

静电喷嘴雾化特性与沉积效果试验分析

兰玉彬^{1,2} 张海艳^{1,2} 文 晟^{1,2} 李晟华¹

(1. 华南农业大学工程学院, 广州 510642; 2. 国家精准农业航空施药技术国际联合研究中心, 广州 510642)

摘要: 为了探究电极材料对静电喷嘴雾化效果和荷电性能的影响,确定设计的静电喷嘴的最佳作业参数,并明确静电作用对雾滴沉积效果的影响,以电极材料、电极电压、喷施压力和喷孔直径为喷施变量,针对设计的静电喷嘴进行室内雾化和沉积试验。研究表明:设计的静电喷嘴最佳电极电压为 8 kV,最佳电极材料为紫铜,最佳喷施压力为 170 kPa;相比于非静电喷雾,静电作用开启后,静电喷嘴的有效喷幅增加约 50 cm;在 3 个采样层的雾滴沉积密度依次增加了 23、19、10 个/cm²;在喷嘴雾化的所有雾滴中,粒径在 50 ~ 120 μm 区间的雾滴受静电作用影响最大,静电作用开启后,此区间段内的雾滴沉积数量增加了约 2 倍,当雾滴粒径大于 120 μm 时,雾滴沉积密度随雾滴粒径的增大呈下降趋势;沉积的雾滴主要是粒径在 180 μm 以下的雾滴,因此适合最佳生物粒径为 180 μm 及 180 μm 以下的作物。

关键词: 静电喷嘴; 雾化特性; 沉积效果; 电极材料; 作业参数

中图分类号: S491 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)04-0130-10

Analysis and Experiment on Atomization Characteristics and Spray Deposition of Electrostatic Nozzle

LAN Yubin^{1,2} ZHANG Haiyan^{1,2} WEN Sheng^{1,2} LI Shenghua¹

(1. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

2. National Center for International Collaboration Research on Precision Agricultural Aviation Pesticides Spraying Technology, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Electrostatic charging of sprayed pesticide was realized in electrostatic spray nozzle design, which improved plant coverage and reduced wasted pesticide as well as soil pollution. The performance of electrostatic spray nozzles depended on the charge to mass rate of droplets. The preface illustrated six factors that can impact on the efficiency of the induction nozzle and the electrostatic spraying agricultural application, including nozzle geometry, nozzle air pressure, nozzle flow rate, applied voltage, electrode geometry, electrode position and materials, the properties of the sprayed liquid used and environment factors around the spray. In order to study the effect of electrode material on atomization characteristics and charge performance of electrostatic nozzle, optimize the spray parameters and explore the influence of electrostatic force on spray deposition, four experimental variables were designed, including the electrode material, electrode voltage, spray pressure and hole diameter of electrostatic nozzle, and the indoor atomization and deposition test were carried out. The results showed that the optimal electrode voltage was 8 kV, the optimal electrode material was copper and the optimal spray pressure was 1.7×10^5 Pa. Compared with non-electrostatic spraying, the spray swath width of electrostatic nozzle was increased by 50 cm. Of all droplets, the electrostatic force had the most effect on the droplets (between 50 μm and 120 μm), making the deposition amount double. And the spray droplet density was decreased as the droplet size was increased over 120 μm. The size of the most droplets deposited on target was under 180 μm. Therefore, those electrostatic nozzles designed were suitable for crops whose optimum biological size was 180 μm or under 180 μm.

Key words: electrostatic nozzle; atomization characteristics; deposit performance; electrode materials; operating parameter

收稿日期: 2017-06-13 修回日期: 2017-10-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200700)、广东省科技计划项目(2017B010117010)和广州市科技计划项目(201707010047)

作者简介: 兰玉彬(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事精准农业航空研究,E-mail: ylan@scau.edu.cn

0 引言

静电喷雾技术是指利用高压电极在喷嘴与喷施靶标之间建立静电场,使经喷嘴雾化后的雾滴携带电荷,在雾滴初始动力、重力和电场力的驱动下,向靶标做沉积运动^[1]。因为静电场的“静电环绕”原理,荷电后的雾滴可以迂回沉积到靶标内部被遮盖的部位,如作物叶片背面等,增加雾滴的沉积效果和穿透性。当携带电荷的雾滴靠近靶标时,根据静电感应原理,靶标将产生与雾滴极性相反的电荷,根据库伦定律,雾滴与靶标之间产生库伦力,增加雾滴在靶标上的粘附性^[2-3]。与非静电条件下相同尺寸的雾滴相比,静电条件下的雾滴在喷施靶标上的润湿面更大,粘附性更强,增大了喷施药液与病虫害的接触面积和接触机会,提高病虫害的防治效果,降低施药量^[4-6]。杨超珍等^[7]建立了感应充电过程的电学模型,探讨了电极结构参数对雾滴荷电效果的影响,为静电电极的结构设计提供了可靠的依据。茹煜、周宏平等^[8-13]针对喷嘴结构、电极电压、电极形状和电极位置等参数对静电喷雾雾化和沉积效果的影响进行了大量理论与试验研究,设计、优化多个静电喷嘴结构、电极结构和电极位置,分析雾滴电晕荷电和感应荷电机理,建立多个不同电极形状所诱导出的电场空间分布模型,为合理设计静电充电装置、正确确定雾流场空间分布,保证雾滴拥有足够的充电时间提供了理论依据。张京等^[14]设计了气液两相流感应式静电喷嘴,探究了电极电压和气液比对静电喷嘴沉积性能的影响。DU 等^[15]建立了射流体在电场中破碎过程的物理模型,探究了喷施溶液的物理性质和电场强度对溶液雾化过程的影响,为分析和控制雾滴破碎过程提供了理论依据。PATEL 等^[16-17]通过理论与试验结合的方法探究了不同形状电极和靶标的电场分布特点,研究结果表明,椭圆形靶标产生的静电场最佳,方形内开圆形孔的电极产生的静电场最佳。AL-MAMURY 等^[18]设计了一款低流量、气流方向可调的气液两相流感应式静电喷嘴,并研究了气流方向对静电喷嘴喷幅、雾滴分布均匀性及雾滴在靶标上沉积效果的影响。

综上,虽然国内外学者对静电喷雾的理论与试验进行了深入研究,但却未见有学者探究电极材料对它的影响。因此,本文以课题组自主研发的静电喷嘴作为研究对象,探究电极材料对静电喷嘴雾化特性、荷电性能和沉积性能的影响。同时,确定课题组设计的静电喷嘴最佳工作参数,为后续搭建应用于四旋翼电动无人机的静电喷雾系统奠定基础。

1 理论分析

1.1 喷孔直径和喷施压力对雾滴粒径的影响理论

在泵压作用下,液体经喷嘴的喷孔喷出,形成空心锥形液膜,具有周向和轴向速度的液膜在持续发展过程中,因受外界气体的扰动作用而在其表面形成正弦波。随着波幅的增大,在液膜的顶端破裂成丝状液膜,并最终碎化为大量细小均匀的雾滴,如图 1 所示。

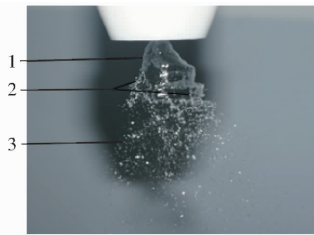


图 1 溶液的雾化过程
Fig. 1 Atomization process
1. 液膜 2. 液丝或液带 3. 液滴

雾滴粒径和雾滴的均匀性是描述喷雾系统雾化特性的特征参数,也是影响喷雾系统沉积特性的关键因素^[19-20]。RIZK 等^[21]以旋流喷嘴为研究对象,对空心锥形液膜厚度与喷施参数、喷嘴参数的关系,进行了大量理论与试验研究,推导出空心锥形液膜厚度与喷施压力、喷孔直径的半经验公式为

$$h_f = 2.7 \left(\frac{D_0 S_1 \mu_1}{\sqrt{p_1}} \right)^{0.25} \tag{1}$$

式中 h_f ——液膜厚度, m
 S_1 ——流量系数 D_0 ——喷孔直径, m
 μ_1 ——溶液动力粘度, m^2/s
 p_1 ——喷施压力, Pa
流量系数 S_1 的经验公式为

$$S_1 = \frac{m_1}{\sqrt{p_1 \rho_1}} \tag{2}$$

式中 m_1 ——溶液的质量流量, kg/s
 ρ_1 ——溶液密度, kg/m^3

WANG 等^[22]在 RIZK 的研究基础上,针对环状液膜破碎过程及雾滴粒径尺寸进行了大量的理论推导和试验研究,推导出雾滴粒径的半经验公式为

$$D = A \left(\frac{\sigma_1 \mu_1^2}{\rho_2 p_1^2} \right)^{0.25} (h_f \cos \theta)^{0.25} + B \left(\frac{\sigma_1 \rho_1}{\rho_2 p_1} \right)^{0.25} (h_f \cos \theta)^{0.75} \tag{3}$$

式中 D ——雾滴粒径, μm
 σ_1 ——溶液的表面张力, m/s
 ρ_2 ——空气密度, kg/m^3
 θ ——半喷雾角, ($^\circ$)

$A、B$ ——经验系数

经验系数 A 和 B 的表达式为

$$A = 2.5 (\cos(2(\theta - 30)))^{2.25} \left(\frac{3.4 \times 10^{-4}}{D_0} \right)^{0.4} \quad (4)$$

$$B = 7.7 (\cos(2(\theta - 30)))^{2.25} \left(\frac{3.4 \times 10^{-4}}{D_0} \right)^{0.2} \quad (5)$$

由式(1)~(5)即可得到雾滴粒径与喷施压力、
喷孔直径的关系。

1.2 电极材料对雾滴荷电性能的影响理论

雾滴荷质比是描述静电喷雾系统荷电性能的特征参数,是提高雾滴在靶标上沉积量和沉积均匀性的重要影响因素,尤其影响雾滴在靶标反面的沉积量^[23-25]。雾滴荷质比是静电场力对雾滴控制能力的表征值。

在实际应用中,主要有3种雾滴充电方法:接触充电法(25~30 kV,半导电溶液)、感应充电法(1~15 kV,导电溶液)和电晕充电法(30~70 kV,导电和不导电溶液均可)。鉴于感应充电法具有充电效果好、所需的电极电压低(远低于空气的击穿电压)、对喷雾系统绝缘性要求低等优点^[26-27],本文选择感应充电法为雾滴充电。

当喷雾系统的静电作用开启后,经过电场区域的溶液开始发生极化,产生与电极极性相反的电荷,完成雾滴充电过程。液膜表面感应出的电荷总量是影响雾滴荷质比的关键因素,根据静电感应特征,液膜表面感应出的电荷总量与电极材料表面电子密度呈正相关^[28],因此,电极材料的静电感应能力是影响雾滴荷电效果的关键因素之一。电极材料的静电感应能力取决于电极材料的内部性质,可从电极材料的费米能级和功函数两个角度进行描述。

在导电过程中,只有费米能级附近的电子参与材料的导电过程^[29],因此费米能级成为衡量激发电极材料导电性能所需的最小电压的表征值,费米能级越高的电极材料,所需的激发电压越高。

溶液感应电荷的密度与电极材料表面电子的密度呈正相关,因此,电极材料在外电场作用下,保持其表面电子不逸出的能力也是间接影响溶液荷电效果的重要因素。功函数是电子跃出电极材料所需最小的能量。因此电极材料的感应能力与电极材料的功函数成正比。本文选择紫铜、黄铜、不锈钢和铝作为电极材料,表1是4种电极材料主要成分的费米能级,表2是4种电极材料的功函数。

表 1 电极材料的费米能级

Tab.1 Fermi energies of certain materials

电极材料	锌	铜	铝	铁
费米能级/eV	4.6	7.1	11.8	15.2

表 2 电极材料的功函数

Tab.2 Order of work function of electrode materials

电极材料	紫铜	黄铜	不锈钢	铝
功函数/eV	4.65	4.50	4.50	4.28

2 静电喷雾系统雾化与荷电试验

2.1 喷雾系统

喷雾系统如图2a所示,由水箱、液压泵(JLm,日井)、压力调节阀(DN25型,永德信)、数字式压力表、数显流量计(K24型,东莞冠达仪表)、静电喷嘴、高压电源等组成。高压电源选择东文高压电源有限公司生产的双极性高压电源,输出电压范围为0~10 kV,如图2b所示。

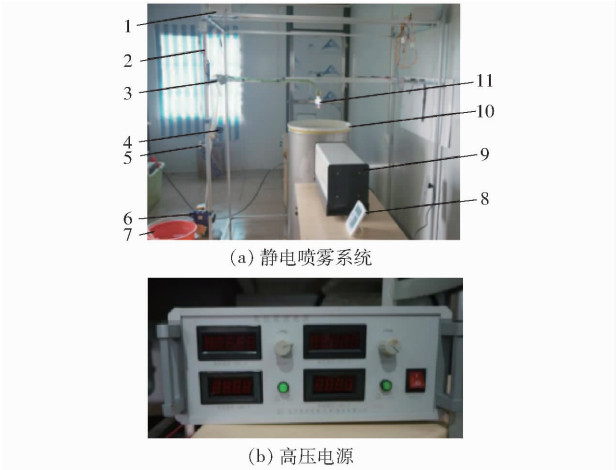


图 2 静电喷雾系统及喷施设备

Fig.2 Electrostatic spray system and spray equipment

1. 高压电源 2. 喷雾支架 3. 流量计 4. 压力表 5. 压力调节阀 6. 液压泵 7. 水箱 8. 温湿度表 9. 激光粒度仪 10. 法拉第筒 11. 静电喷嘴

水箱中的水经过液压泵加压后,经过压力调节阀、压力表、流量计,输送到喷嘴处。通过喷嘴的喷孔雾化成细小均匀的雾滴,由激光粒度仪测量雾滴的粒径信息,由法拉第筒测量雾滴的荷电量。管道内水流通过流量计进行测量。管内压力通过压力表进行测量。通过调压阀对管道内水流压力进行调节,通过电压调节旋钮调节电压。

2.2 静电喷嘴

静电喷嘴采用课题组设计的旋流喷嘴,如图3a所示,由上壳体、橡胶垫圈、导流柱、旋流阀芯、旋流腔、下壳体、电极座和电极等部分组成。旋流阀芯是旋流喷嘴的核心部件之一,加压的液体经过旋流阀芯上的旋流槽后,产生角动量并形成螺旋运动,并在旋流腔中旋转加速,溶液经喷嘴的喷孔喷出后,仍保持一定程度的螺旋运动,加强了外界对液膜的扰动作用,加速液膜破碎,增强了液膜破碎程度。旋流槽

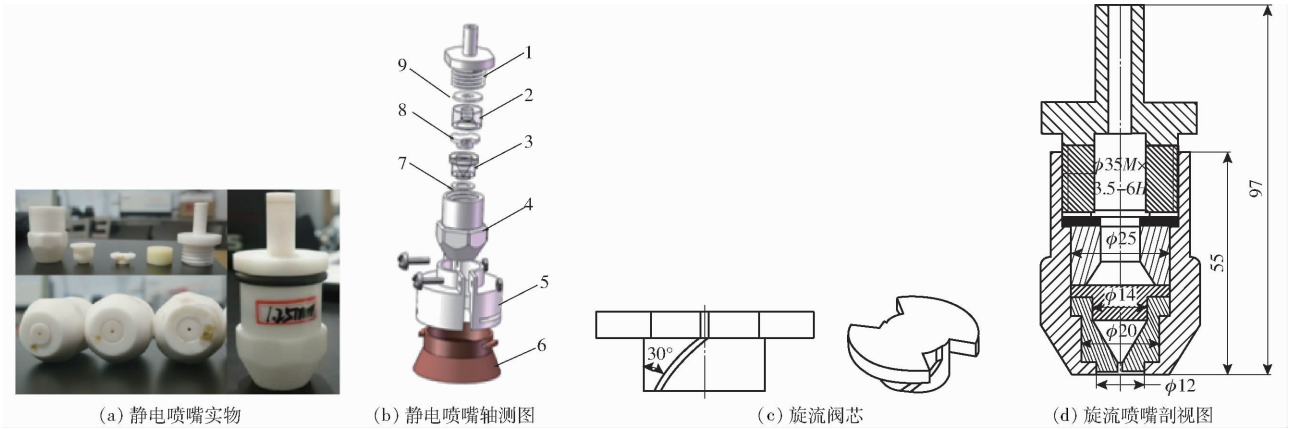


图 3 静电喷嘴

Fig. 3 Electrostatic nozzle

1. 上壳体 2. 导流柱 3. 旋流腔 4. 下壳体 5. 电极座 6. 电极 7,9. 橡胶垫圈 8. 旋流阀芯

数量直接影响喷嘴的体积流量,而旋流槽的螺旋角则对雾滴的体积中径有较为明显的影响,随着旋流槽角的增大,雾滴的体积中径增大^[20]。因此,为了保证雾化效果,实现低流量喷雾,此旋流阀芯开两条对称的、旋流角为 30°的旋流槽,如图 3c 所示。旋流腔上的喷孔直径设计了 1.00、1.25、1.50 mm 3 个系列,如图 3d 所示。静电喷嘴总长 97 mm,可通过快插接头与输液管连接。表 3 为 3 个旋流喷嘴分别在 6 个喷施压力条件下的流量信息。

表 3 静电喷嘴流量

Tab. 3 Flow rate of electrostatic nozzles

喷孔直径 D_0/mm	喷施压力 p_1/kPa					
	60	80	120	170	210	240
1.00	180	226	322	429	470	501
1.25	265	289	369	470	542	579
1.50	358	421	507	608	667	720

2.3 电极

为了增大雾滴与电极重叠区域,提高雾滴荷电效果,电极设计为圆柱与圆锥拼接式电极,电极与电极座连接部分设计为圆柱形,与喷雾区域重合部分设计为圆锥形,如图 4a 所示。在 250 kPa 无静电喷施条件下,旋流喷嘴的雾化角达到 65°,因此电极锥角设计为 65°,防止雾滴打湿电极,影响雾滴荷电效果,同时保证电极与液膜距离最小,电极与雾流场重叠区域最大。电极总高 35 mm,与雾流场重叠区域

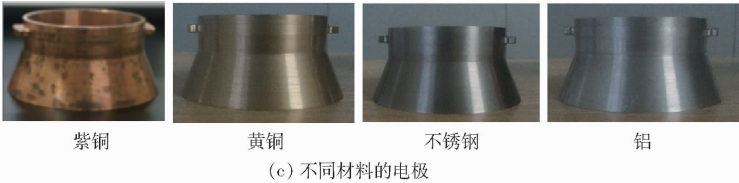
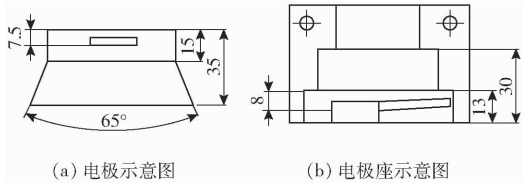


图 4 电极

Fig. 4 Electrode

高 20 mm。

电极座设计为 2 个阶梯式空心半圆柱,图 4b 所示是电极座的其中一半。通过螺钉和螺母将电极座紧固在喷嘴外壳的凸台上,通过电极上的螺旋凸起和电极座上的螺旋槽将二者旋合在一起。图 4c 是 4 种材料电极加工后的实物图。

2.4 试验设计

为了确定本课题组自主研发的 3 个系列静电喷嘴的最佳作业参数,同时,探究电极材料对静电喷嘴雾化和荷电效果的影响,本试验设计了电极材料、喷施压力、喷孔直径和电极电压 4 个试验因素,各因素水平如表 4 所示。

表 4 试验因素水平

Tab. 4 Experimental factors and levels

水平	试验因素			
	喷施压力/ kPa	喷孔直径/ mm	电极电压/ kV	电极材料
1	60	1.00	0	紫铜
2	80	1.25	1	黄铜
3	120	1.50	2	铝
4	170		3	不锈钢
5	210		4	
6	240		5	
7			6	
8			7	
9			8	
10			9	
11			10	

2.4.1 雾滴粒径测定试验

采用 DP-02 型激光粒度仪(欧美克仪器有限公司)进行雾滴粒径信息采集和计算。试验时,静电喷嘴放置于激光发射装置与激光接收装置正中间、激光光束正上方 0.35 m 处。依据表 4 依次进行试验,每个水平重复 3 次。试验时,室内温度为 $(23.4 \pm 3)^\circ\text{C}$,湿度为 $(50 \pm 5)\%$ 。

雾滴谱相对宽度是雾滴均匀性的评价指标。根据中华人民共和国民用航空行业标准^[30],雾滴谱相对宽度(RSF)定义为:90% 累积体积直径($D_{i0.9}$)和 10% 累积体积直径($D_{i0.1}$)的差值与雾滴体积中径($D_{i0.5}$)的比。雾滴谱相对宽度越靠近 1,代表喷雾系统雾化雾滴的均匀性越好。本文定义 UF 为雾滴谱相对宽度(RSF)与 1 差值的绝对值,根据 UF 值,可直接描述喷雾系统所雾化雾滴的均匀性。

2.4.2 雾滴荷质比测定试验

采用图 5 所示法拉第筒(不锈钢制成;筒直径 400 mm,高 800 mm;外筒直径 500 mm,高 1 000 mm)和电荷量表($0 \sim 40 \mu\text{C}$)测量雾滴所携带的电荷量 Q_e 。依据表 4 进行试验,每个水平重复 3 次。试验时,室内温度为 $(26 \pm 3)^\circ\text{C}$,湿度为 $(86 \pm 6)\%$ 。雾滴荷质比为

$$C = \frac{It}{M} \tag{6}$$

其中 $M = \rho_1 V \tag{7}$

$$V = qt \tag{8}$$

式中 C——雾滴荷质比, mC/kg
I——雾滴群电流, A
t——喷施时间, min
M——喷施时间内雾滴的总质量, kg
V——喷施时间内溶液的体积, m^3
q——喷嘴流量, mL/min



图 5 法拉第筒和电荷量表
Fig. 5 Faraday cage and charge scale

2.5 结果分析

2.5.1 喷施压力对雾滴粒径的影响

以静电作用未开启时,静电喷嘴的雾化效果为例,分析喷施压力和喷孔直径对雾滴粒径的影响,如

图 6 所示。

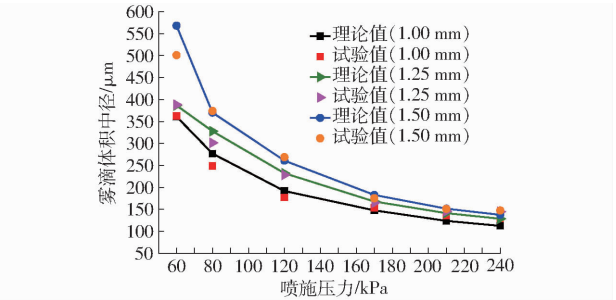


图 6 雾滴体积中径随喷施压力变化曲线
Fig. 6 Variation curves of diameter with pressure

图 6 描述了 3 个喷嘴的雾滴粒径随喷施压力的变化情况及雾滴粒径的理论值与试验结果的拟合情况。从图 6 可知,3 个喷嘴中,喷孔直径为 1.00 mm 的喷嘴所雾化的雾滴最细,当喷孔直径从 1.00 mm 增加至 1.50 mm,雾滴体积中径分别增大了 10.6% 和 21.6%。3 个喷嘴所雾化的雾滴的试验结果与理论值(公式(1)~(5))的相对误差分别为 0.5%、0.8% 和 3.3%。

从喷施压力角度分析图 6 可知:雾滴粒径随喷施压力的增加,出现阶段性变化。当喷施压力从 60 kPa 增加至 170 kPa 时,3 个喷嘴的雾滴体积中径迅速降低,且分别降低了 57.6%、53.7% 和 65.8%。当喷施压力从 170 kPa 增至 240 kPa 时,雾滴粒径减小较缓,3 个喷嘴的雾滴体积中径依次降低了 12.3%、15.0% 和 16.4%。

2.5.2 电极电压对雾滴粒径的影响

图 7 是喷孔直径为 1.00 mm 的静电喷嘴,雾滴粒径随电极电压的变化规律。从电极电压对雾滴粒径的影响角度分析,静电作用开启后,雾滴粒径开始出现减小趋势,当电极电压超过 8 kV 后,雾滴粒径随电极电压的增加而出现增大趋势。这是因为:当电极电压小于 8 kV 时,电极工作方式为感应充电,但当电极电压增加至 8 kV 以上后,电极的工作方式开始由感应充电转换为电晕放电,导致电场混乱,影响雾滴充电效果,降低静电作用对雾滴碎裂产生的影响。

在 4 种电极材料中,紫铜的费米能级最低,功函

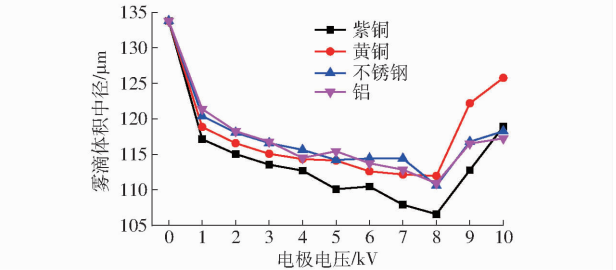


图 7 雾滴体积中径随电压的变化曲线
Fig. 7 Variation curves of diameter with applied voltage

数最大,静电感应能力最强,因此,当电极材料为紫铜时,溶液表面电子密度最高,达到瑞利极限而继续发生碎裂的雾滴更多,因此出现图 7 所示的现象:电极材料为紫铜时,静电喷嘴雾化效果最好。

2.5.3 喷施压力对雾滴分布均匀性的影响

图 8 为 3 个喷嘴在不同喷施压力条件下,非静电条件下(在非静电和不同喷施压力条件下)雾滴均匀性的试验结果,从图 8 可知,3 个喷嘴雾滴的均匀性随喷施压力的变化趋势是一致的:随喷施压力的增加,UF 值减小,雾滴谱相对宽度变窄,雾滴均匀性被提高;当喷施压力从 60 kPa 增加至 240 kPa 时,3 个喷嘴雾滴均匀性分别提高了 80.5%、92.9% 和 96.3%。

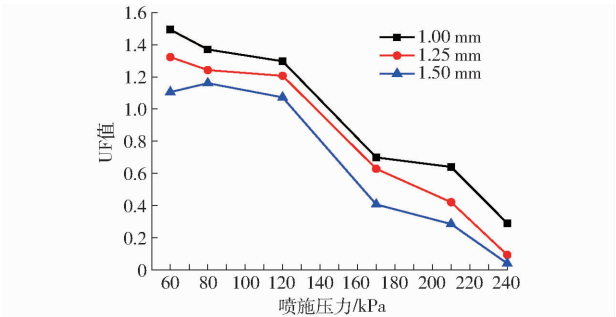


图 8 UF 值随喷施压力的变化曲线

Fig. 8 Variation curves of UF with pressure

当喷施压力保持不变,从图 8 可知,喷孔直径和雾滴均匀性出现正相关关系,当喷孔直径从 1.00 mm 增加至 1.50 mm 时,雾滴均匀性分别提高了 15.1% 和 17.1%。

2.5.4 电极电压对雾滴分布均匀性的影响

图 9 描述了喷孔直径为 1.50 mm 的喷嘴,喷施压力为 210 kPa,在电极材料分别为紫铜、黄铜、不锈钢和铝时,雾滴均匀性随电极电压的变化规律。从图 9 知,静电作用开启后,UF 值迅速减小,说明相比于常规喷雾,静电作用可以提高雾滴的均匀性。电极电压对雾滴均匀性的影响规律与电极电压对雾滴粒径的影响规律相似,电极电压在 8 kV 以内时,UF 值随电极电压的增加而减小,减小趋势较为平缓;电极电压超过 8 kV 后,雾滴均匀性随电极电压增加出现降低趋势,电极材料为紫铜时,雾滴均匀性最好。

2.5.5 喷施压力对雾滴荷质比的影响

图 10 描述了电极电压为 8 kV、电极材料为紫铜时 3 个喷嘴的雾滴荷质比随喷施压力的变化规律。从喷施压力角度分析图 10 可知,当喷施压力在 170 kPa 以内时,随喷施压力的增加,雾滴荷质比逐渐增大,当喷施压力超过 170 kPa 后,随着喷施压力的增加,雾滴荷质比出现减小的趋势。这可能是因为:喷施压力为 170 kPa 时,溶液的介质弛豫时间与

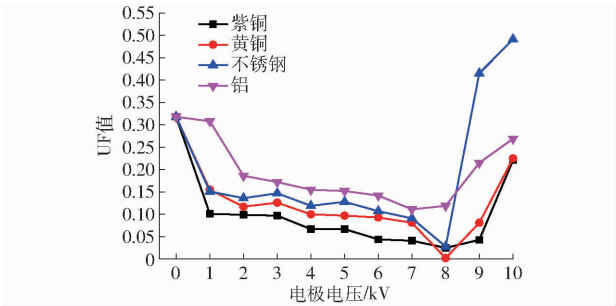


图 9 UF 值随电压的变化曲线

Fig. 9 Variation curves of UF with applied voltage

雾滴破碎时间恰好相等。当喷施压力在 170 kPa 以内时,溶液介质弛豫时间始终小于雾滴破碎时间,保证在雾滴碎裂前,溶液已经完成充电过程。而随着喷施压力的增加,雾滴继续发生雾化,碎裂为更细小的雾滴,增加雾滴在电场里继续感应出电荷的能力,因此,喷施压力在 170 kPa 以内时,随喷施压力的增加,雾滴荷质比呈增大趋势。当喷施压力超过 170 kPa 时,雾滴碎裂时间已经超过介质弛豫时间,说明:当溶液还没有充分荷电,就已经碎裂为雾滴,离开最佳荷电区域,向靶标沉积了,导致雾滴荷质比随喷施压力的增加而呈减小趋势。

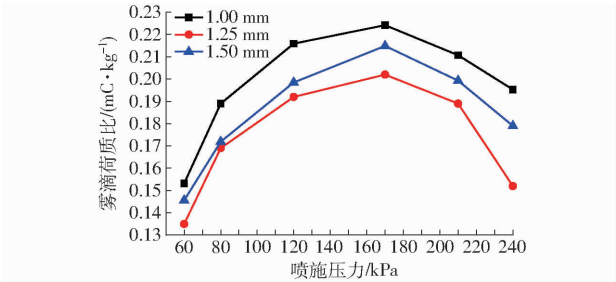


图 10 雾滴荷质比随喷施压力变化曲线

Fig. 10 Variation curves of charge to mass with pressure

喷孔直径 D_0 直接影响液膜厚度 h_f 和雾滴粒径,通过对雾滴粒径的影响间接影响雾滴荷质比。从图 10 可知,3 个喷嘴中,喷孔直径为 1.00 mm 的喷嘴雾滴荷电效果最好。当喷孔直径由 1.50 mm 缩小至 1.00 mm 时,雾滴荷质比依次增加了 6.8% 和 7.1%。

2.5.6 电极电压对雾滴荷质比的影响规律

图 11 描述了喷孔直径为 1.00 mm 喷嘴,在紫铜、黄铜、不锈钢和铝 4 种电极材料喷施条件下(喷施压力为 170 kPa),雾滴荷质比随电极电压的变化。从图 11 分析知,4 种电极材料的充电效果依次为:紫铜、黄铜、不锈钢、铝,在 4 种电极材料中,紫铜费米能级最低,激发紫铜费米面周围的电子进入导带、参与导电过程所需的能量最小,相同的施加电压条件下,紫铜材料被激发出参与导电过程的电子最多,电子活跃程度最高,产生的电场也最强。此外,4 种

电极材料中,紫铜功函数最大,因此紫铜维持其表面电子最大化的能力最强。因此在相同的电极电压下,紫铜表面拥有最高的电子密度,根据静电感应特征,紫铜做电极材料时,溶液表面的电子密度最大,碎裂后,雾滴携带的电荷量最多,荷质比最大。

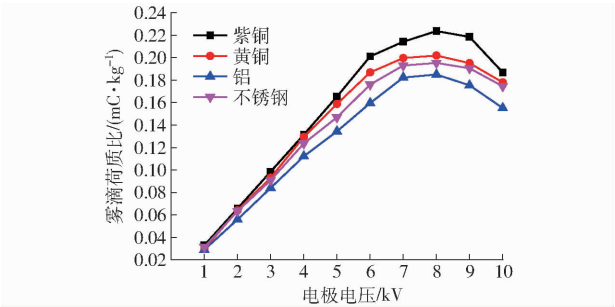


图 11 雾滴荷质比随电压的变化曲线

Fig. 11 Variation curves of charge to mass with applied voltage

雾滴荷质比随电极电压的变化曲线类似一条半抛物线,电极材料为紫铜,电极电压为 8 kV 时,雾滴荷质比最大,最大值为 0.22 mC/kg。

综合以上试验结果,确定此静电喷嘴最佳作业参数为:最佳喷施压力为 170 kPa,最佳电极电压为 8 kV,紫铜为最佳电极材料。喷孔直径为 1.00 mm 的喷嘴雾化和荷电效果最好。因此,以喷孔直径 $D_0 = 1.00$ mm 的静电喷嘴为例,在最佳喷施条件下,测试其在静电作用关闭和开启两种条件下的雾滴沉积情况,分析静电作用对雾滴沉积的影响。

3 静电喷雾系统沉积试验

3.1 试验设计

沉积试验采用质量分数为 5% 的食品级诱惑红染色剂作为喷施溶液,2.5 cm × 7.5 cm 的铜版纸作为雾滴采集卡,两棵龙血树作为沉积靶标(龙血树叶子的表面特征与水稻相似)。两棵植物的总高为 115 cm,冠层高 60 cm,冠幅宽 55 cm,两棵植物并排放置于手推车上,并排放置后的植物总冠幅为 100 cm(植物相邻侧部分重叠)。每棵植物分为 3 个采样层,如图 12 所示,每个采样层布 7 个采样点,具体布点方式如图 13 所示。喷雾系统总高 310 cm,喷嘴放于两棵植物的正中间,距离植物冠层 150 cm,如图 14 所示。

3.2 试验方法

试验前将两株植物并排放置于手推车上,待喷雾系统开启并稳定工作后,人推手推车以 3 m/s 的速度从喷嘴正下方驶过,完成雾滴沉积过程。试验重复 3 次。每次试验完成后,令铜版纸上的雾滴干燥 3 ~ 5 min,然后按照序号收集铜版纸,并逐一放



图 12 布点图

Fig. 12 Diagram of collection point distribution

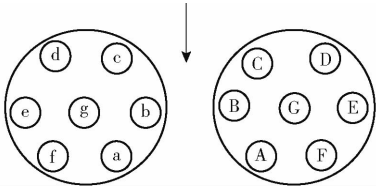


图 13 布点示意图

Fig. 13 Sketch of collection point distribution



图 14 沉积试验图

Fig. 14 Deposit test of electrostatic spray system

入相应的密封袋中,带到精准农业航空喷施雾化实验室进行数据处理。用扫描仪将收集的铜版纸逐一进行扫描,扫描后的图像通过 imageJ 软件进行分析,获得雾滴在作物叶片上的具体沉积情况。图 15 是使用喷孔直径 $D_0 = 1.00$ mm 的喷嘴,在静电和非静电两种情况下,在同一采样点上的雾滴沉积情况。

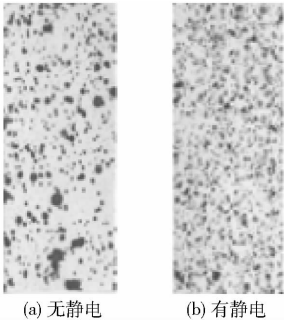


图 15 雾滴在铜版纸上的沉积

Fig. 15 Evaluation of spray deposition in coated paper

3.3 试验结果分析

3.3.1 静电作用对喷嘴喷幅和雾滴沉积密度的影响
图 16 描述了喷孔直径为 1.00 mm 喷嘴,在静电

作用和非静电作用两种喷施条件下,雾滴在各个采样点的沉积情况。从图 16 可知,相比于其他采样点,在 a、b、c 和 A、B、C 6 个采样点处,雾滴沉积量较多,从 g/G 采样点开始,随着采样点与两植物中心距离越来越远,雾滴的沉积量也呈下降趋势。根据文献[31–32]规定:在飞机进行超低容量的农业喷洒作业时,作业对象的雾滴覆盖密度达到 15 个/cm² 以上就达到有效喷幅。从图 16 知,在非静电作用下,喷孔直径为 1.00 mm 的喷嘴,有效喷幅在 g/G 采样点附近。施加静电作用后,喷孔直径为 1.00 mm 喷嘴的有效喷幅扩大至采样点 e/E 附近,有效喷幅大约增大了 50 cm。

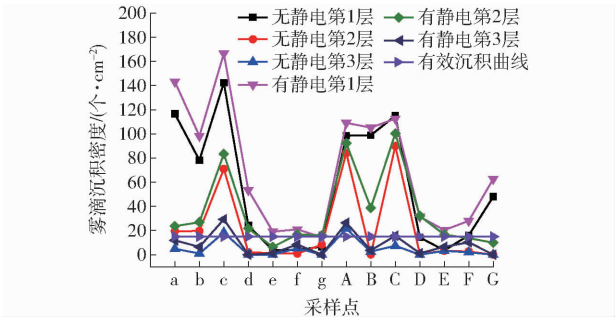


图 16 1.00 mm 喷嘴雾滴的沉积情况

Fig. 16 Droplet number of electrostatic nozzle

相比于非静电喷雾,在静电喷雾的条件下,喷孔直径为 1.00 mm 的喷嘴在 3 个采样层的沉积密度由上至下分别增加了 23、19、10 个/cm²。其中,在第 2 采样层,喷嘴的沉积密度提高了 19.04%,在第 3 采样层,喷嘴的沉积密度提高了 33.33%。试验表明,静电作用可以有效提高雾滴在作物上的沉积效果;在静电力的驱动下,雾滴可以穿透植物顶层,迂回沉积到植物内层。

3.3.2 静电作用对不同粒径雾滴沉积效果的影响

表 5、6 分别是喷孔直径为 1.00 mm 的静电喷嘴,在非静电和静电喷施条件下,各级雾滴在各个采样层的沉积情况。由表 5、6 可知,静电作用开启后,50~80 μm 区间的雾滴在 3 个采样层的沉积数量均增加了 2 倍,在 80~120 μm 区间,雾滴的沉积量也增加了近 1 倍;120 μm 以上的各级雾滴,在静电作用开启后,雾滴沉积量在 3 个采样层也依次增加了 11.2%、-0.6%、16.2%、9.3%、49.5%、63.6%、-14.6%、18.8%、55%、25.9%、36.6%、104.1%。这表明,随着雾滴粒径的增大,静电力对雾滴的控制能力呈现下降趋势,其中,静电力对 50~120 μm 区间的雾滴的驱动作用最好。

表 5 1.00 mm 喷嘴各级粒径雾滴沉积数量(非静电)

Tab.5 Number of droplet deposits of different droplet size ranks				
雾滴粒径 分级/μm	第 1 层	第 2 层	第 3 层	比例/ %
50~80	77.2	86.0	18.9	14.9
80~120	168.8	115.4	66.2	28.7
120~150	105.2	38.3	29.4	14.2
150~180	75.8	34.3	13.8	10.2
180~210	58.6	30.3	6.0	7.8
210~250	58.3	31.7	5.8	7.9
250~300	45.7	25.4	4.1	6.2
>300	90.2	26.7	7.3	10.2

表 6 1.00 mm 喷嘴各级粒径雾滴沉积数量(静电作用)

Tab.6 Number of droplet deposits of different droplet size ranks				
雾滴粒径 分级/μm	第 1 层	第 2 层	第 3 层	比例/ %
50~80	338.4	253.1	57.2	28.7
80~120	273.7	258.7	87.1	27.4
120~150	117.0	100.3	25.1	10.7
150~180	75.3	75.4	16.4	7.4
180~210	68.1	46.5	9.3	5.5
210~250	63.7	47.0	7.3	5.2
250~300	68.3	36.0	5.6	4.9
>300	147.6	65.8	14.9	10.1

在非静电作用下,80~120 μm 区间内的雾滴沉积数所占比例最高,为 28.7%,其他区间的雾滴沉积比例相差不大。静电作用开启后,50~80 μm 区间段内的雾滴沉积比例明显增大;180 μm 以下雾滴沉积数占据了总沉积数的 66.91%,是此喷嘴主要沉积区间段。

4 结论

(1)最佳喷施压力为 170 kPa,最佳电极电压为 8 kV,紫铜为最佳电极材料,喷孔直径 $D_0 = 1.00$ mm 的喷嘴雾化和荷电效果最好。

(2)静电作用开启后,静电喷嘴的有效喷幅增加了约 50 cm。在 3 个采样层的沉积密度依次增加了 23、19、10 个/cm²。

(3)静电作用开启后,50~80 μm 区间的雾滴沉积增加量最明显,约增加了 2 倍,120 μm 以上的雾滴,雾滴沉积粒数随雾滴粒径的增大呈下降趋势。

(4)静电喷嘴沉积的雾滴主要是 180 μm 以下的雾滴,适合最佳生物粒径为 180 μm 及以下的作物。

参 考 文 献

- 1 SINGH M, GHANSHYAM C, MISHRA P K, et al. Current status of electrostatic spraying technology for efficient crop protection [J]. AMA, Agricultural Mechanization in Asia Africa & Latin America, 2013, 44(2):46-53.
- 2 PATEL M K, SAHOO H K, GHANSHYAM C. High voltage generation for charging of liquid sprays in air-assisted electrostatic nozzle system[J]. IETE Journal of Research, 2016, 62(3):424-431.
- 3 LARYEA G N, NO S Y. Development of electrostatic pressure-swirl nozzle for agricultural applications [J]. Journal of Electrostatics, 2003, 57(2):129-142.
- 4 沈从举,贾首星,汤智辉,等. 农药静电喷雾研究现状与应用前景[J]. 农机化研究, 2010,32(4):10-13.
SHEN Congju, JIA Shouxing, TANG Zhihui, et al. Research actuality and application prospects of pesticide electrostatic spraying [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010,32(4):10-13. (in Chinese)
- 5 PATEL M K, PRAVEEN B, SAHOO H K, et al. An advance air-induced air-assisted electrostatic nozzle with enhanced performance[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2017, 135:280-288.
- 6 PATEL M K, SAHOO H K, NAYAK M K, et al. Plausibility of variable coverage high range spraying: experimental studies of an externally air-assisted electrostatic nozzle[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2016, 127:641-651.
- 7 杨超珍,吴春笃,陈翠英. 环状电极感应充电机理及其应用研究[J]. 高电压技术, 2004,30(5):9-11.
YANG Chaozhen, WU Chundu, CHEN Cuiying. Mechanism of induction charge of ring electrode and its application[J]. High Voltage Engineering, 2004,30(5):9-11. (in Chinese)
- 8 茹煜,郑加强,周宏平,等. 航空双喷嘴静电喷头的设计与试验[J]. 农业机械学报, 2007,38(12):58-61,57.
RU Yu, ZHENG Jiaqiang, ZHOU Hongping, et al. Design and experiment of double-nozzle of aerial electrostatic sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007,38(12):58-61,57. (in Chinese)
- 9 周宏平,茹煜,舒朝然,等. 航空静电喷雾装置的改进及效果试验[J]. 农业工程学报, 2012,28(12):7-12.
ZHOU Hongping, RU Yu, SHU Chaoran, et al. Improvement and experiment of aerial electrostatic spray device[J]. Transactions of the CSAE, 2012,28(12):7-12. (in Chinese)
- 10 茹煜,金兰,周宏平,等. 基于圆锥管状电极的高压静电场对雾滴荷电的影响[J]. 高电压技术, 2014,40(9):2721-2727.
RU Yu, JIN Lan, ZHOU Hongping, et al. Effect of high-voltage electrostatic field on droplet charging based on cone-shaped electrode[J]. High Voltage Engineering, 2014,40(9):2721-2727. (in Chinese)
- 11 茹煜,郑加强,周宏平,等. 感应充电喷头环状电极诱导电场的分布研究[J]. 农业工程学报, 2008,24(5):119-122.
RU Yu, ZHENG Jiaqiang, ZHOU Hongping, et al. Electric field distribution produced by circular electrode of induce charging nozzle[J]. Transactions of the CSAE, 2008,24(5):119-122. (in Chinese)
- 12 茹煜,贾志成,周宏平,等. 荷电雾滴运动轨迹的模拟研究[J]. 中国农机化, 2011(4):51-55.
RU Yu, JIA Zhicheng, ZHOU Hongping, et al. Research on moving trajectory simulation of charged droplets[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011(4):51-55. (in Chinese)
- 13 茹煜,周宏平,贾志成. 雾滴荷电特性对其沉积分布及黏附靶标的影响[J]. 南京林业大学学报:自然科学版, 2014, 38(3):129-133.
RU Yu, ZHOU Hongping, JIA Zhicheng. Charging characteristics of droplets effect on the distribution and adhesion of droplets on target[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2014,38(3):129-133. (in Chinese)
- 14 张京,宫帅,宋坚利,等. 气液两相感应式静电喷头性能试验[J]. 农业机械学报,2011,42(12):107-110.
ZHANG Jing, GONG Shuai, SONG Jianli, et al. Performance of two-phase gas-liquid electrostatic induction nozzle [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(12):107-110. (in Chinese)
- 15 DU W, CHAUDHURI S. A multiphysics model for charged liquid droplet breakup in electric fields[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2017, 90:46-56.
- 16 PATEL M K, SAHOO H K, NAYAK M K, et al. Electrostatic nozzle: new trends in agricultural pesticides spraying[C]//National Conference on Emerging Fields in Engineering and Sciences, 2015.
- 17 PATEL M K, SHAMRMA T, NAYAK M K, et al. Computational modeling and experimental evaluation of the effects of electrode geometry and deposition target on electrostatic spraying processes[J]. International Journal of Computer Applications, 2015, 124(2):10-15.
- 18 AL-MAMURY M, BALACHANDRAN W, AL-RAWESHIDY H, et al. Computation model of electrostatic spraying in agriculture industry[C]//Excerpt from the Proceedings of the 2014 COMSOL Conference in Cambridge, 2014.
- 19 王玲,兰玉彬,HOFFMANN W C,等. 微型无人机低空变量喷药系统设计与雾滴沉积规律研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016,47(1):15-22. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160103&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298. 2016.01.003.
WANG Ling, LAN Yubin, HOFFMANN W C, et al. Design of variable spraying system and influencing factors on droplets deposition of small UAV[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(1):15-22. (in Chinese)
- 20 文晟,兰玉彬,张建桃,等. 农用无人机超低容量旋流喷嘴的雾化特性分析与试验[J]. 农业工程学报, 2016,32(20):85-93.
WEN Sheng, LAN Yubin, ZHANG Jiantao, et al. Analysis and experiment on atomization characteristics of ultra-low-volume swirl nozzle for agricultural unmanned aviation vehicle[J]. Transactions of the CSAE, 2016,32(20):85-93. (in Chinese)

- 21 RIZK N K, LEFEBVRE A H. Internal flow characteristics of simplex swirl atomizers[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1985, 1(3): 193 – 199.
- 22 WANG X F, LEFEBVRE A H. Mean drop sizes from pressure-swirl nozzles[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1987, 3(1): 11 – 18.
- 23 FUKUDA T, SUZUKI A, LIAO Y, et al. Influence of spray conditions on droplet charge per unit volume for electrospray deposition[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2014, 77:38 – 49.
- 24 MASKI D, DURAIRAJ D. Effects of electrode voltage, liquid flow rate, and liquid properties on spray chargeability of an air-assisted electrostatic-induction spray-charging system[J]. *Journal of Electrostatics*, 2010, 68(2):152 – 158.
- 25 JAIN M, JOHN B, IYER K N, et al. Characterization of the full cone pressure swirl spray nozzles for the nuclear reactor containment spray system[J]. *Nuclear Engineering & Design*, 2014, 273(4):131 – 142.
- 26 朱和平, 洗福生, 高良润. 静电喷雾技术的理论与应用研究综述[J]. *农业机械学报*, 1989, 20(2):53 – 59.
ZHU Heping, XIAN Fusheng, GAO Liangrun. Summary of research on electrostatic spraying technique theory and its application [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 1989, 20(2):53 – 59. (in Chinese)
- 27 ZHAO S, CASTLE G S P, ADAMIAK K. The effect of space charge on the performance of an electrostatic induction charging spray nozzle[J]. *Journal of Electrostatics*, 2005, 63(3): 261 – 272.
- 28 PATEL M K, GHANSHYAM C, KAPUR P. Characterization of electrode material for electrostatic spray charging: theoretical and engineering practices[J]. *Journal of Electrostatics*, 2013, 71(1):55 – 60.
- 29 王贞涛, 董庆铭, 王军锋, 等. 静电场中雾滴表面诱导电荷对雾滴破碎的影响[J]. *高电压技术*, 2015, 41(1):300 – 305.
WANG Zhentao, DONG Qingming, WANG Junfeng, et al. Effect of induced surface charge on droplets breakup in electrostatic field[J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(1):300 – 305. (in Chinese)
- 30 MH/T1008.1—1997 中华人民共和国民用航空行业标准:第1部分 飞机喷洒设备性能技术指标[S]. 1997.
- 31 MH/T1002—1995 中华人民共和国民用航空行业标准:第1部分 农业航空作业质量技术指标[S]. 1995.
- 32 MH/T1040—2011 中华人民共和国民用航空行业标准:第1部分 航空喷洒设备的喷施率和分布模式测定[S]. 2011.

(上接第86页)

- 18 刘佳, 崔涛, 张东兴, 等. 气吹式精密排种器工作压力试验研究[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(12):18 – 22.
LIU Jia, CUI Tao, ZHANG Dongxing, et al. Experimental study on pressure of air-blowing precision seed-metering device[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(12):18 – 22. (in Chinese)
- 19 翟建波, 夏俊芳, 周勇. 气力式杂交稻精量穴直播排种器设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(1):75 – 82. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160111&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.011.
ZHAI Jianbo, XIA Junfang, ZHOU Yong. Design and experiment of pneumatic precision hill-drop drilling seed metering device for hybrid rice[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(1):75 – 82. (in Chinese)
- 20 廖庆喜, 李继波, 覃国良. 气力式油菜精量排种器气流场仿真分析[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(7):78 – 82.
LIAO Qingxi, LI Jibo, QIN Guoliang. Experiment of pneumatic precision metering device for rapeseed[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(7):78 – 82. (in Chinese)
- 21 KHATCHATOURIAN O A, BINELO M O, de LIMA R F. Simulation of soya bean flow in mixed-flow dryers using DEM[J]. *Biosystems Engineering*, 2014, 123: 68 – 76.
- 22 王金武, 唐汉, 王奇, 等. 基于 EDEM 软件的指夹式精量排种器排种性能数值模拟与试验[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(21):43 – 50.
WANG Jinwu, TANG Han, WANG Qi, et al. Numerical simulation and experiment on seeding performance of pickup finger precision seed-metering device based on EDEM[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(21):43 – 50. (in Chinese)
- 23 廖庆喜, 张朋玲, 廖宜涛, 等. 基于 EDEM 的离心式排种器排种性能数值模拟[J/OL]. *农业机械学报*, 2014, 45(2):109 – 114. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140219&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.02.019.
LIAO Qingxi, ZHANG Pengling, LIAO Yitao, et al. Numerical simulation on seeding performance of centrifugal rape-seed metering device based on EDEM[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(2):109 – 114. (in Chinese)
- 24 史嵩, 张东兴, 杨丽, 等. 基于 EDEM 软件的气压组合孔式排种器充种性能模拟与验证[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(3):62 – 69.
SHI Song, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Simulation and verification of seed-filling performance of pneumatic-combined holes maize precision seed-metering device based on EDEM[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(3):62 – 69. (in Chinese)