

悬挂式常温烟雾机气流场与雾滴沉积三维模拟与试验*

李慧¹ 祁力钧¹ 王沛²

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 霍恩海姆大学杂草科学系, 斯图加特 70599)

摘要: 基于 CFD 三维模拟技术, 建立了常温烟雾机在密闭温室内作业的气流速度场模型及雾滴沉积分布模型, 分析了常温烟雾机的气流速度场及雾滴沉积分布特性, 并进行试验验证。模拟结果表明, 常温烟雾机有效风送距离与风送速度呈正比, 在喷雾高度为 1.5 m 时常温烟雾机风送距离最短; 风送速度为 5 m/s 和 25 m/s 时雾滴质量流量较大, 风送速度为 20 m/s 以上、喷雾高度在 2.0 m 以上时, 雾滴沉积均匀性较好。模拟与试验结果对比说明, 在风机作用区域内, 所建立气流速度场数值模型模拟相对误差为 10% ~ 35%, 雾滴沉积分布模型模拟相对误差为 15% ~ 35%, 可较准确预测常温烟雾机气流速度场与雾滴沉积分布。

关键词: 常温烟雾机 计算流体力学 气流速度场 沉积分布

中图分类号: S493^{+.1} **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)04-0103-07

引言

常温烟雾机是设施农业中病虫害防治的有效工具之一。其产生的气雾滴(体积中径约 30 μm) 在温室空间内弥漫分布, 具有良好的沉积均匀性^[1-4]。Austerweil 等分析了常温烟雾机雾滴在植株不同位置及叶片正反面的沉积率差异, 验证了常温烟雾机喷雾效果的均匀性及穿透性^[5]; Olivet 等分析了温室中常温烟雾机雾滴在辣椒枝叶上的分布及沉积效果, 认为在施药过程中改变烟雾机在温室中的位置有助于提高雾滴的分布均匀性^[6]。邱白晶等研究了密闭空间药液雾滴的沉积分布, 得出了雾滴沉积率分布曲面, 分析了沿温室长度方向上沉积质量的变化规律^[7]。

利用传统试验方法对烟雾机测试研究存在过程复杂、成本高和效率低等问题。而 CFD 技术能够精确设定试验条件, 快速、准确地进行模拟试验, 模拟过程可重复性强, 有效地规避了上述问题。Weiner 等利用 Fluent 软件对室外风送式喷雾机的喷雾流场进行模拟, 建立了气流场速度分布模型, CFD 力学模型能较准确地模拟喷雾机气流速度分布^[8-11]。崔志华等用 CFD 技术模拟了喷雾机在室外工作条件下雾滴的飘移问题^[12-14]。Tasy 等基于 CFD 技术模拟了机械式罩盖对喷雾机作业流场的影响^[15-16]。祁力钧等利用 Fluent 软件分别对果园风送式喷雾机

和背负式喷雾机雾滴沉积分布特性进行了模拟及定量试验验证^[17-18]。

目前, 对喷雾机雾滴沉积的模拟多针对粒径 100 μm 以上较大雾滴在开放式作业空间中的分布特性研究, 而对温室内常温烟雾机所产生平均粒径为 30 μm 雾滴的 CFD 三维模拟研究在国内外还未见报道。本文以实验室自制轨道悬挂式常温烟雾机为研究对象, 通过 CFD 技术三维模拟, 研究不同喷雾条件对雾滴沉积分布特性的影响, 并进行试验验证。

1 模型建立

1.1 模拟对象

以北京市农林科学院的玻璃温室为试验环境, 该温室长 50 m、宽 10 m、高 3 m。以悬挂式常温烟雾机为试验对象, 药箱容积 10 L, 雾滴体积中径约为 30 μm , 喷雾量 0 ~ 100 mL/min 可调, 喷雾高度在距地面 0.5 ~ 2.5 m 内可调, 风送速度 5 ~ 25 m/s 可调。

将常温烟雾机分别置于 0.5、1.0、1.5、2.0 和 2.5 m 喷雾高度, 选取 5、10、15、20 和 25 m/s 风送速度, 以建立不同喷雾高度及风送速度时烟雾机的气流场模型及雾滴沉积分布模型。

1.2 三维空间模型

在 Gambit 软件中建立温室空间模型及烟雾机

收稿日期: 2013-09-11 修回日期: 2013-10-11

* 农业部行业科技专项基金资助项目(201203025)

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

通讯作者: 祁力钧, 教授, 博士生导师, 主要从事植保机械与施药技术研究, E-mail: qilijun@cau.edu.cn

模型。长 50 m、宽 10 m、高 3 m 的长方体密闭空间为模拟温室(下文以 x 、 y 、 z 分别表示温室长、高、宽),高 0.4 m、直径 0.3 m 的圆柱体为模拟烟雾机,如图 1 所示。烟雾机的中心位置定于 $x = 5$ m、 $z = 0$ m 处,其喷雾高度分别置于 $y = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ 和 2.5 m,共建立 5 个三维模拟空间。

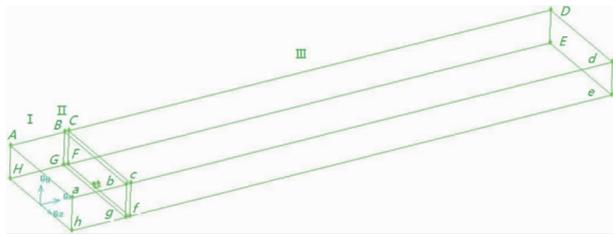


图 1 温室模拟喷雾区域结构图

Fig. 1 Structure for model of spraying space

以通过烟雾机模型前后壁面的两个内部面将模拟区域划分为 I、II、III 三部分,其中 I 为烟雾机喷雾后方区域,纵向边界网格以 0.1 m 为初始刻度,负向增长划分为 20 个间距递增单元;II 为烟雾机所在区域;III 为烟雾机喷雾前方区域,纵向边界网格以 0.1 m 为初始刻度,正向增长划分为 130 个间距递增单元,其余边界以 0.1 m 为间隔等距划分,模拟空间得网格单元总数共计 445 724 个。

连续相介质选用空气,边界条件设置:墙面 $AahH$ 、 $ADEH$ 、 $adeh$ 、 $AadD$ 、 $HheE$ 以及烟雾机模型侧面、沿 X 轴底面为壁面,墙面 $DdeE$ 为压力出口,烟雾机模型沿 X 轴正向底面为速度入口,流动区域分割面 $BbgG$ 、 $CcfF$ 为内部面。

离散相介质选用液体水,边界条件设置:墙面 $AahH$ 、 $ADEH$ 、 $adeh$ 、 $AadD$ 为反弹,地面 $HheE$ 为捕捉,墙面 $DdeE$ 为逃逸,流动区域分割面为内部面 $BbgG$ 、 $CcfF$ 不需设置。

1.3 流体控制方程

雾滴在空气介质中运动时受重力、空气阻力等因素的共同作用。模拟遵守多相流介质质量守恒、动量守恒和能量守恒定律,基于标准 $k-\varepsilon$ 两方程湍流模型展开,表达式为

$$\mu_t = C_\mu \frac{\rho k^2}{\varepsilon} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{\mu_t}{\rho} \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \right) \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \right) \quad (2)$$

$$G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (3)$$

$$G_b = -g \frac{\mu_t}{\rho \rho r} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (4)$$

$$Y_M = 2\rho\varepsilon M^2 \quad (5)$$

式中 μ_t ——湍流粘度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$

ρ ——流体密度, kg/m^3

k ——湍流动能, m^2/s^2

ε ——流体的湍流扩散率, m^2/s^3

x_i ——流体速度, m/s

x_k ——湍流速度, m/s

G_k ——平均速度梯度产生的湍流动能, m^2/s^2

C_μ ——常数,取 0.09

G_b ——由浮力产生的湍流动能, m^2/s^2

p ——流体压强, Pa

r ——特征长度, m

g ——重力加速度, m/s^2

Y_M ——可压缩湍流中脉动扩张的贡献率,流体不可压缩时, $Y_M = 0$

M ——可压缩湍流马赫数

1.4 模拟参数设置

根据试验及实际情况设置模拟参数为:①气流场模型:选择标准 $k-\varepsilon$ 两方程湍流模型,入口风速分别设置为 5、10、15、20 和 25 m/s ,对空气连续相进行迭代计算。②雾滴沉积分布模型:添加离散相模型,选择离散相、连续相耦合计算模型,设置耦合次数为 100 次,最大迭代次数为 1×10^6 次,并设置离散相为随机游走模型。离散相介质设为液态水,选用 surface 出口,出口面每网格喷出的粒子数为 100 个,共 2 500 个粒子,并设置服从 Rosin-Rammler 分布的雾滴模型^[19],最小粒径 2 μm ,最大粒径 70 μm (以上数据由激光粒度仪实际测得),计算得体积中径 32 μm ,Rosin-Rammler 分布系数为 2.47,喷雾流量设置为 1.5×10 g/s (即 90 mL/min)。其中 Rosin-Rammler 分布系数计算式为

$$Y_d = e^{-\left(\frac{d}{\bar{d}}\right)^n} \quad (6)$$

式中 Y_d ——直径大于 d 的雾滴的质量分数, %

d ——雾滴直径, μm

\bar{d} ——雾滴平均直径, μm

n ——分布指数

2 气流场模拟结果与试验验证

2.1 喷雾条件对气流场分布特性的影响

根据第二牛顿运动定律

$$F_x = F_{\text{air}} = ma_x \quad (7)$$

式中 F_x —— X 轴方向受力, N

F_{air} ——空气作用力, N

m ——雾滴质量, kg

a_x ——雾滴加速度, m/s^2

当 a_x 趋于零时,气流场对雾滴不再有水平方向的驱动作用。自然状态下,雾滴受气流作用力与雾滴粒径及空气密度等参数相关,并满足

$$f = k_0 \rho_0 A v \quad (8)$$

式中 f ——雾滴受气流作用力, N

k_0 ——系数, 空气取 0.45

ρ_0 ——空气密度, kg/m^3

A ——沙尘颗粒的截面积, m^2

v ——颗粒与空气的相对速度, m/s

可见, 当颗粒速度等于风速时, 气流场即不再对雾滴有水平方向的驱动作用。由文献[20]得知, 当气流速度随位移增加而减小至恒定不变或趋于零时, 可认为气流对雾滴不再有该气流速度矢量方向的驱动力。

图 2 为烟雾机轴线上的气流水平方向速度曲线。由图可知, 在喷雾高度为 0.5 m、出口风速为 5 m/s 时, 在温室长 22.5 m 处气流水平速度即不再减小并保持恒定。本文认为此作业条件下烟雾机 X 轴向的风送区域为 $x = 5.0 \sim 22.5 \text{ m}$, 风送距离为 17.5 m。

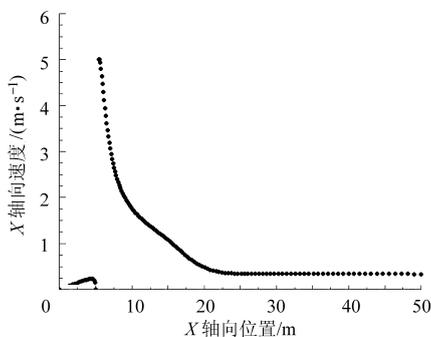


图 2 烟雾机 X 轴向气流速度曲线 ($y = 0.5 \text{ m}, v = 5 \text{ m/s}$)

Fig. 2 Curve of airflow-speed by X-axis

采集各模拟条件下烟雾机于 X 轴风送距离和回归方程如图 3 所示。

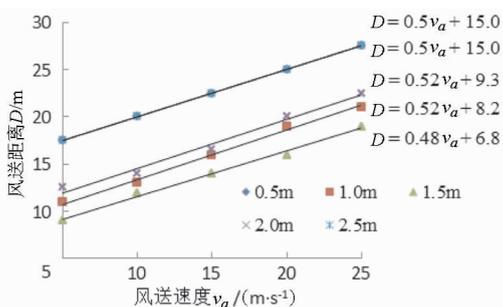


图 3 不同喷雾高度下风送距离与风送速度关系曲线

Fig. 3 Diagram of airflow speed and blowing distance

由变异系数计算公式

$$C_v = \frac{\sigma}{u} \quad (9)$$

式中 σ ——标准差 u ——平均数

得上述回归方程自变量系数变异系数 C_v 为 0.033 2。结果表明, 各方程自变量系数变化不显著, 风机风送速度与 X 轴方向风送距离呈线性正相关, 斜率为

0.5。

在相同作业风速下, 当烟雾机高度处于 0.5 ~ 1.5 m 时, 风机风送距离随高度增加而减小(图 4); 当烟雾机高度处于 1.5 ~ 2.5 m 时, 风机风送距离随高度增加而增大。各风速下风送距离与喷雾高度回归方程如图 5 所示。

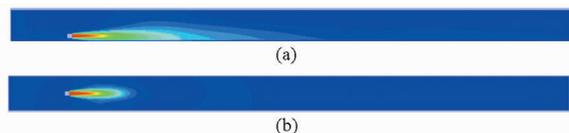


图 4 不同高度下常温烟雾机风送速度分布

Fig. 4 Distribution of airflow speed under spraying heights of 0.5 m and 1.5 m

(a) $y = 0.5 \text{ m}, v = 25 \text{ m/s}$ (b) $y = 1.5 \text{ m}, v = 25 \text{ m/s}$

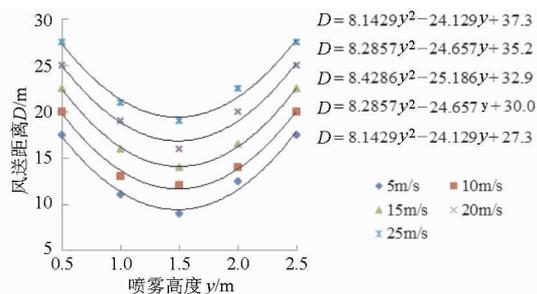


图 5 不同风送速度下风送距离与喷雾高度关系曲线

Fig. 5 Diagram of spraying height and blowing distance

对方程系数作差异性分析, 得二次项系数变异系数为 0.014 5, 一次项系数变异系数为 0.018 0, 结果表明各方程自变量系数变化不显著。可见, 在 3 m 高的温室模型内, 选择任意风送速度, 风机高度为 1.5 m 时均得到最小风送距离。

产生这种现象的原因是: 风机旋转生成压力波而产生气流, 在压力波面质点沿波面法线方向移动, 其速度与压力波在该点的衰减梯度呈正比^[21]。在喷雾高度较低或较高时, 波源离地面或天花板垂直距离较近, 在压力波振幅尚未衰减至较弱程度时即与壁面发生碰撞, 壁面不能完全吸收其能量而对压力产生反射作用。因为在烟雾机至壁面的较窄区域内原始波与反射波重叠而增加压力波强度, 压力波在此情况下衰减距离较长。而当烟雾机在 1.5 m 左右高度作业时, 由于风送装置距离壁面较远, 压力波在与壁面碰撞前已发生较大衰减, 不足以产生反射或反射波强度较小, 叠加波强度变化不明显, 以致压力波短距离内即已衰减。所以烟雾机在温室 Y-Z ($x = 5.0 \text{ m}$) 截面正中间 ($y = 1.5 \text{ m}, z = 0 \text{ m}$) 作业时, 沿 X 轴方向风送距离最小。

2.2 气流场分布试验验证

2.2.1 试验设计

为验证模拟结果的可靠性, 试验测量了与模拟

试验相同条件下所设测量点的气流速度,并与模拟结果对比。试验分别在各模拟高度与风送速度作业规则下进行操作,流量不做调节,保持为 0 mL/s 的状态。将 KANOMAX KA33 型热式风速计垂直于 $Y-Z$ 平面放置,对图 6 所示各采样点气流速度进行测量,按照距地面距离 0.5、1.0、1.5、2.0 和 2.5 m 的顺序,同位置各高度的采样点测量完毕后再进行下一个位置的测量,每个测量点重复测量 3 次,取平均值作为测量结果,并基于 Matlab 进行插值拟合及标准差分析。

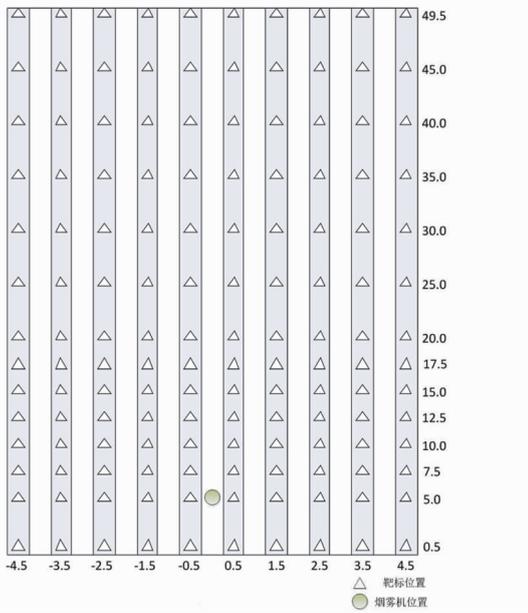


图 6 采样点分布

Fig. 6 Sampling points' distribution

2.2.2 试验结果与分析

图 7 为喷雾高度为 2.0 m, 喷口风送速度为 20 m/s 时,沿 X 轴方向通过烟雾机的竖直切面与水平切面的气流速度分布图。对比风速插值拟合曲线图及模拟气流场截面速度场图可以发现,模拟结果与实际气流速度分布较为吻合。同时,对各模拟(试验)条件下,所有采样点的风速测量值与模拟值根据

$$\bar{E} = \frac{1}{n} \sum \frac{|D_m - D_s|}{D_m} \times 100\% \quad (10)$$

式中 D_m ——模拟值 D_s ——测定值

对差值数组进行相对误差计算,并按照验证试验采样点密集程度划分区域计算平均误差,以此评价此数值模拟结果的可信度。计算结果如表 1 所示。

结果表明,在各试验条件下利用 CFD 技术对常温烟雾机风送系统在密闭温室内的气流速度场模拟与实际试验结果相对误差为 10% ~ 55%,且在不同模拟区域吻合程度存在差异。主要特点为:以烟雾机为起点沿 X 轴正向区域模拟值与试验值相对误

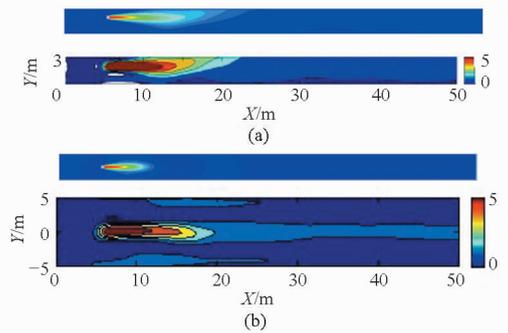


图 7 X 轴向通过烟雾机的截面风速分布

($y = 2.0 \text{ m}$, $v = 20 \text{ m/s}$)

Fig. 7 Distribution of airflow speed

(a) 垂直截面 (b) 水平截面

表 1 模拟区域风速模拟值与实测值平均相对误差

Tab. 1 Average of relative deviation between simulating and testing values for airflow speed %

高度 y/m	区域 x/m	风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)				
		5	10	15	20	25
0.5	0 ~ 5	47.23	54.18	56.24	57.47	54.16
	5 ~ 20	21.40	17.46	15.34	12.97	12.03
	20 ~ 50	35.60	33.47	28.16	24.79	20.01
1.0	0 ~ 5	45.73	51.71	55.94	57.02	55.43
	5 ~ 20	19.87	17.38	16.49	12.75	11.35
	20 ~ 50	28.74	24.03	25.15	22.07	20.59
1.5	0 ~ 5	40.36	45.18	47.79	53.44	55.82
	5 ~ 20	15.66	15.09	13.12	10.48	9.97
	20 ~ 50	25.17	20.34	21.59	18.46	14.05
2.0	0 ~ 5	43.51	49.24	48.16	53.17	54.31
	5 ~ 20	20.78	18.61	17.24	15.09	13.88
	20 ~ 50	28.58	25.64	26.13	22.07	20.10
2.5	0 ~ 5	49.25	54.31	51.38	57.37	59.46
	5 ~ 20	24.05	22.07	21.86	18.43	15.02
	20 ~ 50	34.17	31.94	26.45	24.16	24.42

差较小,其中风速较大区域(5 ~ 20 m)误差最小。分析其原因,主要是由于该区域距离风送出口较近,风机做功产生的压力波是气流的主要驱动来源,风速衰减较为规律。而离烟雾机较远处相对误差略大,因为该区域气流速度已经衰减到接近零,实际试验中空气的自由运动对气流方向的影响有所增强;模型所设出口为温室远端墙面,气流始终趋于向出口方向移动,因此模拟值与实际值误差略有增大。与此同时,在相同高度下随着风送速度增大,风送速度衰减距离相应增长,整体模拟相对误差减小。烟雾机后方(0 ~ 5 m)模拟值相对误差较大,且不受喷雾高度及风送速度影响,所模拟 10 个试验点相对误差均大于 40%,这是因为烟雾机风送系统后方没有气流驱动设备,气流作无规律运动,因此所测试验值随机性较大。综上所述,该数值模型在烟雾机作用区域内模拟结果与试验值间相对误差在 10% ~

35% 之间, 结果接近于傅泽田等^[11]对风送式喷雾机模拟的相对误差 7.77% ~ 36.44%, 说明 CFD 技术可对常温烟雾机风送系统进行有效模拟。

3 雾滴沉积分布特性分析及试验验证

3.1 气流场对雾滴沉积分布特性的影响

雾滴沉积率、分布均匀性等参数是评价喷雾机作业效果的重要参数, 为了解常温烟雾机喷雾作业的雾滴沉积分布特性, 对模拟雾滴通过地面的质量流率及其分布均匀性作了数据采集与分析。表 2 为各雾滴通过地面的质量流量。

表 2 雾滴通过地面的质量流率

Tab.2 Ground mass-flow for discrete phase g/s

高度 y/m	风速/(m·s ⁻¹)				
	5	10	15	20	25
0.5	1.460	1.425	1.400	1.357	1.435
1.0	1.484	1.430	1.370	1.370	1.450
1.5	1.473	1.400	1.375	1.370	1.423
2.0	1.478	1.385	1.345	1.315	1.415
2.5	1.489	1.410	1.345	1.335	1.370

由表可知, 雾滴通过地面的质量流率在 1.315 ~ 1.489 g/s 之间。在喷雾高度为 0.5 ~ 2.0 m, 相同喷雾高度下, 风送速度为 5 ~ 20 m/s 时, 雾滴通过地面的质量流率随风送速度的增加而减小。这主要是由于雾滴沉积过程受气流场影响, 随着风速的增加, 气流场作用范围扩大, 雾滴随之飞行距离延长, 小粒径雾滴从模拟区域远端壁面逃逸数量相应增加, 故在模拟空间内通过地面的粒子数减少而造成质量流率的降低。而当风送速度达到 25 m/s 时, 气流与模拟空间侧壁面接触时衰减幅度较小, 压力波反射后与原始气流压力波叠加, 从而在气流传播过程中形成了涡流, 使得一部分中小粒子飞行轨迹发生了偏转而没有逃逸, 经过一段时间的飞行后最终被模拟地面捕获, 故风送速度 25 m/s 时通过地面的雾滴质量流率反而有所上升, 如图 8 所示。

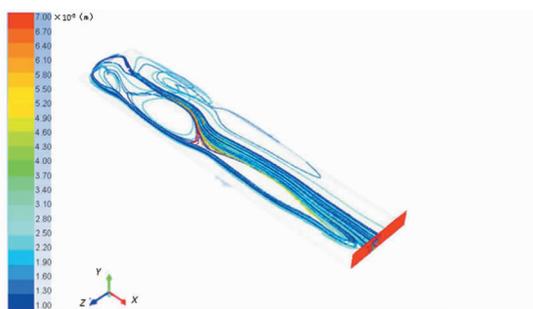


图 8 雾滴轨迹图 ($y = 2.0 \text{ m}$, $v = 25 \text{ m/s}$)

Fig.8 Droplets' particle tracks

天花板较近, 气流压力波与壁面接触时衰减值亦较小, 在壁面反射后分别形成背离反射壁面方向涡流, 气流方向斜向下, 对雾滴的沉积相应具有促进作用, 故此时通过地面的雾滴质量流率也有所增大。

另一方面, 风送速度较大时, 在温室中形成涡流, 气雾滴在温室中的飞行轨迹产生较大随机性, 沉积分布更为离散, 受此影响雾滴的沉积均匀性随之发生改变。其变化规律可通过比较地面质量流率分布标准差加以分析。从 CFD 模型提取各模拟采样点坐标数据及相应质量流率, 基于 Matlab 平台, 利用插值法补充沉积分布数值矩阵, 并计算各模拟条件下地面质量流率分布标准差, 所得结果如表 3 所示, 由表可知, 在风送速度一定的情况下, 喷雾高度为 0.5 ~ 1.5 m 之间时, 雾滴质量流率分布标准差较大, 且随高度增加而减小; 喷雾高度为 1.5 ~ 2.5 m 之间时, 雾滴质量流率分布标准差较小, 且雾滴沉积均匀性受喷雾高度增加的影响不明显, 分布较均匀。喷雾高度为 0.5 m 时, 其雾滴质量流率标准差远大于其他喷雾高度, 可认为 0.5 m 并非有利于雾滴均匀沉积的喷雾条件。在喷雾高度一定的情况下 (除 0.5 m), 烟雾机风速在 15 ~ 20 m/s 时质量流率标准差较小, 分布较为均匀。

表 3 质量流率分布标准差

Tab.3 Standard deviation of mass-flow under different spraying conditions $\mu\text{g/s}$

高度 y/m	风速/(m·s ⁻¹)				
	5	10	15	20	25
0.5	13.2	11.1	10.1	10.0	9.99
1.0	9.40	7.98	7.08	6.28	8.34
1.5	8.69	6.79	6.16	5.65	7.10
2.0	8.08	6.40	6.16	5.53	6.37
2.5	7.68	6.31	5.64	5.58	5.98

3.2 雾滴沉积特性试验验证

3.2.1 试验设计

为验证模拟结果的可靠性, 试验测量了与模拟试验相同条件下所设测量点的雾滴沉积浓度, 并与模拟结果对比。试验选取亚甲基蓝为示踪剂, 样液质量分数为 0.05%, 分别在各模拟高度与风送速度相组合的作业条件下进行操作, 设定喷雾流量为 90 mL/min, 5 min 后打开喷雾控制阀, 喷雾 5 min 后关闭喷雾控制阀及风送风机, 待其自由沉降 2 h。对图 6 所示每个测量点平铺 3 张滤纸片作为采样标本, 标本经萃取后利用高效液相色谱仪获取样液浓度, 并转换为雾滴沉积率, 取沉积率平均值作为各采样点实际测量结果。

$$c_s = \frac{S_{u-s} S_{l-std}}{S_{l-s} S_{u-std}} c_{std} \quad (11)$$

而当喷雾高度为 2.5 m 时, 由于风机位置距离

$$Q_s = \frac{100c_s}{S_f} \quad (12)$$

式中 c_s ——洗脱液质量浓度, g/L
 c_{std} ——标准液质量浓度, g/L
 S_{u-s} ——洗脱液溶质峰面积
 S_{l-s} ——洗脱液溶剂峰面积
 S_{u-std} ——标准液溶质峰面积
 S_{l-std} ——标准液溶剂峰面积
 S_f ——滤纸面积, cm^2
 Q_s ——靶标点沉积量, $\mu\text{g}/\text{cm}^2$

在 CFD 模型中, 计算收敛的情况下逃逸粒子数不再变化, 通过地面的雾滴质量流率恒定。单位面积上的雾滴质量流率与喷雾时间的积即为模拟雾滴沉积率。基于 Matlab 平台, 将 Fluent 采样所得通过地面的雾滴按其落点坐标排列并生成矩阵, 划分单位面积采样点, 对每个采样点内的雾滴质量流率求和, 并换算为该采样点的沉积率模拟值。其计算式为

$$Q_m = T \sum_{n_2}^{n_1} q_n \quad (13)$$

式中 Q_m ——沉积率模拟值, $\mu\text{g}/\text{cm}^2$
 T ——喷雾时间, s
 q_n ——采样点质量流率, kg/s
 n ——单位采样面积内的沉积质点编号

3.2.2 试验结果与分析

根据 2.2.2 节所述方法对雾滴沉积率的模拟值与实测值计算相对误差, 如表 4 所示。结果表明, 在各模拟条件下, 数值模型雾滴质量流率与验证试验雾滴沉积间相对误差较气流场更大, 相对误差为 15% ~ 80%。分析原因, 主要是由于雾滴沉积分布模型是在气流场模型基础上进行的迭代计算。雾滴沉积分布模型的相对误差继承了气流场模型的相对误差。此外, 模型中雾滴除逃逸外均完全沉降到地面, 而在实际试验中, 存在雾滴的不完全沉降。因此沉积率实测值小于模拟值, 造成了模拟相对误差的增大。

在各验证区域内平均相对误差依然存在差异, 其规律与连续相吻合, 以烟雾机为起点沿 X 轴正向区域模拟值与试验值相对误差较小, 为 15% ~ 40%; 其中风速较大区域(5 ~ 20 m)误差最小 15% ~ 30%; 烟雾机后方(0 ~ 5 m)相对误差较大, 所模拟 10 个试验点误差均超过了 70%。考虑到烟雾机作业区域模拟值误差均在 35% 以内, 可认为该离散相模型在烟雾机有效风送距离内(5 ~ 20 m)可准确预测常温

烟雾机的喷雾效果, 在烟雾机风送方向($x \geq 5$ m)模拟值与试验值较吻合^[11]。

表 4 沉积浓度模拟值-实测值平均相对误差

Tab. 4 Average of relative deviation between simulating and testing values for droplets' deposition %

高度 y/m	区域 x/m	风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)				
		5	10	15	20	25
0.5	0 ~ 5	75.61	80.24	86.13	81.09	76.47
	5 ~ 20	29.67	26.51	21.16	18.09	19.61
	20 ~ 50	32.15	30.37	28.56	25.35	20.17
1.0	0 ~ 5	72.05	77.31	78.14	80.57	75.03
	5 ~ 20	26.02	25.79	23.13	23.51	21.68
	20 ~ 50	29.46	26.53	25.15	23.01	17.19
1.5	0 ~ 5	71.43	75.24	80.17	78.61	73.33
	5 ~ 20	24.05	22.54	20.76	19.04	16.10
	20 ~ 50	28.30	25.83	25.19	23.04	20.11
2.0	0 ~ 5	74.52	79.81	84.19	84.67	80.31
	5 ~ 20	28.76	27.04	24.87	22.15	20.80
	20 ~ 50	31.41	29.08	28.25	24.07	22.69
2.5	0 ~ 5	78.84	80.80	85.17	82.01	74.10
	5 ~ 20	31.95	28.81	26.39	25.04	21.96
	20 ~ 50	36.08	33.17	29.91	27.75	27.97

综合考虑表 3、表 4, 常温烟雾机在风送速度为 25 m/s、喷雾高度为 2.0 m 时雾滴沉积同时满足较大质量流率及较小分布标准差两个条件, 认为喷雾效果达到最优状态。可见, 较以往落地式烟雾施药装置, 为常温烟雾机设置导轨悬挂装置对改善气雾滴沉积效果提供了有利条件。

4 结论

(1) 根据喷雾高度及风送速度的变化, 温室壁面对气流压力波的反射影响了有效风送范围。恒定风速下, 烟雾机在温室中间高度作业时风送距离最短。

(2) 常温烟雾机雾滴沉积率受气流场影响明显, 提高喷雾高度和风送速度有助于改善雾滴分布的均匀性。

(3) 气流场模型在风机作用范围内模拟值与试验值相对误差为 10% ~ 35%; 雾滴沉积模型在烟雾机风送范围内模拟相对误差为 15% ~ 35%, 模拟结果较可信。不同条件下所建立模型均能有效模拟常温烟雾机作业的气流速度场及雾滴沉积分布。

(4) 误差来源于试验条件难以精确控制, 所建立模型相对理想。而试验过程中雾滴的不完全沉降进一步增大了雾滴沉积分布模型的误差。

参 考 文 献

- 1 Sánchez-Hermosilla J, Rincón V J, Páez F, et al. Comparative spray deposits by manually pulled trolley sprayer and a spray gun in greenhouse tomato crops[J]. *Crop Protection*, 2012, 31(1):119-124.
- 2 Austerweil M, Grinstein A. Automatic pesticide application in greenhouses[J]. *Phytoparasitica*, 1997, 25(Supp. 1):S71-S80.
- 3 Joe Lentz. Ultralow volume applications for rights-of-way[C]// Goodrich-Mahoney J W, Abrahamson L P, Ballard J L, et al. *Environmental Concerns in Rights-of-Way Management: Eighth International Symposium*. New York: Elsevier; 2008:647-651.
- 4 Harburguer L, Seccacini E, Licastro S, et al. Droplet size and efficacy of an adulticide-larvicide ultralow-volume formulation on *Aedes aegypti* using different solvents and spray application methods[J]. *Pest Management Science*, 2012, 68(1):137-141.
- 5 Austerweil M, Ben-David T, Steiner B, et al. Control of powdery mildew by mechanical aerosol generators[J]. *Phytoparasitica*, 1996, 24(2):151-152.
- 6 Olivet J J, Val L, Usera G. Distribution and effectiveness of pesticide application with a cold fogger on pepper plants cultured in a greenhouse[J]. *Crop Protection*, 2011, 30(8):977-985.
- 7 邱白晶, 李成泉, 汤伯敏, 等. 密闭空间药雾质量浓度分布试验[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(4):65-68, 74.
Qiu Baijing, Li Chengquan, Tang Bomin, et al. Research on visualization of pesticide mass concentration in airtight awning space[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(4):65-68, 74. (in Chinese)
- 8 Weiner K L, Parkin C S. The use of computational fluid dynamic code for modeling spray from a mistblower[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1993, 55(4):313-324.
- 9 Baetens K, Nuytens D, Verboven P, et al. Predicting drift from field spraying by means of 3D computational fluid dynamics model[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2007, 56(2):161-173.
- 10 陈发元, 汪小昆, 丁为民, 等. 果树喷雾用圆盘风扇三维气流速度场数值模拟与验证[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(8):51-54.
Chen Fayuan, Wang Xiaochan, Ding Weimin, et al. Numerical simulation and experimental verification of 3-D air-velocity field of disk fan used in orchard sprayer[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(8):51-54. (in Chinese)
- 11 傅泽田, 王俊, 祁力钧, 等. 果园风送式喷雾机气流速度场模拟及试验验证[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(1):69-74.
Fu Zetian, Wang Jun, Qi Lijun, et al. CFD simulation and experimental verification of air-velocity distribution of air assisted orchard sprayer[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(1):69-74. (in Chinese)
- 12 崔志华, 傅泽田, 祁力钧, 等. 风送式喷雾机风筒结构对漂移性能的影响[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(2):111-115.
Cui Zhihua, Fu Zetian, Qi Lijun, et al. Effect of the air duct medication on the spray drift emitted by an air-assisted sprayer[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(2):111-115. (in Chinese)
- 13 孙国祥, 汪小昆, 丁为民, 等. 基于 CFD 离散相模型雾滴沉积特性的模拟分析[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(6):13-19.
Sun Guoxiang, Wang Xiaochan, Ding Weimin, et al. Simulation analysis on characteristics of droplet deposition based on CFD discrete phase model[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(6):13-19. (in Chinese)
- 14 张铁, 杨学军, 严荷荣, 等. 超高地隙喷杆喷雾机风幕式防飘移技术研究[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(12):77-86.
Zhang Tie, Yang Xuejun, Yan Herong, et al. Anti-drift technology of super-high clearance boom sprayer with air-assisted system[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(12):77-86. (in Chinese)
- 15 Tsay J, Fox R D, Ozkan H E, et al. Evaluation of a pneumatic-shielded spraying system by CFD simulation[J]. *Transactions of the ASAE*, 2002, 45(1):47-54.
- 16 孙小华. 基于喷雾流场的防飘移数值模拟研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2006.
- 17 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):72-76.
Qi Lijun, Zhao Yaqing, Wang Jun, et al. CFD simulation and experimental verification of droplet dispersion of air-assisted orchard sprayer[J]. *Transactions of Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(2):72-76. (in Chinese)
- 18 孙国祥, 李永博, 汪小昆, 等. 背负式喷雾器雾滴分布特性的 CFD 模拟与试验[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(20):73-79.
Sun Guoxiang, Li Yongbo, Wang Xiaochan, et al. CFD simulation and experiment of distribution characteristics for droplet of knapsack sprayer[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(20):73-79. (in Chinese)
- 19 Bailey A G, Balachandran W, Williams T J. The rosin-rambler size distribution for liquid droplet ensembles[J]. *Journal of Aerosol Science*, 1983, 14(1):39-46.
- 20 Jing Jianping, Zhang Chunming, Sun Wei, et al. Influence of mass-flow ratio of inner to outer secondary air on gas-particle flow near a swirl burner[J]. *Particuology*, 2013, 11(5):540-548.
- 21 李顺波, 东兆星, 齐燕军, 等. 爆炸冲击波在不同介质中传播衰减规律的数值模拟[J]. *振动与冲击*, 2009, 28(7):115-117.
Li Shunbo, Dong Zhaoxing, Qi Yanjun, et al. Numerical simulation for spread decay of blasting shock wave in different media[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2009, 28(7):115-117. (in Chinese)

- 12 胡国明. 颗粒系统的离散元素法分析仿真[M]. 武汉:武汉理工大学出版社,2010.
- 13 王国强. 离散单元法及其在 EDEM 上的实践[M]. 西安:西北工业大学出版社,2010.
- 14 Li Hongchang, Li Yaoming, Gao Fang, et al. CFD – DEM simulation of material motion in air-and-screen cleaning device[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2012, 88(10):111 – 119.
- 15 朴香兰, 王国强, 张占强, 等. 水平转弯颗粒流的离散元模拟[J]. 吉林大学学报:工学版, 2010, 40(1):98 – 102.
Piao Xianglan, Wang Guoqiang, Zhang Zhanqiang, et al. Discrete element method simulation of granular flow on horizontal turn [J]. *Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition*, 2010, 40(1):98 – 102. (in Chinese)

Numerical Simulation Based on CFD – DEM and Experiment of Grain Moving Laws in Inertia Separation Chamber

Jiang Enchen Sun Zhanfeng Pan Zhiyang Wang Lijun

(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to obtain grain moving laws in inertia separation chamber of combine harvester threshing prior to cutting, grains motion was simulated by using computational fluid dynamics and discrete element coupled methods. Simulation results showed that grain particles were separated from short straw through airflow and the performance of chamber separating and cleaning grain was improved with the increasing of airflow velocity, while the turbulence phenomenon in the rear of chamber got more serious and airflow pressure drop was increased. Not full grain particles also deposited in chamber. In order to verify the validity of simulation results, the experimental test was conducted. Experimental results and simulation results were basically accord, which showed that the simulation of grain motion in inertia separation chamber based on CFD – DEM was feasible. The results would be a better basis to improve the performance of inertia separation chamber to separate and clean grain.

Key words: Cleaning grain Inertia separation chamber Computational fluid dynamics Discrete element method Numerical simulation Experiment

(上接第 109 页)

3-D Simulation for Airflow Field and Droplets Deposition of Hanging Cold Sprayer

Li Hui¹ Qi Lijun¹ Wang Pei²

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Department of Weed Science, University of Hohenheim, Stuttgart 70599, Germany)

Abstract: In order to understand the airflow speed field and deposition distribution rules and characters of a designed hanging cold sprayer, several numerical spraying models for that based on CFD technology were established. Beside that, the verification experiments were conducted. The simulation results indicate that the effective blowing distance is positively related to the blowing speed of the cold sprayer. The cold sprayer gets the minimum blowing distance at the height of 1.5 m. The model gets larger ground mass-flow rate under the blowing speed of 5 m/s and 25 m/s. The model gets better uniformity under blowing speed greater than 20m/s and height greater than 2.0 m. The consequences of simulation and verification experiments show that, in the cold sprayer's blowing area, the relative deviation of modeling air flow field is between 10% ~ 35%, and the relative deviation of droplets' deposition model is between 15% ~ 35%. As the consequence, both of the models can forecast the cold sprayer's air flow field and the droplets' deposition distribution correctly.

Key words: Cold sprayer Computational fluid dynamics Airflow speed field Deposition distribution