

# 环形电极结构对喷雾形态与荷电效果的影响

甘云华<sup>1,2</sup> 郑晓红<sup>1,2</sup> 江政纬<sup>1,2</sup> 罗燕来<sup>1,2</sup> 周毅<sup>1,2</sup>

(1. 华南理工大学电力学院, 广州 510640; 2. 广东省能源高效清洁利用重点实验室, 广州 510640)

**摘要:** 为研究环形电极结构对静电雾化的影响, 对不同环形电极结构下的静电场进行实验研究, 得到其锥-射流模式下的喷雾锥角及液滴荷质比。根据实验工况对不同环形电极结构下静电雾化装置产生的空间电场进行数值模拟, 得到其对空间电场分布的影响。结果表明, 随着环形电极内径减小或厚度增大, 环形电极周围的径向电场强度增大, 而轴向场强并未有明显变化; 喷雾锥角和荷质比随环形电极内径的减小或厚度的增大而增大。环形电极厚度及内径的改变使空间电场分布发生变化, 从而影响喷雾形态及液滴荷电效果。本研究可为提高液滴荷电效果、合理设计静电喷雾装置提供技术参考。

**关键词:** 静电雾化; 电极结构; 电场分布; 喷雾锥角; 荷质比

**中图分类号:** S491; O361.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)09-0387-07

## Effect of Ring Electrode Structure on Spray Morphology and Droplet Charging

GAN Yunhua<sup>1,2</sup> ZHENG Xiaohong<sup>1,2</sup> JIANG Zhengwei<sup>1,2</sup> LUO Yanlai<sup>1,2</sup> ZHOU Yi<sup>1,2</sup>

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China

2. Guangdong Province Key Laboratory of Efficient and Clean Energy Utilization, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** Electrode structure is an important factor affecting the charging effect of droplets. To study the effect of structure of ring electrode on the performance of electro-spray, totally 12 kinds of ring electrodes based on the combination of different inner diameters (12 mm, 14 mm, 16 mm and 18 mm) and thicknesses (1 mm, 2 mm and 3 mm) were selected for experiments. In the experiment, the digital SLR camera was used for image acquisition, and the image was processed by software to obtain the spray cone angle. In the experiments, the voltage across the resistor was directly measured, and the droplet charge-mass-ratio was obtained by calculation. The effects of electrode structure on droplet charge performance and spray morphology were analyzed by comparing the spray cone angle and the droplet charge-mass-ratio. Based on the experimental condition, electric field of different ring electrode structures was calculated by numerically simulation, and its influence on the electric field distribution was obtained. The results showed that as the inner diameter of the ring electrode decreased or the thickness increased, the radial electric field strength around the ring electrode was increased, and the axial electric field strength did not change significantly. The spray cone angle and the specific ratio were increased as the inner diameter of the ring electrode decreased or the thickness increased. The variation of the thickness and inner diameter of the ring electrode changed the spatial electric field distribution, which affected the spray structure and droplet charging. The research results can supply some guideline for improving the charging performance of the droplets and rationally designing the electrostatic spray device.

**Key words:** electro-spray; electrode structure; electric field distribution; spray cone angle; charge-mass-ratio

收稿日期: 2019-02-28 修回日期: 2019-04-18

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51776077)、广东省自然科学基金项目(2018B030311043)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(2018ZD05)

**作者简介:** 甘云华(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事微小尺度燃烧与传热研究, E-mail: ganyh@scut.edu.cn

## 0 引言

静电雾化是指液体以一定流速进入毛细管,带电液滴在毛细管口处受到静电力、表面张力等联合作用形成稳定的圆弧锥形结构,在锥结构的顶端形成一股稳定细小的射流,最终破碎为液滴,液滴在电场力的作用下运动<sup>[1]</sup>。与其他雾化方式相比,静电雾化产生的液滴具有更小的粒径、更好的可控性,雾群分布更为均匀<sup>[2]</sup>。经过静电雾化得到的喷雾具有优越的雾化特性,现已广泛应用于工业喷涂<sup>[3]</sup>、农业喷洒<sup>[4]</sup>、雾化除尘<sup>[5]</sup>以及喷雾燃烧<sup>[6-7]</sup>中。

典型的静电雾化装置<sup>[8]</sup>由负载高压金属毛细管与接地电极组成。毛细管-环形电极-接地网格电极则是在毛细管-接地电极的基础上,在毛细管与接地电极加入负载高压环形电极。为叙述方便,将毛细管-接地电极称为单电极,毛细管-环形电极-接地网格电极成为双电极。研究表明<sup>[9]</sup>,与单电极装置相比,双电极装置能够在相对较低的电压下提供较强的电场。史艳玲等<sup>[10]</sup>进行了组合电场下乙醇的荷电雾化实验,得到了稳定的锥-射流雾化模式,并基于该模式进行了理论分析计算,采用椭圆积分的方法求解出双电极电场下射流区的场强分布,发现增大环形电极电压参数对雾化区的场强起到增强作用。GAN等<sup>[11]</sup>通过数值模拟及实验研究发现,双电极能够形成更稳定的锥射流模式,产生更小、更均匀的液滴。

电极参数是影响雾化特性的重要因素<sup>[12]</sup>。目前探讨电极参数对静电雾化的影响已有较多研究。MOON等<sup>[13]</sup>提出一种脉冲电压电容式静电感应喷雾装置,并通过实验研究环形电极直径及厚度对沉积电流的影响。PATEL等<sup>[14]</sup>通过理论分析和实验研究,揭示了液滴荷质比对电极材料、形状和几何参数的依赖性。王军锋等<sup>[15-17]</sup>建立了液滴群荷电量的理论计算式,对荷电喷雾中环形电极诱导的静电场进行数值模拟,实验研究了电极间距及电极环直径对静电雾化特征的影响规律。杨超珍等<sup>[18-20]</sup>研究在感应荷电状态下电极环直径和安装位置对液滴荷质比的影响,发现荷电量与电极环直径和安装位置间存在线性关系,并构建了荷电系数与电极参数和位置关系的经验公式。王贞涛等<sup>[21]</sup>利用静电场叠加原理与椭圆积分方法,对单、双毛细管电极静电雾化电极产生的空间电场进行理论分析与数值计算,得出:与毛细管单电极相比,毛细管双电极中间区域的径向电场强度减小,轴向场强增大,非相干区域的电场强度均增大;毛细管双电极的空间分布使静电雾化产生的射流与液滴群呈现“八”字形。兰

玉彬等<sup>[22]</sup>针对设计的静电喷嘴进行室内雾化和沉积试验,研究结果表明: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。

尽管对电极参数影响雾化特性的实验和数值计算较多,而基于双电极装置在不同环形电极结构下的荷电雾化研究尚未见报道。本文基于双电极荷电雾化装置,对其静电场进行数值模拟,得到不同环形电极内径及厚度下的电场强度分布,并通过实验研究不同电极结构对喷雾锥角及荷质比的影响,以期液体燃料在内燃机等动力装备上的应用提供理论基础。

## 1 实验系统

采用的静电喷雾实验系统如图1所示。乙醇流量通过微量注射泵控制,以2 mL/h注入毛细管喷嘴。毛细管喷嘴内径为0.9 mm,外径为1.1 mm。在喷嘴正上方同轴布置环形电极与金属网格。环形电极的下边缘与喷嘴出口的距离为1 mm,环形电极的下边缘与金属网格之间的垂直距离为26 mm。喷嘴与环形电极分别施加高压 $V_1$ 和 $V_2$ ,金属网格接地。在喷嘴和金属网格之间存在一个电势差,液体在静电力的作用下破碎成液滴并朝网格移动。为实现稳定锥射流模式下的静电喷雾,实验中控制喷嘴电压 $V_1$ 为4.5 kV,环形电极电压 $V_2$ 为1.3 kV。为研究不同环形电极结构对静电喷雾的影响,选取内径 $D_{r1}$ 为12、14、16、18 mm,厚度 $h$ 为1、2、3 mm,共12种不同结构的环形电极进行实验。实验采用数码单反相机进行图像采集,为使图像清晰,采用绿色激光

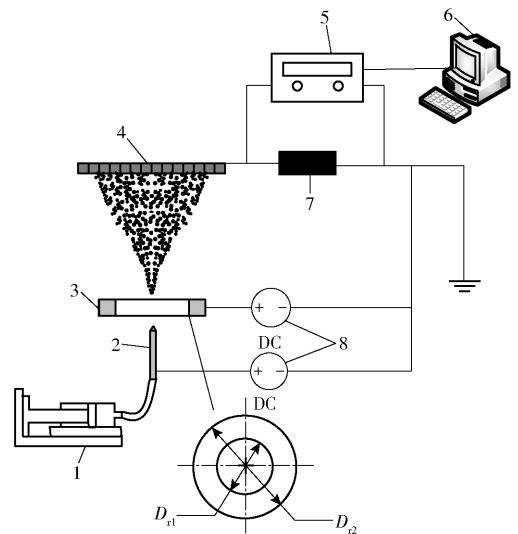


图1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic of experimental system

1. 微量注射泵 2. 毛细管喷嘴 3. 环形电极 4. 金属网格 5. 数据采集仪 6. 计算机 7. 标准电阻 8. 直流电源

作为辅助光源。通过软件对拍摄图像进行处理得到喷雾锥角。

为获得喷雾液滴的荷电情况,在金属网格和电源地极之间串联一个标准电阻(1 MΩ),利用数据采集仪测量电阻上的电压,据欧姆定律可计算得到喷雾电流。实验中,待电压稳定后每隔 0.5 s 记录一次数据,每组记录 10 个数据。对同一工况下记录 5 组数据。采取测量值的算术平均值作为实验最后的结果。通过荷质比来表征液滴的荷电效果,荷质比越大,液滴的荷电性能及充电效果越好。液滴荷质比为液滴带电量与其质量的比值,即

$$\lambda = \frac{q}{m} = \frac{IT}{q_m T} = \frac{I}{q_v \rho} \quad (1)$$

式中  $\lambda$ ——液滴荷质比, C/kg

$q$ ——液滴荷电量, C

$m$ ——液滴质量, kg

$q_m$ ——质量流量, kg/s

$q_v$ ——体积流量, m<sup>3</sup>/s

$I$ ——电流, A

$T$ ——测量时间, s

$\rho$ ——乙醇密度, kg/m<sup>3</sup>

记第  $n$  组第  $m$  个记录的电压其对应的荷质比为  $\lambda_{nm}$ , 其算术平均值为  $\bar{\lambda}$ , 则荷质比标准偏差为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^5 \sum_{m=1}^{10} (\lambda_{nm} - \bar{\lambda})^2}{50}} \quad (2)$$

实验在室温条件下进行,假定乙醇物性不随温度的变化而变化。室温下乙醇体积分数大于等于 99.7%, 密度为 789.3 kg/m<sup>3</sup>, 动力粘度为 1.70 mPa·s, 表面张力为 0.022 N/m, 电导率为 51 μS/m, 相对介电常数为 25.3。实验中,测定电阻上的最大电压为 0.06 V, 相较于喷嘴电压 4.50 kV, 电阻分压可忽略不计。实验误差如表 1 所示。

表 1 实验误差

Tab. 1 Error analysis

参数	测量工具	量程	误差
体积流量 $q_v$	注射泵	0 ~ 2 mL/h	±1.0%
喷嘴电压 $V_1$	高压直流电源	0 ~ 4.5 kV	±1.0%
环形电极电压 $V_2$	高压直流电源	0 ~ 1.3 kV	±1.0%
电阻电压 $U_s$	数据采集仪	0 ~ 0.1 V	±1.0%
直径 $D_{r1}, D_{r2}$	游标卡尺	0.9 ~ 22 mm	±0.02 mm
环形电极厚度 $h$	游标卡尺	0 ~ 3 mm	±0.02 mm

## 2 数值模拟

利用 COMSOL Multiphysics 多物理耦合软件对电场进行模拟。根据实验系统及实验工况,建立二

维轴对称模型,如图 2 所示。求解区域以空气为介质,对计算区域采用三角形自由网格划分,并进行网格独立性验证,最终选取网格数为 13 162。模拟计算区域为 13.5 mm × 29.5 mm。计算过程采用稳态求解器进行求解。

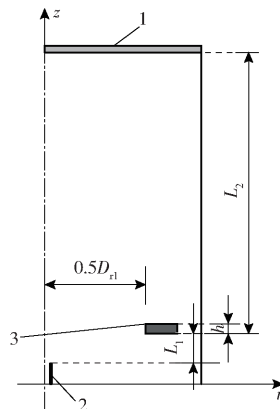


图 2 二维轴对称模型示意图

Fig. 2 Schematic of 2D axisymmetric model

1. 金属网格 2. 喷嘴 3. 环形电极

喷嘴、环形电极及金属网格之间形成的空间电位可由拉普拉斯方程求解,即

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (3)$$

电场强度计算式为

$$\mathbf{E} = -\nabla \phi \quad (4)$$

式中  $\mathbf{E}$ ——电场强度, V/m

$\phi$ ——空间电压, V

## 3 结果与分析

### 3.1 空间电场

图 3 为环形电极厚度为 3 mm、内径为 12 mm 时空间电场分布情况。由图可知,电场强度在喷嘴附近最大,并沿轴向  $z$  方向和径向  $r$  方向急剧减小。因此液滴荷电主要发生在靠近喷嘴电极周围的区域。

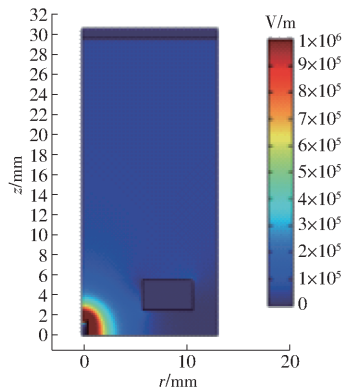


图 3 空间电场分布图 ( $h = 3$  mm,  $D_{r1} = 12$  mm)

Fig. 3 Electric field distribution ( $h = 3$  mm,  $D_{r1} = 12$  mm)

为更好地分析不同环形电极结构下电场分布情况,在环形电极附近的主要荷电区域内选取了截面

进行分析。观察发现靠近喷嘴区域,环形电极厚度及内径对电场分布影响很小,而当 $z$ 变大,电场强度迅速减小,电场分布对液滴运动影响较小。最终选取 $z=3\text{ mm}$ 、 $z=3.5\text{ mm}$ 和 $z=4\text{ mm}$ 3个截面进行分析。图4为环形电极厚度为 $3\text{ mm}$ ,不同内径的径向场强分布情况。由图可知,径向场强沿径向先增大后减小。靠近中心轴线处,不同环形电极内径场强曲线几乎重合。随着 $r$ 增大,环形电极内径对径向场强影响变大。环形电极内径越小,径向场强越大。由于喷嘴处施加的电势比环形电极处施加的电势大得多,因此环形电极对中心轴线附近的电场强度影响较小,主要影响靠近环形电极区域的电场分布。

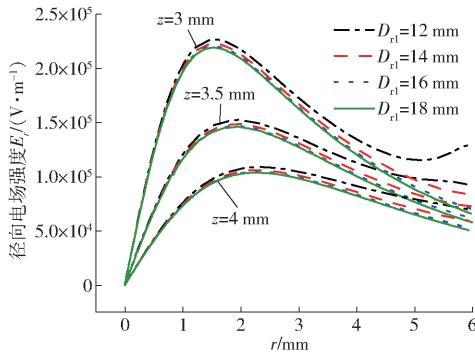


图4 不同环形电极内径径向场强分布( $h=3\text{ mm}$ )

Fig. 4 Radial electric field distribution at different ring electrode inner diameters ( $h=3\text{ mm}$ )

图5为环形电极内径为 $12\text{ mm}$ ,不同厚度的径向场强分布。由图可知,环形电极厚度越大,径向场强越大。并且 $z$ 越大,环形电极厚度对径向电场强度的影响更大。环形电极厚度对径向场强的影响同环形电极内径对径向电场强度的影响相比发生在靠近环形电极更小的区域内。

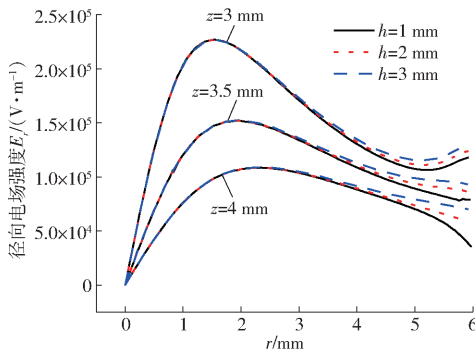


图5 不同环形电极厚度径向场强分布( $D_{ri}=12\text{ mm}$ )

Fig. 5 Radial electric field distribution at different ring electrode thicknesses ( $D_{ri}=12\text{ mm}$ )

图4和图5表明当 $z=3\text{ mm}$ ,环形电极内径为 $12\text{ mm}$ 时,径向电场强度先增大,在 $r=1.5\text{ mm}$ 附近达到最大,随后减小,而在 $r=5\text{ mm}$ 附近又增大。而其他截面及其他环形电极条件下径向电场强度变化规律则是先增大然后减小。由静电叠加原理可知,

空间径向场强由喷嘴产生的径向场强及环形电极产生的径向场强组成。在 $r$ 较小的位置,径向电场强度主要取决于喷嘴处产生的径向电场强度。而当逐渐靠近环形电极的位置,环形电极对径向电场强度的分布影响增大。因为环形电极边缘附近局部电场强度较大,因此环形电极内径为 $12\text{ mm}$ 时,在 $z=3\text{ mm}$ 截面(靠近环形电极下边缘处) $r=6\text{ mm}$ 附近径向电场强度不再随 $r$ 的增大而减小,而是随 $r$ 的增大而增大。而在 $z=3.5\text{ mm}$ 及 $z=4\text{ mm}$ 所在截面不处于环形电极边缘附近,环形电极产生的径向电场强度较小,在此截面处径向电场强度虽不随 $r$ 的增大而增大,但径向电场强度的下降趋势减缓。由此可见环形电极结构会改变空间径向电场强度的分布。

图6、7为不同环形电极内径及厚度在不同截面上的轴向场强分布。相同结构的环形电极在同一位置上的轴向场强大于径向场强。由图可以看出,不同环形内径和厚度的轴向场强曲线基本重合,即改变环形电极内径或者厚度对轴向场强影响较小。

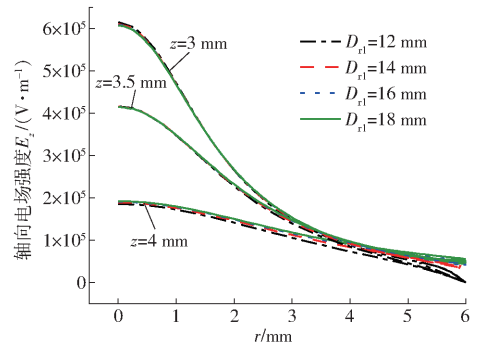


图6 不同环形电极内径轴向场强分布( $h=3\text{ mm}$ )

Fig. 6 Axial electric field distribution at different ring electrode inner diameters ( $h=3\text{ mm}$ )

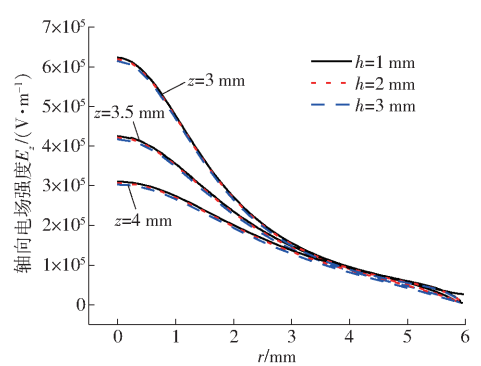


图7 不同环形电极厚度轴向场强分布( $D_{ri}=12\text{ mm}$ )

Fig. 7 Axial electric field distribution at different ring electrode thicknesses ( $D_{ri}=12\text{ mm}$ )

### 3.2 喷雾形态

将喷嘴出口与雾化锥外缘相切的两条直线间的夹角定义为喷雾锥角 $\alpha$ <sup>[23]</sup>。喷雾锥角反映了喷雾离开喷嘴后在空间的分布情况,是评价喷雾质量的

一个重要参数,较大的喷雾锥角更加有利于气液两相作用<sup>[24]</sup>。图 8 为喷雾锥角示意图。采用数码相机进行图像采集,可得不同环形电极厚度及内径时,在锥射流模式下的喷雾锥角,如图 9 所示。

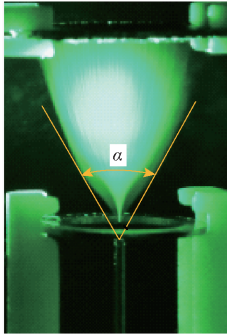


图 8 喷雾锥角示意图

Fig. 8 Schematic of spray cone angle

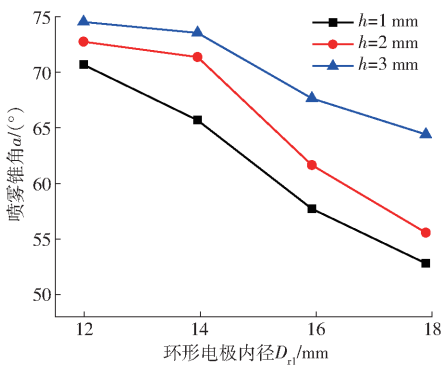


图 9 不同环形电极结构下的喷雾锥角

Fig. 9 Spray cone angle under different ring electrode structures

由图 9 可知,喷嘴电极及环形电极上施加的电势一定时,同一环形电极厚度下,环形电极内径减小,喷雾锥角增大。在毛细管口破碎后的带电液滴主要受到了静电力、重力以及粘性阻力的共同作用<sup>[25]</sup>。直径为  $d$  的单个球形液滴受到的各力表达式为

$$F_q = qE \quad (5)$$

$$F_g = mg \quad (6)$$

$$F_D = 3\pi\mu d(v_c - v_p) \left(1 + \frac{3}{16}Re\right) \quad (7)$$

其中  $Re = \frac{|v_c - v_p|}{\nu} \rho_c d \quad (8)$

式中  $F_q$ ——静电力, N  $F_g$ ——重力, N

$F_D$ ——粘性阻力, N

$g$ ——重力加速度,  $m/s^2$

$\mu$ ——动力粘性系数,  $Pa \cdot s$

$v_c$ ——连续相速度,即空气速度,  $m/s$

$v_p$ ——液滴速度,  $m/s$   $Re$ ——雷诺数

$\nu$ ——运动粘性系数,  $m^2/s$

$\rho_c$ ——空气密度,  $kg/m^3$

当液滴处于空间某点,其受力情况如图 10 所示。当带电液滴进入空间电场,因为喷嘴附近电场强度达到  $10^6$  V/m,液滴受到的静电力远大于其他力。所以在喷嘴附近的液滴运动主要受静电力控制。此时液滴的运动方向与电场线方向几乎一致。随着液滴的运动,电场强度逐渐减小而液滴速度逐渐增大,粘性阻力成为主导力,液滴速度减小,最终静电力与粘性阻力等达到平衡。因此静电力对液滴运动影响较大的区域在喷嘴附近。环形电极内径越小,轴向电场强度没有发生较大改变,而径向场强越大,因此液滴获得一个较大的径向静电力,使得液滴在空间的分布区域更大。同一环形电极内径时,环形电极厚度越大,喷雾锥角越大。环形电极厚度对喷雾锥角的影响也是通过增大环形电极厚度产生较大的径向电场强度,使电场强度方向不同,而液滴的运动方向与电场强度几乎一致,因此液滴群在空间的分布更广。在相同工况下,增大环形电极厚度或者减小环形电极内径可以增大喷雾锥角。

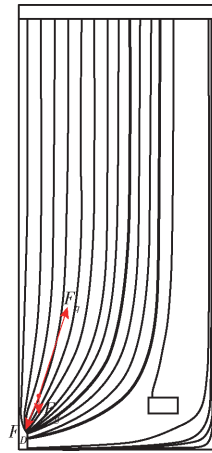


图 10 液滴受力示意图

Fig. 10 Schematic of forces on droplet

### 3.3 液滴荷质比

静电雾化中用荷质比表征喷雾荷电的效果,荷质比越大,液滴荷电越充分。图 11 为不同环形电极结构下的液滴荷质比。由图 11 可以得到,环形电极厚度越大或者内径越大,液滴荷质比越小。双电极结构下产生的液滴荷电量是接触荷电与感应荷电共同作用决定的。实验中控制毛细管电压不变,因此可以认为接触荷电产生的荷电量不变。带电液体在静电力作用下破碎,进入由毛细管与环形电极共同产生的静电场,液体通过感应静电产生感应电荷。液体表面感应荷电密度  $\rho_s$  可以由 Gauss 定律计算为

$$\rho_s = \epsilon E \quad (9)$$

其中  $E = E_1 + E_2 \quad (10)$

式中  $\rho_s$ ——液体表面感应电荷密度,  $C/m^2$

$\epsilon$ ——空气的介电常数,  $F/m$

$E_1$ ——毛细管电极所产生的电场强度, V/m

$E_2$ ——环形电极所产生的电场强度, V/m

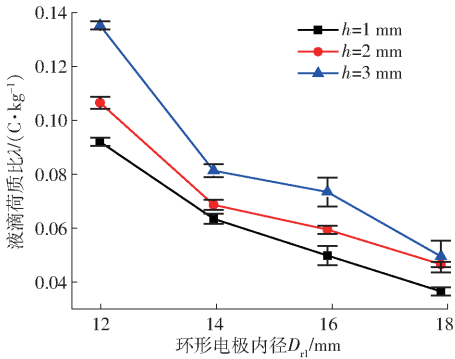


图 11 不同环形电极结构下的液滴荷质比

Fig. 11 Charge-mass-ratio of droplets under different ring electrode structures

根据静电叠加原理,双电极电场可视为单毛细管电场与单环形电场共同作用叠加形成。毛细管产生的电场不变,总电场强度与环形电极电场变化一致。感应荷电产生的喷雾电流为<sup>[15]</sup>

$$I_1 = 2\pi r_1 \rho_s u = \frac{2\rho_s q_v}{r_1} = \frac{2\varepsilon E q_v}{r_1} \quad (11)$$

式中  $I_1$ ——感应荷电电流, A

$u$ ——毛细管口乙醇流速, m/s

$r_1$ ——毛细管内径, m

将式(11)代入式(1)可得感应荷电部分产生的

荷质比为

$$\lambda_1 = \frac{I_1}{\rho q_v} = \frac{2\varepsilon E}{\rho r_1} \quad (12)$$

由式(12)可以看出,液滴荷质比与电场强度、毛细管出口半径及液体密度有关。改变环形电极的内径或者厚度,空间电场强度发生改变从而改变荷质比。由3.1节空间电场可知,环形电极内径减小或者厚度增大,在主要的荷电区内电场强度增大,因此液滴的荷质比也随之增大。虽然环形电极内径越小,厚度越大能获得越好的荷电效果,但环形电极内径过小或者厚度过大,将导致液体喷射到电极表面引起放电,从而不利于液滴荷电。

## 4 结论

(1) 环形电极内径和厚度的改变主要对径向场强产生影响。环形电极内径减小或者厚度增大,靠近环形电极区域的径向场强增大。

(2) 环形电极内径减小或者厚度增大,使空间径向电场强度增大,液滴获得较大径向静电力,最终使喷雾锥角增大。

(3) 液滴荷质比随环形电极厚度的增大或者环形电极内径的减小而增大。因此,采用小内径、大厚度环形电极,可以有效提高喷雾荷电效果。

## 参 考 文 献

- [1] JAWOREK A, KRUPA A. Classification of the modes of EHD spraying[J]. Journal of Aerosol Science, 1999, 30(7): 873–893.
- [2] 王贞涛,毛惠敏,罗惕乾. 锥-射流模式下毛细管静电雾化流场的 PIV 测量[J]. 农业机械学报, 2010, 41(8): 62–66.  
WANG Zhentao, MAO Huimin, LUO Tiqian. Investigation on electrostatic spray of capillary in cone-jet mode using PIV [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(8): 62–66. (in Chinese)
- [3] TOLJIC N, ADAMIAK K, CASTLE G S P, et al. Three-dimensional numerical studies on the effect of the particle charge to mass ratio distribution in the electrostatic coating process[J]. Journal of Electrostatics, 2011, 69(3): 189–194.
- [4] 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.
- [5] 陈晟,刘文巍,杨萌萌,等. 静电与流体作用下微米颗粒团迁移机理研究[J]. 工程热物理学报, 2018, 39(1): 114–118.  
CHEN Sheng, LIU Wenwei, YANG Mengmeng, et al. Evolution of migrating micro-particle cloud with hydrodynamic and electrostatic interactions [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2018, 39(1): 114–118. (in Chinese)
- [6] GAN Y H, TONG Y, JU Y, et al. Experimental study on electro-spraying and combustion characteristics in meso-scale combustors[J]. Energy Conversion and Management, 2017, 131: 10–17.
- [7] GAN Y H, CHEN X, TONG Y, et al. Thermal performance of a meso-scale combustor with electrospray technique using liquid ethanol as fuel[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 128: 274–281.
- [8] GANAN-CALVO A M. On the general scaling theory for electrospraying[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2004, 507: 203–212.
- [9] ZHAO S, CASTLE G S P, ADAMIAK K. Comparison of conduction and induction charging in liquid spraying[J]. Journal of Electrostatics, 2005, 63(6): 871–876.
- [10] 史艳玲,罗智斌,甘云华,等. 小尺度荷电锥-射流场强分布特性研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 15–20.  
SHI Yanling, LUO Zhibin, GAN Yunhua, et al. Analysis on distribution of electric field strength of small-scale cone-jet electro-spraying[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 15–20. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20150403&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150403&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.04.003. (in Chinese)
- [11] GAN Y H, ZHANG X, LI H G, et al. Effect of a ring electrode on the cone-jet characteristics of ethanol in small-scale electro-

- spraying combustors[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2016, 98: 15–29.
- [12] PATEL M K, SHARMA 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.
- [13] MOON J, LEE D, KANG T, et al. A capacitive type of electrostatic spraying nozzle[J]. *Journal of Electrostatics*, 2003, 57(3): 363–379.
- [14] PATEL M K, KUNDU M, SAHOO H K, et al. Enhanced performance of an air-assisted electrostatic nozzle: role of electrode material and its dimensional considerations in spray charging[J]. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 2016, 9(4): 332–338.
- [15] 王军锋,张仕超,左子文. 感应荷电过程中喷雾荷电特性影响规律实验研究[J]. *高电压技术*, 2017, 43(2): 514–519.  
WANG Junfeng, ZHANG Shichao, ZUO Ziwen. Experimental study of influence rules on spray charged characteristics in the induction charging process[J]. *High Voltage Engineering*, 2017, 43(2): 514–519. (in Chinese)
- [16] 王军锋,顾维镨,王晓英,等. 感应荷电喷雾荷电性能与喷雾特性试验研究[J]. *高电压技术*, 2015, 41(2): 504–509.  
WANG Junfeng, GU Weikai, WANG Xiaoying, et al. Experimental study on charging performance and spray characteristics of induction charged spray[J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(2): 504–509. (in Chinese)
- [17] 姚江,王军锋,何晓岷,等. 感应荷电喷雾静电场分布规律与荷电特性[J]. *江苏科技大学学报(自然科学版)*, 2018, 32(4): 497–502.  
YAO Jiang, WANG Junfeng, HE Xiaokun, et al. Electrostatic field distribution and charging performance of induction charged spray[J]. *Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2018, 32(4): 497–502. (in Chinese)
- [18] 崔海蓉,杨超珍,余盛兵,等. 电极参数影响射流喷雾荷电量的试验研究[J]. *高电压技术*, 2015, 41(12): 4042–4047.  
CUI Hairong, YANG Chaozhen, YU Shengbing, et al. Experimental study of electrode parameters effect on jet spray charge [J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(12): 4042–4047. (in Chinese)
- [19] 杨超珍,叶五梅,赵伟敏. 电极位置影响荷电量的试验研究[J]. *高电压技术*, 2007, 33(10): 79–82.  
YANG Chaozhen, YE Wumei, ZHAO Weimin. Experimental study on effect of electrode position on charged volume[J]. *High Voltage Engineering*, 2007, 33(10): 79–82. (in Chinese)
- [20] 杨超珍,叶五梅,赵伟敏. 感应荷电中环形电极参数影响的实验研究[J]. *农机化研究*, 2009, 31(11): 178–181.  
YANG Chaozhen, YE Wumei, ZHAO Weimin. Experiment on parameter effect of ring electrode in charged induction[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2009, 31(11): 178–181. (in Chinese)
- [21] 王贞涛,张永辉,SAU Amalendu,等. 双毛细管静电雾化电场特性研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(12): 62–69.  
WANG Zhentao, ZHANG Yonghui, SAU Amalendu, et al. Characteristics of electro-field in electro-hydrodynamics atomization with double capillary[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(12): 62–69. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20161209&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161209&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.009. (in Chinese)
- [22] 兰玉彬,张海艳,文晟,等. 静电喷嘴雾化特性与沉积效果试验分析[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(4): 130–139.  
LAN Yubin, ZHANG Haiyan, WEN Sheng, et al. Analysis and experiment on atomization characteristics and spray deposition of electrostatic nozzle[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(4): 130–139. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20180415&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180415&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.015. (in Chinese)
- [23] 姚春德,侯亚帮,贾丽冬,等. 乙醇圆柱射流雾化破碎过程的 PIV 试验研究[J]. *中国机械工程*, 2014, 25(3): 285–290.  
YAO Chunde, HOU Yabang, JIA Lidong, et al. Study on ethanol cylindrical spray process with PIV measurements[J]. *China Mechanical Engineering*, 2014, 25(3): 285–290. (in Chinese)
- [24] 刘赵森,王凯峰,王治林,等. 阶梯型加速段对旋流喷嘴雾化特性的影响[J]. *力学学报*, 2018, 50(3): 570–578.  
LIU Zhaosen, WANG Kaifeng, WANG Zhilin, et al. Influence of ladder type accelerating section on atomization characteristics of pressure swirl atomizer[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2018, 50(3): 570–578. (in Chinese)
- [25] 王晓英. 荷电液滴雾化机理的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2006.  
WANG Xiaoying. The research on charged droplet atomization mechanics [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2006. (in Chinese)