# 扇形雾喷头雾化过程中雾滴运动特性\*

张 京 宋坚利 何雄奎 曾爱军 刘亚佳 (中国农业大学理学院,北京100193)

【摘要】 利用相位多普勒粒子分析仪测试了 LU120-03 型扇形雾喷头喷雾扇面内的雾滴运动速度,计算得出 雾滴运动初速度即液膜破碎速度,确定了雾滴在喷雾扇面内的速度分布。结果表明:靠近喷头的区域,扇面边缘的 最小雾滴速度小于中心位置的最小雾滴速度,更易飘失;远离喷头的区域,细小雾滴速度迅速衰减,极易受气流影 响而产生飘失。

关键词:雾化 雾滴 运动特性 中图分类号: S491 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)04-0066-04

# Droplets Movement Characteristics in Atomization Process of Flat Fan Nozzle

Zhang Jing Song Jianli He Xiongkui Zeng Aijun Liu Yajia (College of Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

#### Abstract

The droplets velocity in spraying fan of flat fan nozzle LU120 - 03 was tested by phase Doppler particle analyzer (PDPA). The initial velocity was liquid-sheet velocity and the velocity distribution in spraying fan was confirmed. The results showed that the velocity of minimum droplets in spraying fan edge was lower than that in central position near the nozzle, so it was more likely to drift; the fine droplets velocity decreased rapidly far away from the nozzle so that the droplets were very easy to result in drift influenced by airflow.

Key words Atomization, Droplets, Movement characteristics

# 引言

农药飘失是造成农药损失与农药污染的一个主要问题,影响雾滴飘失的相关因素很多,雾滴尺寸与运动速度是决定农药雾滴沉积和飘失的两个最基本的因素<sup>[1-4]</sup>。目前,研究农药飘失的手段主要有田间试验、风洞试验、仿真模拟,由于田间试验与风洞试验条件限制多、耗费大,而仿真模拟则具有快速、条件可控、耗费少等优点,因此在农药飘失的基础理论研究方面主要使用这种方法。仿真模拟准确性取决于数据的准确性,尤其是雾滴运动初速度与雾滴粒径可以通过粒径测试仪测定,而雾滴运动速度,尤其是雾滴运动初速度的测

定,目前还少有研究<sup>[5-7]</sup>。因此,精确测定喷头喷雾 时的雾滴初速度以及雾滴在喷雾扇面内的速度分布 对确保农药飘失仿真模拟的准确性具有重要意义。

本文针对扇形雾喷头雾化过程中的雾滴粒径、 运动速度进行测试,为减少雾滴飘失提供理论依据。

# 1 材料与方法

试验在联邦德国农林生物研究中心(JKI)施药 技术研究部测试中心进行,使用丹麦 Dantec / Invent 测试技术公司生产的相位多普勒粒子分析仪(phase Doppler particle analyzer,简称 PDPA)测定喷雾扇面 中雾滴粒径和运动速度参数。试验用喷头是德国 LECHLER 公司生产的 LU120-03 型扇形雾喷头,

收稿日期:2010-07-15 修回日期:2010-09-02

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(30800728、30971940)和国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2008AA100904)

作者简介:张京,博士生,主要从事植保机械与施药技术研究,E-mail: zj810515@163.com

通讯作者: 宋坚利,讲师,主要从事植保机械与施药技术研究, E-mail: songjianli170@163.com

喷雾压力为 0.3 MPa, 喷头流量为 1.17 L/min, 喷头 喷雾角为 120°。

# 1.1 测试点的设置

建立坐标系如图 1 所示,喷头所在位置为坐标 原点(0,0,0), *x* 轴垂直喷雾扇面为扇面纵向, *y* 轴 平行于喷雾扇面为扇面横向, *z* 轴为雾流中轴线,垂 直向下为 *z* 轴正向。

设定平面 yz 为喷雾扇面横向对称面,平面 xz 为 扇面纵向对称面。沿 z 轴方向每隔100 mm设置一个 水平测量面,在每个测量面内根据椭圆面的大小确 定 x 方向的偏移量,本着对称平分的原则确定 5 条 测量线。设定雾流轴线角度为 0°,将扇面横向对称 面进行 16 份等角度平分,角等分线与水平线交点坐 标通过正切公式求出,即求出测试面上每个测量点 的 y 坐标,测试点坐标如表 1 所示。



Fig. 1 Test point position

表 1 测量点坐标 Tab.1 Test point coordinates

z/mm	y/mm								x∕mm		
100	0	±13	±27	±41	± 58	± 77	± 100	±130	±173	±10	±20
200	0	±26	± 54	± 83	±116	±154	± 200	± 261	± 346	±15	± 30
300	0	±40	± 80	±124	±173	±230	± 300	± 391	±450	±20	±40
400	0	± 53	±107	±166	±231	± 307	±400	± 521	± 693	± 30	± 60
500	0	± 66	±134	± 207	± 289	± 384	± 500	±652	± 866	±40	± 80

# 1.2 测量方法

在测试过程中,PDPA 固定在底座上,喷头安装 在一个能够在三维空间移动的坐标架上,通过计算 机输入指令控制坐标架移动,使喷头自动运行到指 定位置,保证测量点的精准定位。随机选择同一批 号喷头 10 个,分别重复 3 次测定每个喷头的流量, 并计算每个喷头流量平均值及总体平均值,选择与 平均值偏差最小的喷头作为被测试喷头。测试过程 中室温恒定,试验介质为清水。PDPA 测量所得的 数据为统计值,为保证测试数据准确,在每次采样过 程中,在接近边界测量点至少测量 3 000 个雾滴。

# 2 结果与分析

# 2.1 雾滴初速度

雾滴运动初速度与液膜破碎情况有关,在许多 研究中假设液膜破碎后产生的不同粒径雾滴初速度  $v_f$ 相同,均等于液膜破碎速度  $v_s^{[8-9]}$ 。Sidahmed 建 立能量守恒公式计算雾滴形成时的能量变换得出: 对于大雾滴  $v_f \approx v_s$ ,而小雾滴当直径接近于最小直 径时,其雾滴飞行速度下降非常快。因此,从液膜分 离出的雾滴速度等于液膜的速度的假设只适用于大 雾滴。同时也可以看出,小雾滴在形成时从液膜吸取的能量也比大雾滴少得多<sup>[10]</sup>。Giles 也认为作用 给喷头的 70% 的能量最后都变成了雾滴的动能,并 且大雾滴所含有的能量占了大部分<sup>[11]</sup>。

在本次测试中,测试面与喷孔的最近距离是 100 mm,在此测试距离上雾滴雾化过程已经完成, 并且由于距离较短,雾滴运动速度受空气阻力和重 力影响小,所以此处的雾滴运动速度可以近似等同 于雾滴的运动初速度。图2为LU120-03型喷头喷 雾压力为0.3 MPa时在距离喷孔 100 mm 扇面横向 对称面上各点的雾滴粒径与速度分布情况。

从图 2 可以看出,随着雾滴粒径增加,其速度迅速上升,当雾滴粒径较大时,雾滴运动速度趋近一致。在扇面中心位置(x=0)雾滴粒径与速度关系曲线变化趋势相同,随着测试点靠近扇面边缘区域速度陡升现象逐渐减弱,试验结果与 Sidahmed 的结论相一致<sup>[12]</sup>。因此,在距喷头 100 mm 处测试计算雾滴的液膜破碎速度可行。在不同测试点最大雾滴的运动速度基本一致,而最小雾滴速度随着远离中心点而逐渐下降,由中心点 9.00 m/s 下降为2.64 m/s。根据 Sidahmed 研究结果,大雾滴的运动速度可以等同于液膜破碎速度,所以将雾滴粒径与

速度关系曲线用最小二乘法拟合,求出曲线极限值 即得到液膜破碎速度。图 3 为测试点(0,0,100)处 雾滴粒径与速度拟合曲线,数据符合玻尔兹曼分布, 根据曲线公式求得液膜破碎速度为 17.80 m/s。用 同样的方法对其他测试点进行分析,结果如表 2 所示。由表可知,除边缘点(0,173,100)液膜破碎速 度为15.27 m/s外,其他点的数值相差不大,因此将 这些值平均得到液膜破碎速度为 17.93 m/s。



图 2 x = 0 mm, z = 100 mm 时沿 y 向雾滴粒径与速度关系曲线 Fig. 2 Droplet size-velocity distribution in y direction when x is 0 mm and z is 100 mm (a) 0 mm (b) 13 mm (c) 27 mm (d) 41 mm (e) 58 mm (f) 77 mm (g) 100 mm (h) 130 mm (i) 173 mm



# 2.2 雾滴速度分布

雾滴在运动的过程中受到诸多力的作用,其中 主要有重力、浮力、空气阻力。雾流中雾滴运动是一 个非常复杂的过程,雾滴在运动的过程中与周围的 空气进行能量交换,夹带一部分空气同向运动,因此 形成了气液混合的二相流运动。雾滴的运动速度不 同,扇面中夹带气流的运动速度也不同,所以计算雾 滴与气流的相对速度是非常困难的<sup>[13-16]</sup>。雾滴运 动时气流在其尾部形成涡流,能够减小处于涡流区 运动雾滴的空气阻力,使得雾滴实际运动速度大于

表	2 不	同 y 值时	<b>」</b> 雾滴粒	径−速度	拟合曲组	线极限(	直
Tab. 2	Limit	value o	f droplet	size vs	velocity	fitting	curv

y/mm	0	13	27	41	58	77	100	130	173
液膜破碎速度/m·s <sup>-1</sup>	17.76	17.49	18.31	18.39	17.60	17.83	18.23	17.89	15.27

单个雾滴运动的理论计算速度。因此,在分析雾滴 运动时需要将不同粒径的雾滴分别研究。

图 4 为 LU120 - 03 型 喷 头 在 喷 雾 压 力 为 0.3 MPa时喷雾轴线上(x = 0, y = 0)雾滴速度随粒

径的变化。由图可知,随着与喷孔距离的增加,雾滴 的运动速度减小,但是雾滴粒径不同,其减小趋势不 同。随着雾滴离喷头越来越远,细小雾滴速度迅速 衰减,其次是较大雾滴,最后是大雾滴。z = 100 mm





Fig. 4 Droplet size vs velocity distribution of spraying fan axis

处雾滴运动速度随着雾滴粒径的增大先直线快速增加,粒径大于100 µm 后趋于平缓,而在其他3个距离,雾滴速度的变化趋势是先平缓后陡升再平缓,而且随着与喷孔距离增加第一次平缓长度不断增加,在 z为200、300、400 mm 处第一次平缓增加的雾滴粒径范围分别是25.1~45.7 µm、25.1~66.1 µm、25.1~87.1 µm。这说明随着距离喷头越来越远,细

小雾滴的速度减小,并逐渐趋近一致,而后大雾滴速 度衰减,而且大雾滴与小雾滴之间的速度差异逐渐 变小。

# 3 结论

(1) 距喷头100 mm 处,雾滴初速度等同于液膜 破碎速度,由雾滴粒径与速度分布拟合曲线的极限 值计算得出雾滴液膜破碎速度。

(2) 靠近喷头的区域,雾滴粒径与速度关系曲 线变化趋势相同,细小雾滴速度衰减程度大于大雾 滴。扇面边缘区域的最小雾滴的速度小于中心位置 的最小雾滴速度,所以扇面边缘位置的细小雾滴比 扇面中心位置的更易飘失。远离喷头后,雾滴间相 互作用减小,细小雾滴速度迅速衰减,极易受气流影 响而产生飘失。

#### 参考文献

- 1 Ade G, Molari G, Rondelli V. Vineyard evaluation of a recycling tunnel sprayer [J]. Transactions of the ASAE, 2005, 48(6):2105~2112.
- 2 Molari G, Benini L, Ade G. Design of a recycling tunnel sprayer using CFD simulations [J]. Transactions of the ASAE, 2005, 48(2):463~468.
- 3 刘秀娟,周宏平,郑加强.农药雾滴飘移控制技术研究进展[J].农业工程学报,2005,21(1):186~190. Liu Xiujuan, Zhou Hongping, Zheng Jiaqiang. Research advances of the technologies for spray drift control of pesticide application [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005,21(1):186~190. (in Chinese)
- 4 张京,杨雪玲,何雄奎,等.改进双圆弧罩盖减少雾滴飘失试验[J].农业机械学报,2009,40(7):67~71. Zhang Jing, Yang Xueling, He Xiongkui, et al. Improved double-foil shield for reducing spray drift[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(7):67~71. (in Chinese)
- 5 邓巍,丁为民,何雄奎.PWM间歇式变量喷雾的雾化特性[J].农业机械学报,2009,40(1):74~78. Deng Wei, Ding Weimin, He Xiongkui. Spray characteristics of PWM-based intermittent pulse variable spray [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40 (1):74~78. (in Chinese)
- 6 赵辉,宋坚利,曾爱军,等.喷雾液动态表面张力与雾滴粒径关系[J].农业机械学报,2009,40(8):74~79. Zhao Hui, Song Jianli, Zeng Aijun, et al. Correlations between dynamic surface tension and droplet diameter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(8):74~79. (in Chinese)
- 7 吕晓兰,傅锡敏,宋坚利,等. 喷雾技术参数对雾滴飘移特性的影响[J]. 农业机械学报,2011,42(1):59~63. Lü Xiaolan, Fu Ximin, Song Jianli, et al. Influence of spray operating parameters on spray drift[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(1):59~63. (in Chinese)
- 8 蒋勇,廖光煊,王清安,等.喷雾过程液滴碰撞-聚合模型研究[J].火灾科学,2000,9(2):27~30. Jiang Yong, Liao Guanxuan, Wang Qingan, et al. Study on calculating model of droplets collision/coalescence in spray process [J]. Fire Safety Science, 2000,9(2):27~30. (in Chinese)
- 9 蒋勇,范维澄,廖光煊,等.喷雾过程中液滴不稳定破碎的研究[J].火灾科学,2000,9(3):1~5. Jiang Yong, Fan Weicheng, Liao Guangxuan, et al. Study on instability breakup of fluid droplet in spray process[J]. Fire Safety Science, 2000,9(3):1~5. (in Chinese)
- 10 Sidahmed M M. A transport model for near nozzle fan sprays[J]. Transactions of the ASAE, 1997, 40(3):547 ~ 554.
- 11 Giles D K. Energy conversion and distribution in pressure atomizers [J]. Transactions of the ASAE, 1988, 31(6): 1668 ~ 1673.
- 12 Sidahmed M M. A model for predicting the droplet size from liquid sheets in airstreams [J]. Transactions of the ASAE, 1996, 39(5): 1651 ~ 1655.

出,可降低损耗,提高效率,进一步减小了风速变异系数,因此是较为理想的结构。样机试验表明改进

风筒形成的风幕实现了较高的出口平均风速和风速 变异小,因而雾滴具有较好的二次雾化均匀度。

#### 参考文献

- 邓巍,丁为民,何雄奎.变量喷施技术及其雾化特性评价方法综述[J].中国农业大学学报,2009,14(3):94~102.
  Deng Wei, Ding Weimin, He Xiongkui. Technologies and evaluation methodology of variable spray [J]. Journal of China Agricultural University,2009,14(3):94~102. (in Chinese)
- 2 中国农业机械化科学研究院. 一种喷杆喷雾机:中国, ZL 200620157987.9[P]. 2008-03-05.
- 3 何雄奎,曾爱军,刘亚佳,等.水田风送低量喷杆喷雾机设计及其参数研究[J].农业工程学报,2005,21(9):76~79. He Xiongkui, Zeng Aijun, Liu Yajia, et al. Design and parameter test of the low volume air assistant rice boom sprayer [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(9):76~79. (in Chinese)
- 4 王福军. 计算流体动力学分析 [M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
- 5 祁力钧,赵亚青,王俊,等. 基于 CFD 的果园风送式喷雾机雾滴分布特性分析[J]. 农业机械学报, 2010, 41(2): 62~67. Qi Lijun, Zhao Yaqing, Wang Jun, et al. CFD simulation and experimental verification of droplet dispersion of air-assisted orchard sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(2): 62~67. (in Chinese)
- 6 陶雷,何雄奎,曾爱军,等. 开口双圆弧罩盖减少雾滴飘失效果的 CFD 模拟[J]. 农业机械学报,2005,36(1):35~37. Tao Lei, He Xiongkui, Zeng Aijun, et al. CFD simulation of open doubled-foil shield on reducing spray drift [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(1):35~37. (in Chinese)
- 7 戴奋奋.风送喷雾机风量的选择与计算[J].植物保护,2008,34(6):124~127. Dai Fenfen. Selection and calculation of the blowing rate of air-assisted sprayers [J]. Plant Protection, 2008, 34(6):124~ 127. (in Chinese)
- 8 Teske M E, Miller P C H, Thistle H W, et al. Initial development and validation of a mechanistic spray drift model for ground boom sprayers[J]. Transactions of the ASABE, 2009,52(4): 1089 ~ 1097.
- 9 刘雪美,张晓辉,刘丰乐,等. 基于 RVM 的喷杆喷雾机风助风筒多目标优化设计[J],农业机械学报,2010,41(6): 75~80.

Liu Xuemei, Zhang Xiaohui, Liu Fengle, et al. Multi-objective dynamic design optimization for air duct of air-assisted boom sprayer based RVM [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41 (6): 75 ~ 80. (in Chinese)

10 余泳昌,王保华,史景钊,等. 手动喷雾器组合充电式静电喷雾装置的雾化效果试验[J]. 农业工程学报, 2005, 21(12):85~88.

Yu Yongchang, Wang Baohua, Shi Jingzhao, et al. Design and experimental study of combined charging hydraulic electrostatic spraying box [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(12): 85 ~ 88. (in Chinese)

- 11 Delele M A, Jaeken P, Debaer C, et al. CFD prototyping of an air-assisted orchard sprayer aimed at drift reduction [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2007, 55(1):16 ~ 27.
- 12 Zhu H, Derksen R C, Ozkan H E, et al. Development of a canopy opener to improve spray deposition and coverage inside soybean canopies: part 2. opener design with field experiments [J]. Transactions of the ASABE, 2008, 51(6): 1913 ~ 1921.

#### (上接第69页)

- 13 张燕,樊靖郁,王道增. 横流冲击射流尾迹涡结构的实验研究[J]. 力学季刊, 2005,26(4):539~543.
  Zhang Yan, Fan Jingyu, Wang Daozeng. Experimental study for wake vortices of an impinging jet in crossflow[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2005,26(4):539~543. (in Chinese)
- 14 张晓元,李炜,李长城. 横流环境中射流的数值研究[J]. 水利学报,2002,33(3):32~43. Zhang Xiaoyuan, Li Wei, Li Changcheng. Numerical simulation for the flow field of vertical round turbulent jet entering the cross current[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002,33(3):32~43. (in Chinese)
- 15 卞晓静. 横流条件下垂直动量射流数值模拟[J]. 河海大学学报:自然科学版,2006,34(5): 530~533.
  Bian Xiaojing. Numerical simulation of vertical momentum jet in cross-flow [J]. Journal of Hehai University: Natural

Sciences, 2006, 34(5): 530 ~ 533. (in Chinese)

16 李炜,姜国强,张晓元. 横流中圆孔湍射流的旋涡结构[J].水科学进展,2003,14(5):576~582. Li Wei, Jiang Guoqiang, Zhang Xiaoyuan. Vortex structures of round turbulent jets in cross-flow[J]. Advances in Water Science, 2003,14(5):576~582. (in Chinese)