扇形雾喷头雾滴飘失机理*

宋 坚 利¹ 刘 亚 佳¹ 张 京¹ 何 雄 奎¹ 曾 爱 军¹ Herbst A² (1. 中国农业大学理学院, 北京 100193; 2. 德国联邦耕作物研究中心, Messeweg 11/12 D - 38104 不伦瑞克, 德国)

【摘要】 为了分析雾滴飘失机理和提出针对性的防飘措施,使用相位多普勒粒子分析仪(PDPA)对常规扇形 雾喷头雾化产生的喷雾扇面中的雾滴粒径与运动速度分布进行了分析。结果表明:喷雾截面上雾滴体积中值直径 (VMD)分布为中间低、边缘高的凹面形态,在喷雾扇面横向和纵向对称面上,VMD形态呈二次多项式分布;易飘失 雾滴主要集中在距离喷头 300~500 mm喷雾扇面的中心位置;喷雾扇面截面上的夹带气流速度符合高斯分布,气 流分布与空气淹没射流类似;喷雾扇面中易飘失区域是喷雾扇面末端、喷雾扇面两翼、喷雾扇面迎流面外层。

关键词:扇形雾喷头 喷雾 雾滴 飘失 机理 中图分类号: S491 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)06-0063-07

Drift Mechanism of Flat Fan Nozzle

Song Jianli¹ Liu Yajia¹ Zhang Jing¹ He Xiongkui¹ Zeng Aijun¹ Herbst A²

(1. College of Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China

2. Federal Research Centre for Cultivated Plants, Messeweg 11/12 D-38104 Braunschweig, Germany)

Abstract

In order to research the drift mechanism and develop effective anti-drift technology, phase Doppler particle analyzer (PDPA) was used to analyze droplets size and velocity distribution in spraying fan near flat fan nozzles. Results showed that the distribution of droplets size (VMD) in spraying fan sectional view was like a concave, and droplets size varied following quadratic polynomial in cross-symmetry plane and lengthwise-symmetry plane of spraying fan. Droplets drifting easily were located in the 300 ~ 500mm of the centre of spraying fan far from nozzles. Entrained air velocity in spraying fan varied following Gauss distribution, and the flow field of entrained air was similar to a submerged air jet. Major drifting areas were evaluated depending on the droplets size and velocity distribution in spraying fan. Results showed that there were three major drifting areas in spraying fan: cross edges of spraying fan, wake region of spraying fan and outer layer facing wind of spraying fan.

Key words Flat fan nozzle, Spraying, Droplet, Drift, Mechanism

引言

农药喷施过程中,部分农药雾滴会被气流携带 向非靶标区域飘移而造成飘失。随着农药用量的增 加,农药飘失所造成的动植物药害、环境污染等问题 日益突出。开展对农药雾滴飘失机理的研究,对指 导施药方法、研究开发高效施药机具、提高农药利用 效率、减轻农药对非靶标生物的影响和环境压力具 有重要意义。

农药飘失是一个复杂的问题,影响雾滴飘失的 相关因素很多,如药液特性、施药机具和使用技术、 气象因素、操作者操作技能等^[1-5]。雾滴场中所含 的小雾滴的数量是影响农药飘失量的最主要因素, 研究表明粒径小于 100 μm 的雾滴最易飘移,粒径

收稿日期:2010-07-15 修回日期:2010-09-02

^{*} 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2008AA100904)和国家自然科学基金资助项目(30800728、30971940)

作者简介: 宋坚利,讲师,主要从事高效施药技术与机具研究, E-mail: songjianli170@163.com

通讯作者: 何雄奎,教授,博士生导师,主要从事高效施药技术与机具研究, E-mail: xiongkui@ cau. edu. cn

400 μm 的雾滴有飘移的可能^[6-7]。因此,目前主要 的防飘手段是控制易飘失雾滴的运动和减少易飘失 雾滴量。为采取有效的防飘措施,必须对喷雾过程 中雾滴在喷雾扇面中的雾滴粒径分布和运动规律等 动力学特性进行研究。本研究的目的是测试常规扇 形雾喷头雾化产生的喷雾扇面中雾滴粒径与速度分 布,分析雾滴飘失机理,以提出有针对性的防飘措施。

1 试验装置与方法

试验在德国联邦农作物研究中心(JKI)施药技 术研究部测试中心进行,使用相位多普勒粒子分析 仪(phase Doppler particle analyzer,简称 PDPA)测试 扇形雾喷头雾化产生的喷雾扇面空间中各点的雾滴 粒径分布、雾滴的运动速度,PDPA 粒径测量精度 0.5%,速度测量精度 0.2%。测试所用的喷头选用 德国 LECHLER 公司生产的 LU120-03 型常规扇形 雾喷头,喷雾压力 0.3 MPa,流量 1.17 L/min,喷头 喷雾角 120°。测试过程中室温恒定,试验介质为清 水。



1.1 测试点的设置

扇形雾喷头雾化产生的雾流是截面为椭圆形的 喷雾扇面,为准确地测量喷雾扇面中的雾滴粒径与 运动速度分布,在三维空间内设置测量点,如图1所 示。设定喷头所在位置为空间中的原点(0,0,0), 截面椭圆形长轴与喷头形成的面(x=0)为扇面横 向对称面,短轴与喷头形成的面($\gamma = 0$)为纵向对称 面,x 轴垂直喷雾扇面,y 轴平行于喷雾扇面,z 轴为 雾流中轴线,垂直向下为z轴正向。因为LU系列喷 头的喷雾高度一般为500 mm,所以沿z轴方向每隔 100 mm 设置一个测试平面,在每个测试平面中将椭 圆短轴进行4等分,确定5条测试线,将喷雾扇面 x 轴方向进行16份等角度等分,角等分线在每个测试 平面内与5条测试线的交点为测试点。测量点空间 位置坐标如表1所示。由于雾滴运动过程中能量衰 减,所以喷雾扇面截面不能呈现标准的椭圆形,在实 际测量过程中很难测试到清晰的雾流边界线。为了 得到精准的试验数据,在实际测试的过程中对相距 较远的两点间适当插入测量点。



图1 测试点分布

Fig. 1 Distribution of sample points

	表 1	测量点坐标信息					
Tab. 1	Information	of coordinates	for	the	test	poir	

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

1.2 测量方法

在测试过程中,将 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三维坐标架运动,从而使喷头自动运行到指定位置,保证测量点的精准定位。喷雾过程中,PDPA 记录并显示雾滴测试数据及分布曲线,数据自动分类保存。测试过程中,在边界点至少测量 3 000 个雾滴,接近中心位置的测试点测量

5000个雾滴。数据通过 Matlab 进行分析。

2 试验结果与分析

2.1 雾流中雾滴粒径空间分布

吕晓兰等测试数据显示,在远离喷头(z≥200 mm)的测试平面上雾滴体积中值中径(VMD) d_{vMD}空间图具有相似结构,均呈现边缘高、中间洼的 凹面形状,这说明喷雾扇面边缘位置的雾滴粒径大 于中间位置的雾滴粒径^[8]。为了进一步研究雾滴 粒径的空间分布,根据测试数据绘制测试平面的 VMD 平面势量图。图 2 所示为距离喷头 500 mm 的 测试平面 VMD 平面势量图。







分析势量图发现,势量线轮廓为不规则的椭圆 形,这与喷雾扇面截面的形状类似。数据显示,从中 心向雾流边界区域发展,雾滴 VMD 逐渐增大,尤其 在椭圆长轴方向雾滴 VMD 增大趋势最明显,因此 喷雾扇面横向边缘区域的雾滴粒径最大。将扇面横 向和纵向对称面中的雾滴 VMD 数据进行多项式拟 合(图 3, 表 2) 表明, 在远离喷头的测试面(z ≥200 mm)上,处于两个对称面上雾滴 VMD 拟合曲 线均符合二次多项式分布。在横向对称面上,随 着与喷头的距离增加拟合曲线的二次项系数成直 线递减,在喷雾扇面横向方向上雾滴粒径差异逐 渐变小。随着与喷头距离增加,小雾滴逐渐由中 心区域向边缘区域扩散。在喷雾扇面纵向方向 上,拟合曲线二次项系数随着与喷头距离的增加 而递增,距离喷头越远喷雾扇面中心区域的细小 雾滴的比例越大。



图 3 喷雾扇面对称面上雾滴 VMD 分布 Fig. 3 VMD distribution at symmetry planes of spraying fan (a)扇面横向对称面 (b)扇面纵向对称面

表 2 喷雾扇面对称面上 VMD 分布拟合公式 Tab. 2 Fitting formula of VMD distribution at symmetry planes of spraying fan

z/mm	横向对称面(x=0)	纵向对称面(y=0)
200	$d_{\rm VMD} = 0.001 \ 2y^2 + 0.006y + 48.689$	$d_{\rm VMD} = 0.\ 004\ 2x^2 + 0.\ 024\ 7x + 59.\ 44$
300	$d_{_{\rm VMD}} = 0.\ 000\ 8y^2 + 0.\ 010\ 9y + 55.\ 128$	$d_{\rm VMD} = 0.007\ 6x^2 + 0.018\ 8x + 70.763$
400	$d_{\rm VMD} = 0.\ 000\ 6y^2 - 0.\ 007\ 5y + 67.\ 675$	$d_{\rm VMD} = 0.\ 007\ 9x^2 + 0.\ 051\ 7x + 87.\ 089$
500	$d_{_{\rm VMD}} = 0.\ 000\ 4y^2 + 0.\ 010\ 7y + 85.\ 522$	$d_{\rm VMD} = 0.008 \ 1x^2 - 0.043 \ 6x + 98.366$

由于雾滴体积中值直径 VMD 并不能完整地描述雾滴的粒径分布以及雾滴谱中不同粒径雾滴的所 占的比例,因此必须对不同粒径雾滴分别进行研究。 将雾滴粒径从大到小分组,计算各组雾滴所占体积 比例。设定雾滴粒径 100 μm 以下的雾滴为易飘失 雾滴,因此通过计算粒径小于 100 μm 的雾滴量就可 计算出雾流扇面中各测试点的易飘失雾滴总流量。 计算公式为

$$Q_{\rm drift} = \frac{\sum \frac{1}{6} \pi d_i^3 n_i}{t} \tag{1}$$

式中 Q_{drift}——易飘失雾滴总流量

d_i——各组平均雾滴直径

n_i——雾滴个数 t——测试时间

图 4 为喷雾扇面对称面上易飘失雾滴的流量分 布图。由图可以看出,易飘失雾滴主要集中在喷雾 扇面中心区域,越靠近喷雾扇面边缘位置易飘失雾 滴的流量越小;易飘失雾滴流量最大的地方处于距 离喷头 300~500 mm 的区域内,这就意味着如果环 境气流能够将这个区域的细小雾滴吹离喷雾扇面, 将造成严重的飘失。



学

报

(a) 横向对称面 (b)纵向对称面

喷雾扇面中雾滴速度分布 2.2

图 5 为 LU120-03 型喷头喷雾压力 0.3 MPa 时 喷雾扇面横向对称面上雾滴粒径为100 µm 的雾滴 运动速度分布。由图可知,粒径为100 µm 雾滴的运 动速度随着与喷头距离的增加而逐渐减小。在每个 测试平面上,从喷雾扇面中心位置到喷雾扇面边缘, 雾滴的运动速度逐渐降低;距离喷头越远(z≥ 400 mm),雾滴运动速度的衰减程度越小,这说明当 细小雾滴运动到喷雾扇面尾部时,其运动速度将趋 向一致。



symmetry plane of spraying fan

喷雾扇面中流量分布 2.3

6

4

3

2

1 0

50

 $Q/\mathrm{mL}\cdot\mathrm{min}^{-1}$ 5

图 6 为喷雾扇面中横向对称面和纵向对称面的 喷雾流量分布。由图可知,两个对称面上喷雾扇面

100

150

v/mm

(a)

2.00



2.4 零流中夹带气流速度分布

图 7 为 LU120-03 型喷头在 0.3 MPa 喷雾压力 下喷雾扇面横向对称面内的夹带气流速度 v"变化 曲线。对各个测试面上的数据进行最小二次拟合显 示每个测试面上的夹带气流速度符合高斯分布,测 试所得结果同 Smith 等建立的夹带气流速度公式比

较,相同点是气流速度分布均符合高斯分布 (y =

 $y_0 + \frac{A}{w \sqrt{\pi/2}} e^{-2\frac{(x-x_c)^2}{w^2}}$),由于 Smith 等模型建立的基

础是基于空气与雾滴的动量交换,所以建立的模型 与扇面中喷雾流量分布有关^[9]。根据 Smith 的理论 并结合本试验结果,可以确认喷雾扇面中夹带气流 的速度与喷雾流量分布相关。Smith 等在建立模型 时假设在喷雾扇面截面上的雾滴粒径均一,但是根 据2.1 节中得到的结论,在喷雾扇面截面上雾滴





z = 100 mm

z = 200 mm

250

300

=300 mm

=400 mm



plane of spraying fan

表 3 拟合公式中参数值

 Tab. 3
 Parameter values in fitting equipments

z/mm	Α	x _c	w	y_0	R^2
100	1 422. 8	4.30	111.26	2.13	0.96
200	2 145.8	5.15	218.25	0.75	0.97
300	1 751.1	0. 98	265.97	1.10	0.97
400	4 028.7	- 3. 81	518.65	- 0. 69	0.96

扇面中喷雾中心区域速度大于扇面边缘处的气 流速度,随着与喷孔距离的增加,中心处速度衰减, 并且中心与边缘处的速度差逐渐减小(图7)。这种 现象与空气淹没射流的主体段流场很相似,不同点 是夹带空气流场中不存在核心区和起始段,相同点 是随着距离的增加轴线流速逐渐减小,流速分布曲 线也趋于平坦,断面流速分布为高斯分布。因此,可 以在一定假设条件下将雾流中的夹带气流作为空气 射流来研究,认为雾流是气液两相混合射流,从这一 个角度研究就能够解释喷雾扇面中的雾滴粒径与运 动速度的分布情况。

射流发展过程中,会不断卷吸并混合外界气流 使得射流断面不断扩大,流速则不断减低,流量却沿 程增加。在喷雾过程中,喷雾扇面中间气流速度大 于边缘处气流速度,由于存在速度梯度,扇面边缘的 细小雾滴将被卷吸进入喷雾扇面中心位置,造成喷 雾扇面中心位置雾滴 VMD 小于边缘部分。在雾滴 运动初始阶段,雾滴雾化刚刚完成,不同粒径的雾滴 都具有比较大的动能,细小雾滴受到卷吸作用并不 显著,因此在距离喷头 100 mm 处并没有出现中间 VMD 小、边缘 VMD 大的情况。距离喷头 100 mm、 200 mm 时扇面外侧易飘失雾滴体积百分比大于内 侧(图 4)也是这个原因。雾滴运动过程中,细小雾 滴的动能由于空气阻力作用迅速衰减,此时扇面中 空气速度梯度较大,所以大量细小雾滴被卷吸入喷 雾扇面中心位置。当雾滴继续运动,扇面截面上的 空气流速分布趋于平坦,速度梯度减小,细小雾滴所 受到卷吸作用减弱,其运动轨迹开始向边缘扩展。 由于扇面中心位置的空气流速高于边缘部分,所以 中心处空气与雾滴的相对运动速度小,受到的空气 阻力小,在中心位置的雾滴运动速度大于边缘雾滴 的运动速度,使得在喷雾截面内同一大小的雾滴运 动速度分布呈现凸面峰形结构。

3 农药雾滴飘失机理分析

雾流中气流速度分布分析表明,喷雾雾流是气 液两相混合射流,夹带气流类似狭缝淹没空气射流 主体段,所以在外界气流中喷头喷雾的状态可以认 为是横流环境中有限宽窄缝气液两相射流流动现 象。

根据横流环境中射流相关理论^[10-15],由于喷雾 扇面对横向气流的阻抗使喷雾扇面迎流面压力大于 背流面压力,喷雾扇面主体沿横向气流方向逐渐弯 曲,最终其流向与横流流向一致。在靠近喷头区域, 雾滴动能和夹带气流速度以及雾滴密度都很大,横 流对其影响程度较小,易飘失雾滴在夹带气流的作 用下向靶标运动的能力较强,不易产生飘失。随着 与喷头距离的增加,扇面逐渐展开,雾滴运动速度和 夹带气流速度衰减,喷雾扇面的弯曲程度越来越大, 越来越多的细小雾滴将在横向气流的作用下脱离喷 雾扇面形成飘失,所以喷雾扇面末端是易造成飘失 的区域。张京等正是因为增加了罩盖对喷雾扇面末 端的保护而提高了双圆弧罩盖的防飘性能^[16]。

雾流中的液相由一个个雾滴组成,因此可将喷 雾扇面看作多孔介质,根据扇面中的雾滴粒径分布 与雾滴密度分布,此多孔介质是截面为椭圆形的扇 形结构,而且多孔介质中心部分的孔隙率小于扇面 边缘部分。连续相进入多孔介质后会产生速度降和 压力降,也就是说横向气流进入雾流后会受到雾滴 的阻力而使横向速度减小,因此喷雾扇面中心位置 对横向气流的阻力大于边缘位置对横向气流的阻 力。喷雾扇面的多孔介质结构以及夹带气流将阻挡 横向气流的运动,从而使横向气流会产生绕流分离 漩涡,在扇面下游方向出现方向相反的绕流分离涡 旋。综合喷雾扇面多孔介质结构与喷雾扇面中的夹 带气流与易飘失雾滴沉降速度分布,横向气流将侵 入喷雾扇面两翼,对雾滴产生横向作用力,将细小雾 滴吹离喷雾扇面,并进入绕流分离漩涡中,从而在喷 雾扇面下游产生的一对细小雾滴朝向喷雾扇面中心 相对旋转的绕流分离漩涡,如图8所示。这部分雾



图 8 绕流分离涡旋现象 Fig. 8 Turbulent behind spraying fan (a) 绕流涡旋俯视图 (b)绕流涡旋后视图

滴的沉降速度很低,极易受侧风影响而产生飘失,所 以喷雾扇面两翼部分也是易飘失区域。

由于喷雾扇面与横向气流的流速在方向和大小 上都有差异,在喷雾扇面主体边缘存在剪切层,形成 剪切型旋涡,在喷雾扇面上将产生迎流面涡层和背 流面涡层。由于涡层中涡流的旋转方向与沉降速度 相反,所以涡层中细小雾滴的沉降速度比较低,此部 分雾滴易被绕流横流夹带进入绕流漩涡中,形成飘 失,因此喷雾扇面迎流面外层也是易飘失区域。

4 结论

(1)在喷雾扇面横向对称面和纵向对称面上, 雾滴 VMD 分布符合二次多项式。在喷雾扇面横向 方向上,随着与喷头距离增加小雾滴逐渐由中心区 域向边缘区域扩散;在喷雾扇面纵向方向上,距离喷 头越远喷雾扇面中心区域的细小雾滴的比例越大。

(2)易飘失雾滴主要集中在喷雾扇面中心位

置,易飘失雾滴流量最大的位置处于距离喷头 300~ 500 mm 的区域内。

(3)粒径 100 μm 雾滴的运动速度随着与喷头 距离的增加逐渐减小,从喷雾扇面中心位置到喷雾 扇面边缘,雾滴的运动速度逐渐降低,当细小雾滴运 动到喷雾扇面尾部时,其运动速度将趋向一致。

(4)在喷雾扇面截面上,喷雾流量分布是一个 中心高、边缘低的峰状结构,雾滴数量密度分布也是 中心高、边缘低的峰状结构,说明中心位置的雾滴数 量最大,越靠近喷雾边缘,雾滴数量越小。

(5)喷雾扇面截面上的夹带气流速度符合高斯 分布,气流分布与空气淹没射流类似,可以在一定假 设条件下将雾流中的夹带气流作为空气射流来研 究,认为喷雾雾流是气液两相混合射流。

(6)确定了喷雾扇面中的易飘失区域是:喷雾 扇面末端、喷雾扇面两翼部分、喷雾扇面迎流面外 层。

参考文献

1 宋坚利,何雄奎,曾爱军,等. 罩盖喷杆喷雾机的设计与防飘试验[J]. 农业机械学报, 2007, 38(8): 74~77, 89.

Song Jianli, He Xiongkui, Zeng Aijun, et al. Design and anti-drift efficacy evaluation of a new shield boom sprayer [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(8): 74 ~ 77, 89. (in Chinese)

2 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):35~37,78.

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, 78. (in Chinese)

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 Miller D R, Stoughton T E, Steinke W E, et al. Atmospheric stability effects on pesticide drift from an irrigated orchard [J]. Transactions of the ASAE, 2000, 43(5): 1 057 ~ 1 066.
- 5 Hoffmann W C, Salyani M. Spray deposition on citrus canopies under different meteorological conditions[J]. Transactions of the ASAE,1996, 39(1): 17 ~ 22.
- 6 Zhu H, Reichard D L, Fox R D, et al. Simulation of drift of discrete sizes of water droplets from field sprayers [J]. Transactions of the ASAE, 1994, 37(5): 1 401 ~ 1 407.
- 7 Reichard D L, Zhu H, Fox R D, et al. Computer simulation of variables that influence spray drift[J]. Transactions of the ASAE, 1992, 35(5): 1 401 ~ 1 407.

- 69
- 8 吕晓兰,何雄奎,宋坚利,等.标准扇形雾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 Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(9):95~100. (in Chinese)
- 9 Smith R W, Miller P C H. Drift predictions in the near nozzle region of a flat fan spray [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1994, 59(2): 111 ~ 120.
- 10 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 Hohai University: Natural Sciences, 2006, 34(5): 530~533. (in Chinese)
- 11 姜国强,李炜. 横流中有限宽窄缝射流的旋涡结构[J]. 水利学报,2004,35(5):52~58.
 Jiang Guoqiang, Li Wei. Vortex structure of slot turbulent jets in cross-flow [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(5):52~58. (in Chinese)
- 12 李国能,周昊,杨华,等. 横流中湍流射流的数值研究[J]. 中国电机工程学报,2007,27(2):87~91.
 Li Guoneng, Zhou Hao, Yang Hua, et al. Numerical study of turbulent jet in cross-flow [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(2):87~91. (in Chinese)
- 13 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)
- 14 袁丽蓉,沈永明,郑永红.用 VOF 方法模拟横流下窄缝紊动射流[J].海洋学报,2005,27(4):155~160. Yuan Lirong, Shen Yongming, Zheng Yonghong. Simulation on a slit-type turbulent jet in a cross-flow using the VOF method [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2005, 27(4):155~160. (in Chinese)
- 15 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 Fan, 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)
- 16 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)

(上接第79页)

- 9 李羊林,吴春笃,傅锡敏.双级射流混药装置的试验研究[J].农业工程学报,2008,24(1):172~174. Li Yanglin, Wu Chundu, Fu Ximin. Experimental study on two-stage jet mixing apparatus[J]. Transactions of the CSAE, 2008,24(1):172~174. (in Chinese)
- 10 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 appratus pesticide mixture[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science, 2002,23(2):13~16. (in Chinese)
- 11 何培杰,陈翠英,吴春笃,等.两级射流泵混药装置试验研究[J].农业机械学报,2003,34(1):57~60.
 He Peijie, Chen Cuiying, Wu Chundu, et al. Experimental investigation of mixing apparatus with two stage jet pump[J].
 Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003,34(1):57~60. (in Chinese)
- 12 Pianthong K, Seehanam W, Behnia M, et al. Investigation and improvement of ejector refrigeration system using computational fluid dynamics technique[J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48(9): 2556 ~ 2564.
- 13 Zhu Y, Cai W, Wen C. Numerical investigation of geometry parameters for design of high performance ejectors [J]. Applied Thermal Engineering, 2009,29(5~6): 898~905.
- 14 Cho N, Hwang I, Lee C, et al. An experimental study on the airlift pump with air jet nozzle and booster pump[J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, 21(Supp. 1): 19 ~ 23.