

射流混药装置面积比对混药均匀性的影响*

邱白晶 徐溪超 邓斌 杨宁 姜国微 吴春笃

(江苏大学现代农业装备与技术省部共建教育部重点实验室, 镇江 212013)

【摘要】 以探索农药和水混合后混药均匀性表征的数值计算途径为目标,确定了射流混药装置混药质量分数分布场数值模拟方案,采用 CFD 软件 Fluent 对射流混药装置混药质量分数分布场进行了数值计算。引入离析度概念来定量评价射流混药装置中农药和水的混合均匀程度,离析度降为 0.05 视为药水混合均匀。当面积比 $m \in [2.56, 4.00]$ 时,随面积比的增大,最小混合距离下降,但最小混合距离的下降受混药效率的制约。综合考虑,面积比 $m = 3.06$ 的射流混药装置混药性能高于面积比 $m = 2.56, 4.00$ 的射流混药装置。混合管中最大湍流强度均下降 14.96% 进入扩散混合区,扩散混合区所在的坐标区间为: $X \in [(-13.85m + 111.37) \text{ mm}, 116.5 \text{ mm}]$ 。因此,在实验测量射流混药装置混药后的农药质量分数时,应按照扩散混合区所在的坐标区间,针对不同面积比合理布置质量分数测量点。

关键词: 混药装置 面积比 离析度 计算流体动力学

中图分类号: S49 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)10-0095-06

Effect of Area Ratio on Mixing Homogeneity in Jet-mixing Apparatus

Qiu Baijing Xu Xichao Deng Bin Yang Ning Jiang Guowei Wu Chundu

(Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education and Jiangsu Province, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract

Aimed at homogeneity principle of water mix with pesticide in the jet-mixing apparatus, a mathematical model for solving the interior concentration field was established, CFD software called Fluent was used to calculate the field. Time-average mass fraction of pesticide was obtained. Intensity of segregation was introduced to quantitative evaluate the mix degree of water and pesticide. The water was mixed with pesticide uniformly when intensity of segregation was 0.05. As the increasing of area ratio, the shortest mixing distance decreased with the area ratio $m \in [2.56, 4.00]$. The mixing performance of jet-apparatus with $m = 3.06$ was better than the jet-mixing apparatus with $m = 2.56$ and $m = 4.00$. The diffusive mixing zone appeared after the maximum turbulent intensity average rate decreased by 14.96%. And the coordinate interval was $X \in [(-13.85m + 111.37) \text{ mm}, 116.5 \text{ mm}]$. Therefore, when measure the concentration in jet-mixing apparatus by experiment, it should according the coordinate interval and area ratio to choose the appreciate concentration measurement point.

Key words Mixing apparatus, Area ratio, Intensity of segregation, Computational fluid dynamics

引言

混药是机械化施药的基本操作单元,其混药质量的高低直接关系到病虫害的防治效果。传统机械

化施药采用预混合方式^[1-2],即农药和水在混药箱里搅拌后再进行喷洒。预混合方式存在混药质量不高,农药浪费等弊端^[3],将逐渐被在线混药方式所替代。

收稿日期: 2010-11-19 修回日期: 2011-01-05

* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2008AA100905、2006AA10A305-3)、国家自然科学基金资助项目(30571240)、江苏省属高校自然科学重大基础研究项目(10KJA470007)和高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20093227110008)

作者简介: 邱白晶,教授,博士生导师,主要从事农业机械化工程及植保机械研究,E-mail: qbj@ujs.edu.cn

混药装置是实现在线混药的关键部件,其混药均匀性正逐渐为研究者所关注。邱白晶等^[4]采用CFD(computational fluid dynamics)数值模拟方法研究了嘴管距、面积比和吸入口角度对射流混药装置流动性能影响。但混药器的设计不仅要考虑流动性能,更重要的品质是混药均匀性。如果药液不能在目标靶区均匀分布,则只能按分布的最小值来确定防治用药量,从而导致在分布的最大值处用药量超标。超标用药不仅降低了农药的有效利用率,而且严重污染环境。Hloben 最先发展了体积平均信号处理方法,研制了在线混药过程中平均浓度变化的光纤光度传感器^[5]。Vondricka 在 Hloben 的基础上,对传感器结构进行了改进,使传感器嵌入混药器结构内^[6]。由于测量方法本质没有改变,因此 Vondricka 等给出的仍然是体积平均浓度。刘志壮等从混药反馈控制的需求出发^[7],研制了药流流量计和水流流量计,两者配合给出混药平均浓度。

现有文献表征在线混药浓度给出的均还是体积平均浓度或断面平均浓度。本文针对射流混药装置,在文献[4]采用 CFD 研究流动性能的基础上,进一步探索 CFD 方法表征农药和水混合均匀性的数值计算途径。

1 射流混药装置及参数

1.1 射流混药装置

射流混药装置结构如图 1 所示,主要由射流嘴、吸药管、吸入室、混合管和扩散管组成。

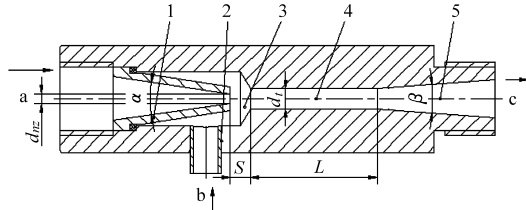


图 1 射流混药装置结构示意图

Fig.1 Schematic of jet-mixing apparatus

1. 射流嘴 2. 吸药管 3. 吸入室 4. 混合管 5. 扩散管

工作时,作为主流体的水经进口 a 进入射流混药装置,在射流嘴出口处产生负压吸引农药从进口 b 进入吸入室,并在混合管中进行混合,混合后的药水混合物经扩散管出口 c 流出混药装置。

1.2 结构参数

将射流混药装置结构参数分为固定参数和可变参数两类,如表 1 所示。

固定参数是指研究过程中保持不变的参数,涉及的具体参数和取值:收敛角 α 为 14° ,扩散管扩散角 β 为 9° ,混合管长度 L 为 36.0 mm,嘴管距 S 为 5.50 mm。

表 1 射流混药装置结构参数分类及取值

Tab.1 Sort and value of structure parameters

参数类型	结构参数	数值		
固定参数	射流嘴收敛角 $\alpha/(^\circ)$	14		
	扩散管扩散角 $\beta/(^\circ)$	9		
	混合管长度 L/mm	36.0		
	嘴管距 S/mm	5.50		
可变参数	射流嘴直径 d_{nz}/mm	5	4	3
	混合管直径 d_t/mm	8	7	6
	面积比 m	2.56	3.06	4.00

可变参数是指研究过程中需要改变参数取值以便探究其对混药均匀程度影响的参数类别。本文以射流嘴出口直径 d_{nz} 、混合管直径 d_t 这两个参数为可变参数。

面积比 m 是混合管截面积与射流嘴出口截面积之比,定义为

$$m = \frac{A_t}{A_{nz}} = \left(\frac{d_t}{d_{nz}} \right)^2 \quad (1)$$

式中 A_t, A_{nz} ——混合管和射流嘴出口截面积, mm^2

d_t, d_{nz} ——混合管和射流嘴出口直径, mm

由式 1 可知,面积比 m 的改变需通过射流嘴直径 d_{nz} 和混合管直径 d_t 来实现,故把面积比 m 也归入可变参数类。

按表 1 选择混合管直径和射流嘴出口直径的组合,其对应的面积比分别为 2.56、3.06 和 4.00。

1.3 工作参数

由于工程上用流量比 q 与压力比 h ,流量比 q 与混药效率 η 之间的关系曲线来评价射流混药装置性能。因此,确定混药装置工作参数为流量比 q 、压力比 h 和混药效率 η 。

流量比 q 是农药的体积流量与水体积流量之比,定义为

$$q = \frac{Q_b}{Q_a} \quad (2)$$

式中 Q_a ——水进口体积流量, m^3/s

Q_b ——农药进口体积流量, m^3/s

压力比 h 是反映射流混药装置压力损失的一个无量纲参数。压力比大,表明压力损失小。定义为

$$h = \frac{p_c - p_b}{p_a - p_b} \quad (3)$$

式中 p_a, p_b, p_c ——水进口、农药进口和混合液出口压力

混药效率 η 是射流混药装置的压力比与流量比的乘积,定义为

$$\eta = hq \quad (4)$$

2 数值模拟方法与材料

2.1 农药剂型的选择

农药剂型主要分为水溶型、乳油型和悬浮剂型 3 种,且水溶型农药在农业植保上最为常见。水溶型农药与水混合后,农药和水在射流混药装置内呈一相两组分分布^[8]。本文以水溶性农药剂型为研究参照剂型。

2.2 混合物物性确定

为方便后续研究中进行数值试验结果与实测值比较,本文采用质量分数为 2.5% 的 NaCl 溶液^[9] 作为水溶型农药。在室温下农药(质量分数为 2.5% NaCl 溶液)物性参数为:密度 1 065 kg/m³,粘度 0.89 mPa·s;水的物性参数为:密度 998.2 kg/m³,粘度 1.003 mPa·s。

混合物密度按体积权重混合定律处理

$$\rho = (1 - \varphi_B)\rho_A + \varphi_B\rho_B \quad (5)$$

混合物粘度按质量权重混合定律处理^[10]

$$\mu = (1 - w_B)\mu_A + w_B\mu_B \quad (6)$$

式中 ρ ——混合物密度,kg/m³

μ ——混合物粘度,Pa·s

φ_B ——农药体积分数

w_B ——农药质量分数

下角 A、B 表示水和农药。

2.3 混合模型的确定

在工作参数设置相同的情况下,固定射流嘴收敛角、扩散管扩散角、吸入口角度、混合管长度和嘴管距的取值,通过改变面积比取值的方法来研究面积比对比农药和水混合均匀性影响。对于不同面积比的射流混药装置,工作参数均设置为:水进口 a 和农药进口 b 的流量体积流量分别为 20 L/min 和 10 L/min,混合液出口 c 压力为 0.6 MPa。

农药和水混合是农药和水这两组分之间相互作用的结果,涉及到湍流和扩散两种混药机制^[11]。因水溶型农药与水混合后在射流混药装置内呈一相两组分分布,故采用 Fluent 中组分传输模型(species transport model)对射流混药装置内农药和水混合后的浓度场进行数值计算。组分传输模型的控制方程为

$$\frac{\partial(\rho_B\varphi_B)}{\partial t} + \text{div}(\rho_B\mathbf{u}\varphi_B) = \text{div}(D_{BA}\text{grad}(\rho_B\varphi_B)) + S_B \quad (7)$$

式中 ρ_B ——农药密度 \mathbf{u} ——速度矢量

t ——时间,s S_B ——源项

D_{BA} ——农药在水中的扩散系数,m²/s

扩散系数 D_{BA} 按 Wilke - Chang 公式^[10]计算

$$D_{BA} = 1.17 \times 10^{-16} \frac{\phi_A M_A T}{\mu_A V_B^{0.6}} \quad (8)$$

式中 T ——混合物温度,取 293.15 K

μ_A ——水的粘度,取 1.003×10^{-3} Pa·s

M_A ——水的摩尔质量,取 18.01 g/mol

ϕ_A ——水的缔合参数,取 2.6

V_B ——农药(2.5% NaCl 溶液)在正常沸点下的分子体积,取 0.81 cm³/mol

代入以上各值,计算得 $D_{BA} = 1.87 \times 10^{-9}$ m²/s。

3 数值求解方案的确定

3.1 网格剖分方式及无关性验证

Fluent 进行数值计算是在每个网格单元上进行,因此在计算前必须对射流混药装置进行网格剖分。

由于射流混药装置含有形状不规则的吸入室,难以全部用六面体结构网格对射流混药装置进行剖分,因此将射流混药装置分块(图 2),采用六面体网格和四面体网格组合的网格剖分方式。组合方案为:对于形状不规则的吸入室 II 采用适应性较好的四面体 Tgrid 网格^[12];对于射流嘴 I,混合管和扩散管 III,吸药管 IV 采用六面体结构网格。利用网格工具 Gambit 2.2 对其进行分块剖分。

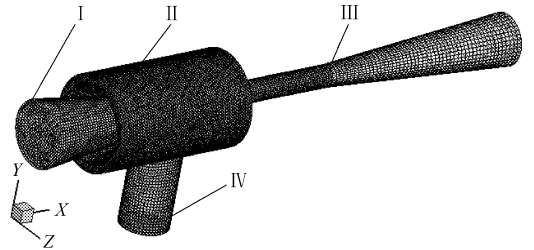


图 2 射流混药装置网格划分

Fig. 2 Mesh for jet-mixing apparatus

网格数量关系到求解的精确性,理论上网格数量越多求解结果越精确。受计算条件的限制,网格数量不宜过多。为了找到最适宜的网格数量,以面积比为 2.56 的模型为例,确定 4 种不同网格间距的网格进行网格无关性验证,如表 2 所示。

表 2 不同间距的网格

Tab. 2 Different interval size for mesh

算例	网格间距/mm				网格总数
	I	II	III	IV	
case-1	0.5	0.6	0.5	0.6	223 602
case-2	0.6	0.7	0.6	0.7	141 965
case-3	0.7	0.8	0.7	0.8	92 822
case-4	0.8	0.9	0.8	0.9	70 033

以射流混药装置混合管两截面上($X = 45.5$ mm

和 $X = 81.5 \text{ mm}$) 农药平均质量分数为基准, 当不同间距的网格对应的农药平均质量分数相差小于 5% 时, 取网格总数相对少的网格作为其他面积比网格剖分的标准。网格无关性验证结果如图 3 所示。

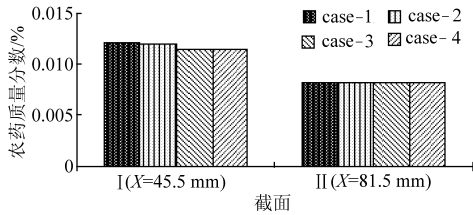


图 3 网格无关性验证结果

Fig. 3 Results of grid independent

由图 3 可知, 截面 I 上 4 种不同间距网格对应的农药质量分数偏差最大为 4.7%, 截面 II 上 4 种不同间距网格对应的农药质量分数偏差最大为 0.15%。出于计算成本考虑, 选取 case-2 所对应的网格间距作为另外 3 种面积比的射流混药装置网格剖分基准。

3.2 湍流模型及边界条件

湍流模型采用标准 $k-\varepsilon$ 两方程模型, 其控制方程见文献 [13], 方程中系数 $C_\mu = 0.09$, $c_1 = 1.44$, $c_2 = 1.92$, $\delta_k = 1.0$, $\delta_\varepsilon = 1.3$ [13]。

入口边界条件设置为: 水进口和农药进口均采用速度入口。湍流参数设置为湍流湍动能 k 和湍流耗散率 ε 。 k 和 ε 的计算公式为

$$k = 0.005v^2 \quad (9)$$

$$\varepsilon = C_\mu \frac{k^{3/2}}{l} \quad (10)$$

其中

$$l = 0.07L_h$$

式中 v ——进口速度, m/s

L_h ——进口管道水力直径, mm

为了达到一定的喷雾压力, 将混合液出口边界定为压力出口。

3.3 离散格式及收敛准则

采用 Fluent 6.3 压力基求解器。数值计算采用有限体积法离散控制方程, 对流项等各参数的离散均采用精度高的二阶迎风格式, 速度和压力的耦合方式采用 SIMPLEC 模式, 收敛精度设置为 10^{-4} 。

3.4 壁面处理

采用标准壁面函数对射流混药装置内部流道进行处理。

4 结果与讨论

4.1 混合均匀性评价

为定量评价射流混药装置中农药和水的混合均匀程度, 本文引入离析度 I 的概念 [14], 其表达式为

$$I = \frac{S^2}{S_{\max}^2} = \frac{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (C_i - C_{\text{avg}})^2}{C_{\text{avg}}(1 - C_{\text{avg}})} \quad (11)$$

$$\text{其中 } C_{\text{avg}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i \quad (12)$$

式中 S, S_{\max} ——农药和水组分中农药质量分数的方差和最大方差

C_{avg} ——所有取样点位置农药质量分数的平均值

C_i ——取样点位置农药质量分数

n ——取样点数量

本文中取样点位置与网格截面上网格节点一致。网格截面的选取以混合管入口 ($X = 45.5 \text{ mm}$) 为起始截面, 混药装置出口 ($X = 116.5 \text{ mm}$) 为终止截面, 每隔 3 mm 选取一个网格截面, 共选取 25 个网格截面。

以截面 $X = 60.5 \text{ mm}$ 为例, 取样点即为图中虚线框内黑点所在位置。图 4 中共有 157 个取样点, 也即式 (11) 和式 (12) 中 n 的取值 157。

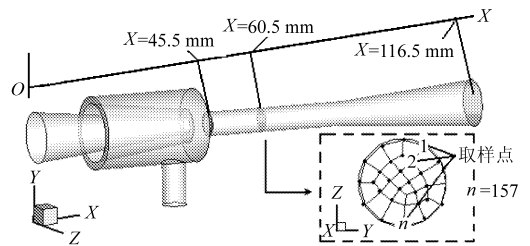


图 4 取样点示意图 ($X = 60.5 \text{ mm}$)

Fig. 4 Sketch of sampling position ($X = 60.5 \text{ mm}$)

由式 (11) 可知, 离析度 I 为 0 ~ 1.0 之间。当 I 为 1.0 时, 表示射流混药装置中农药和水无混合; 当 I 为 0 时, 表示射流混药装置中农药和水混合均匀。当 I 值降为 0.05 时即认为农药和水已混合均匀, 将此时的位置离水进口 (图 4 中 O 点位置) 的距离定义为最小混合距离 L_{\min} 。

4.2 离析度沿轴线分布

农药和水主要在射流混药装置混合管和扩散管内进行混合, 因此给出混合管和扩散管轴线方向 (45.5 ~ 116.5 mm) 离析度的变化曲线, 如图 5 所示。

由图 5 可以看出: 3 种面积比的离析度曲线随着轴向距离的增大均呈急剧下降, 然后逐渐趋于平缓。当面积比 m 为 2.56、3.06 和 4.00 时对应的离析度达到 0.05 (即混合均匀) 时的最小混合距离 L_{\min} 分别为 98.3、82.1、70.6 mm。

图 6 为面积比与最小混合距离和混药效率的关系曲线。由图 6 可知, 面积比 m 与最小混合距离 L_{\min} 符合线性分布, 即

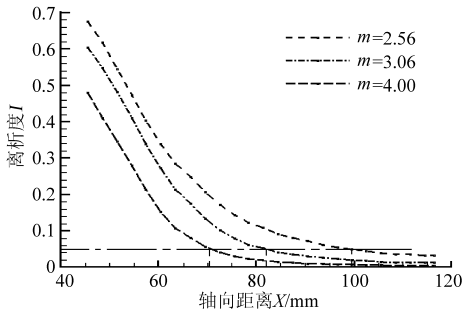


图 5 不同面积比时离析度沿轴线变化曲线
($X = 45.5 \sim 116.5 \text{ mm}$)

Fig. 5 Variation curve of I along the axial direction

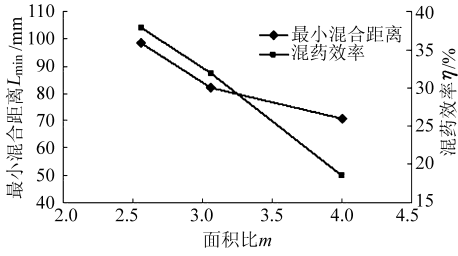


图 6 面积比与最小混合距离和混药效率的关系

Fig. 6 Relation between m and L_{\min} with η

$$L_{\min} = -13.85m + 111.37 \quad (m \in [2.56, 4.00])$$

$$R^2 = 0.9905 \quad (13)$$

面积比 m 的增大有助于缩短最小混合距离 L_{\min} 。但面积比的增大会受到混药效率的限制。当面积比 m 为 2.56、3.06 和 4.00 时对应的混药效率 η 分别为 37.84%、31.96% 和 18.56%。

因此,当面积比 $m \in [2.56, 4.00]$ 时,随面积比的增大,最小混合距离下降。但混合距离的下降受混药效率的制约。综合考虑,当面积比 $m = 2.56$ 、3.06、4.00 时,面积比 m 为 3.06 的射流药装置混药性能优于面积比 m 为 2.56、4.00 的射流混药装置。

4.3 扩散混合区域确定

图 7 是面积比 m 为 2.56、3.06 和 4.00 对应的混合管和扩散管轴线(45.5 ~ 116.5 mm)方向上湍流强度 D 分布曲线。

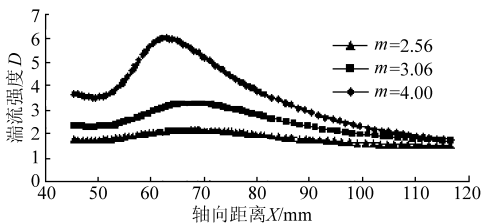


图 7 混合管轴线上的湍流强度分布曲线

Fig. 7 Distribution of turbulence intensity along the axial

由图 7 可知,面积比 m 为 2.56、3.06 和 4.00 时对应的湍流强度 D 分布曲线均呈现单峰曲线类型,且峰值分别出现在截面 68.17、67.39、62.85 mm,对应的最大湍流强度 D_{\max} 为 2.17、3.28、6.01。

当面积比 m 为 2.56、3.06 和 4.00 时对应的最小混合距离 L_{\min} 为 98.3、82.1、70.6 mm 时,与最小混合距离 L_{\min} 对应的湍流强度 $D_{L_{\min}}$ 为 1.83、2.78、5.17。

表 3 给出的是最大湍流强度 D_{\max} 与湍流强度 $D_{L_{\min}}$ 的关系。由表 4 可知,与湍流强度 $D_{L_{\min}}$ 相比,面积比 m 为 2.56、3.06 和 4.00 时对应的最大湍流强度 D_{\max} 依次下降为 15.67%、15.24%、13.97%,平均下降 14.96%。

表 3 湍流强度 D_{\max} 与 $D_{L_{\min}}$ 和关系

Tab. 3 Relationship between D_{\max} and $D_{L_{\min}}$

湍流强度		下降	平均下降
D_{\max}	$D_{L_{\min}}$	百分比/%	百分比/%
2.17	1.83	15.67	
3.28	2.78	15.24	14.96
6.01	5.17	13.97	

因此,当农药和水混合离析度降为 0.05 表示农药和水混合均匀时,3 种面积比对应的混合管中最大湍流强度 D_{\max} 平均下降 14.96% 进入扩散混合区。

结合式(13),对于面积比 $m \in [2.56, 4.00]$ 的射流混药装置扩散混合区所在的坐标区间为

$$X \in [(-13.85m + 111.37) \text{ mm}, 116.5 \text{ mm}] \quad (14)$$

式(14)中,116.5 mm 为射流混药装置的总长度。

因此,在实验测量射流混药装置混药后农药质量分数时,应按照式(14)所示的扩散混合区所在的坐标区间,针对不同的面积比合理布置农药质量分数测量点。

5 结论

(1)当面积比 $m \in [2.56, 4.00]$ 时,随面积比的增大,最小混合距离下降。但最小混合距离的下降受混药效率的制约。综合考虑,当面积比 $m = 2.56$ 、3.06、4.00 时,面积比 $m = 3.06$ 的射流混药装置混药性能高于面积比 $m = 2.56$ 、4.00 的射流混药装置。

(2)当离析度降为 0.05 视为药水混合均匀时,最大湍流强度 D_{\max} 均下降 14.96% 进入扩散混合区。面积比 $m \in [2.56, 4.00]$ 的射流混药装置扩散混合区所在的坐标区间为: $X \in [(-13.85m + 111.37) \text{ mm}, 116.5 \text{ mm}]$ 。因此,在实验测量射流混药装置混药后的农药质量分数时,应按照扩散混合区所在的坐标区间,针对不同的面积比合理布置农药质量分数测量点。

参 考 文 献

- 1 Frost A R. A pesticide injection metering system for use on agricultural spraying machines [J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1990, 46: 55 ~ 70.
- 2 Ghate S R, Perry C D. Ground speed control of pesticide application rates in a compressed air direction pesticide sprayer[J]. *Transactions of the ASAE*, 1994, 37(1): 33 ~ 38.
- 3 Ghate S R, Phatak S C. A compressed air direct injection pesticide sprayer[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 1991, 7(2): 158 ~ 162.
- 4 邱白晶,徐溪超,杨宁,等. 射流混药装置主参数分析的数值模拟[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(6): 76 ~ 79,69.
Qiu Baijing, Xu Xichao, Yang Ning, et al. Numerical simulation on main structure parameters of jet-mixing apparatus[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(6): 76 ~ 79,69. (in Chinese)
- 5 Vondricka J, Hloben P, Lammers P S. Optimization of direct nozzle injection system for site-specific herbicide application [C]. 2007 ASABE Annual Meeting, Paper Number 071085, 2007.
- 6 Vondricka J, Lammers P S. Measurement of mixture homogeneity in direct injection systems[J]. *Transactions of the ASABE*, 2009, 52(1): 61 ~ 66.
- 7 刘志壮,徐汉虹,洪添胜,等. 在线混药式连续可变量喷雾系统设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(12): 93 ~ 96,129.
Liu Zhizhuang, Xu Hanhong, Hong Tiansheng, et al. Key technology of variable-rate spraying system of online mixing pesticide [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009,40(12):93 ~ 96,129. (in Chinese)
- 8 John D, Nalewaja G, Robert G R, et al. Pesticide formulations and application systems: 18th vol. (STP 1347) [M]. ASTM International, 1998.
- 9 Downey D, Crowe T G, Giles D K, et al. Direct nozzle injection of pesticide concentrate into continuous flow for intermittent spray applications[J]. *Transactions of the ASABE*, 2005, 49(4): 865 ~ 873.
- 10 Kooijman H A. A modification of the stokes-einstein equation for diffusivities in dilute binary mixtures [J]. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2002, 41(13): 3 326 ~ 3 328.
- 11 Vondricka J, Lammers P S. Real-time controlled direct injection system for precision farming[J]. *Precision Agriculture*, 2009, 10(5): 421 ~ 430.
- 12 Pianthong K, Seehanam W, Behnia M. Investigation and improvement of ejector refrigeration system using computational fluid dynamics technique[J]. *Energy Conversion and Management*, 2007, 48(9): 2 556 ~ 2 564.
- 13 Launder B E, Spalding D B. Lectures in mathematical models of turbulence[M]. London: Academic, 1972.
- 14 Mickailly-Huber E S, Bertrand F, Tanguy P, et al. Numerical simulations of mixing in an SMRX static mixer[J]. *Chemical Engineering Journal*, 1996, 63(2): 117 ~ 126.

(上接第 83 页)

- 6 赵湛,李耀明,陈进,等. 种群空间分布状态对排种器吸种性能的影响[J]. *江苏大学学报:自然科学版*,2009,30(6): 559 ~ 563.
Zhao Zhan, Li Yaoming, Chen Jin, et al. Influence of seeds spatial distribution on suction performance of precision vacuum seeder [J]. *Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition*,2009,30(6):559 ~ 563. (in Chinese)
- 7 吴爱祥,孙业志,刘湘平. 散体动力学理论及其应用[M]. 北京:冶金工业出版社,2002.
- 8 刘彩玲,宋建农. 种盘振动对气吸振动式精量播种装置工作性能的影响[J]. *中国农业大学学报*,2004,9(2):12 ~ 14.
Liu Cailing, Song Jiannong. Influence of seed tray vibration on work performance of suction-vibration type precision seed device[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2004, 9(2):12 ~ 14. (in Chinese)
- 9 王国强,郝万军,王继新. 离散单元法及其在 EDEM 上的实践[M]. 西安:西北工业大学出版社,2010.
- 10 杨玲,杨明金,李庆东,等. 包衣稻种物理特性的试验研究[J]. *农业工程学报*,2005,21(9):7 ~ 11.
Yang Ling, Yang Mingjin, Li Qingdong, et al. Experimental study on physical properties of coated rice seed[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*,2005,21(9):7 ~ 11. (in Chinese)
- 11 张石平,陈进,李耀明. 振动气吸式穴盘精量播种装置种子“沸腾”运动分析[J]. *农业工程学报*,2008,24(7):20 ~ 24.
Zhang Shiping, Chen Jin, Li Yaoming. Analysis of seeds ‘Boiling’ motion on vibrational air-suction tray seeder [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(7):20 ~ 24. (in Chinese)
- 12 李季成,权龙哲,罗立娜. 稻米含水率对其弹性模量的影响[J]. *东北农业大学学报*,2008,39(4):1 ~ 3.
Li Jicheng, Quan Longzhe, Luo Li'na. Influences of brown rice grain's water ratio on elastic modulus [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*,2008,39(4):1 ~ 3. (in Chinese)
- 13 华大年. 机械原理[M]. 北京:高等教育出版社 1994.