

射流混药装置变工况流场特性试验与数值分析*

欧鸣雄 贾卫东 邱白晶 管贤平 盛云辉
(江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室, 镇江 212013)

摘要: 为了解射流混药器在变工况条件下的流场特性,采用 CFD 数值分析和试验方法对其射流流场进行了分析。研究结果显示数值模型可以较准确地预测混药比随出口静压的变化,混药比随出口静压的增大而线性降低。通过分析变工况条件下的装置内流场可知,沿路径 *a-d-e* 方向的静压最低点位于靠近点 *d* 前端的混药室流域,流体静压在喷嘴内部迅速降低,在混药管内则呈上升趋势。在喷嘴射流影响下,靠近射流核心区的路径 *c-d* 段出现了局部旋涡。根据无量纲性能曲线分析结果可知,混药装置的压力比与混药比之间呈线性递减的关系,数值分析结果显示压力比预测误差最大值为 6%,当扩散管出口静压大于 0.45 MPa 时,装置内出现药液回流现象,并失去在线混合的功能。

关键词: 射流混药 变工况 混药比 流场 数值分析 试验
中图分类号: S49 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)09-0107-05

Experiment and Numerical Analysis of Flow Field in Jet Mixing Device under Variable Working Conditions

Ou Mingxiong Jia Weidong Qiu Baijing Guan Xianping Sheng Yunhui
(Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: To investigate flow field characteristics of jet mixing under variable working conditions, a jet flow field was analyzed with CFD simulation method and experimental analysis. The results indicated that the proposed numerical model could exactly predict the mixing ratio changed with outlet static pressure. It is showed that the mixing ratio decreased linearly with the increase of outlet static pressure. The static pressure distributions under different conditions demonstrated that the lowest pressure point along path *a-d-e* located in mixing chamber was ahead of point *d*, and the static pressure decreased rapidly in nozzle field and rose up slowly in mixing tube. A local vortex appeared closed to jet core zone along path *c-d*, which was affected by jet flow. The non-dimensional performance curves presented a decreasing linear relationship between the pressure ratio and mixing ratio. The prediction error between numerical and experimental results was less than 6%; when the outlet static pressure was higher than 0.45 MPa, the reflux status appeared in the jet mixing device which lost the function of water-pesticide mixing online.

Key words: Jet mixing Variable working conditions Mixing ratio Flow field Numerical analysis Experiment

引言

在线混药喷雾技术是植保机械领域的重要发展

方向,以射流混药装置为核心的在线混药喷雾技术具有高效、清洁和精确可控的特点^[1-2]。混药比和浓度分布是影响施药品质的关键因素,Vondricka^[3]

收稿日期: 2015-02-14 修回日期: 2015-03-16
* 国家自然科学基金资助项目(51475215)、江苏高校优势学科建设工程资助项目(苏政办发[2014]37号)、江苏省自然科学基金资助项目(BK2012285)和江苏大学高级人才科研启动基金资助项目(14JDG030)
作者简介: 欧鸣雄,助理研究员,博士,主要从事植保机械及工程技术研究,E-mail: myomx@ujs.edu.cn

曾研究注入式混药装置在不同混药比条件下的药液浓度动态特性,并采用计算流体动力学(CFD)数值分析方法研究了药液浓度的流场分布特征。何培杰等^[4]通过试验研究了结构参数和进、出口压力等对射流混药装置不同工况性能的影响规律。邱白晶等^[5-6]采用试验方法研究了射流混药装置与喷雾系统之间的参数匹配问题,结果显示喷雾系统参数的改变会使得射流混药装置的工况发生变化,喷头阻力特性的增大会使得射流混药装置出现药液回流的现象。针对射流混药装置内部复杂的三维有限空间粘性射流现象,徐幼林等^[7-8]采用CFD数值分析和试验方法研究了4种不同吸药结构射流混药装置工作性能及混合效果,并对部分工况下出现的药液回流现象进行了分析。

近些年来,国内外学者广泛采用CFD数值分析方法对包括射流混药在内的各种射流现象进行了研究^[9-11]。现有的研究结果显示,基于CFD理论的数值分析方法能够较为准确地揭示各种射流装置的内部流场分布和流动状态。

射流混药装置的性能不仅与自身结构参数相关,还与在线混药喷雾系统的配置参数有关。随着喷雾系统配置参数的改变,射流混药装置的工况点和性能参数也随之变化,并会影响到施药品质和病虫害防治效果^[12-13]。本文通过数值分析和试验研究射流混药装置的混药比变化规律,分析装置内流场的路径静压分布和局部旋涡特征,并对其无量纲性能曲线进行预测研究。该研究对深入了解射流混药装置的变工况流场特性和性能具有设计指导意义,可为大型机动植保机械的在线混药喷雾系统研发提供有效参考。

1 试验装置和数值模型

1.1 试验装置

根据在线混药喷雾系统结构和JB/T 9782—1999《植保机械 通用试验方法》要求,设计了射流混药装置的试验装置,如图1所示。该试验装置由水箱、药箱、液泵、流量计、压力传感器、射流混药装置和流量调节阀组成,试验过程中液泵的出口流量保持不变,工况调节通过球阀调节混药装置的出口压力实现,试验采用清水介质模拟药液。该射流混药装置的设计喷洒流量范围为300~700 L/h,设计喷雾压力范围为0.15~0.5 MPa,该性能参数适用于中小型的喷杆式喷雾机系统^[14]。

试验采用的射流混药装置如图2所示,其结构包括射流进口、喷嘴、吸药口、混药室、混药管和扩散管等部分,具体的结构尺寸参数如表1所示。

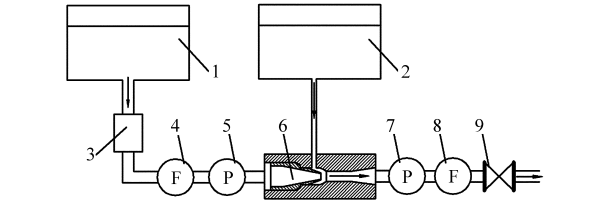


图1 射流混药试验装置图

Fig. 1 Experimental scheme of jet mixing apparatus
1. 水箱 2. 药箱 3. 液泵 4、8. 流量计 5、7. 压力传感器
6. 射流混药装置 9. 流量调节阀

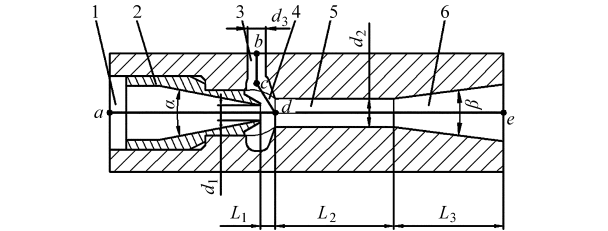


图2 射流混药装置结构示意图

Fig. 2 Structural diagram of jet mixing device
1. 射流进口 2. 喷嘴 3. 吸药口 4. 混药室 5. 混药管 6. 扩散管

表1 射流混药装置参数

Tab. 1 Parameters of jet mixing device			
参数	数值	参数	数值
喷嘴出口直径 d_1/mm	2	吸药口直径 d_3/mm	4.5
混药管直径 d_2/mm	4	嘴管距 L_1/mm	4.5
喷嘴收缩角 $\alpha/(\text{^\circ})$	16	混药管长度 L_2/mm	36
扩散角 $\beta/(\text{^\circ})$	9	扩散管长度 L_3/mm	35

在正常混药状态时,喷嘴出口的清水介质高速射流所形成的抽吸作用将药液从药箱中吸出,清水介质和药液分别从射流进口(点a)和吸药口(点b)流向混药室(点d前端),并经过混药管和扩散管到达点e,最终形成符合要求的清水-药液混合溶液。

1.2 数值模型和边界条件

根据射流混药装置的结构尺寸建立其计算域三维模型,如图3所示。为了提高模型的网格质量,在射流进口、喷嘴、混药管和扩散管部分采用结构化网格,其余部分采用非结构化的四面体网格,并通过网

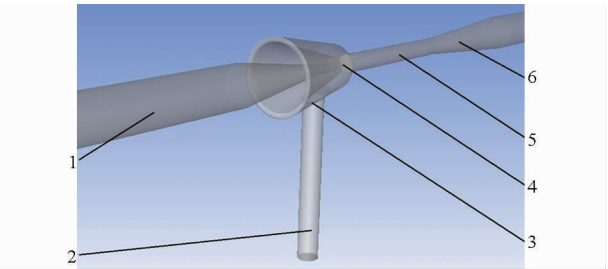


图3 射流混药装置计算域模型

Fig. 3 Computational domain of jet mixing device
1. 射流进口 2. 药液进口边界 3. 吸药口 4. 混药室 5. 混药管 6. 扩散管

格无关性检查获得合理的网格数量。文献[10、15、16]的研究结果显示,Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型适用于准确捕捉和描述复杂的高速射流流场状态。因此,射流混药装置的数值分析采用 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型,压力速度耦合项则采用 SIMPLEC 算法^[15-16]。

根据试验装置的运行参数和工况调节方法,模型的射流进口采用速度进口边界条件,药液进口采用压力进口边界条件,扩散管出口采用压力出口边界条件,壁面为无滑移边界条件,近壁区则采用标准壁面函数处理^[17]。该装置的设计喷雾压力范围为 0.15~0.5 MPa,在实际应用中,混合溶液在流经混药装置出口与喷嘴之间的管道、过滤器和三通等部件时,还会产生一定的压力损失,以此确定射流混药装置在各工况点的边界条件如表 2 所示^[18]。

表 2 各工况点边界条件

Tab.2 Boundary conditions of operation points			
工况	清水流量 /(L·h ⁻¹)	射流进口 静压/MPa	扩散管出口 静压/MPa
1	520	1.28	0.25
2	520	1.28	0.30
3	520	1.29	0.35
4	520	1.28	0.40
5	520	1.27	0.45
6	520	1.27	0.50
7	520	1.27	0.55

2 结果分析

2.1 混药比变化分析

根据试验和数值分析结果,获得射流混药装置在各工况条件下的混药比变化曲线如图 4 所示。

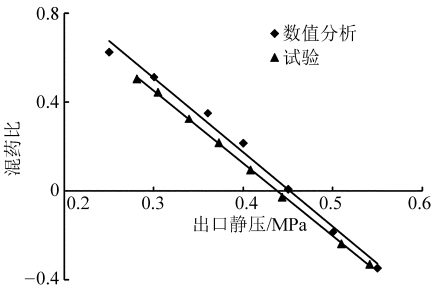


图 4 混药比多工况变化曲线

Fig. 4 Comparison of mixing ratio under multi-conditions

由图 4 可知,随着出口静压的增大,射流混药装置的混药比基本呈线性减小,试验与数值分析结果的曲线斜率基本一致,均能反映出出口静压与混药比之间的线性变化关系。当出口静压高于 0.45 MPa 时,混药比数值为负,即出现了药液回流现象,清水介质此时从混药室流向吸药口处(沿路径 $c-d$ 方

向)。

2.2 内流场分析

射流混药装置的内流场特性是决定其性能变化的基础,为研究变工况条件下射流混药装置内流场的压力分布规律,沿图 2 所示的装置内部流场主要流道路径 $a-d-e$ 和 $b-c-d$ 进行分析,获得其路径节点的静压分布曲线分别如图 5、6 所示。

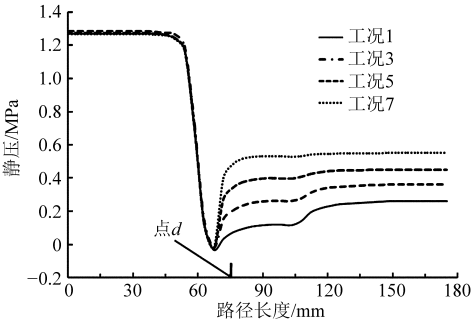


图 5 路径 $a-d-e$ 静压分布曲线

Fig. 5 Static pressure distribution along path $a-d-e$

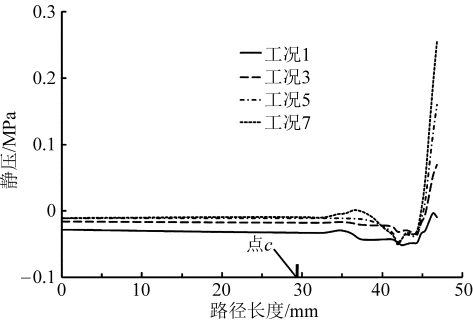


图 6 路径 $b-c-d$ 静压分布曲线

Fig. 6 Static pressure distribution along path $b-c-d$

由图 5 可知,该路径段的静压最低点位于靠近点 d 前端的混药室内流域,沿着路径 $a-d-e$ 方向,流体静压在喷嘴内部迅速减小,经过静压最低点后的压力曲线在混药管内呈上升趋势。在扩散段内的静压变化平缓并趋近于出口静压,射流进口和喷嘴区域的静压分布受出口静压的变化影响很小。

图 6 显示了变工况条件下路径 $b-c-d$ 上的静压分布情况,由图可知,在进入混药室之前的 $b-c$ 段,静压变化平稳,在路径 $c-d$ 段靠近混药室射流核心区附近,流体静压出现先下降后迅速上升的现象。此外,随着出口静压的增大,药液体积流量逐渐减小,从药液进口边界到路径点 b 的水力损失也随之降低,使得不同工况下路径 $b-c-d$ 上的静压分布曲线之间具有一定的差值。路径 $c-d$ 段位于装置内流场的射流混合区域,为了进一步研究该区域内的流场分布特征,选取典型工况(工况 3 和 7)下该区域的速度矢量分布如图 7 所示。

由图 7 可知,在路径 $c-d$ 段的混药室流场内存在较大的局部旋涡,由此导致该路径段的静压分布

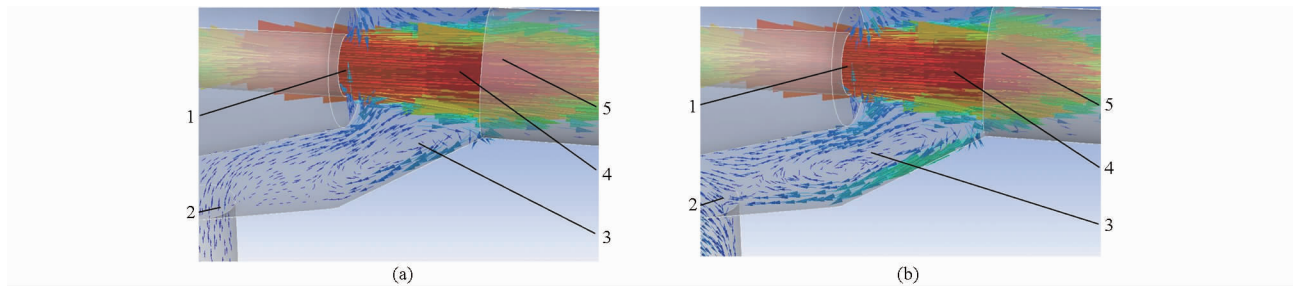


图 7 路径 *c-d* 附近流场的速度矢量分布图

Fig. 7 Velocity vector distribution around path *c-d*

(a) 工况 3 (b) 工况 7

1. 喷嘴出口 2. 吸药口 3. 局部旋涡 4. 射流核心区 5. 混药管

出现先下降后迅速上升的现象,该局部旋涡结构特征与文献[19–20]的研究结果基本一致,从而验证了该数值模型的合理性。

2.3 无量纲性能特征分析

射流混药装置的无量纲性能特征是描述其能量转换特性的重要方法,根据试验和数值分析结果,获得混药装置无量纲性能曲线如图 8 所示,其中压力比 *h* 定义为^[21]

$$h = \frac{\frac{p_e}{\rho g} + \frac{v_e^2}{2g} + z_e - \left(\frac{p_s}{\rho g} + \frac{v_s^2}{2g} + z_s \right)}{\frac{p_a}{\rho g} + \frac{v_a^2}{2g} + z_a - \left(\frac{p_s}{\rho g} + \frac{v_s^2}{2g} + z_s \right)}$$

(1)

式中 *h*——射流混药装置的压力比
ρ——清水密度 *g*——重力加速度
p、*v*、*z*——静压、流速和位置高度
下标 *a*、*e* 和 *s* 代表图 2、3 所示的射流进口点 *a*、扩散管出口点 *e* 和药液进口边界处的过流断面。

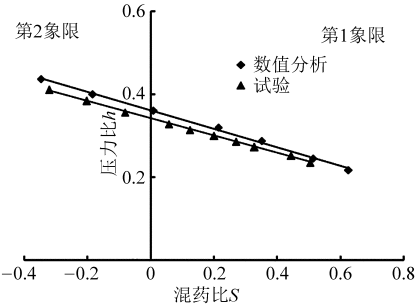


图 8 射流混药装置无量纲性能曲线

Fig. 8 Non-dimensional performance of jet mixing device

通过线性回归分析,获得压力比 *h* 与混药比 *S* 之间的方程表达式为

$$h_{CFD} = 0.361 - 0.223S_{CFD} \quad (R^2 = 0.997) \quad (2)$$

$$h_{EXP} = 0.341 - 0.208S_{EXP} \quad (R^2 = 0.999) \quad (3)$$

下标 *CFD* 和 *EXP* 分别代表数值分析值与试验值。

由式(2)、(3)可知,射流混药装置的压力比与混药比之间呈线性递减的关系,从无量纲性能曲线预测的角度获得数值分析的压力比预测误差

$$\alpha_h = \frac{h_{CFD} - h_{EXP}}{h_{EXP}} \times 100\%$$

(4)

*α_h*最大值约为 6% (混药比 *S* 变化区间为[−0.35, 0.62])。

通过上述分析可知,在正常运行工况时,射流混药装置的工况点位于如图 8 所示的第 1 象限内。当压力比超过 0.36 时,装置的工况点位于第 2 象限内,此时喷嘴出口的清水射流已无法将药液从药箱中吸出,一部分清水介质流入药箱形成药液回流现象,并失去在线混合的功能,该分析结果与文献[6、13]的研究结果一致。

3 结论

(1) 射流混药装置的混药比与扩散管出口静压之间基本呈线性递减的关系,在设计射流混药装置时,应当考虑到喷雾系统的布置方式和阻力特性,将出口静压控制在合理的范围内,以满足病虫害防治所需要的混药比要求。

(2) 喷洒流量不变时,随着射流混药装置压力比(或扩散管出口静压)的增大,射流混药装置会出现药液回流的现象。对于上述混药装置而言,其扩散管出口静压应低于 0.45 MPa,对应的压力比应小于 0.36,以避免药液回流现象的发生。

(3) 基于 CFD 的数值模型能够较为准确地预测射流混药装置在变工况条件下的性能特征和流场特性,在本文试验测试的混药比范围内,数值分析的压力比预测误差最大值约为 6%。

参 考 文 献

1 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.

- 2 何培杰,陈翠英,吴春笃,等. 射流混药装置混合管流场数值计算[J]. 江苏大学学报:自然科学版, 2002,23(2):13-16.
He Peijie, Chen Cuiying, Wu Chundu, et al. Numerical computation of mixing pipe flow-field in jet mixing apparatus for pesticide mixture[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2002, 23(2):13-16. (in Chinese)
- 3 Vondricka J. Study on the process of direct nozzle injection for real-time site-specific pesticide application [D]. Bonn: University of Bonn, 2007.
- 4 何培杰,吴春笃,陈翠英,等. 安全混药装置的试验研究[J]. 中国安全科学学报,2011,11(4):35-40.
He Peijie, Wu Chundu, Chen Cuiying, et al. Experimental investigation on safe mixing apparatus [J]. China Safety Science Journal, 2011,11(4):35-40. (in Chinese)
- 5 邱白晶,徐溪超. 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): 76-80.
Qiu Baijing, Xu Xichao. 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):76-80. (in Chinese)
- 6 邱白晶,马靖. 在线混药喷雾系统混药性能试验[J]. 农业工程学报,2014,30(17):78-85.
Qiu Baijing, Ma Jing. Experiment on mixing performance of online mixing spray system [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(17):78-85. (in Chinese)
- 7 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.
- 8 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.
- 9 Cong Xu. Prediction of the pumping capacity for reverse-flow diverter pumps[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2014,92(7):1219-1226.
- 10 Shah A, Chughtai R. Experimental and numerical analysis of steam jet pump [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2011,37(10):1305-1314.
- 11 Wang X D, Dong J L. Numerical study on the performances of steam-jet vacuum pump at different operating conditions [J]. Vacuum,2010,84(11):1341-1346.
- 12 江健. 基于 Fluent 的农药射流混药器的仿真与优化研究[D]. 南京:南京林业大学,2013.
- 13 邓斌,邱白晶. 喷杆喷雾机射流混药装置试验研究[J]. 农机化研究,2014(5):170-173.
Deng Bin, Qiu Baijing. Experimental study on jet mixing apparatus of boom sprayer [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2014(5):170-173. (in Chinese)
- 14 邓斌. 喷杆喷雾机射流混药装置试验研究[D]. 镇江:江苏大学,2013.
- 15 Fan J, Eves J, Thompson H M, et al. Computational fluid dynamic analysis and design optimization of jet pumps[J]. Computers & Fluids, 2011,46(1):212-217.
- 16 Sriveerakul T. Performance prediction of steam ejector using computational fluid dynamics: part 1. Validation of the CFD results [J]. International Journal of Thermal Sciences,2007,46(8): 812-822.
- 17 Andrea Mangialardo, Walter Borreani. Numerical investigation on a jet pump evolving liquid lead for GEN-IV reactors [J]. Nuclear Engineering and Design, 2014, 280: 608-618.
- 18 Vondricka J, Lammers P S. Real-time controlled direct injection system for precision farming[J]. Precision Agriculture,2009, 10(5):421-430.
- 19 宁锋. 脉冲液体射流泵内部流场的分析与计算[D]. 郑州:华北水利水电学院,2007.
- 20 文吉运,于波,陆宏圻. 射流泵内流场的大涡模拟[J]. 武汉大学学报:工学版,2007,40(2):110-114.
Wen Jiyun, Yu Bo, Lu Hongqi. Large eddy simulation for jet pump flow[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2007, 40(2):110-114. (in Chinese)
- 21 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.