

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.08.015

# 荷电雾滴群撞击界面过程的 PDPA 测试\*

贾卫东<sup>1</sup> 薛飞<sup>1</sup> 李成<sup>1</sup> 刘栋<sup>2</sup> 唐爱坤<sup>2</sup>

(1. 江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室, 镇江 212013; 2. 江苏大学能源与动力工程学院, 镇江 212013)

**【摘要】** 为了研究荷电雾滴群撞击植株靶标界面的过程,研究了适合撞击过程测量的相位多普勒粒子分析仪(PDPA)测试方法,分析了荷电雾滴群撞击界面后形态特征及形成的原因。实验结果表明:荷电雾滴群特殊的空间运动结构决定其撞击植株靶标界面后具有独特的存在形态;荷电雾滴撞击界面后只会产生粘附或反弹而不会发生喷溅;较多细微雾滴的存在导致荷电雾滴群反弹后凝并现象显著,使雾滴的粒径增大而个数减少;单雾滴撞击界面后产生粘附或反弹的判据  $K$  的临界值不适于荷电雾滴群的撞击过程,而法向 Weber 数为 30 可作为发生反弹现象的参考依据;较大的切向速度能够造成荷电雾滴撞击植株界面后反弹现象的发生;荷电雾滴所具有的部分法向动能在撞击反弹过程中转为切向动能。

**关键词:** 荷电雾滴 撞击 植株靶标界面 实验

**中图分类号:** S49 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)08-0078-05

## Measurement of Charged Droplets Impacting Plant Target Interface by Using PDPA

Jia Weidong<sup>1</sup> Xue Fei<sup>1</sup> Li Cheng<sup>1</sup> Liu Dong<sup>2</sup> Tang Aikun<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education & Jiangsu Province, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

### Abstract

In order to study the process of charged droplets impacting the plant target interface, a test method by using PDPA was given. Both the morphological characteristics of charged droplets after impact and its causes were analyzed. The measurement results indicated that the special space movement form of charged droplets determined their unique morphological characteristics after impact. Charged droplets after impact would adhere to the interface or rebound but never splash. The existence of more fine droplets made coalescence phenomenon remarkable so as to increase the charged droplet size but decrease their number. The critical value of  $K$  for determining a single droplet's adhesion or rebound after impact was not suitable for the process of charged droplets impacting the plant target interface. However, 30, the critical value of normal Weber number, could be a reference for determining charged droplets' adhesion or rebound after impact. Larger tangential velocity may encourage charged droplets to rebound from the interface after impact. A part of normal kinetic energy of charged droplets would translate into tangential kinetic energy after impact.

**Key words** Charged droplets, Impact, Plant target interface, Measurement

收稿日期: 2012-01-13 修回日期: 2012-02-27

\* 国家自然科学基金资助项目(50975125)、江苏省自然科学基金资助项目(BK2011048)、江苏大学高级专业人才能启动基金资助项目(09JDG056)和江苏省高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

作者简介: 贾卫东, 副研究员, 博士后, 主要从事两相流理论及应用、精确施肥技术和高效植保装备研究, E-mail: jiaweidong@ujs.edu.cn

## 引言

静电作用下的雾滴群, 由于雾滴间的相互作用、静电场和喷雾流场间的耦合、界面特性作用等, 其在植株表面的粘附性能与撞击植株靶标界面的动力学过程密切相关, 因而对荷电雾滴群撞击植株靶标界面的过程进行深入研究具有重要意义。

自 20 世纪初开始, 围绕液滴冲击界面的过程, 国外学者进行了大量研究工作。早期的研究集中于单液滴冲击界面过程的数值模拟, 研究中并不关心液滴撞击前后的能量平衡模式。直到 20 世纪 90 年代, 研究人员开始关注液滴冲击界面前能量的平衡, 并提出了一系列能量平衡模型<sup>[1-3]</sup>。随着研究的深入, 研究人员开始运用实验及模拟手段探究表面张力、惯性力、粘性阻力、临界冲击的典型参数  $Kerit$  等影响液滴冲击界面过程的重要因素及观察液滴撞击界面的动态过程<sup>[4-8]</sup>。除此之外还有学者研究了液滴溶液对于其撞击界面后反弹的影响<sup>[9]</sup>。

然而液滴撞击界面过程的研究主要集中于化工喷涂、动力机械和消防灭火等领域, 涉及农业喷雾施药领域的较少, 而有关荷电雾滴群撞击界面过程的研究未见报道。为此, 本文用相位多普勒粒子分析仪 (PDPA) 测试荷电雾滴群撞击植株靶标界面的过程, 根据测试结果具体分析荷电雾滴群撞击界面后形态特征及形成的原因。

## 1 实验装置及方法

### 1.1 实验装置

#### 1.1.1 荷电装置

采用充电效果好的环状、针状电极的组合电极, 如图 1 所示。6 个针状电极均匀布置在铜制环状电极之上, 并与高压静电发生器连接作为高压端, 环状电极接地, 在两者之间形成高压电场, 充电电压可从 0 调至 40 kV。为了便于荷电与非荷电情况的对比, 选择普通的压力雾化喷嘴并布置于装置中轴线上, 由在圆周上呈对称分布的 3 个支撑杆固定, 孔口直径为 1.0 mm。

#### 1.1.2 荷质比测量装置

荷质比是荷电量  $Q$  与雾滴质量  $m$  之比, 是衡量雾滴荷电效果的重要指标。本文采用法拉第桶法进行荷质比测量<sup>[10]</sup>。

#### 1.1.3 荷电喷雾流场的 PDPA 测试装置

图 2 为荷电雾滴撞击植株靶标界面过程的 PDPA 测试装置。测量条件为: 环境温度 26℃、相对湿度 70%、实验介质为水、喷嘴压力 0.3 MPa、流量 800 mL/min, 取充电电压 0、20、40 kV 3 个测量工况。为适合实验装置的喷幅范围, 植株靶标界面选择八

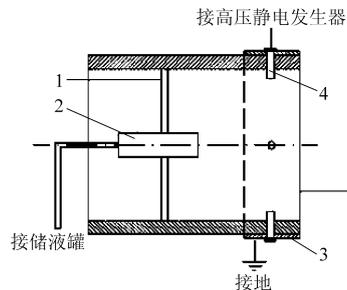


图 1 荷电装置

Fig. 1 Charge equipment

1. 支撑杆 2. 雾化喷头 3. 环状电极 4. 针状电极

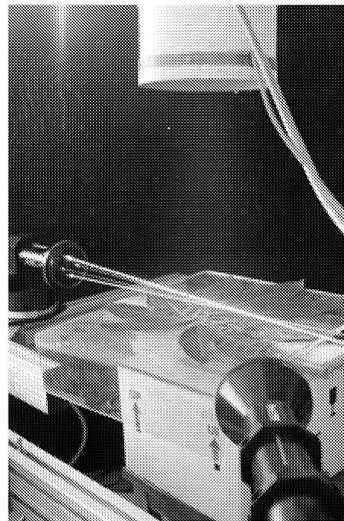


图 2 荷电雾滴撞击植株靶标界面过程的 PDPA 测试

Fig. 2 Measurement of charged droplets impacting plant target interface using PDPA

角金盘叶片。该叶片横径为 25 cm, 表面光泽、无毛, 利用接触角测量仪 (芬兰 KSV 公司、CAM 101 型) 测得的雾滴在其表面的接触角为 34°, Neinhuis 等指出接触角小于 110° 的为亲水性靶标界面, 因此本研究针对亲水性作物界面<sup>[11]</sup>。叶片固定于平板之上以保持测量的稳定性。同时, 为避免不规则界面造成 PDPA 测量控制体无法捕捉无规律反弹雾滴, 测点避开由八角金盘叶基发出的掌状脉。

### 1.2 测试方法

在测试中, 选择与喷雾场中心线相垂直且与喷嘴的距离为 300 mm 的测量断面, 测量线为测量断面与喷雾流场的垂直中间截面的交线, 该测量线与植株界面距离为 5 mm。测量坐标如图 3 所示。

PDPA 在每个测点所测得的法向速度  $u$  其方向与  $z$  轴正方向一致的为入射雾滴 (状态 1), 否则为反弹 (或喷溅) 雾滴 (状态 3)。

### 1.3 撞击量化

引入 Sommerfeld 数  $K$  作为区别单雾滴粘附、喷溅和反弹现象的判据<sup>[12-13]</sup>

$$K = \sqrt{We} \sqrt{Re} \quad (1)$$

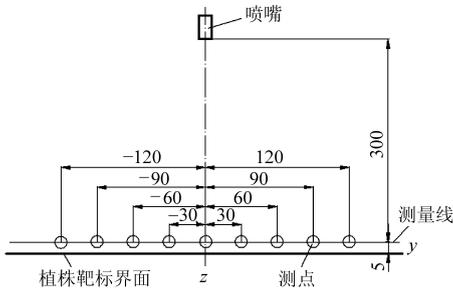


图3 测量坐标

Fig. 3 Measuring coordinates

其中

$$We = \frac{\rho |U_p|^2 d_p}{\sigma} \quad (2)$$

$$Re = \frac{\rho |U_p| d_p}{\mu} \quad (3)$$

式中  $We$ ——雾滴韦伯数  $\rho$ ——雾滴密度

$Re$ ——雾滴雷诺数  $d_p$ ——雾滴直径

$|U_p|$ ——雾滴撞击界面前速度

$\sigma$ ——表面张力  $\mu$ ——液体动力粘度

用  $K$  的 2 个临界值来区分雾滴的 3 类变形情况:  $K < 3$  发生反弹,  $3 \leq K \leq 57.7$  形成粘附,  $K > 57.7$  产生喷溅。

## 2 结果及讨论

### 2.1 不同荷电条件下雾滴撞击界面前、后粒径与雾滴数对应关系

图 4 给出 3 种荷电条件下雾滴撞击界面前、后粒径与雾滴数对应关系。在 0 (未荷电)、20 和 40 kV 3 种条件下,雾滴在撞击植株靶标界面前表现出的运动结构特征与贾卫东等所分析的结果一致<sup>[14]</sup>。在撞击靶标界面后,3 种条件下相同粒径雾滴数均少于撞击前,表明部分雾滴粘附于靶标界面。同时,充电电压 40 kV 时反弹雾滴数明显减少,这从实验测试角度证明了当充电电压达到 40 kV 时,雾滴在植株界面上易于粘附<sup>[15]</sup>。由此可知,荷电雾滴空间运动结构对其撞击植株靶标界面后的存在形态具有重要影响。

未荷电时部分撞击界面后的雾滴粒径小于撞击前(图 4a)。表明这部分雾滴撞击后处于喷溅状态而形成细小的二次雾滴,其原因在于撞击前具有较高的动能。当充电电压为 20 kV 时,撞击后雾滴的粒径均处于撞击前的粒径谱之内,表明在此条件下雾滴仅能从界面反弹而无喷溅现象(图 4b)。当充电电压为 40 kV 时,撞击后有较多的雾滴粒径大于撞击前(图 4c)。这是由于较高的充电电压使得撞击前雾滴细化导致雾滴数大增,从而造成撞击后雾滴数也较其他条件下多,而使得反弹后的凝并几率大增所致。同时,也反映出在此条件下雾滴仅能从

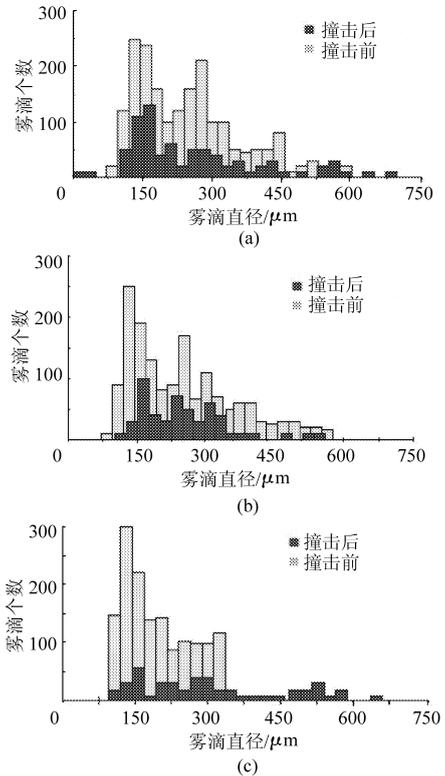


图 4 不同荷电条件下雾滴撞击界面前、后粒径与雾滴数的对应关系

Fig. 4 Corresponding relationship between droplet sizes and their counts before and after impacting plant target interface at different applied voltages

(a) 0 kV (b) 20 kV (c) 40 kV

界面反弹而无喷溅现象。

根据上述分析,荷电雾滴不同于非荷电雾滴的特殊的空间运动结构决定其撞击植株靶标界面后具有独特的存在形态。

### 2.2 荷电条件下雾滴撞击界面前、后主要参数分布

研究表明,荷电雾滴撞击植株靶标界面后具有独特的存在形态,现以充电电压 40 kV 的测试结果为例进行具体分析。

#### 2.2.1 雾滴撞击界面前、后粒径与雾滴数分布

图 5、6 分别给出荷电雾滴撞击植株靶标前、后的粒径与雾滴数分布,显示撞击后雾滴粒径有所增加及雾滴数明显减少。这一结果更加直观地表明在一定的充电电压下,荷电雾滴撞击靶标界面后只会反弹而不会出现喷溅现象。并且,反弹后的雾滴数明显低于撞击前,这显现出荷电雾滴具有较好的粘附性能,也反映了反弹过程中的凝并现象。

#### 2.2.2 雾滴撞击界面前的 Sommerfeld 数与 Weber 数分布

图 7、8 为 Sommerfeld 数  $K$  与 Weber 数  $We$  沿  $y$  轴分布。图 7 给出的  $K$  值未达到 57.7,这与 Escure

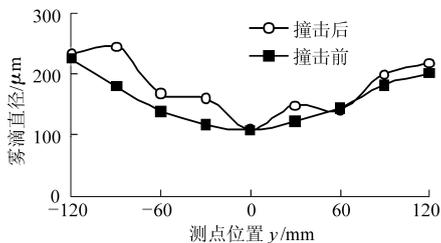


图 5 荷电雾滴撞击界面前、后粒径分布

Fig. 5 Size distribution of charged droplets before and after impacting plant target interface

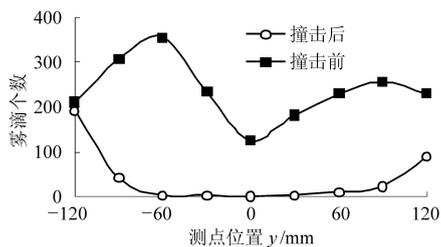
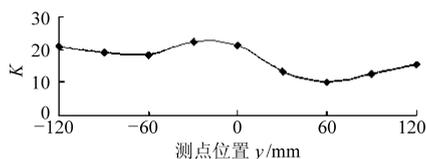
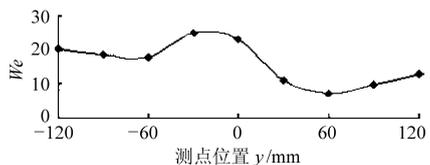


图 6 荷电雾滴撞击界面前、后雾滴数分布

Fig. 6 Number distribution of charged droplets before and after impacting plant target interface

图 7  $K$  值沿  $y$  轴分布Fig. 7  $K$  value distribution along  $y$  direction图 8  $We$  沿  $y$  轴分布Fig. 8  $We$  value distribution along  $y$  direction

和 Rioboo 等给出区别粘附、反弹和喷溅现象的判据相一致<sup>[12-13]</sup>。但 Escure 等又认为: $K < 3$  发生反弹, $3 \leq K \leq 57.7$  形成粘附<sup>[12]</sup>, 按此划分, 图 7 给出的  $K$  值应使得荷电雾滴均粘附于植株界面而不会反弹出去。但测试结果已经表明, 有较多的雾滴发生反弹, 这二者相矛盾的原因在于: ① 该判据应用于单雾滴撞击界面, 本文的测试对象为荷电雾滴群。② Wang 等认为雾滴发生反弹时其法向 Weber 数应小于 30<sup>[16]</sup>, 图 8 给出的结果符合这一点。③ Davood 等指出雾滴群撞击界面时切向速度及切向 Weber 数也将会对撞击后的形态造成较大影响<sup>[17]</sup>, 因此荷电雾滴较大的切向速度导致其发生反弹。

### 2.2.3 雾滴撞击界面前、后的法向与切向速度分布

图 9 为荷电雾滴撞击界面前、后法向速度分布。撞击前、后法向速度相差较大, 表明雾滴受到界面的粘滞作用而导致部分动能耗散以及反弹后需要消耗一定的反弹能。图 10 显示荷电雾滴撞击界面前、后切向速度几乎均大于撞击前, 这种现象表明部分法向动能在撞击反弹过程中转为切向动能。

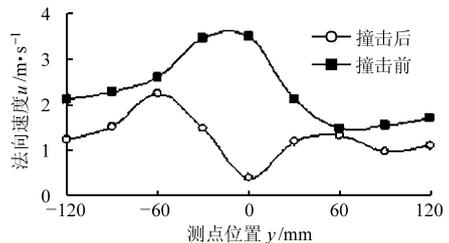


图 9 荷电雾滴撞击界面前、后法向速度分布

Fig. 9 Normal velocity distribution of charged droplets before and after impacting plant target interface

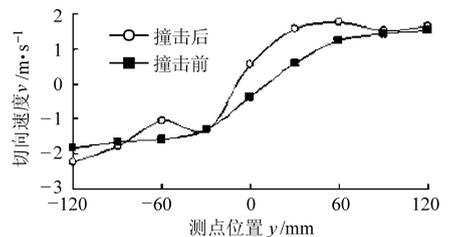


图 10 荷电雾滴撞击界面前、后切向速度分布

Fig. 10 Tangential velocity distribution of charged droplets before and after impacting plant target interface

## 3 结论

(1) 荷电雾滴不同于非荷电雾滴的特殊空间运动结构决定其撞击植株靶标界面后具有独特的存在形态。

(2) 荷电雾滴撞击界面后只会产生粘附或反弹而不会发生喷溅现象。

(3) 由于存在较多的细微雾滴(与非荷电相比)导致反弹后显著凝并现象并使雾滴的粒径增大及雾滴数减少。

(4) 单雾滴撞击界面后产生粘附与反弹现象的判据  $K$  的临界值不适于荷电雾滴群的撞击过程, 而法向 Weber 数为 30 可作为发生反弹现象的参考依据。

(5) 较大的切向速度能够造成荷电雾滴撞击植株界面后反弹现象的发生。

(6) 荷电雾滴所具有的部分法向动能在撞击反弹过程中转为切向动能。

## 参 考 文 献

- 1 Chandra S, Avedisian C T. On the collision of a droplet with a solid surface [J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1991, 432(1):13~41.
- 2 Pasandideh-Fard M, Qiao Y M, Chandra S, et al. Capillary effects during droplet impact on a solid surface [J]. Physics of Fluids, 1996, 8(3):236~247.
- 3 Mao T, Kuhn D, Tran H. Spread and rebound of liquid droplets upon impact on flat surfaces [J]. American Institute of Chemical Engineers Journal, 1997, 43(9):2169~2179.
- 4 Mundo C, Sommerfeld M, Tropea C. Droplet-wall collisions: experimental studies of the deformation and breakup process [J]. Int. J. Multiphase Flow, 1995, 21(2):151~173.
- 5 Aziz S D, Chandra S. Impact, recoil and splashing of molten metal droplets [J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 2000, 43(16):2841~2857.
- 6 Mehdizadeh N Z, Chandra S, Mostaghimi J. Formation of fingers around the edges of a drop hitting a metal plate with high velocity [J]. J. Fluid Mech., 2004, 510(7):353~373.
- 7 Roisman I V, Horvat K, Tropea C. Spray impact: rim transverse instability initiating fingering and splash, and description of a secondary spray [J]. Physics of Fluids, 2006, 18(10):102~124.
- 8 Minamikawa T, Fujimoto H, Hama T, et al. Numerical simulation of two droplets impinging successively on a hot solid in the film boiling regime [J]. ISIJ International, 2008, 48(5):611~615.
- 9 Williams P A, English R J, Blanchard R L, et al. The influence of the extensional of very low concentrations of high molecular mass water-soluble polymers on atomisation and droplet impact [J]. Pest Management Science, 2008, 64(5):497~504.
- 10 Marchant J A, Green R. An electrostatic charging system for hydraulic spray nozzles [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1982, 27(2):309~319.
- 11 Neinhuis C, Barthlott W. Characterization and distribution of water-repellent, self-cleaning plant surfaces [J]. Annals of Botany, 1997, 79(6):667~677.
- 12 Escure C, Vardelle M. Experimental and theoretical study of the impact of alumina droplets on cold and hot substrates [J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2003, 23(2):185~221.
- 13 Rioboo R, Marengo M, Tropea C. Time evolution of liquid drop impact onto solid [J]. Dry Surfaces Experiments in Fluids, 2002, 33(1):112~124.
- 14 贾卫东,邱白晶,施爱平,等. 农用高压静电喷雾场的实验 [J]. 农业机械学报, 2007, 38(12):66~69.  
Jia Weidong, Qiu Baijing, Shi Aiping, et al. Measurement and agricultural high-voltage electrostatic spraying field by using PDPA [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(12):66~69. (in Chinese)
- 15 贾卫东,李萍萍,邱白晶,等. 农用静电喷雾雾滴粒径与速度分布的试验研究 [J]. 农业工程学报, 2008, 24(2):17~21.
- 16 Wang M, Watkins A P. Numerical modeling of diesel spray impaction phenomena [J]. Int. J. Heat Fluid Flow, 1993, 14(3):301~311.
- 17 Davood K, Cameron T. Spray impact on to flat and rigid walls: empirical characterization and modeling [J]. Int. J. Multiphase Flow, 2007, 33(5):525~544.
- 18 王军锋,张娟娟,王贞涛,等. 风幕式气力辅助静电喷雾沉积特性 [J]. 农业机械学报, 2012, 43(2):61~65.  
Wang Junfeng, Zhang Juanjuan, Wang Zhentao, et al. Deposition and distribution characteristics of air-assisted electrostatic spraying by wind-curtain [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2):61~65. (in Chinese)
- 19 贾卫东,李成,王贞涛. 高沉积静电喷雾装置试验研究 [J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(2):244~248.  
Jia Weidong, Li Cheng, Wang Zhentao. Experimental study on electrostatic spraying device with better deposition [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(2):224~248. (in Chinese)
- 20 王贞涛,罗惕乾,岑旗钢. 静电喷雾两相流场的试验 [J]. 排灌机械工程学报, 2010, 28(1):68~72.  
Wang Zhentao, Luo Tiqian, Cen Qigang. Experiment on electrostatic spray two-phase flow [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(1):68~72. (in Chinese)