

# 对冲喷头喷雾场液滴分布特性试验

董福龙<sup>1,2</sup> 周宏平<sup>1</sup> 茹煜<sup>1</sup> 施明宏<sup>1</sup> 陈青<sup>1</sup> 易克传<sup>2</sup>

(1. 南京林业大学机械电子工程学院, 南京 210037; 2. 安徽科技学院机械工程学院, 凤阳 233100)

**摘要:** 植保扇形喷头的喷雾扇形面内不同位置处液滴直径是不相同的, 呈现接近于 U 形分布的中间液滴直径小而两侧液滴直径偏大的情况, 这导致同高度水平方向上各点处的液滴在靶标上的沉积行为不同, 致使防治效果存在差异。本文对出水口径 1 mm 和切槽角 30° 的对冲喷头喷雾场的液滴直径分布特性进行试验, 该喷头是基于射流和撞击流耦合作用的新型喷头, 发现对冲喷头在喷雾扇形面内的液滴直径呈现中间区域液滴直径较大且均匀而两侧液滴直径较小的特性, 如喷施压力 0.4 MPa 时在 300 mm 高度测试面上, 喷雾扇形面内中间区域液滴直径在 265 ~ 268 μm, 而靠近两侧边缘处的液滴直径在 250 ~ 252 μm, 这有利于解决喷杆式喷雾机大田作业时液滴直径分布不均匀的不足; 并对喷头这一特性进行理论分析, 提出在分裂区的 3 次雾化(即扰动雾化、撞击雾化和振荡雾化)是引起这一特性的根本原因。同时采用径向不均匀指数对喷雾场的液滴分布均匀特性进行定量表征分析, 发现径向不均匀指数能够总体反映喷雾场的非均匀特性, 当喷施压力在 0.6 ~ 0.7 MPa 范围时, 径向不均匀指数在 0.47 ~ 0.51 较小范围内变化, 说明在该压力范围内工作时喷头喷雾场具有良好的液滴均匀分布特性。

**关键词:** 对冲喷头; 喷雾场; 液滴直径; 撞击流; 分布特性

**中图分类号:** S491 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)12-0116-06

## Experiment on Droplet Distribution Characteristics in Spray Field of Impinging Nozzle

DONG Fulong<sup>1,2</sup> ZHOU Hongping<sup>1</sup> RU Yu<sup>1</sup> SHI Minghong<sup>1</sup> CHEN Qing<sup>1</sup> YI Kechuan<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

2. College of Mechanical Engineering, Anhui Science and Technology University, Fengyang 233100, China)

**Abstract:** The droplet sizes are different at different positions in the spray field of flat-fan nozzle which are widely used in agriculture. It shows like the U-shaped distribution, that is, the droplet diameters of the middle droplet are smaller and the droplet diameters of both sides are larger, which results in the differences of the droplet depositional behavior on the targets at different points of the same height in the horizontal direction, leading to different control effects. The droplet sizes of the impinging nozzle were obtained according to the test system for atomizing performance of nozzles. Experiments were conducted on droplet distribution characteristics in spray field of the impinging nozzle with the exit diameter of 1 mm and the groove angle of 30°. The nozzle was a new nozzle based on the coupling of jet and impinging jets. It was found that the droplet diameters of the middle droplet were uniform and the droplet diameters of both sides were smaller. For instance, when the spraying pressure was 0.4 MPa, the droplet diameters of the middle droplet were 265 ~ 268 μm and the droplet diameters of both sides were 250 ~ 252 μm on the test surface at height of 300 mm. The new nozzle was beneficial to solve the insufficiency of uneven droplet size distribution of boom sprayers in field operation. The characteristics of the new nozzle were analyzed theoretically and the three times of atomization (disturbance, impact and oscillating) in the cracking-zone was considered as the fundamental cause of these characteristics. Meanwhile, the droplet distribution uniformity of spray field was quantified by the radial nonuniformity index (RNI). It proved that the radial nonuniformity index can reflect the overall non-uniformity of spray field. The value of radial nonuniformity index was varied in a small range (0.47 ~ 0.51) when the pressure was in the range

收稿日期: 2018-07-24 修回日期: 2018-10-21

基金项目: 国家林业局 948 项目(2015-4-56)和安徽高校自然科学研究重点项目(KJ2018A0543)

作者简介: 董福龙(1978—),男,博士生,安徽科技学院讲师,主要从事现代机械设计理论与方法研究, E-mail: alone79@163.com

通信作者: 周宏平(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事植保机械装备与技术研究, E-mail: hpzhou@njfu.edu.cn

of 0.6 ~ 0.7 MPa, showing that the spray field of the impinging nozzle had good droplet uniform distribution. The impinging nozzle provided a beneficial technological support for the development of intelligent precision spraying machine for plant protection.

**Key words:** impinging nozzle; spray field; droplet size; impinging jets; distribution characteristics

## 0 引言

目前,装有扇形喷头的喷杆式喷雾机被广泛应用于大田作物的病虫害防治中<sup>[1]</sup>,水平杆上的喷头按一定间隔安装,作业时相邻的喷雾扇形面部分叠合,以保证某一喷雾高度处水平方向上各点药液喷洒一致,从而实现施药液量均匀的目的。然而,扇形喷头喷雾扇面内不同位置处的液滴直径是不相同的,这就造成喷雾机喷杆上各喷头喷雾扇面叠合后液滴直径分布的不均匀,相邻两喷头扇形边缘叠合区的液滴比未叠合区的扇面中心区域的液滴大很多,而液滴直径对农药在靶标上沉积行为和防治效果又有重要影响<sup>[2]</sup>,这就导致在某一喷雾高度处水平方向上各点处的液滴在靶标上的沉积行为不同,致使防治效果存在差异。农林作物病虫害防治的最终目标是要达到防治效果均匀、无防效不足或药害的现象,其关键在于均匀施药<sup>[3]</sup>,因此研究改善扇形喷头的液滴直径分布,优化喷杆上喷头安装参数,对提高喷杆式喷雾机工作效率、控制减少药害和提高药液利用率有重要意义。

已有研究发现药液的液滴直径分布情况是影响农药在靶标上沉积量和分布均匀性的主要因素<sup>[4-5]</sup>。当前许多新成分农药的选用量不超过 70 g/hm<sup>2</sup>,使用此用量的农药要充分发挥效用必须使喷雾器产生能够均匀分布在靶标上的液滴<sup>[6]</sup>。而喷头是喷雾机喷雾系统的关键部件,作业过程中的施药量、液滴大小和粒径均匀度等衡量喷雾质量的关键性指标都由其性能决定<sup>[7]</sup>。吕晓兰等<sup>[8]</sup>对扇形喷头雾化场液滴的空间分布和运动进行分析,发现液滴直径在逐渐远离喷头的截面上呈现中间小边缘大的凹形椭球面分布,液滴速度在轴线方向呈

现中间大边缘小的山丘形分布;祁力钧等<sup>[9]</sup>通过试验研究了喷嘴类型、喷雾压力及布置高度等因素对液滴分布均匀性的影响,发现喷嘴类型对液滴分布均匀性影响较大,布置高度影响较小,提高喷施压力有助于改善液滴粒径均匀性;TUCK 等<sup>[10]</sup>对扇形喷嘴在农业喷雾中液滴尺寸和速度进行研究,发现获得均匀良好的靶标覆盖率的方法是减小液滴谱的同时增大液滴速度,其中提高液滴粒径均匀度更为重要。扇形喷头由于能实现从小到中等范围的液滴直径,防飘性较好且能产生高冲击力的液柱流或扇形喷雾,所以广泛应用于农林业生产<sup>[11]</sup>,但是存在喷雾扇形面内液滴直径中间小两侧偏大的粒径均匀性较差的问题<sup>[3,12-13]</sup>,本文研究基于射流和撞击流耦合作用的对冲喷头<sup>[14-15]</sup>的喷雾场,并运用径向不均匀指数来分析喷雾场液滴分布均匀性问题。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验喷头的喷雾装置如图 1 所示,图 1a 为装配情况,图 1b 为设计的喷头试制样件,图 1c 为新型喷头工作原理图。作为研究热点之一的撞击流是一种较新颖的技术方法,目前广泛应用在化学工程领域。研究发现两射流发生撞击能一定程度上均化液滴群粒径<sup>[16-17]</sup>,粒径均化表明在撞击过程中大液滴破碎的倾向较大,而且撞击越强烈越有利于粒径均化。试验的喷头样件是基于射流和撞击流耦合作用原理,使两股相向撞击的射流改变成以一定夹角相向高速冲击,并用一个喷头(或喷雾装置)实现,以获得大小均匀的液滴直径。

扇形喷头的液滴直径分布状态由喷头的终端出水口形状决定<sup>[18]</sup>,因此在设计时主要考虑对冲喷头

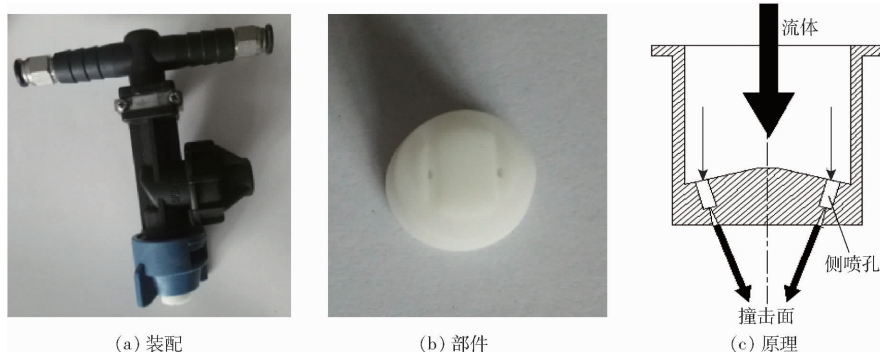


图 1 喷雾装置

Fig. 1 Atomization device

终端喷孔出水口形状的尺寸。对冲喷头外形尺寸根据装配部件的尺寸要求确定;两个出水口与单孔扇形喷头出水口设计要求一样,本次设计的对冲扇形喷头两个出水口的孔径和切槽角分别为 1 mm 和 30°,两出水口之间距离 7 mm,两射流撞击前喷雾面与垂直撞击面夹角是 15°,两侧喷孔的射流在撞击面碰撞后形成垂直向下的喷雾扇形面。

## 1.2 试验设计

扇形喷雾场中液滴直径在某一水平高度的液滴分布情况对药液在靶标上的沉积行为和防治效果有重要影响,粒径均匀的液滴在靶标上的沉积分布对病虫害防治有积极良好效果。试验研究对冲喷头扇形喷雾场的液滴直径分布特性对改善喷雾作业过程中喷雾机工作效率、提高防治效果和药液利用率有重要指导意义。

采用图 2 所示的喷头雾化性能测试系统对对冲喷头扇形喷雾场的液滴直径进行测试,该系统由药液雾化系统和液滴直径测试系统两部分组成。药液雾化系统主要由测试喷头雾化装置和药液供给系统组成,药液供给系统由水箱、电动机、柱塞泵、水压调节阀、流量计、压力表及连接管等组成;液滴直径测试系统主要由安装有 WX5-RODOS 软件的计算机和新帕泰克有限公司(德国)生产的 HELOS/QUTXEL 激光粒度记录仪等组成。试验在常温、无风的室内进行,介质为清水。

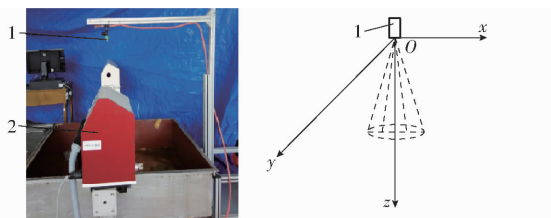


图 2 喷头雾化性能测试系统

Fig. 2 Test system for atomization performance of nozzle

1. 喷头 2. 激光粒度仪

试验前将喷头安装在试验台架上,如图 2 所示,喷头体轴线垂直向下,以对冲喷头终端两喷孔出水口中点的连接线中点为原点,垂直向下方向为  $z$  轴正方向,激光粒度仪接收端垂直穿过喷雾扇形面,水平向右为  $x$  轴正方向,垂直于喷雾扇形面向外为  $y$  轴正方向。 $x$ 、 $y$  和  $z$  轴方向符合右手螺旋关系。

按照仪器操作规程和液滴直径测试方法进行试验。由于装有扇形喷头的喷杆式喷雾机在作业时要求喷头与作物(或靶标)保持约 300 mm 的距离<sup>[19]</sup>,试验在距离原点沿  $z$  轴正方向 100、200、300、400 mm 水平高度上测试 4 个测试面的液滴直径,如图 3 所示。根据文献[8,20]测得,喷施压力 0.3 MPa、距离喷头终端喷孔出水口 500 mm 处时对冲喷头的喷幅为

425 mm,为评价喷雾场液滴分布情况,对如图 3 所示测试点进行测量,100 mm 水平高度测量距轴线 -35、0、35 mm 处的液滴直径,200 mm 水平高度测量距轴线 -70、-35、0、35、70 mm 处的液滴直径,300 mm 水平高度测量距轴线 -105、-70、-35、0、35、70、105 mm 处的液滴直径,400 mm 水平高度测量距轴线 -140、-105、-70、-35、0、35、70、105、140 mm 处的液滴直径,每个测试点数值取重复测试 3 次的平均值。

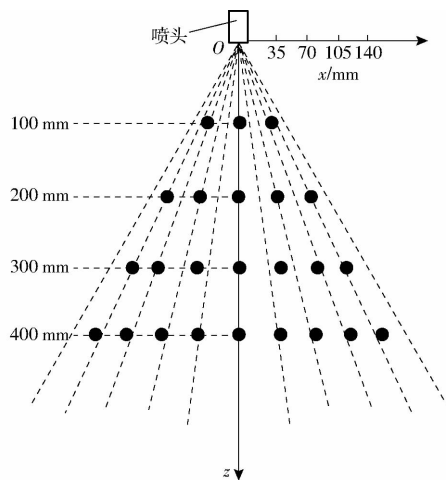


图 3 喷雾扇形面测试点

Fig. 3 Spray sector test points

## 1.3 评价方法

液滴尺寸与分布情况是衡量喷雾雾化质量的重要标准之一,在植保喷雾中经常采用体积中径(VMD)来评价雾化质量和表示雾化特性。VMD 是表示将取样液滴的体积按液滴从小到大的顺序累积,当累积值等于取样液滴体积总和的 50% 时所对应的液滴直径(也用  $D_{V50}$  表示)。

径向不均匀指数(Radial nonuniformity index, RNI)是设计出的一种新的非量纲指标<sup>[21]</sup>,主要用来量化流化床和其它多相流系统中流动参数径向变化的程度,已证明是对径向流动结构的一个很好的度量;赵娜等<sup>[22]</sup>利用径向不均匀指数来研究航空喷嘴喷雾场液滴周向分布特性,证明其比使用常规方法更简便。本文用径向不均匀指数来定量表征对冲喷头喷雾场液滴分布均匀性问题。其表达式为

$$R(D) = \frac{s(D)}{\sqrt{(D_{\max} - \bar{D})^2 + (\bar{D} - D_{\min})^2}}$$

式中  $s(D)$ ——标准差

$D_{\max}$ 、 $D_{\min}$ —— $D$  测量值的最大值和最小值

$\bar{D}$ ——测量算术平均值

径向不均匀指数  $R(D)$  介于 0 到 1 之间,其值越大说明液滴分布均匀性越差。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 喷雾场液滴分布特性

喷施压力在 0.3 ~ 0.8 MPa 范围变化时, 对冲喷

头喷雾扇形面内的液滴直径尺寸分布情况如图 4 所示。 $z$  轴正方向垂直距离为  $H$ ,  $x$  轴方向水平距离为  $L$ , 图中圆点表示在该测试点测得的液滴直径, 圆点下数值表示在该测试点测得的液滴体积中径 ( $\mu\text{m}$ )。

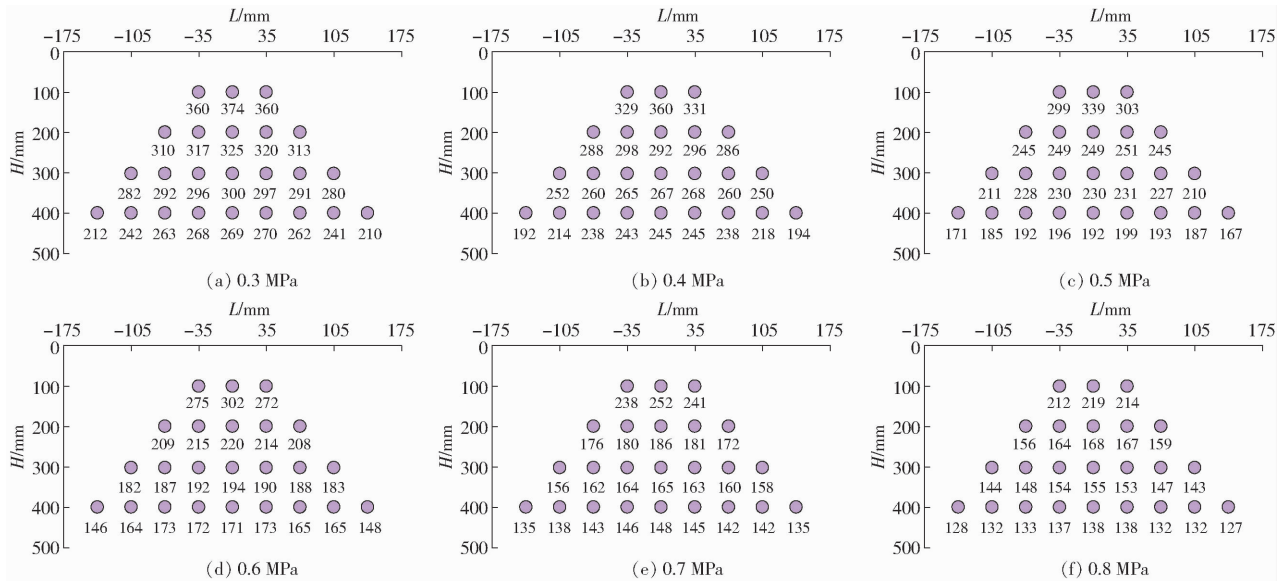


图 4 喷雾场液滴直径变化趋势

Fig. 4 Trends of droplet size change in spray field

由图 4 可见, 随着喷施压力的增大, 沿  $z$  轴正方向, 即测试面 1、2、3、4 处, 液滴直径逐渐变小, 例如喷施压力在 0.8 MPa 时, 液滴直径沿轴线方向从 219  $\mu\text{m}$  减小至 138  $\mu\text{m}$ ; 在同一水平高度, 液滴直径呈现中间液滴直径较大且均匀一致而两侧液滴直径偏小的情况, 随着喷施压力的增大两边测试点处液滴直径会接近中间区域位置液滴直径, 例如喷施压力 0.4 MPa 在 300 mm 测试面上, -35 ~ 35 mm 区间的液滴直径在 265 ~ 268  $\mu\text{m}$ , 而在靠近喷雾扇形面边缘处距轴线 105 mm 处的液滴直径是较小的 250 ~ 252  $\mu\text{m}$ , 当喷施压力增至 0.7 MPa 时, 在 -105 ~ 105 mm 区间的液滴直径在 156 ~ 165  $\mu\text{m}$ , 变动范围相差 9  $\mu\text{m}$ , 虽然随着喷施压力的增加喷雾扇形面的喷幅会略有增大, 但总体上液滴直径在同一水平高度上会趋向一致, 图 4d ~ 4f 都说明此规律; 喷施压力大于 0.7 MPa 时, 在 200 mm 和 400 mm 水平高度位置处的液滴直径有接近 300 mm 位置处液滴直径的趋势, 例如喷施压力在 0.3 MPa 时, 轴线上的液滴直径是 300  $\mu\text{m}$ , 在 200 mm 和 400 mm 处的液滴直径分别是 325  $\mu\text{m}$  和 269  $\mu\text{m}$ , 差值都在 25  $\mu\text{m}$  以上, 而当喷施压力增至 0.8 MPa 时, 在轴线上的液滴直径是 155  $\mu\text{m}$ , 而在 200 mm 和 400 mm 处的液滴直径分别是 168  $\mu\text{m}$  和 138  $\mu\text{m}$ , 差值不超过 17  $\mu\text{m}$ ; 植保机械喷头的喷施压力一般都在 0.2 ~ 0.5 MPa, 当压力超过 0.5 MPa 时, 液滴直径减小量很小, 而对冲喷头在喷施压力大于 0.6 MPa 时, 液滴直径还可快速减

小, 表明其可实现较宽的调压范围, 具有良好的调压特性。

由于对冲喷头液滴直径在喷雾扇形面内具有中间液滴直径较大且均匀一致而两侧液滴直径偏小的特点, 对安装在喷雾机喷杆上的各喷头来说, 喷雾扇形面叠合后会形成分布均匀的液滴直径喷雾面, 相邻两喷头扇形边缘叠合区的液滴直径趋向或接近未叠合区的扇面中间区域的液滴直径, 从而获得良好均匀一致的液滴直径, 这有利于药液在靶标上的沉积并实现较好的病虫害防治。

对于对冲喷头液滴直径在喷雾扇形面内呈现中间液滴直径较大且均匀一致而两侧液滴直径偏小的特点进行分析, 认为对冲喷头的雾化全过程可划分为射流区、分裂区和雾化区(图 5)。

(1) 在射流区, 由于对冲喷头射流雾化是通过一个喷头(或雾化装置)实现的, 两股充分加速后形

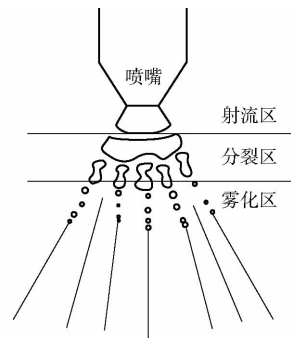


图 5 雾化过程示意图

Fig. 5 Schematic of atomization process

成的高速射流在喷头终端出水口附近以一定夹角相向高速流动,喷雾射流会在很短距离(很短时间)内受到空气扰动而变成非常薄的液层,射流区发生在两射流离开出水口至射流撞击中心一定距离处(两射流未发生撞击)。

(2)在分裂区,继续运动的液层会在惯性力和气-液交界面产生的扰动与外力作用下横向切断而产生分裂,该雾化称为第1次雾化(即扰动雾化);两液层在撞击面(撞击中心)相互撞击,由于射流的撞击引起高动量的传递,再加上液体分子是紧密聚集的凝聚状态,在撞击时液体之间必然发生强烈的相互作用,有液体流团或(和)分子之间相互碰撞、剪切、挤压等作用,致使液团(液滴)尺寸迅速减小,撞击会使喷雾射流流团或(和)大液滴破碎,较小液滴相互结合(并聚)成大一些的液滴,总体上使流团或(和)液滴在撞击区趋向一致,达到均化,喷施压力越大,撞击越激烈则流团或(和)液滴均化越明显,该雾化称为第2次雾化(即撞击雾化);由于液体相撞冲击流间强烈的动量传递和相互作用必然导致强烈的微观混合和在撞击区产生压力波动,同时射流带动的空气在撞击时也会发生冲击和振荡,这意味着流团或分子之间会发生振动,使得部分能量转化为振动能,致使流团或(和)液滴进一步雾化,故在该区域又发生了第3次雾化(即振荡雾化)。根据雾化机理把3次雾化分别命名为扰动雾化、撞击雾化和振荡雾化。对冲喷头撞击分裂模型如图6所示。扇形喷头在分裂区仅发生第1次雾化(即扰动雾化),而对冲喷头经历了3次雾化,形成了分割尺寸均匀的流团或(和)液滴,其对后续雾化区形成良好均匀一致的液滴直径有重要影响。

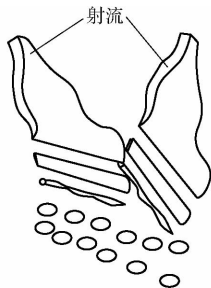


图6 喷头撞击分裂模型

Fig. 6 Splitting model of impinging nozzle

(3)在雾化区,产生分裂且趋向一致均化的流团或(和)液滴继续发展进行线性运动(在流体动力学中这种线型液滴的轨迹称为流线,其具有流线形状不随时间变化且流线不能交叉也不能弯折的特点),在气动力、惯性力、粘性力和表面张力等各种力的相互作用下,进一步分裂破碎成细小均匀的液滴,其运动轨迹与轴线方向形成了一定的夹角,形成

喷雾扇形面,当夹角大于某一角度时,两侧液滴运行距离增加的同时受各种力(重力、空气阻力等)作用会使液滴尺寸减小,这就造成喷雾扇形面两侧液滴尺寸偏小的情况。

## 2.2 喷雾场液滴分布均匀特性

借助于径向不均匀指数,对喷施压力在0.3~0.8 MPa范围内变化时的液滴雾化规律进行分析。表1给出了不同喷射压力下100、200、300、400 mm测试面的 $R(D_{v50})$ 值。

表1  $R(D_{v50})$ 的分布特性

Tab. 1 Distribution characteristics of  $R(D_{v50})$

喷施压力/ MPa	H/mm			
	100	200	300	400
0.3	0.63	0.49	0.49	0.51
0.4	0.62	0.54	0.51	0.52
0.5	0.61	0.56	0.55	0.45
0.6	0.61	0.51	0.48	0.48
0.7	0.60	0.49	0.47	0.48
0.8	0.59	0.54	0.53	0.49

由表1可见,喷施压力在0.3~0.8 MPa范围变化时,在100 mm水平高度测试面上的 $R(D_{v50})$ 不小于0.59,其液滴直径分布特性最差,主要是由于测试位置离喷头出水口较近且测试点较少,液滴未充分雾化且喷雾扇形面较小,实际作业中一般不选择该位置;一般情况 $R(D_{v50})$ 随着喷施压力增大而减小,如在100 mm位置处从0.63降至0.59; $R(D_{v50})$ 随着喷雾距离的增大而减小,如压力在0.6 MPa时,其值从0.61降至0.48,表明在测试范围内喷雾场液滴直径均匀性随着喷雾距离的增加而变好;喷施压力0.3~0.4 MPa在400 mm处的 $R(D_{v50})$ 为0.51~0.52,比在300 mm处的0.49~0.51大一些,说明在300 mm水平高度附近喷雾场液滴直径均匀性较好,这与李秉礼<sup>[19]</sup>指出的装有扇形喷头的喷杆式喷雾机在作业时要求喷头与作物保持300 mm距离建议相符合;随着喷施压力的增大液滴飘移会对测试结果有一定影响,压力0.8 MPa时在200~400 mm范围内的 $R(D_{v50})$ 是0.49~0.54,比0.7 MPa时的0.47~0.49增大一些,说明喷雾场液滴直径均匀性会随着喷施压力增加变差;喷施压力在0.6~0.7 MPa范围时, $R(D_{v50})$ 在0.47~0.51范围内变化,喷雾场在该压力范围内相对具有良好的液滴均匀分布特性;由于已知的 $R(D_{v50})$ 都在0.5上下,说明该喷头喷雾扇形面液滴直径分布相对较差,表征结果与试验结果基本一致,能总体上反映喷雾场液滴直径的非均匀性。

### 3 结论

(1) 提出的基于射流和撞击流耦合作用的对冲喷头经试验证明具备可行性, 该喷头为精准施药技术提供了技术支持。

(2) 对冲喷头喷雾扇形面的液滴直径呈现中间液滴直径较大且均匀一致而两侧液滴直径偏小的特性, 如喷施压力 0.4 MPa 在 300 mm 水平高度测试面上, 中间的液滴直径在 265 ~ 268  $\mu\text{m}$ , 而靠近边缘处的液滴直径在 250 ~ 252  $\mu\text{m}$ , 该特性有利于解决喷杆式喷雾机大田作业时液滴直径分布不均

匀的问题。同时对冲喷头具有较宽的压力调节范围, 在喷施压力大于 0.6 MPa 时液滴直径还可快速减小。

(3) 提出了在雾化过程的分裂区经历 3 次雾化 (即扰动雾化、撞击雾化和振荡雾化) 是造成液滴直径均匀一致的根本原因。

(4) 把径向不均匀指数应用于植保喷头喷雾场液滴分布特性的定量表征分析, 发现径向不均匀指数能总体上反映喷雾场液滴直径的非均匀性。喷施压力在 0.6 ~ 0.7 MPa 时, 对冲喷头喷雾场具有良好的液滴均匀分布特性。

### 参 考 文 献

- JENSEN P K, OLESEN M H. Spray mass balance in pesticide application: a review[J]. *Crop Protection*, 2014, 61: 23 - 31.
- HILZ E, VERMEER A W P. Spray drift review: the extent to which a formulation can contribute to spray drift reduction[J]. *Crop Protection*, 2013, 44: 75 - 83.
- 王双双, 何雄奎, 宋坚利, 等. 农用喷头雾化粒径测试方法比较及分布函数拟合[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(20): 34 - 42. WANG Shuangshuang, HE Xiongkui, SONG Jianli, et al. Measurement comparison and fitted distribution equation of droplet size for agricultural nozzles[J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(20): 34 - 42. (in Chinese)
- 袁会珠, 杨代斌, 闫晓静, 等. 农药有效利用率与喷雾技术优化[J]. *植物保护*, 2011, 37(5): 14 - 20. YUAN Huizhu, YANG Daibin, YAN Xiaojing, et al. Pesticide efficiency and the way to optimize the spray application[J]. *Plant Protection*, 2011, 37(5): 14 - 20. (in Chinese)
- 王沛, 祁力钧, 李慧, 等. 植物叶片表面结构对雾滴沉积的影响分析[J/OL]. *农业机械学报*, 2013, 44(10): 75 - 79. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20131013&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20131013&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.10.013. WANG Pei, QI Lijun, LI Hui, et al. Influence of plant leaf surface structures on droplet deposition[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(10): 75 - 79. (in Chinese)
- 杨君. 喷雾机械的喷雾均匀性试验研究[J]. *湖南农机*, 2012, 39(3): 55 - 60. YANG Jun. Experimental study based on nozzle spray uniformity[J]. *Hunan Agricultural Machinery*, 2012, 39(3): 55 - 60. (in Chinese)
- 董福龙, 周宏平. 国外植保喷头技术开发进展[J]. *江西农业大学学报*, 2018, 40(4): 866 - 874. DONG Fulong, ZHOU Hongping. Development of foreign plant nozzles[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2018, 40(4): 866 - 874. (in Chinese)
- 吕晓兰, 何雄奎, 宋坚利, 等. 标准扇形喷头雾化过程测试分析[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(9): 95 - 100. LÜ Xiaolan, HE Xiongkui, SONG Jianli, et al. Analysis of spray process produced by agriculture flat-fan nozzles[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(9): 95 - 100. (in Chinese)
- 祁力钧, 傅泽田. 不同条件下喷雾分布试验研究[J]. *农业工程学报*, 1999, 15(2): 107 - 111. QI Lijun, FU Zetian. Experimental study on spray deposition uniformity[J]. *Transactions of the CSAE*, 1999, 15(2): 107 - 111. (in Chinese)
- TUCK C R, ELLIS M C B, MILLER P C H. Techniques for measurement of droplet size and velocity distributions in agricultural sprays[J]. *Crop Protection*, 1997, 16(7): 619 - 628.
- 张慧春, GARY D, 郑加强, 等. 扇形喷头雾滴粒径分布风洞试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2012, 43(6): 52 - 57. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20120610&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120610&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.06.010. ZHANG Huichun, GARY D, ZHENG Jiaqiang, et al. Wind tunnel experiment of influence on droplet size distribution of flat nozzles[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(6): 52 - 57. (in Chinese)
- 刘秋生. M5 型喷嘴喷液液滴粒径分布实验研究[J]. *华东电力*, 2014, 42(3): 622 - 626. LIU Qiusheng. Experimental research of M5 nozzle droplet particle size distribution[J]. *East China Electric Power*, 2014, 42(3): 622 - 626. (in Chinese)
- 时玲, 张霞, 吴红生, 等. 扇形喷头雾量分布均匀性的试验研究[J]. *云南农业大学学报*, 2011, 26(3): 389 - 394. SHI Ling, ZHANG Xia, WU Hongsheng, et al. Experimental research on spray distribution uniformity of fan nozzle[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2011, 26(3): 389 - 394. (in Chinese)
- 董福龙, 周宏平, 许林云, 等. 自激对冲雾喷头: 20161085810.1[P]. 2018 - 09 - 21.

- 1964, 179(6): 16-22.
- 3 HETTIARATCHI D R P, REECE A R. Symmetrical three-dimensional soil failure [J]. *Journal of Terramechanics*, 1967, 4(3): 45-67.
- 4 McKYES E, ALI O S. The cutting of soil by narrow blades [J]. *Journal of Terramechanics*, 1977, 14(2): 43-58.
- 5 GODWIN R J, SPOOR G. Soil failure with narrow tines [J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1977, 22(4): 213-228.
- 6 GODWIN R J. A review of the effect of implement geometry on soil failure and implement force [J]. *Soil & Tillage Research*, 2007, 97: 331-340.
- 7 ZHANG J, KUSHWAHA R L. Dynamic analysis of a tillage tool; Part I. Finite element method [J]. *Canadian Agricultural Engineering*, 1998, 40: 287-292.
- 8 ARMIN A, SZYSZKOWSKI W, FOTOUHI R. 3D finite element analysis of curved blade's mechanics in farming tillage operations [C] // *Proceedings of the World Congress on Engineering*, 2016: 1-6.
- 9 REN L Q, HAN Z W, LI J Q, et al. Effects of non-smooth characteristics on bionic bulldozer blades in resistance reduction against soil [J]. *Journal of Terramechanics*, 2002, 39(4): 221-230.
- 10 REN L Q, HAN Z W, LI J Q, et al. Experimental investigation of bionic rough curved soil cutting blade surface to reduce soil adhesion and friction [J]. *Soil & Tillage Research*, 2006, 85: 1-12.
- 11 TONG J, JI W F, JIA H L, et al. Design and tests of biomimetic blades for soil-rototilling and stubble-breaking [J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2015, 12: 495-503.
- 12 张金波, 佟金, 马云海. 仿生减阻深松铲设计与试验 [J/OL]. *农业机械学报*, 2014, 45(4): 141-145. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20140422&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140422&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.04.022.
- ZHANG Jinbo, TONG Jin, MA Yunhai. Design and tests of bionic subsoiler for reducing soil resistance [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(4): 141-145. (in Chinese)
- 13 佟金, 张清珠, 常原, 等. 仿生镇压辊减粘降阻的有限元分析与试验验证 [J/OL]. *农业机械学报*, 2014, 45(7): 85-92. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20140714&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140714&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.07.014.
- TONG Jin, ZHANG Qingzhu, CHANG Yuan, et al. Finite element analysis and test verification of the viscosity-reducing and resistance-reducing abilities of bionic roller [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(7): 85-92. (in Chinese)
- 14 任露泉, 梁云虹. 仿生学导论 [M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- 15 施新泉. 原来如此——千姿百态的动物 [M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 2005.
- 16 GODWIN R J, SPOOR G, SOOMRO M S. The effect of tine arrangement on soil forces and disturbance [J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1984, 30(1): 47-56.
- 17 GODWIN R J, O' DOGHERTY M J. Integrated soil tillage force prediction models [J]. *Journal of Terramechanics*, 2007, 44(1): 3-14.
- 18 BOX G E P, BEHNKEN D W. Some new three level designs for the study of quantitative variables [J]. *Technometrics*, 1960, 2(4): 455-475.
- 19 GHOSH B N. The power requirement of a rotary cultivator [J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1967, 12(1): 5-12.
- 20 STAFFORD J V. The performance of a rigid tine in relation to soil properties and speed [J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1979, 24(1): 41-56.

(上接第 121 页)

- 15 董福龙, 周宏平, 易克传. 基于产品语义分析的自激对冲喷头概念设计 [J]. *农机化研究*, 2019, 41(3): 199-203.
- DONG Fulong, ZHOU Hongping, YI Kechuan. Conceptual design of self-excited collision nozzle based on semantic analysis [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2019, 41(3): 199-203. (in Chinese)
- 16 ASHGRIZ N, GIVI P. Binary collision dynamics of fuel droplets [J]. *International Journal of Heat & Fluid Flow*, 1987, 8(3): 205-210.
- 17 伍沅. 撞击流: 原理·性质·应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- 18 李旭, 吴春笃, 王光亮, 等. 低流量扇形雾喷头的设计 [J]. *农业机械学报*, 2002, 33(4): 38-41.
- LI Xu, WU Chundu, WANG Guangliang, et al. Design of a low atomizer with fan-shaped spraying [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2002, 33(4): 38-41. (in Chinese)
- 19 李秉礼. 植保机械 [M]. 北京: 科学普及出版社, 1984.
- 20 董向丽, 王思芳, 孙家隆. 农药科学使用技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- 21 ZHU J X, MANYELE S V. Radial nonuniformity index (RNI) in fluidized beds and other multiphase flow systems [J]. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2001, 79(2): 203-213.
- 22 赵娜, 余永刚, 陆欣, 等. 对撞喷嘴喷雾场周向分布特性的实验研究 [J]. *弹道学报*, 2013, 25(3): 95-99.
- ZHAO Na, YU Yonggang, LU Xin, et al. Experiment study on circumferential distribution characteristics in spray field of impinging jet injector [J]. *Journal of Ballistics*, 2013, 25(3): 95-99. (in Chinese)