

脂溶性农药旋动射流混合机理与混药器流场数值模拟

宋海潮^{1,2} 徐幼林¹ 郑加强¹ Zhu Heping³

(1. 南京林业大学机械电子工程学院, 南京 210037; 2. 南京工业职业技术学院机械工程学院, 南京 210023;
3. 美国农业部应用技术研究所, 伍斯特 OH 44691)

摘要: 以研究脂溶性农药和水的混合均匀性为目的, 试验验证了传统射流混药器结构对脂溶性农药在线混合的局限, 提出旋动射流混合机理以增加工作液和混合液的旋度, 根据该机理设计的旋动射流混药器采用螺旋弯曲收缩管、起旋器和在扩散管中加入固定导叶等方式, 增加工作液的卷吸能力、掺混作用。经过数值仿真, 采用容积分数分布均匀性评判指标来判断混合效果, 结果表明, 喷嘴出口处面积加权平均均匀性指数 γ_a 为 0.998 9, 截面上药液容积分数最大值与最小值的差值很小, 整个截面上的药液分布一致, 旋动射流混药器结构设计能够保证出口位置处脂溶性农药与水的均匀混合。

关键词: 脂溶性农药; 旋动射流; 混药器; 混合均匀性; 容积分数分布均匀指数

中图分类号: TP391.41; S482 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)09-0079-06

Swirling Jet Mixture Mechanism of Fat-soluble Pesticides
and Numerical Simulation of Mixer Field

Song Haichao^{1,2} Xu Youlin¹ Zheng Jiaqiang¹ Zhu Heping³

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China
2. College of Mechanical Engineering, Nanjing Institute of Industry Technology, Nanjing 210023, China
3. USDA-ARS-ATRU, Wooster OH 44691, USA)

Abstract: To characterize jet mixture profiles for in-line injection of pesticides, two-phase flow fields in conventional mixing chambers were investigated under various test conditions. The two-phase flow was formed with water mixed with either a water-soluble liquid or a fat-soluble liquid (silicon oil). Test results illustrated that there were limitations for the conventional mixers to obtain uniform mixtures with the fat-soluble pesticide. To overcome these limitations, a new mixing device based on the swirling jet mechanism was conceived and developed to improve the mixture uniformity of water and the fat-soluble pesticide. The swirling jet mixer consisted of a spiral curved shrink tube, a diffuser and a guide vane to accelerate the two-phase flow spiral movement and blend the two liquids. A computational fluid dynamics program (Fluent) was used to simulate the flow field inside the swirling jet mixer to optimize its design. The mixture uniformity was evaluated by introducing the uniformity index γ_a , representing that the two liquids were blended homogenously as γ_a was 1. Simulated results showed that the γ_a was 0.998 9 across the entire cross sections inside the mixer, confirming uniform mixture profiles with the new mixer design. Therefore, the new swirling jet mixer would solve the non-uniform mixture problem associated with conventional mixers and could significantly improve the in-line injection technology to reduce pesticide waste.

Key words: fat-soluble pesticide; swirling jet; mixer; mixture uniformity; volume fraction uniformity index

收稿日期: 2016-02-18 修回日期: 2016-04-14

基金项目: 江苏省农机三新工程项目 (NJ2014-11)、江苏省农业科技支撑计划项目 (BE2012383)、江苏高校优势学科建设工程项目 (PAPD)、2013 年度江苏高校优秀科技创新团队项目 (苏教科 (2013) 10 号)、高校研究生科研创新计划项目 (KYLX_0868)、江苏省高等职业院校国内高级访问学者计划项目 (2015FX037) 和江苏省 333 高层次人才培养工程项目

作者简介: 宋海潮 (1978—), 男, 博士生, 南京工业职业技术学院副教授, 主要从事数字化设计与制造研究, E-mail: songhc@njfu.edu.cn
通信作者: 徐幼林 (1961—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事植保机械、现代机械设计理论与方法研究, E-mail: youlinxu@njfu.edu.cn

引言

病虫害肆虐造成粮食减产和植被破坏,必须施用农药加以控制,但农药施用不当会造成一系列危害,由此必须重视施药品质。评价施药品质的重要指标之一是农药有效物质在靶标上沉积分布的均匀程度,农药均匀分布防治效果好、不产生药害,也最节约农药^[1]。目前生产中施药以预混式为主,但预混式施药除了对操作者有很大伤害外,对施药机械和环境都存在很大污染,因此国内外众多学者致力于在线混药研究^[2-6]。在线混合施药实现随用随配,避免了预混式施药时农药配比随意性和农药的滥用^[7],可最大限度地减少农药对人体和环境的污染。

农药分为水溶性和脂溶性,水溶性农药可以与水充分溶解混合^[1];脂溶性农药和助剂加水稀释搅拌后,以极小的油珠均匀分散在水中形成相对稳定的乳浊液,或以平均粒径 2~3 μm 分散颗粒与水混合形成有明显分层现象的悬浮剂^[8]。目前水溶性农药的在线混合研究取得了较好的成果;而脂溶性农药采用现有的在线混合混药器结构很难达到农药有效物质在靶标上均匀沉积分布,限制了在线混药器的研究进展。针对脂溶性农药,要保证农药和水在线均匀混合,则要对现有混药器,从结构上进行优化设计,通过改变混药器的结构,改善水和农药的混合效果,提高其混合均匀性。

旋动射流是通过特殊的流体边界和流体的特性相互作用而形成的一种具有旋转流场的流动形式,旋动射流射出后在周围环境流体中的扩展比相应的无旋动普通射流快,其卷吸能力、掺混作用均比普通射流大^[9]。因此,本文拟将旋动射流引入在线混合过程,深入分析旋动射流混药器对非水溶性农药的

在线混合效果。

1 旋动射流混药器结构参数与混药机理分析

1.1 射流混药器混合非水溶性农药局限性试验分析

射流混药器结构^[1]如图 1 所示,为了分析该结构对水溶性和非水溶性农药在线混合的混合效果,首先利用该混药器对各种农药混合效果进行试验验证。

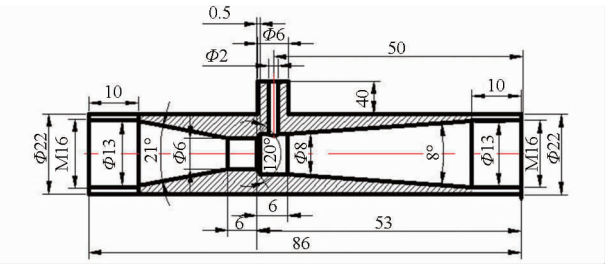


图 1 普通射流混药器结构图

Fig. 1 Diagram of jet mixer

混合性能试验系统^[1]如图 2 所示,由供液系统、供药系统、混合效果图像数据采集系统组成。供水系统主要由水箱 (Raven Industries, Inc.)、D19 Hypro 型离心泵 (Hypro Corp.)、184-11575-00 型 230 V 三相电动机 (Wagner Electric Corp.) 组成,测量水压的压力计位于溢流阀和混药器之间 (图 2a)。供药系统采用美国农业部应用技术研究所使用的 Raven SCS 700 农药在线混合系统中的供药系统,系统中包含药箱、计量泵及流量控制显示系统。该计量泵是一个往复泵,可以保证在计量泵工作范围内能够提供稳定、精确的流量。计量泵是通过电动马达带动的,其流量控制及显示系统内有一个单片机,当输入需要的流量参数时,该系统将发出指令调节马达输入频率,从而调节计量泵的转速。吸取的农药和水在混药器内混合后经喷头喷出 (图 2b)。为

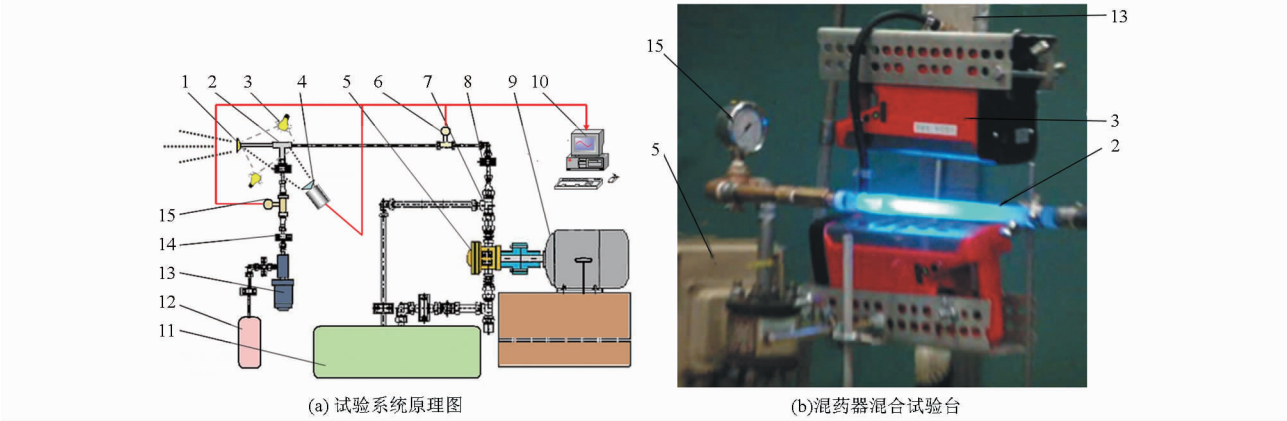


图 2 混合性能试验系统

Fig. 2 Mixing performance experimental set-up

1. 喷头 2. 混药器 3. 紫光灯 4. 摄像机 5. 离心泵 6. 压力计 7. 溢流阀 8. 流量计 9. 电动机 10. 计算机 11. 水箱 12. 药箱 13. 计量泵 14. 流量计 15. 压力计

了便于拍摄混合过程的流动情况,试验选用水溶液类剂型农药的替代物为水和荧光物质 Acid Yellow 7 (Carolina Color & Chemical Company) 的混合物,而脂溶性农药选用 Silicon Oil 替代,Silicon Oil 是一种无色硅树脂非水溶性液体,因此在与水混合时它总是漂浮于水的上部,同样为了便于拍摄,在 Silicon Oil 中加入油性荧光示踪剂 UVITEX OB(Keystone Aniline Corporation)。

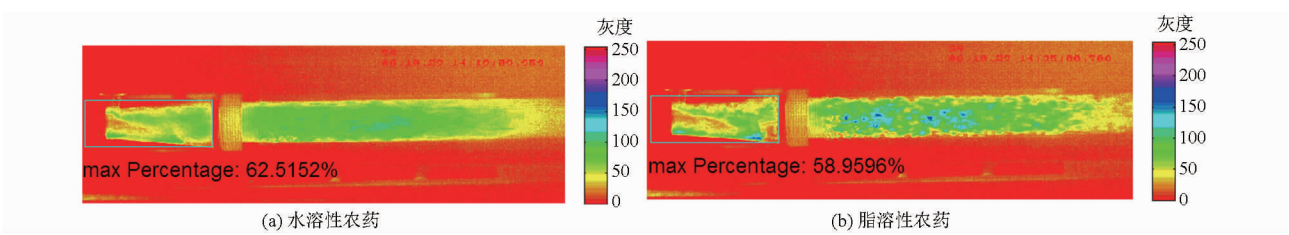


图3 在线混合试验图像
Fig.3 In-line-mixing image

从图 3a 可以看出,在该参数下通过混药器的液体各部分色彩基本均匀,说明水溶性农药与水能均匀混合;但图 3b 所显示的脂溶性农药基本呈团状悬浮在水中,还有浓度较高的农药存在悬浮液中没有破碎分离,说明利用该混药器不能将非水溶性农药与水均匀混合。通过改变不同的工作参数继续对脂溶性农药进行试验,发现该混药器均不能实现对该种农药的有效分离与扩散,无法获得较好的混合效果,因此,需要从结构上对射流混药器进行优化,以满足脂溶性农药的在线混合要求。

1.2 旋动射流混药器结构设计

旋动射流是自由射流加旋转的一种复合流动,其与普通射流的区别在于有一个切向速度即旋转速度。旋动射流的常规产生方式主要是切向径流、安装导流片及旋转管道 3 种方式^[10]。这里在射流混药器结构基础上,设计了一种旋动射流混药器结构。

旋动射流混药器如图 4 所示,通过弯管起旋和起旋器起旋提高其旋动性,提高脂溶性农药和水的均匀混合效果。混药器主要由收缩管、吸药管、扩散

图 3 所示为通过试验获得的在线混合后在混药器扩散段的图像,试验时系统工作参数为离心泵指示流量刻度 3 000,农药计量泵流量刻度值为 10;水进口压力为 1 MPa,药进口压力为 0.1 MPa,混药器出口压力为 0.8 MPa;Acid Yellow 7 质量浓度为 0.1 g/L,UVITEX OB 质量浓度为 4 g/L,Silicon Oil 粘度为 97.7 mPa·s。水溶性农药和脂溶性农药在混药器扩散段的混合效果图像如图 3 所示。

管、起旋器、光管和药瓶组成,混药器进口同进水管相连,出口和喷头连接。吸药管、起旋器和光管设计成标准件,可根据药液黏度等特性调整其尺寸规格。药瓶和扩散管固定连接,混药器使用时,将药瓶上端瓶盖旋松,使瓶盖上的气孔和瓶体气孔相通,保证药瓶内的气压和大气压相通,农药顺畅流入混药器。当混药器不使用时,将瓶盖旋紧,此时,瓶体气孔和瓶盖气孔错位,药液无法流出。

1.3 旋动射流混药器结构参数及混合机理

混药器中混合管长度过短,会导致混合管出口处流速分布很不均匀,使扩散损失加大,混合管最优长度 L_k 为 5 ~ 7 倍 d_3 ^[11]。当混合管直径 d_3 为 7 mm、射流嘴直径为 4 mm 时,射流混药装置混药性能最好^[12]。根据旋动射流混药器的结构特点,结合以前研究^[13],确定混合管直径 d_3 为 7.2 mm、射流嘴直径为 4 mm、收缩管收敛角 $\alpha = 16^\circ$ 、扩散管扩散角 $\beta = 9^\circ$ 、混合管长度 $L_k = 20$ mm。

(1) 弯管起旋

混药器的收缩管设计成螺旋弯曲收缩管结构,

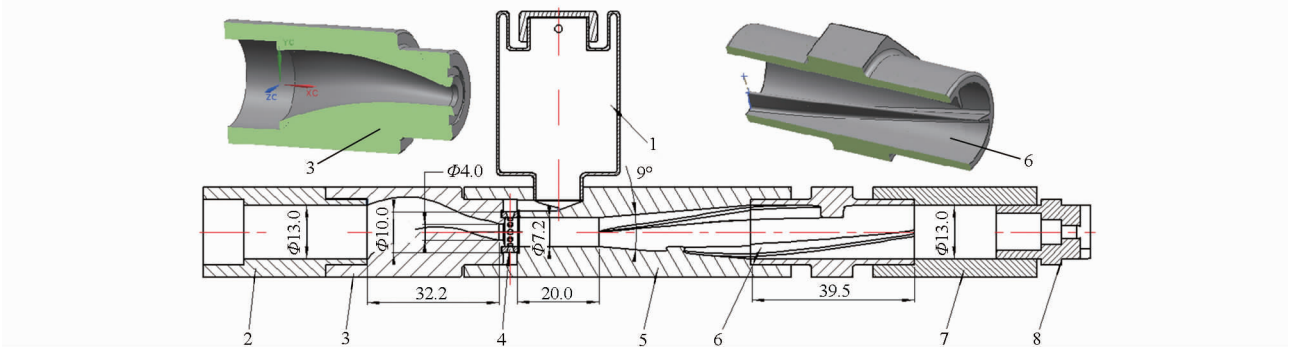


图4 旋动射流混药器结构图

Fig.4 Assembly diagram of swirling jet mixer

1. 药瓶 2. 进水管 3. 收缩管 4. 吸药管 5. 扩散管 6. 起旋器 7. 光管 8. 喷头

收缩管入口直径 13 mm,出口直径 4 mm,入口和出口的圆心都在混药器的轴心线上(见图 4)。当水流入收缩管时,在弯曲的管路中,由于流体的转弯,出现从曲率中心向管子外壁的离心力^[14],外壁的压力增高而内壁的压力降低,因此,在外壁处流体的流速将减小,内壁处流速将相应增大,外壁处流体出现扩散效应,内壁处出现收缩效应;随着流体在弯曲管路中流动,又有相反的现象发生,内壁附近产生扩散效应而外壁附近产生收缩效应,从而大大提高旋流强度。

(2)起旋器起旋

起旋器(见图 4)的结构参数主要有:起旋器长度、导叶个数、导叶高度及导叶包角。而导叶长度一

般为管径的 1~4 倍,导叶高度 h 为管径的 1/2,导叶个数为 3~8 片,导叶包角 $5^{\circ}\sim 20^{\circ}$ ^[10],综合考虑阻力和混合效果^[9],确定导叶个数为 3,导叶包角为 15° 。

根据文献[1],确定管壁内径 13 mm,由于混合管直径 d_3 为 7.2 mm、扩散管扩散角 $\beta=9^{\circ}$,计算后确定扩散管导叶高度从 0 mm 逐渐增大到 6.5 mm,导叶长度 36.848 mm,螺距 221.028 mm。起旋器内壁导叶高度 6.5 mm,导叶长度 40 mm,螺距 240 mm。当药、水混合液通过该管段时,由于导叶的存在,混合液不仅沿轴向向前运动,而且产生径向运动,显著提高混合液的混合效果,混药器结构参数如表 1 所示。

表 1 在线射流混药器结构参数
Tab.1 Structural parameters of jet mixer

结构参数	普通射流混药器	旋动射流混药器	结构参数	普通射流混药器	旋动射流混药器
收缩管入口直径/mm	13	13	扩散管扩散角/(°)	8	9
收缩管出口直径/mm	6	4	扩散管出口直径/mm	13	13
收缩管长度/mm	12	32.2	扩散管内导叶高度/mm		0~6.5
收缩管螺距/mm		128.8	扩散管内导叶个数		3
吸药口内径/mm	8	7.2	扩散管内导叶包角/(°)		15
吸药口外径/mm		10	起旋器内导叶高度/mm		6.5
混合管长度/mm	6	20	起旋器内导叶个数		3
混合管直径/mm	6	7.2	起旋器内导叶包角/(°)		15

2 旋动射流混药数值模拟分析

2.1 网格划分

Fluent 常用的网格类型包括六面体网格、四面体网格/边界层网格及多面体网格。通常六面体网格的计算精度要高于四面体网格,但对于复

杂的几何模型,通常无法生成六面体网格^[15]。针对本文研究的混药器,采用四面体+边界层网格,然后转换成多面体网格进行计算。采用四面体+边界层网格划分,网格数量 4 525 485,然后导入 Fluent 转换成多面体网格,网格数量 1 989 646,如图 5 所示。

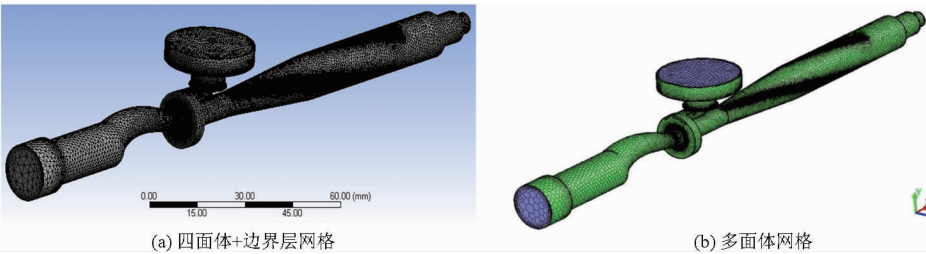


图 5 网格划分
Fig.5 Meshing

2.2 旋动射流混药湍流模型及边界条件

(1)湍流模型

采用混合多相流模型模拟两相之间的掺混,湍流模型为 Realizable $k-\varepsilon$ 模型,适用性广,计算稳定^[16]。采用 SIMPLE 算法求解本构方程组,残差收敛标准为 1×10^{-5} ,单元交界面处的压力采用 PRESTO 插值格式,混合物动量方程对流项采用二阶迎风格式离散,其余方程对流项采用一阶迎风格

式,湍流模型的其它参数取缺省值。
(2)边界条件
边界条件设置,水进口和农药进口均采用压力入口,混合液出口采用压力出口。其余为壁面,采用强化壁面函数对混药器近壁面参数进行计算,假定内表面光滑,如表 2 所示。
2.3 容积分数分布均匀性评判指标
为了分析药水混合均匀性,引入面积加权平均

表 2 边界条件

Tab.2 Boundary conditions

流体类型	密度/(kg·m ⁻³)	粘度/(Pa·s)	压力/MPa
水	998.2	0.001	0.32
药	915	0.004	0.01
混合液			0.01

均匀性指数 γ_a 来判断。 γ_a 可以表征某一位置处药液容积分数分布的均匀性^[17]。 γ_a 越接近 1, 表明药、水混合越均匀。 γ_a 计算公式为

$$\gamma_a = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (|\phi_i - \bar{\phi}_a|) A_i}{2 |\bar{\phi}_a| \sum_{i=1}^n A_i}$$

(1)

式中 ϕ_i ——面网格中心容积分数
 $\bar{\phi}_a$ ——面积加权平均容积分数
 A_i ——面网格面积
 n ——面网格数

3 旋动射流混药器仿真结果分析

3.1 模型收敛验证

在当前工况下, 计算收敛时, 水和药液进口流量及混合液出口流量为: 0.279、0.018、-0.297 kg/s。可知进口水和药的质量流率之和为 0.297 kg/s, 等于出口混合液质量流率(负号指流出)。从计算结果来看, 总的进口流量与出口流量误差极小, 表明此时流量守恒。

3.2 药液容积分数分布及均匀性指数

对混药器结构进行仿真分析, 得到后处理平面位置如图 6 所示, 定义平面位置 1 ($x = 0.04\text{ m}$); 2 ($x = 0.05\text{ m}$); 3 ($x = 0.06\text{ m}$); 4 ($x = 0.07\text{ m}$); 5 ($x = 0.08\text{ m}$); 6 ($x = 0.09\text{ m}$); 7 ($x = 0.10\text{ m}$); 8 ($x = 0.11\text{ m}$); 9 ($x = 0.12\text{ m}$); 10 ($x = 0.13\text{ m}$); 11 ($x = 0.17\text{ m}$)。

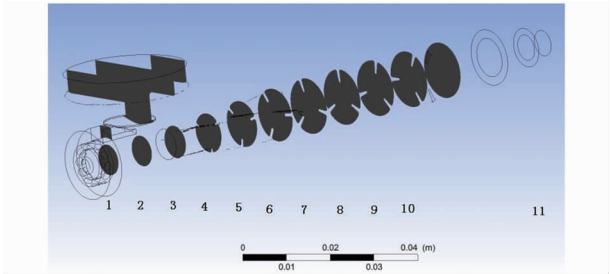


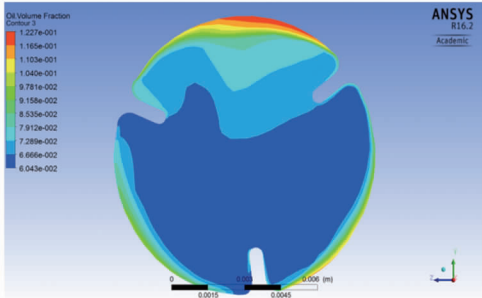
图 6 后处理平面位置

Fig.6 Plane position of post-treatment

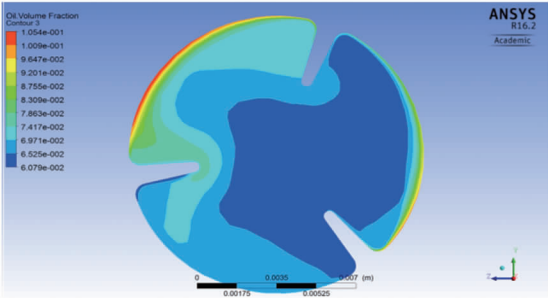
图 7 给出了沿流动方向不同截面处药液容积分数分布及该位置处药液的分布均匀性。由图 7 可见沿流动方向, 截面上药液容积分数最大值与最小值的差值逐渐减小, 混合渐趋均匀。最终到达出口位置处, 整个截面上的药液基本分布一致, 实现了非水溶性农药和水的均匀混合。

4 结论

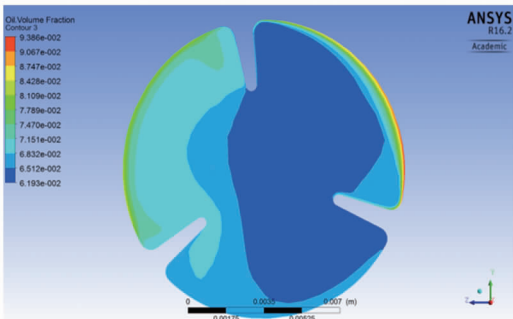
(1) 通过改变普通射流混药器结构, 采用螺旋弯曲收缩管、起旋器和在扩散管中加入固定导叶等方式, 可增加工作液的卷吸能力、掺混作用, 从而提



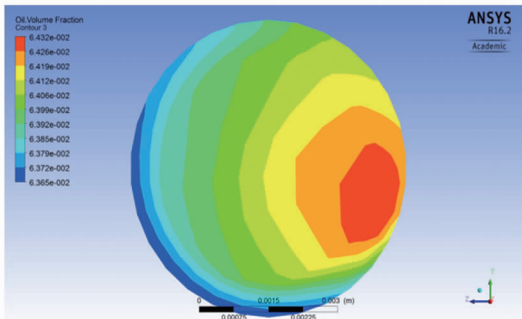
(a) $x = 0.08\text{ m}$; $\gamma_a = 0.948\ 7$



(b) $x = 0.10\text{ m}$; $\gamma_a = 0.968\ 0$



(c) $x = 0.12\text{ m}$; $\gamma_a = 0.977\ 0$



(d) $x = 0.17\text{ m}$; $\gamma_a = 0.998\ 9$

图 7 不同位置处药液容积分数分布及均匀性指数

Fig.7 Volume fraction distribution and homogeneity index of different locations

高农药和水的混合效果。

(2)采用容积分数分布均匀性评判指标来判断混合效果,仿真结果表明,喷嘴出口处面积加权平均均匀性指数 γ_a 为 0.998 9,截面上药液容积分数最

大值与最小值的差值很小,整个截面上的药液分布一致,旋动射流混药器结构设计能够保证出口位置处脂溶性农药与水的均匀混合。

参 考 文 献

1 徐幼林. 植保机械混药器及其农药在线混合性能研究[D]. 南京:南京林业大学,2009.
XU Youlin. Study on mixers for plant protection machinery and chemical in-line-mixing performance [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2009. (in Chinese)

2 VONDRICKA J, LAMMERS P S. Evaluation of a carrier control valve for a direct nozzle injection system [J]. Biosystems Engineering, 2009, 103(1) : 43 – 48.

3 VONDRICKA J, LAMMERS P S. Real-time controlled direct injection system for precision farming [J]. Precision Agriculture, 2009, 10(5) : 421 – 430.

4 SHEN Yue, ZHU Heping, LIU Hui, et al. Development of a real-time chemical injection system for air-assisted variable-rate sprayers[C] // ASABE 2013 Annual Meeting, ASABE Paper 131594669, 2013.

5 XU Xichao, QIU Baijing, DENG Bin, et al. Analysis on online mixing performance of jet-mixing apparatus[C] // Renewable and Sustainable Energy, Advanced Materials Research, 2011(347 – 353) : 417 – 421.

6 BUCHANAN Ian, LIANG H C, LIU Zengkai, et al. Pesticides and herbicides[J]. 2000 Literature Review, Water Environment Research, 2001 : 1038 – 1078.

7 HOISEN M A, SELIM S M. Experimental study of cavitation criterion in centrifugal pumps [J]. Journal of Visualization, 2014, 17(1) : 87 – 94.

8 徐幼林,郭敬坤,郑加强. 农药在线混合均匀度高速摄影分析[J]. 农业机械学报, 2011, 42(8) : 75 – 79.
XU Youlin, GUO Jingkun, ZHENG Jiaqiang. Mixing uniformity of chemical and water in direct injection system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(8) : 75 – 79. (in Chinese)

9 华绍曾. 实用流体阻力手册[M]. 北京:国防工业出版社, 1985.

10 孙西欢,阎庆级,李永业,等. 管道螺旋流输送水力特性研究[M]. 北京:中国水力水电出版社, 2012.

11 DAVID J, BEALE, SARIT L, et al. Detection of striazine pesticides in natural waters by modified large-volume direct injection HPLC[J]. Talanta, 2010, 82(2) : 668 – 674.

12 欧鸣雄,贾卫东,邱白晶,等. 射流混药装置变工况流场特性试验与数值分析[J]. 农业机械学报, 2015, 46(9) : 107 – 111.
OU Mingxiong, JIA Weidong, QIU Baijing, et al. Experiment and numerical analysis of flow field in jet mixing device under variable working conditions[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9) : 107 – 111. (in Chinese)

13 邱白晶,徐溪超,杨宁,等. 射流混药装置结构参数对混药性能影响的模拟分析[J]. 农业机械学报, 2011, 42(6) : 76 – 79.
QIU Baijing, XU Xichao, YANG Ning, et al. Simulation analysis of structure parameters of jet-mixing apparatus on jet-mixing performance [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6) : 76 – 79. (in Chinese)

14 董志勇. 射流力学[M]. 北京:科学出版社, 2005.

15 XU Youlin, WANG Xiwei, ZHENG Jiaqiang, et al. Simulation and experiment on agricultural chemical mixing process for direct injection system based on CFD [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(5) : 148 – 152.

16 SONG Xueguan. Performance comparison and erosion prediction of jet pumps by using a numerical method [J]. Mathematical and Computer Modeling, 2013, 57(1 – 2) : 245 – 253.

17 钟绍华,孔斌,MIROSLAW Lech Wyszynski,等. 均质压燃(HCCI)单区和多区燃烧模型的比较[J]. 内燃机工程, 2007, 28(3) : 6 – 10.
ZHONG Shaohua, KONG Bin, MIROSLAW Lech Wyszynski, et al. Comparison of single-zone and multi-zone combustion model for HCCI engine [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2007, 28(3) : 6 – 10. (in Chinese)