L)	悬浮剂	405 ~ 495 mL/hm ² , 稀释 1 000 倍	1 000	20	20	马铃薯、白菜等杀菌
氟啶虫酰胺(10%)	水分散粒剂	150 ~ 180 mL/hm ² , 稀释 3 000 倍	333	10	3. 3	白菜、马铃薯等杀虫
苯甲·嘧菌酯(325 g/L)	悬浮剂	300 ~ 600 mL/hm ² , 稀释 1 500 倍	666	20	13. 3	西瓜、水稻等杀菌

预混药箱稀释最小用水量 V_{nw} 为

$$V_{nw} = \frac{V_a}{K_w} S_m$$

(1)

式中 V_a ——药箱容积,L

K_w ——稀释倍数

S_m ——室温下最小稀释倍数

由式(1)可得预混药箱稀释最小用水量,通过农药使用方法及试验^[24-28]得到使用剂量及稀释最小用水量。由表 1 可知,将预混药箱容积确定为 30 L,可满足绝大多数农药剂型的稀释用水量。

参考植保作业所使用的农药制剂理化性质,并结合喷雾机外形结构中安装预混药箱的位置特点设计预混药箱外形立体尺寸^[29-30],预混药箱形状选为倒立锥形,上平面几何尺寸为 500 mm×325 mm,下平面几何尺寸为 100 mm×100 mm,高度为 450 mm。

2.2 预混喷头

预混药箱内农药采用射流方式搅拌,搅拌流量与预混药箱容量的关系^[31]为

$$Q_m = (0.1 \sim 0.2) V \tag{2}$$

式中 Q_m ——搅拌流量,L/min

V ——预混药箱容量,L

由预混药箱容量确定为 30 L,可得搅拌流量为 3~6 L/min。结合喷雾机工作压力,选用 110SF15 型标准扇形喷嘴,性能参数如表 2 所示。

表 2 110SF015 型喷嘴性能参数

Tab.2 Performance parameters of 110SF015 nozzle		
喷嘴压力/MPa	流量/(L·min ⁻¹)	出口初速度/(m·s ⁻¹)
0.15	4.24	20
0.30	6.00	30
0.50	7.75	35
0.70	9.17	40

在压力 0.3 MPa 下,喷嘴出水量为 6 L/min,满足预混射流搅拌流量要求。

2.3 上药阀

预混装置作为喷雾机的嵌入式模块化组件相对工作时间较短,为在无独立动力源情况下达到抽吸并输送预混药液的目的,预混装置底部需安装基于文丘里原理的上药阀,通过改变上药阀体内流道直径,使高速射流流体在缩小的过流截面出口后侧产生“真空区”流场,利用文丘里原理将预混药箱内的预混药液吸入上药阀出口管道内,并最终将预混药液送入喷雾机药箱,其结构参数如图 7 所示。

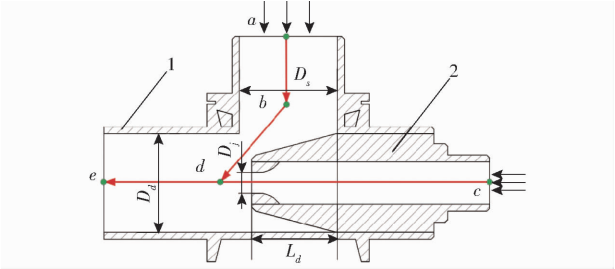


图 7 上药阀结构参数示意图

Fig.7 Schematic of feeding valve structure

1.三通管 2.射流管

上药阀工作过程原理如图 8 所示,在射流形成的负压作用下,预混药箱出口管内的混合液被吸入上药阀出口管道内。

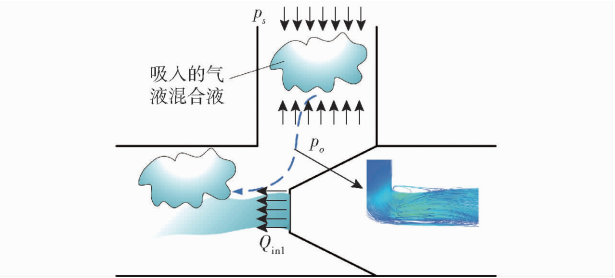


图 8 上药阀射流与吸入过程

Fig.8 Jet and suction process of feeding valve

$b-d$ 段吸入混合流体的连续方程^[32]为

$$\frac{dp_{in2}}{\rho_{in2}} + v_{in2} dv_{in2} + d \left(K_{in2} \frac{v_{in2}^2}{2} \right) = 0 \tag{3}$$

式中 p_{in2} ——吸入混合液静压,MPa

ρ_{in2} ——吸入射流管喷嘴附近气液混合流体密度,kg/m³

v_{in2} ——吸入混合液速度,m/s

K_{in2} ——吸入过程摩擦损失系数

上药阀从预混药箱中抽吸混合液是动态过程,在抽取的流体中无法避免地混杂着气体,吸入射流管喷嘴附近气液混合流体密度 ρ_{in2} 为

$$\rho_{in2} = \frac{m_{in2L} + m_{in2G}}{Q_{in1} [M + p_s Q_{Gs} / (p Q_{in1})]} = \frac{SM + \zeta Q_{Gs} / Q_{in1}}{p_{in1} M + p_s Q_{Gs} / (p Q_{in1})} \tag{4}$$

式中 m_{in2L} 、 m_{in2G} ——吸入液体、气体质量流率,kg/s

Q_{in1} ——射流液体体积流率,m³/s

ρ_{in1} ——射流液体密度,kg/m³

M ——吸入液体与射流液体体积流率比

S ——吸入液体与射流流体密度比

ζ ——预混药箱出口管道区域气体密度与射流液体密度比

p_s ——预混药箱出口管道区域静压,MPa

p ——环境静压,MPa

Q_{Gs} ——预混药箱出口管道区域气体体积流率,m³/s

上药阀出口管道区域混合液中气体速度 v_{in2Go} 为

$$v_{in2Go} = \frac{v_n (M + \vartheta_o)}{\lambda} \tag{5}$$

式中 ϑ_o ——上药阀喷嘴周边区域内气体流率比

v_n ——射流液体速度,m/s

λ ——上药阀出口管内径与射流管内径比

联立式(3)~(5)可得混合液吸入的连续方程为

$$M(p_s - p_o) + Q_{Gs} p_s \ln(p_s/p_o)/Q_{in1} = Z \frac{SM + \zeta Q_{Gs}/Q_{in1}}{\lambda^2} (1 + K_{in2})(M + \vartheta_o)^2 \quad (6)$$

式中 p_o ——上药阀喷嘴周边区域静压,MPa

Z ——射流动态压力,MPa

上药阀出口管内流道截面积与射流管内流道截面积的最佳比^[29] λ 为

$$\lambda = \sqrt{\frac{0.952 \kappa_1^2 \varepsilon_0}{h + 0.003 \kappa_1^2}} \quad (7)$$

其中
$$h = \frac{p_{out} - p_{in2}}{p_{in1} - p_{in2}} \quad (8)$$

式中 κ_1 ——喷嘴入口流速系数

ε_0 ——液体浓度修正系数

p_{out} ——混合液出口压力,MPa

p_{in1} ——射流流体静压,MPa

由式(7)可知,上药阀出口管内径与射流管内径比 λ 为混合液吸入的连续方程中由结构参数控制的影响因素,该参数与 SANGER^[33]在场地试验测得的影响参数基本一致。

射流管内流道直径^[29] D_j 为

$$D_j = \sqrt{\frac{4Q_{in1}}{\pi \kappa_1 \sqrt{2\omega \frac{p_{in1} - p_{in2}}{\rho_{in1}}}}} \quad (9)$$

式中 ω ——喷口出口系数

上药阀出口管内流道直径 D_d 为

$$D_d = D_j \lambda \quad (10)$$

预混药箱出口管内流道直径与上药阀出口管内流道直径采用同一尺寸,射流管引出长度 L_d 为

$$L_d = D_d - 0.15 D_j \lambda \quad (11)$$

结合喷雾机管道常用内径,优选得上药阀出口管内流道直径 D_d 为 30 mm,预混药箱出口管内流道直径 D_e 为 30 mm,射流管内流道直径 D_j 为 10 mm,射流管引出长度 L_d 为 25 mm。

通过使用 ANSYS - Fluent 仿真,流体类型为不可压缩流体,喷雾机使用的施药泵工作压力为 0 ~ 3 MPa,根据上药阀结构参数构建仿真模型,相关条件设置包括:选用 Realizable $k - \varepsilon$ 湍流模型^[34],应用 pressure based 压力求解器,采用 high resolution 求解格式,残差类型为均方根(RMS)残差,收敛标准为 1×10^{-4} ,得到上药阀射流口与混药箱出口处流体的压力比和流量比曲线,如图 9 所示。

由图 9a 可知,当入口压力低于 0.2 MPa 时,上药阀的压力比为负值,出现药液回流现象,无法正常工作。由图 9b 可知,当入口压力高于 0.5 MPa 时,上药阀流量比不再出现波动,因此上药阀的工作压

力应控制在 0.2 ~ 0.5 MPa。

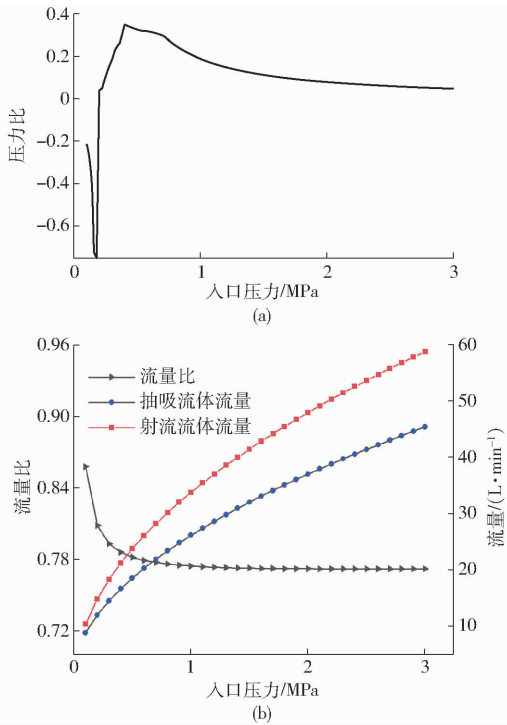


图 9 上药阀无量纲特性变化曲线

Fig. 9 Dimensionless characteristic change curves of feeding valve

3 预混药箱流场分析与数值模拟

3.1 计算域与边界条件

运用 ANSYS - Fluent 软件模拟箱体内的药液动态混合过程,由于预混喷头的扰动而产生的流场变化以及扩散场变化,选取高于预混药箱 1/2 容积(液面高度为 240 mm)时 250、300、350 mm 3 个液面高度,进行动态混合流场特性仿真分析,计算域如图 10 所示。

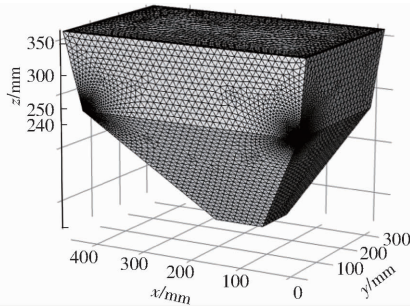


图 10 预混药箱计算域

Fig. 10 Computational domain of premixing tank

预混流场数值模拟仿真时,流体类型为不可压缩流体,湍流模型选用 Realizable $k - \varepsilon$ 模型^[35],网格采用适应性更好的非结构化网格^[36-38]。环境压力为 1 个标准大气压,预混喷头进口管道截面设为压力进口,进口压力为 0.4 MPa。出口为药箱上部平面,由于直接与大气相通,故出口压力设为 0 MPa。

3.2 预混药箱动态流场数值模拟

通过 Fluent 流体仿真得到预混流场内流体速度分布,如图 11 所示。对比 3 种液面高度下流场可知,由预混喷头射流形成的流场存在较高的一致性,流体运动过程均为:高速流体从预混喷头喷出接触预混药箱底部后,分别折向两侧倾斜箱壁,形成以预混喷头为分界线的两个混合涡漩流场,完成预混药箱内的药液混合。此外,3 种液面高度下的流场中预混喷头两侧的漩涡高度存在随着液面高度增加而增加的现象。由图 11 可知,壁面流体速度最大值位于药箱底部。

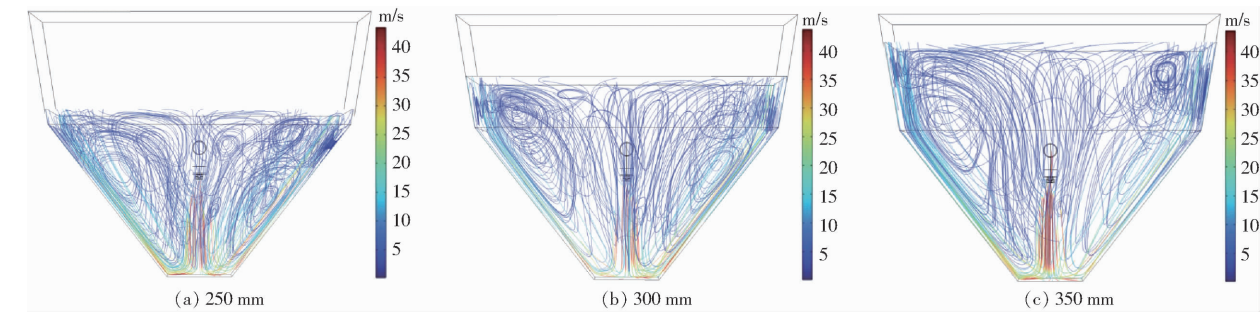


图 11 预混药箱流线分布
Fig. 11 Streamline distribution diagrams of premixing tank

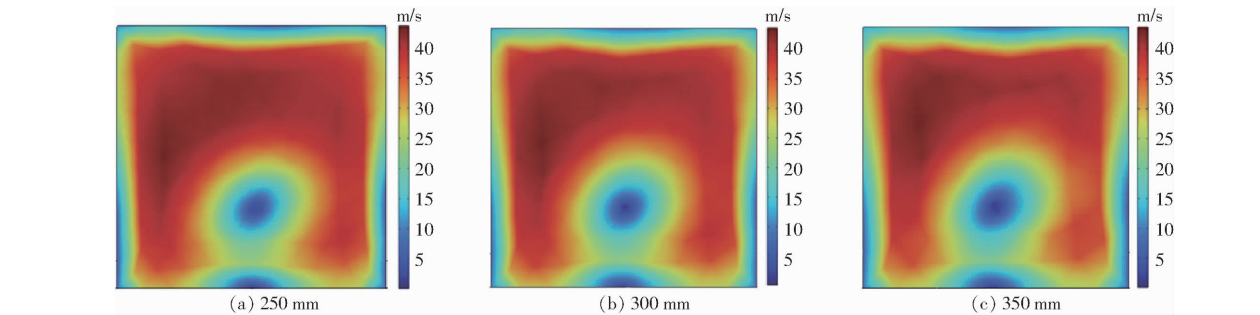


图 12 预混药箱底部速度分布
Fig. 12 Velocity distribution diagrams at bottom of premixing tank

3.3 预混流场浓度变化趋势分析

喷雾机常用农药制剂中可湿性粉剂农药的混合最为困难^[39],采用可湿性粉剂农药制剂预混流场分析进行模拟。可湿性粉剂农药为细小粉状固体,粒径为 20 ~ 30 μm ,仿真中可视为水与颗粒体的混合,在 Fluent 仿真模拟中可使用 Mixture 模型^[40-41]。

由预混药箱的三维模型和液面高度可知,两相

预混药箱底部流体速度分布情况如图 12 所示,下部的低速圆环为预混喷头高速流体与底部接触的位置,除去底部平面与倾斜桶壁交接位置发生的流体速度突变,其余位置流体速度分布较为均匀,可对底部的药液进行有效扰动,同时将药液带入上部漩涡混合流场,避免底部药液的沉积。随着液面高度增加,预混喷头需要扰动的液体体积增加,预混喷头喷出的高速流体在预混药箱底部的低速圆环面积逐渐增加,底部其余区域流体冲刷速度也呈下降趋势,但冲刷区域保持较高的一致性。

邻液面容积差约为 4 L,对表 2 中数据进行插值处理可得预混时间约为 30 s。分别对液面高度 250 ~ 300 mm、300 ~ 350 mm 和 350 ~ 400 mm 药液体积等距划分为 5 个监测平面,并记录监测各平面平均质量分数,其结果如图 13 所示。

由图 13 可知,预混喷头喷出的高速流体形成扰动混合流场,预混药箱底部的药液被水流带入药箱

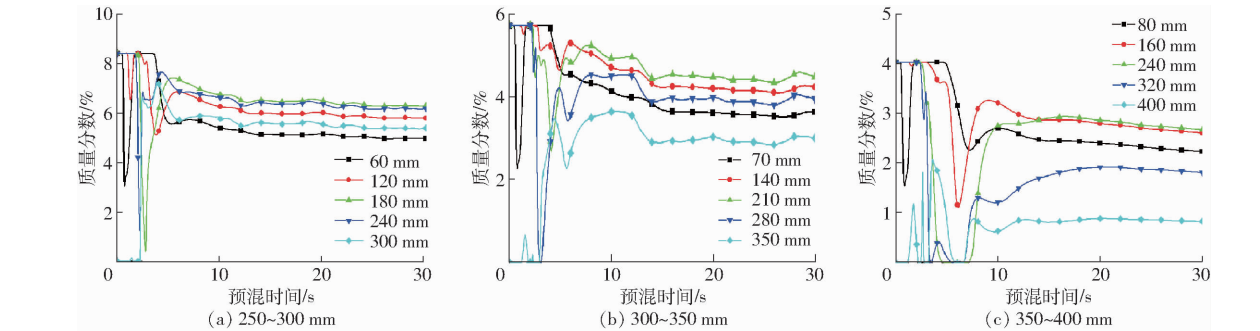


图 13 粉剂农药预混流场质量分数变化曲线
Fig. 13 Change trends of mass fraction of powder pesticide premixed flow field

的中上部,各个监测质量分数自下而上依次出现峰值后最终趋于平稳,动态的预混流场均存在液面实时高度约 3/5 处药液浓度最高,向上下两侧递减的现象。随着清水的注入稀释预混浓度不断降低,不同液面高度下粉剂农药质量分数动态变化过程具有较高的一致性。

4 预混喷头参数优化

4.1 预混流体运动学理论分析

预混喷头通过射流的方式扰动预混药箱内的流体以达到搅拌的目的。为分析搅拌的过程,将预混喷头射流过程简化,如图 14 所示。

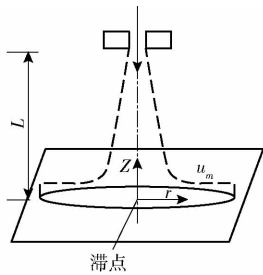


图 14 喷头垂直射流示意图

Fig. 14 Schematic of vertical jet of nozzle

假设射流流体不可压缩,在柱坐标下,采用边界层近似的射流径向和垂向的雷诺方程^[42]为

$$u \frac{\partial u}{\partial r} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial u'w'}{\partial z} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (12)$$

$$\frac{\partial w'^2}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p_t}{\partial z} \quad (13)$$

式中 u 、 w ——径向和垂向时间平均速度, m/s
 u' 、 w' ——径向和垂向脉动速度, m/s
 p_t ——时间平均压力, MPa
 ρ ——流体密度, kg/m³
 ν ——运动粘度, m²/s

对方程进一步处理,做以下约束:在速度场中,在图 14 中滞点处,有

$$u = w = u' = 0 \quad (14)$$

在距离滞点无穷远的位置有

$$u = 0 \quad (15)$$

将式(12)乘以 r 并对 z 进行积分,在滞点位置有

$$\frac{\tau_w}{\rho} = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \int_0^\infty u^2 dz \right) \quad (16)$$

式中 τ_w ——壁面切应力, MPa

假设流动是连续的,由量纲分析^[43-44]可得

$$\frac{u_m L}{\sqrt{E}} = 1.32 \left(\frac{r}{L} \right)^{-1.1} \quad (17)$$

式中 u_m ——径向最大速度, m/s

L ——喷头与壁面垂直距离, m

E ——流体离开喷头出口时通量

由式(16)、(17)可知,喷头出口的流体初速度和位置参数决定了在滞点位置的壁面切应力和冲刷速度,是影响预混效果的主要因素。

4.2 预混喷头空间位置参数组合试验

由流体运动理论分析可知,不同液面高度时预混药箱内的流体运动过程以及粉剂农药浓度变化过程均呈较高的一致性,在后续优化过程中,选取满箱状态(30 L)对预混喷头压力以及预混喷头的空间位置进行参数优化。

4.2.1 单因素取值范围确定

从混合均匀性和配药准确性出发,在预混药箱内预混药液越均匀越有利于配制药液准确性和后期喷雾机药箱内混合的均匀性,因此本文所设计的预混装置以粉剂农药均匀度变异系数为预混效果评价指标。

优化试验采用多点分层监测的方法^[45],如图 15 所示。

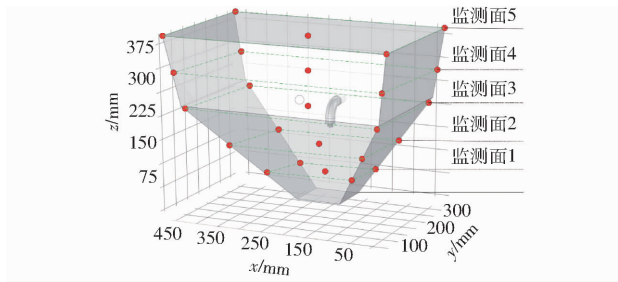


图 15 监测点分布图

Fig. 15 Distribution map of monitoring points

预混药箱底部平面为基准面,由下往上每隔 75 mm 布置一个监测面,共 5 个监测面。监测面为矩形,选取矩形 4 个角和中心作为监测点,共 25 个监测点。通过监测点得到药液浓度并计算预混药液均匀度变异系数,监测面浓度取 5 个监测点浓度平均值。

由理论分析可知,预混喷头的混合效果受预混喷头出口的流体初速度、与底部平面距离、与垂直平面距离三者共同影响,而预混喷头压力是流量及出口流体初速度的主要影响因素。因此,预混喷头压力 p_t 拟取 0.2 ~ 1.0 MPa;预混药箱采用左右对称的设计,预混喷头布置在预混药箱的垂直中轴线上,与底部平面距离 L 和垂直平面距离 L_w 如图 16 所示。

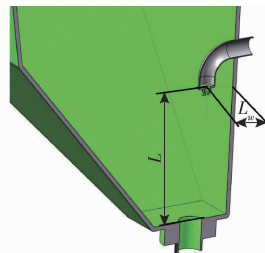


图 16 位置参数示意图

Fig. 16 Schematic of location parameters

对各影响因素数值模拟仿真结果如图 17 所示。预混喷头压力对均匀度变异系数的影响如图 17a 所示,压力 0.2 ~ 0.5 MPa 与 0.8 ~ 1.0 MPa 段均匀度变异系数呈下降趋势,压力 0.5 ~ 0.8 MPa 段呈上升趋势,且工作压力经过 0.6 MPa 后均匀度变异系数急剧增加。将工作压力 0.6 MPa 作为拐点,预混喷头工作压力为 0.2 ~ 0.6 MPa。

预混喷头与底部平面距离对均匀度变异系数的影响如图 17b 所示,在高度 125 ~ 225 mm 内均匀度

变异系数呈下降趋势,高于 225 mm 后喷嘴水流无法有效搅拌底部,因此将预混喷头与底部平面距离数值模拟范围确定在 125 ~ 225 mm 之间。

预混喷头与垂直平面距离对均匀度变异系数的影响如图 17c 所示,随着预混喷头与垂直平面距离的增加,均匀度变异系数呈锯齿状变化趋势,当距离达到 170 mm 后均匀度变异系数趋于平稳,因此将预混喷头与垂直平面距离数值模拟范围确定在 40 ~ 170 mm 之间。

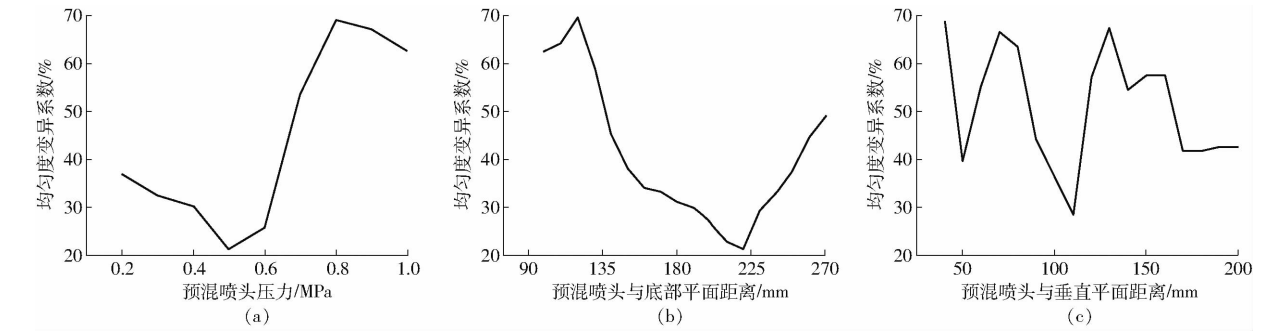


图 17 单因素试验结果

Fig. 17 Single factor test results

4.2.2 试验设计与方法

试验采用三因素五水平二次正交旋转中心组合试验方法,选取预混喷头压力、预混喷头与底部平面距离、预混喷头与垂直平面距离为试验因素,以预混粉剂农药均匀度变异系数 Y 作为评价指标。

试验因素编码如表 3 所示。各水平组合下进行 5 组试验,取其平均值作为结果。

表 3 试验因素编码
Tab. 3 Coding of factors

编码	因素		
	预混喷头压力/ MPa	预混喷头与底部 平面距离/mm	预混喷头与垂直 平面距离/mm
-1.682	0.2	125	40
-1	0.3	145	70
0	0.4	175	105
1	0.5	200	140
1.682	0.6	225	170

4.2.3 试验结果与分析

试验结果如表 4 所示, A 、 B 、 C 为因素编码值。采用 Design-Expert 8.0.6 软件对试验结果进行二次回归分析,并对各个试验指标进行多元回归拟合,得到粉剂农药均匀度变异系数的回归方程,检验各试验因素的显著性。对粉剂农药均匀度变异系数试验数据的方差分析如表 5 所示。各个因素与因素间交互作用的影响由大到小为 C^2 、 B 、 AB 、 A 、 AC 、 C 、 A^2 、 B^2 、 BC 。将不显著项的回归平方及自由度并入残差项,得到各因素对粉剂农药均匀度变异系数影

表 4 试验方案与结果

Tab. 4 Test scheme and results

试验 序号	因素			均匀度变异 系数 $Y/\%$
	A	B	C	
1	-1	-1	-1	35.8
2	1	-1	-1	38.7
3	-1	1	-1	31.4
4	1	1	-1	37.5
5	-1	-1	1	39.6
6	1	-1	1	35.3
7	-1	1	1	33.1
8	1	1	1	37.5
9	-1.682	0	0	34.6
10	1.682	0	0	38.2
11	0	-1.682	0	41.8
12	0	1.682	0	35.1
13	0	0	-1.682	30.4
14	0	0	1.682	35.8
15	0	0	0	38.1
16	0	0	0	39.0
17	0	0	0	37.0
18	0	0	0	37.5
19	0	0	0	38.0
20	0	0	0	38.5

响的回归方程为

$$Y = 32.36 + 0.41A - 0.57B + 0.30C + 0.55AB - 0.41AC - 0.62C^2$$

(18)

对式 (18) 进行失拟检验,失拟项为 0.056 7,大于 0.05,不显著,证明方程模拟较好。

由表 5 可知,交互作用项预混喷头压力与预混喷头底部平面距离、预混喷头压力与预混喷头垂直

表 5 粉剂农药均匀度变异系数方差分析

Tab.5 Variance analysis of coefficient of variation of powder pesticide homogeneity

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	131.72	9	14.64	10.18	0.0006
A	16.82	1	16.82	11.7	0.0065
B	32.81	1	32.81	22.83	0.0007
C	9.16	1	9.16	6.37	0.0302
AB	17.7	1	17.7	12.32	0.0056
AC	9.9	1	9.9	6.89	0.0254
BC	0.21	1	0.21	0.15	0.7094
A ²	3.87	1	3.87	2.69	0.1318
B ²	0.61	1	0.61	0.43	0.5279
C ²	40.92	1	40.92	28.47	0.0003
残差	14.37	10	1.44		
失拟	11.86	5	2.37	4.73	0.0567
纯误差	2.51	5	0.5		
总和	146.09	19			

平面距离对试验性能指标均匀度变异系数的影响均显著,其余交互项均不显著。

采用 Design-Expert 8.0.6 软件对数据进行处理,得到预混喷头压力与底部平面距离对评价指标的响应曲面如图 18a 所示,当预混喷头与垂直平面距离一定时,增加预混喷头与底部平面距离同时减小预混喷头压力,均匀度变异系数也随之降低。预混喷头压力与垂直平面距离对均匀度变异系数的响应曲面如图 18b 所示。在预混喷头压力较小时,随着预混喷头与垂直平面的距离增大,均匀度变异系数随之增大。同时预混喷头与底部平面距离增加,均匀度变异系数相应减小。预混喷头压力较大时,随着预混喷头与垂直平面距离增加,均匀度变异系数先逐渐升高至峰值后降低。

4.2.4 多岛遗传算法优化

为避免在全球搜索最优解的过程中陷入局部最优解,采用多岛遗传算法对预混喷头位置参数与工作压力进行寻优^[46-47]。

通过图 18 响应曲面的分析,并结合预混喷头实际工作情况确定优化数学模型为

$$\begin{cases} \min f(A,B,C) \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1.682 \leq A \leq 1.682 \\ -1.682 \leq B \leq 1.682 \\ -1.682 \leq C \leq 1.682 \end{cases} \end{cases} \quad (19)$$

根据欧盟标准,喷雾机药箱中药液均匀度变异系数应小于 15%,国内研究也以此为标准。预混装置作用为农药制剂初步稀释混合,国内外还未制定相关标准,从混合均匀性和配药准确性出发,在预混药箱内预混药液越均匀越有利于后期喷雾机药箱内混合的均匀性,所以以粉剂农药均匀度变异系数最小作为优化目标。

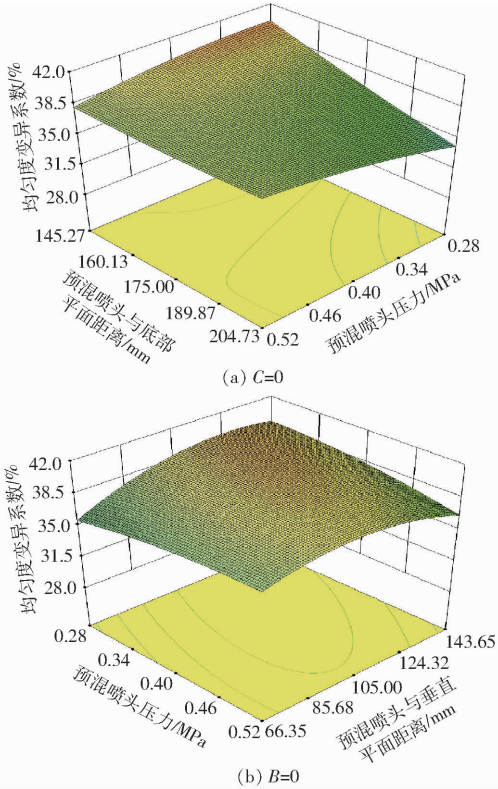


图 18 试验因素对指标影响的响应曲面

Fig. 18 Response surfaces of influence of test factors on index

采用多岛遗传算法对式 (19) 进行优化,得到寻优路径图如图 19 所示。

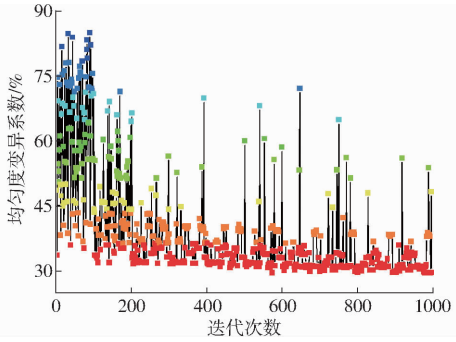


图 19 多岛遗传算法寻优路径

Fig. 19 Multi island genetic algorithm optimization path

通过对目标函数进行求解,从最优集中得到,当喷头压力为 0.3 MPa、预混喷头与底部平面距离为 200 mm、预混喷头与背部垂直平面的距离为 70 mm 时,粉剂农药预混均匀度变异系数最小。

4.2.5 优化结果对比

通过对目标函数的求解,得到粉剂农药预混均匀度变异系数最小的参数优化组合,并在此参数组合下进行仿真试验,优化前后粉剂农药预混均匀度变异系数变化曲线如图 20 所示。

由图 20 可知,未优化前均匀度变异系数平均值为 40.3%,经组合试验优化后均匀度变异系数为 31.1%,预混均匀度提高 22.8%。

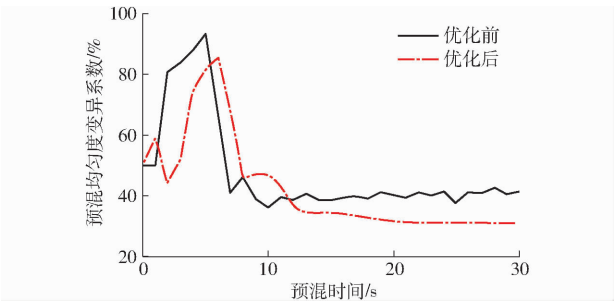


图 20 粉剂农药预混均匀度变异系数变化曲线
Fig. 20 Variation curves of coefficient of variation of powder pesticide premixing uniformity

由动态流场仿真试验可知,预混药箱内浓度峰值出现在实时液面高度约 3/5 处。优化前与优化后预混药箱实时液面高度约 3/5 处(检测面 3)的质量分数变化曲线如图 21 所示。

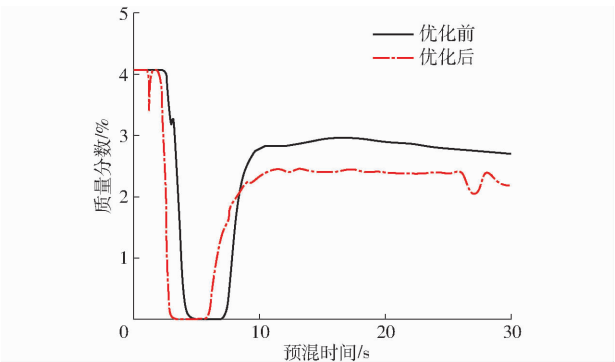


图 21 检测面 3 预混质量分数变化曲线
Fig. 21 Change curves of premix mass fraction on test surface 3

由图 21 可知,通过对喷头空间参数的优化,能够有效降低液面高度 3/5 处的药液浓度。分析两组试验结果,未优化前预混浓度平均值为 2.7%,经过优化后预混浓度平均值为 2.4%,降低 11%。

5 场地试验与结果分析

5.1 预混试验

为验证预混药箱内预混喷头的实际工作性能,将预混喷头按照优化的空间位置参数安装在预混药箱中进行场地试验。

由于陶土粉与粉剂农药溶于水形成的悬浊液理化特性相近,并且陶土粉具有干燥后理化性质稳定、不易挥发的特点,因此选用陶土粉作为替代品,试验过程如图 22 所示。

根据 ISO 5682 - 4: 2021《Equipment for crop protection Spraying equipment Part 4: Test methods for agitation of sprayer tanks》的试验要求,试验选取 0.5 kg 陶土粉,预混喷头压力 0.3 MPa。在预混药箱侧面 375、300、225、150、75 mm 位置分别开孔并接取 50 mL 混合液,使用电热鼓风干燥机(DHG - 9030



图 22 混合试验
Fig. 22 Mixed test

型)进行干燥处理,并使用电子秤(Ohaus adventurer ar1530 型)称量干燥物质量,预混试验重复 5 次,取平均值,预混试验结果如表 6 所示。

表 6 混合试验结果		
Tab. 6 Mixed test results		
接取高度/mm	5 次平均干质量/g	均匀度变异系数/%
375	0.55	32.99
300	0.71	
225	1.31	
150	0.95	
75	0.83	

由于预混过程是在动态情况下进行,而且预混时间有限,预混药箱加满之前必须打开上药阀门,通过对预混箱流场数值模拟分析和预混喷头空间位置参数优化结果进行预混试验,获得预混药液均匀度变异系数为 32.99%。药箱箱壁 225 mm 高度开孔处(约为实时液面高度的 3/5)所得悬浊液干质量大于上部和下部,并且存在向上下两侧递减的趋势。结果表明,喷雾机预混装置有较好的初步混合性能,验证了预混流场仿真分析的合理性及参数优化结果的准确性。

5.2 上药试验

为验证上药阀的作业性能,对上药阀抽药性能进行测试。施药泵型号为 MB4160/3.0,流量计型号为 K28,分别安装在上药阀水流进口管与出口管位置。试验过程如图 23 所示。

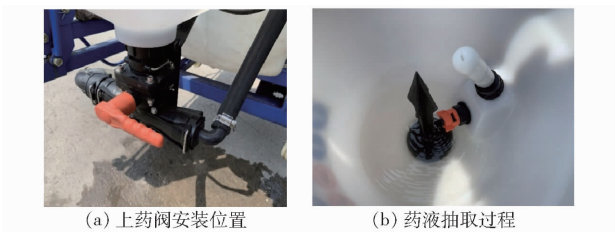


图 23 供药试验
Fig. 23 Feeding pesticide test

试验前检查管路系统有无松动与泄漏。预混药箱满箱状态下,分别在压力 0.2、0.3、0.4、0.5 MPa 下测量上药阀抽取药箱内全部液体所用的时间和流量。为保证试验结果准确性,各压力重复抽取 10 次,结果取平均值。试验结果如图 24 所示。

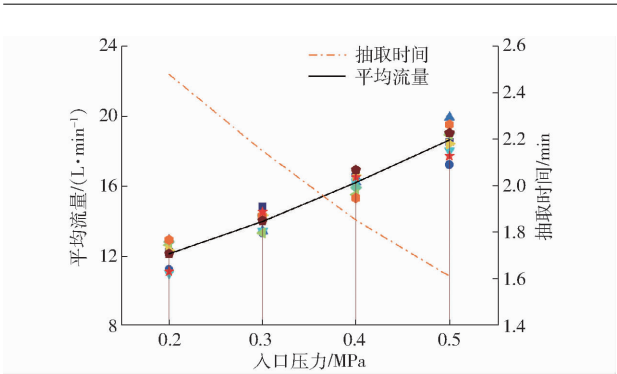


图 24 供药试验结果
Fig. 24 Supply of pesticide test results

由图 24 可知,随着入口压力增加,药液入口流量呈现上升趋势。抽取过程中压力 0.2 MPa 下平均流量为 12.11 L/min,抽取药液的时间为 2.5 min,压力 0.5 MPa 下平均流量为 18.61 L/min,抽取药液的时间为 1.6 min。

6 结论

(1)为明确预混装置混合动态流场规律与结构参数设计理论等方面问题,基于现有的喷雾机预混装置,确定了预混药箱、预混喷头、上药阀等

关键部件的基础参数,实现喷雾机实际施药作业时在工作压力0.2~0.5 MPa 下农药制剂预混及送药的要求。

(2)运用 ANSYS-Fluent 流体仿真分别对液面高度 250、300、350 mm 时预混药箱动态流场特性进行数值模拟仿真分析,得到动态的预混流场在液面实时高度约 3/5 处的药液浓度最高,向上下两侧递减的预混流场规律;预混药箱内的射流形成的不同液面高度动态流场以及预混浓度变化趋势均呈较高的一致性。

(3)采用二次回归正交旋转中心组合优化试验方法,以预混喷头工作压力和空间位置参数为影响因素,建立了模型回归方程,获得预混效果较好的参数组合:预混喷头工作压力 0.3 MPa、与底部平面距离 200 mm、与背部垂直平面的距离 70 mm。与优化前相比,预混均匀度提高 22.8%,液面高度 3/5 处峰值浓度下降 11%。场地试验表明:预混药液均匀度变异系数为 32.99%,与仿真结果具有较高的一致性;上药阀在压力 0.2~0.5 MPa 下抽取输送预混药液无停滞回流现象。

参 考 文 献

[1] 何雄奎. 高效植保机械与精准施药技术进展[J]. 植物保护学报, 2022, 49(1): 389-397.
HE Xiongkui. Research and development of efficient plant protection equipment and precision spraying technology in China: a review[J]. Journal of Plant Protection, 2022, 49(1): 389-397. (in Chinese)

[2] 王韦韦, 谢进杰, 陈黎卿, 等. 3YZ-80A 型履带自走式玉米行间喷雾机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(9): 106-114.
WANG Weiwei, XIE Jinjie, CHEN Liqing, et al. Design and experiment of 3YZ-80A crawler self-propelled corn interrow sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 106-114. (in Chinese)

[3] 刘国海, 李持衡, 沈跃, 等. 同步转向高地隙喷雾机模糊自适应轨迹跟踪预测控制[J]. 农业机械学报, 2021, 52(9): 389-399.
LIU Guohai, LI Chiheng, SHEN Yue, et al. Trajectory tracking and fuzzy adaptive model predictive control of high clearance synchronous-steering sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 389-399. (in Chinese)

[4] 茹煜, 陈旭阳, 刘彬, 等. 轴流式果园喷雾机风送系统优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(5): 147-157.
RU Yu, CHEN Xuyang, LIU Bin, et al. Optimized design and performance test of axial flow orchard sprayer air delivery system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 147-157. (in Chinese)

[5] 肖丽萍, 刘木华, ZHU Heping, 等. 喷嘴喷施不同生物农药雾滴特性研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 100-106.
XIAO Liping, LIU Muhua, ZHU Heping, et al. Spray droplet size characteristics of different biological pesticides with different hydraulic nozzles[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 100-106. (in Chinese)

[6] 郑加强, 徐幼林. 环境友好型农药喷施机械研究进展与展望[J]. 农业机械学报, 2021, 52(3): 1-16.
ZHENG Jiaqiang, XU Youlin. Development and prospect in environment-friendly pesticide sprayers[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 1-16. (in Chinese)

[7] 王金武, 白海超, 孙小博, 等. 水田喷雾机喷雾装置设计与动态分析[J]. 农业机械学报, 2019, 50(3): 69-79.
WANG Jinwu, BAI Haichao, SUN Xiaobo, et al. Design and dynamic analysis of spray device for paddy field sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 69-79. (in Chinese)

[8] 郑永军, 陈炳太, 吕昊曦, 等. 中国果园植保机械化技术与装备研究进展[J]. 农业工程学报, 2020, 36(20): 110-124.
ZHENG Yongjun, CHEN Bingtai, LÜ Haotun, et al. Research progress on mechanization technology and equipment of orchardplant protection in China[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(20): 110-124. (in Chinese)

[9] SATJARITANUN P, REGALBUTO J R, REGALBUTO J A, et al. Mixing optimization with inward flow configuration contra-rotating impeller, baffle-free tank[J]. Alexandria Engineering Journal, 2021, 60(4): 3759-3779.

- [10] KAZEMZADEH A, EIN-MOZAFFARI F, LOHI A. Hydrodynamics of solid and liquid phases in a mixing tank containing high solid loading slurry of large particles via tomography and computational fluid dynamics [J]. Powder Technology, 2020, 360: 635 – 648.
- [11] WEBER L L, CAVALIERI-POLIZELI K M V, ZIMMERMANN G G, et al. Impact of self-propelled sprayer traffic on ferralsol physical properties in Southern Brazil[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2021, 21(4): 2957 – 2966.
- [12] 周文静. 单轨式喷雾机设计与试验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2018.
ZHOU Wenjing. Design and experimental research of a single track sprayer[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2018. (in Chinese)
- [13] 何雄奎, KLEISINGER S, 吴罗罗, 等. 动力学因素和药箱充满程度对喷雾机液力搅拌器搅拌效果的影响[J]. 农业工程学报, 1999, 12(4): 131 – 134.
HE Xiongkui, KLEISINGER S, WU Luoluo, et al. Influences of dynamic factors and filling level of spray in the tank on the efficacy of hydraulic agitation of the sprayer[J]. Transactions of the CSAE, 1999, 12(4): 131 – 134. (in Chinese)
- [14] 曲峰, 盛希宇, 李熙, 等. 3WZF-400A 型果园风送喷雾机改进设计[J]. 农业机械学报, 2017, 48(增刊): 15 – 21.
QU Feng, SHENG Xiyu, LI Xi, et al. Improved design of 3WZF-400A orchard air-assisted sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.): 15 – 21. (in Chinese)
- [15] ZHENG L, CHENG X, CAO L, et al. Enhancing pesticide droplet deposition through O/W pickering emulsion: synergistic stabilization by flower-like ZnO particles and polymer emulsifier[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 434: 134761.
- [16] 李杨, 李礼佳, 和铭钰, 等. 大豆亲脂蛋白-甲基纤维素 W/O/W 乳液稳定性研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(7): 395 – 403, 434.
LI Yang, LI Lijia, HE Mingyu, et al. Preparation and stability characterization of soybean lipophilic protein-methyl cellulose W/O/W emulsion[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 395 – 403, 434. (in Chinese)
- [17] 温馨, 李荣, ERSAN Sevcin, 等. 玉米黄素双棕榈酸酯乳液制备及其稳定性研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(6): 354 – 361.
WEN Xin, LI Mo, ERSAN Sevcin, et al. Formation and stability of zeaxanthin dipalmitate emulsions[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 354 – 361. (in Chinese)
- [18] ATWOOD S T, SHEETS T J, SUTTON T B, et al. Stability of selected pesticide formulations and combinations in aqueous media[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1987, 35(2): 169 – 172.
- [19] MORENO-GONZÁLEZ D, PÉREZ-ORTEGA P, GILBERT-LÓPEZ B, et al. Evaluation of nanoflow liquid chromatography high resolution mass spectrometry for pesticide residue analysis in food[J]. Journal of Chromatography A, 2017, 1512: 78 – 87.
- [20] DAI J, WANG W, LIANG Y, et al. A novel molluscicidal formulation of niclosamide[J]. Parasitology Research, 2008, 103(2): 405 – 412.
- [21] XIE S, ZHANG X, L W, et al. Formulation, characterization and pharmacokinetics of long-acting ceftiofur hydrochloride suspension[J]. Current Drug Delivery, 2021, 18(2): 224 – 233.
- [22] ORDU J I. Evaluation of gum from *Abelmoschus esculentus* leaves as a suspending agent in cotrimoxazole suspension formulation [J]. The Pharma Innovation, 2018, 7(5): 682.
- [23] 陆军胜, 耿晨鸣, 崔晓路, 等. 基于叶面积指数的夏玉米叶片临界氮浓度稀释曲线研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 319 – 326.
LU Junsheng, GENG Chenming, CUI Xiaolu, et al. Determination of summer maize leaf critical nitrogen dilution curve based on leaf area index[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 319 – 326. (in Chinese)
- [24] 李子璐, 张晨辉, 郭勇飞, 等. 喷雾助剂对茎叶处理除草剂的增效机制及应用研究进展[J]. 农药学学报, 2021, 23(2): 245 – 258.
LI Zilu, ZHANG Chenhui, GUO Yongfei, et al. Research progress on the synergistic regularity and application of spray adjuvants on the foliage-applied herbicides[J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2021, 23(2): 245 – 258. (in Chinese)
- [25] 郭崇友, 杨琴, 陈叶青, 等. 2.5% 高效氟氰菊酯纳米微乳剂的研发与应用[J]. 农药, 2020, 59(2): 99 – 102.
GUO Chongyou, YANG Qin, CHEN Yeqing, et al. Development and application of the lambda-cyhalothrin 2.5% nano-microemulsion[J]. Agrochemicals, 2020, 59(2): 99 – 102. (in Chinese)
- [26] UMETSU N, SHIRAI Y. Development of novel pesticides in the 21st century[J]. Journal of Pesticide Science, 2020, 45(2): 54 – 74.
- [27] RANI L, THAPA K, KANOJIA N, et al. An extensive review on the consequences of chemical pesticides on human health and environment[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 283: 124657.
- [28] ZHANG R, DU J, DONG X, et al. Occurrence and ecological risks of 156 pharmaceuticals and 296 pesticides in seawater from mariculture areas of Northeast China[J]. Science of the Total Environment, 2021, 792: 148375.
- [29] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- [30] 周志艳, 姜锐, 罗锡文, 等. 液位监测技术在植保无人机中的应用分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(4): 47 – 55.
ZHOU Zhiyan, JIANG Rui, LUO Xiwen, et al. Application analysis of liquid-level monitoring technology to plant protection

- UAV[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4): 47–55. (in Chinese)
- [31] ZUGHBI H D, RAKIB M A. Mixing in a fluid jet agitated tank: effects of jet angle and elevation and number of jets[J]. Chemical Engineering Science, 2004, 59(4): 829–842.
- [32] VAN DER LINGEN T W. A jet pump design theory[J]. Journal of Basic Engineering, 1960, 82(4): 947–960.
- [33] SANGER N L. An experimental investigation of several low-area-ratio water jet pumps[J]. Journal of Basic Engineering, 1970, 92(1): 11–19.
- [34] 宋海潮, 徐幼林, 郑加强, 等. 脂溶性农药旋动射流混合机理与混药器流场数值模拟[J]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 79–84.
- SONG Haichao, XU Youlin, ZHENG Jiaqiang, et al. Swirling jet mixture mechanism of fat-soluble pesticides and numerical simulation of mixer field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 79–84. (in Chinese)
- [35] SHAHEED R, MOHAMMADIAN A, KHEIRKHAH GILDEH H. A comparison of standard $k-\varepsilon$ and realizable $k-\varepsilon$ turbulence models in curved and confluent channels[J]. Environmental Fluid Mechanics, 2019, 19(2): 543–568.
- [36] 金永平, 刘德顺, 文泽军. 矿用对旋式轴流风机前后两级叶片弯掠参数优化设计[J]. 煤炭学报, 2010, 35(10): 1754–1759.
- JIN Yongping, LIU Deshun, WEN Zejun. Optimization design for skew and sweep parameters of mine contra-rotating axial fan two-stage blades[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(10): 1754–1759. (in Chinese)
- [37] 李春曦, 范福伟, 刘宏凯, 等. 弦向掠叶片对动叶可调轴流风机性能影响模拟[J]. 机械工程学报, 2019, 55(14): 151–159.
- LI Chunxi, FAN Fuwei, LIU Hongkai, et al. Simulation on aerodynamic performance of a variable-pitch axial flow fan with chordwise swept blades[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(14): 151–159. (in Chinese)
- [38] 王磊, 廖宜涛, 万星宇, 等. 油麦兼用型气送式集排器分配装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 43–53.
- WANG Lei, LIAO Yitao, WAN Xingyu, et al. Design and test on distributor device of air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 43–53. (in Chinese)
- [39] SHEIKH M A R, SON E, KAMIYAMA M, et al. Sedimentation behavior of mixed solid particles[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2018, 55(6): 623–633.
- [40] 张致军, 罗远婵, 章真, 等. 防治白菜根肿病的新型海洋微生物农药——解淀粉芽孢杆菌 Txc2-1 可湿性粉剂配方优化及药效研究[J]. 农药学学报, 2020, 22(1): 145–153.
- ZHANG Zhijun, LUO Yuanchan, ZHANG Zhen, et al. Formulation optimization of the wettable powder of *Bacillus amyloliquefaciens*: a novel marine microbial pesticide for the control of cabbage clubroot[J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2020, 22(1): 145–153. (in Chinese)
- [41] 金京京, 齐永志, 甄文超. 枯草芽孢杆菌 B1514 可湿性粉剂对小麦纹枯病的防效及对土壤微生物区系和小麦产量的影响[J]. 农药学学报, 2016, 18(5): 596–604.
- JIN Jingjing, QI Yongzhi, ZHEN Wenchao. Effects of bacillus subtilis B1514 wettable powder on the control effects of wheat sharp eyespot, the soil microflora communities and the yield of wheat[J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2016, 18(5): 596–604. (in Chinese)
- [42] POREH M, TSUEI Y G, CERMAK J E. Investigation of a turbulent radial wall jet[J]. Journal of Applied Mechanics, 1967, 34(2): 457–463.
- [43] BRADSHAW P, LOVE E M. The normal impingement of a circular jet on a flat plate[R]. Great Britain Aeronautical Research Council, ARC Report Council, London, 1959.
- [44] BAKKE P. An experimental investigation of a wall jet[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1957, 2(5): 467.
- [45] 刘昶希, 胡军, 李宇飞, 等. 锥形风场式防飘喷雾装置内流道优化与防飘特性[J]. 农业工程学报, 2021, 37(22): 11–20.
- LIU Changxi, HU Jun, LI Yufei, et al. Optimization of the inner flow channel of conical wind field anti-drift spray device and anti-drift characteristics[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(22): 11–20. (in Chinese)
- [46] ZHANG W W, QI H, YU Z Q, et al. Optimization configuration of selective solar absorber using multi-island genetic algorithm[J]. Solar Energy, 2021, 224: 947–955.
- [47] WANG L, LIU H T. Parameter optimization of bidirectional re-entrant auxetic honeycomb metamaterial based on genetic algorithm[J]. Composite Structures, 2021, 267: 113915.