

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.047

# 小尺度荷电喷雾系统雾化区场强分布特性分析

史艳玲<sup>1</sup> 罗智斌<sup>2,3</sup> 甘云华<sup>2,3</sup> 李华<sup>2,3</sup> 杨泽亮<sup>2,3</sup>

(1. 华南农业大学工程基础教学与训练中心, 广州 510640; 2. 华南理工大学电力学院, 广州 510640;

3. 广东省能源高效清洁利用重点实验室, 广州 510640)

**摘要:** 荷电喷雾燃烧技术对于促进微小尺度条件下液体燃料稳定与充分燃烧具有重要意义。基于喷嘴内径为 0.9 mm 的新型结构小尺度荷电喷雾燃烧器, 开展了单电场及组合电场作用下乙醇燃料的荷电喷雾实验, 测量了稳定“锥-射流”雾化模式下雾化区的雾化角。实验结果发现在相同乙醇流量下, 采用组合电场燃烧器时的雾化角大于采用单电场时的雾化角, 表明环形电极的引入可提高乙醇的雾化效果。荷电喷雾空间电场是由高压组合电极和空间电荷共同作用产生的, 电极参数和空间电荷对空间电场分布均有重要影响。根据均匀带电细圆环电势和场强公式, 将有限长薄圆柱面视为均匀带电细圆环的集合, 利用叠加定理和椭圆积分的方法, 计算出组合电极诱导电场在雾化区的场强分布。空间电荷作用产生的电场由喷嘴形成的雾锥区形状和带电量决定。计算结果表明, 环形电极在雾化区产生的场强是轴对称的极不均匀的场强。当喷嘴电压处于一定值时, 增大极距和环形电极的电压, 组合电极的诱导电场强度大小有明显增强的作用, 场强角度有明显变化。空间电荷产生的场强也是轴对称的极不均匀的电场强度, 与电极诱导电场相比其作用不容忽视, 尤其靠近金属网附近, 空间电荷产生的电场起主导作用。组合电极条件下的荷电喷雾空间电场强度比喷嘴单电极作用下的荷电喷雾空间场强有明显的增强。选择 1 mm 的极距和环形电极的电压有利于荷电喷雾系统形成稳定的“锥-射流”雾化模式。

**关键词:** 微尺度燃烧; 锥-射流; 场强分布; 荷电喷雾; 组合电场

**中图分类号:** TK16 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)05-0343-09

## Analysis on Electric Field Strength Distribution in Spraying Region of Small-scale Electro-spraying System

Shi Yanling<sup>1</sup> Luo Zhibin<sup>2,3</sup> Gan Yunhua<sup>2,3</sup> Li Hua<sup>2,3</sup> Yang Zeliang<sup>2,3</sup>

(1. Engineering Basis for Teaching and Training Center, South China Agricultural University, Guangzhou 510640, China

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

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

**Abstract:** Electro-spraying is an effective technique to enhance combustion of liquid fuel in micro/small-scale. A new combustor using a stainless steel capillary tube with inner diameter of 0.9 mm was designed. Electro-spraying experiments using ethanol as fuel were carried out under single electric field and combined electric field, and the spraying angels in the spraying region were measured under stable cone-jet mode. The experimental results found that the spraying angel under the combined electric field was bigger than that under single electric field at the same flow rate of 1.6 mL/h. It can be inferred that the ring electrode can enhance the spraying process of ethanol. The space electric field during the electro-spraying process was established by the combination of the combined electrodes and space charges. Both the electrode parameters and space charges play great roles in the electric field distribution. According to

收稿日期: 2016-01-08 修回日期: 2016-02-29

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51376066)、内燃机燃烧学国家重点实验室开放基金项目(K2016-01)、广东省教育部产学研结合项目(2012B091000156)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(201522083)

**作者简介:** 史艳玲(1976—),女,讲师,主要从事高电压与绝缘和荷电喷雾研究, E-mail: yanlingsally@scau.edu.cn

**通信作者:** 甘云华(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事微尺度燃烧及传热研究, E-mail: ganyh@scut.edu.cn

the uniformly charged ring electric potential and field strength formula, the limited long and thin cylinder was regarded as a set of uniformly charged ring. Based on superposition theorem, the distribution of electric field strength in the spraying region was calculated using ellipse integral method and the relationship between Cartesian coordinates and polar coordinates. The electric field established by the space charges depends on the form of spraying region and the quantity of electric charge. The results show that the electric field strength was an axial symmetry and extremely nonuniform when using the ring electrode only. When keeping the voltage of nozzle as a constant, the electric field strength in the spraying region varies greatly along with increasing the electrode spacing and voltage of ring electrode. The electric field strength from the space charges was also an axial symmetry and extremely nonuniform, which cannot be ignored. Especially near to the steel mesh, the space charge dominated the whole electric field. The electric field strength under combined electrodes was enhanced greatly when comparing with that under single electrode. The selection of suitable electrode spacing and voltage is very important for the form of stable cone-jet mode. The present study can supply some guidelines for the design and operation of small-scale combustor.

**Key words:** micro-scale combustion; cone-jet; distribution of electric field strength; electro-spraying; combined electric field

## 引言

微小尺度燃烧受散热损失较大的影响,液体燃料流量小时容易发生熄火、火焰传播速度慢、燃烧不完全等问题<sup>[1-3]</sup>。荷电喷雾技术是有效解决微小尺度下液体燃料稳定燃烧的途径之一。在高压电场的作用下,燃料离开毛细管喷嘴时带上电荷,可随着外加电压的升高形成一个稳定的锥-射流模式<sup>[4]</sup>。

国内外学者对单个电场下的雾化特性展开实验研究和理论分析。SON等<sup>[5]</sup>对毛细管-板电极静电雾化射流的稳定性进行了理论研究。AGATHOU等<sup>[6]</sup>在一定范围的流量和电压下,测量了液滴的大小和速度。JAWOREK等<sup>[7-8]</sup>通过对液滴的电场力、机械力和压力的物理过程分析,给出了10种荷电雾化模式。LI等<sup>[9]</sup>实验研究了外加脉动电压对锥-射流模式下的荷电喷雾的影响规律。陈汇龙等<sup>[10]</sup>计算了在喷嘴与环形电极组成的感应充电装置中,电极电压和电极间距对电场分布的影响及其荷电特性分析。在微小尺度下,开展此类研究较早的美国耶鲁大学的学者提出采用荷电喷雾燃烧技术和催化燃烧技术相结合来设计小尺度液体燃料燃烧器<sup>[11]</sup>。一些学者对静电喷雾燃烧进行了实验研究和数值分析<sup>[12-15]</sup>。

基于本课题组前期的实验结果,认为采用组合电场可提高微小尺度液体燃料的雾化效果,通过对射流区的场强分布计算可知,改变环形电压参数,对射流区的场强分布没有影响,但是对雾化区的影响很大<sup>[16-18]</sup>。因此有必要针对组合电场在雾化区的场强分布进行分析。本文根据均匀带电细圆环电势

和场强公式,将有限长薄圆柱面视为均匀带电细圆环的集合,采用椭圆积分的方法,得到组合电极诱导电场在雾化区的场强方程,根据电磁场理论建立空间电荷产生的场强方程,运用叠加定理得到荷电喷雾雾化区空间的场强。基于实验工况条件,进行理论计算,得到乙醇在微尺度组合电极作用下在荷电喷雾空间雾化区的场强分布规律,为优化微型燃烧器的结构设计和稳定运行提供理论指导和参考依据。

## 1 实验方法与结果

实验装置包括燃料供给装置、燃料雾化装置和可视化测量装置,图1为其系统简图。燃料供给装置由高精度的注射泵控制一定流量的无水乙醇。燃料雾化装置主要包括:内径0.9 mm,外径1.2 mm,长度 $L = 10$  mm的金属毛细管作为喷嘴;内径12 mm,外径24 mm,厚度为5 mm环形电极;1 k $\Omega$ 电阻接在金属网格和接地极之间。在射流区,喷嘴与环形电极之间的最小距离为1 mm。喷嘴距离环形电极中心的距离为 $L_1 = 1 + 5/2 = 3.5$  mm,喷嘴与金属网格的距离为21 mm,环形电极和网格之间的距离为 $L_2 = 21 - 3.5 = 17.5$  mm,喷嘴、环形电极分别与一个高压直流电源的正极相连,电势分别为 $V_1$ 和 $V_2$ 。可视化测量装置包括体视显微镜、数字摄像头和绿色激光灯。

喷嘴-环电极组合电场实验工况条件为:乙醇流量 $q_v = 1.6$  mL/h, $V_1 = 4.2$  kV, $V_2 = 1$  kV,实验测量得到荷电雾化图像如图2所示。该工况处于典型的“锥-射流”稳定雾化模式。在喷嘴的出口,形成稳定的Taylor锥,在环形电极的上方,形成具有一定锥

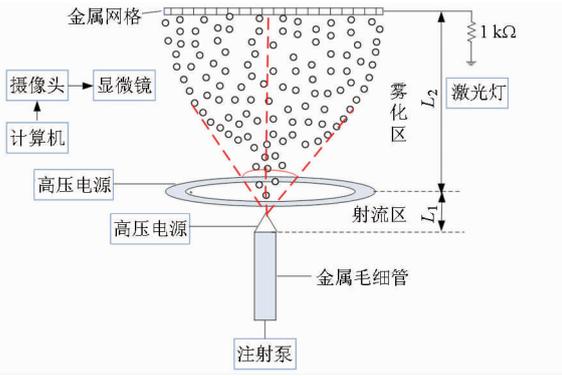


图 1 喷嘴-环电极静电雾化系统结构简图

Fig.1 Structure diagram of capillary-annular electrode electrostatic spraying system

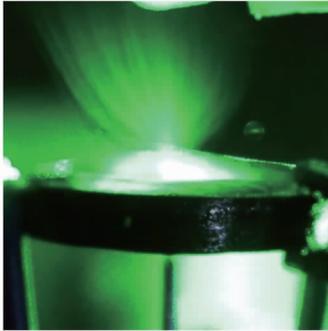


图 2 组合电场下的“锥-射流”实验照片

Fig.2 Electro-spraying image at cone-jet mode under combined electric field

角的伞状雾化区,经后处理软件测量得出雾化角为  $92.15^\circ$ 。

喷嘴单电场实验工况条件为:  $q_v = 1.6 \text{ mL/h}$ ,  $V_1 = 5.2 \text{ kV}$ ,  $V_2 = 0 \text{ kV}$ , 实验测量得到的荷电雾化图像如图 3 所示。该工况也处于“锥-射流”稳定雾化模式。在喷嘴的出口形成稳定的 Taylor 锥,雾化区的雾化角为  $52.71^\circ$ 。

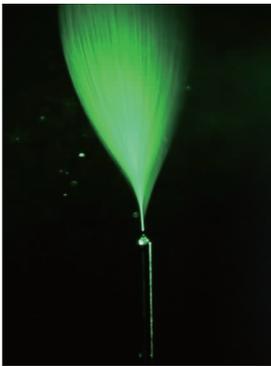


图 3 单电场下的“锥-射流”实验照片

Fig.3 Electro-spraying image at cone-jet mode under single electric field

## 2 雾化区电场强度理论分析

### 2.1 组合电极诱导电场数学模型

空间任一点  $P$  在球坐标系中用  $r, \varphi$  和  $\theta$  表示,  $r$

是矢量  $OP$  的大小,  $\varphi$  为  $OP$  与  $z$  轴的夹角,  $\theta$  为  $OS$  与  $x$  轴的夹角, 建立如图 4 所示坐标系。

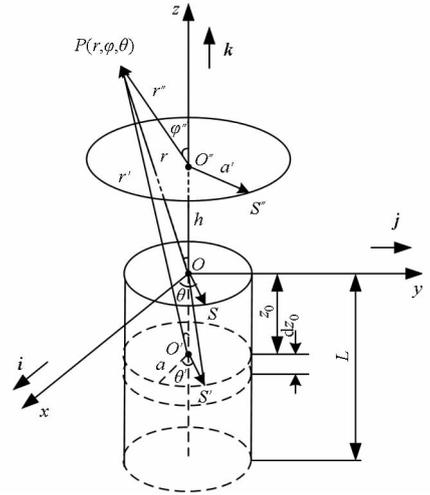


图 4 喷嘴及环形电极的空间坐标图

Fig.4 Coordinates of nozzle and ring electrode

设喷嘴为均匀带电薄圆柱面, 半径取喷嘴内外半径的平均值  $a$  ( $0.525 \text{ mm}$ ), 所带电荷为  $q$ , 长度  $L = 10 \text{ mm}$ , 其电荷面密度为  $\sigma = q / (2\pi aL)$ ,  $r'$  是  $O'P$  的大小,  $\varphi'$  是  $O'P$  与  $z$  轴的夹角,  $\theta'$  为  $O'S'$  与  $x$  轴的夹角, 其位矢为:  $\mathbf{r}'_{OS'} = a \cos\theta' \mathbf{i} + a \sin\theta' \mathbf{j} + z_0 \mathbf{k}$ , 场点  $P$  的位矢为:  $\mathbf{r}_P = r' \sin\varphi' \mathbf{i} + (r' \cos\varphi' + z_0) \mathbf{k}$ <sup>[19]</sup>, 于是可得矢量  $\mathbf{R}'_{PS'} = \mathbf{r}_P - \mathbf{r}'_{OS'}$ , 圆柱面上取一面元, 角度为  $d\theta'$ 、宽度为  $dz_0$ , 其电荷元为  $dq = \sigma a d\theta' dz_0$ , 距  $x$  轴为  $|z_0|$ 。根据文献 [20 - 21] 推导出薄圆柱面在  $P(x, z)$  点的电势为

$$V_1 = \int_{-L}^0 \int_0^{2\pi} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\sigma a d\theta' dz_0}{R'} = \int_{-L}^0 \frac{q}{2\pi^2 \epsilon_0 L} \frac{1}{\sqrt{a^2 + r'^2 + 2ar' \sin\varphi'}} K(k) dz_0 \quad (1)$$

根据直角坐标与极坐标的关系, 则

$$r' = \sqrt{r^2 + z_0^2 - 2rz_0 \cos\varphi} \quad (2)$$

$$r \sin\varphi = r' \sin\varphi' \quad (3)$$

$$r' \cos\varphi' = r \cos\varphi - z_0 \quad (4)$$

将式(2) ~ (4)代入式(1), 则喷嘴在  $P$  点产生的电势为

$$V_1 = \int_{-L}^0 \frac{q}{2\pi^2 \epsilon_0 L} \frac{1}{\sqrt{a^2 + r^2 + z_0^2 - 2rz_0 \cos\varphi + 2arsin\varphi}} K(k) dz_0 \quad (5)$$

其中

$$q = \frac{2\pi^2 \epsilon_0 L V_1}{\int_{-L}^0 \frac{1}{\sqrt{a^2 + r^2 + z_0^2 - 2rz_0 \cos\varphi + 2arsin\varphi}} K(k) dz_0} \quad (6)$$

$$k = \sqrt{\frac{4arsin\varphi}{a^2 + r^2 + z_0^2 - 2rz_0 \cos\varphi + 2arsin\varphi}} \quad (7)$$

式中  $K(k)$ ——模为  $k$  的第 1 类椭圆积分

$\varepsilon_0$ ——真空介电常数

由于圆柱面的电位为喷嘴所加电压 4.2 kV, 利用实验条件, 根据公式(7), 求出  $xOz$  平面内圆柱面上各点所带的电荷, 再取平均值便可以估算出喷嘴电极所带电荷为  $q = 8.7307 \times 10^{-10}$  C。喷嘴所加电压为 5.2 kV 时, 喷嘴电极所带电荷为  $q = 1.0809 \times 10^{-9}$  C。将环形电极理想化为均匀带电圆环, 半径取环形电极内外半径平均值  $a'$  (9 mm), 所加电压为  $V_2$ , 环形电极圆心坐标  $O''$  为  $(0, 0, h)$ ,  $h = L_1 = 3.5$  mm, 所带电荷为  $q'$ , 电荷线密度为  $\lambda' = q' / (2\pi a')$ ,  $r''$  是  $O''P$  的大小,  $\varphi''$  是  $O''P$  与  $z$  轴的夹角,  $dq' = \lambda' a' d\theta''$ 。环形电极原点位矢为:  $r''_{os''} = a' \cos\theta'' \mathbf{i} + a' \sin\theta'' \mathbf{j} + h \mathbf{k}$ , 场点  $P$  的位矢为:  $r_p = r'' \sin\varphi'' \mathbf{i} + (r'' \cos\varphi'' + h) \mathbf{k}$ 。于是可得矢量  $\mathbf{R}''_{ps''} = r_p - r''_{os''}$ 。

根据直角坐标与极坐标的关系, 则

$$r'' = \sqrt{r^2 + h^2 - 2rh\cos\varphi} \quad (8)$$

$$r \sin\varphi = r'' \sin\varphi'' \quad (9)$$

$$h = r \cos\varphi - r'' \cos\varphi'' \quad (10)$$

得到环形电极单独作用时, 在  $P$  点产生的电势为<sup>[18]</sup>

$$V_2 = \frac{q'}{2\pi^2 \varepsilon_0} \frac{1}{\sqrt{a'^2 + r^2 + h^2 - 2rh\cos\varphi + 2a'r\sin\varphi}} K(k') \quad (11)$$

其中 
$$K(k') = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{dx}{\sqrt{1 - k'^2 \sin^2 x}} = \frac{\pi}{2} \left[ 1 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 k'^2 + \left(\frac{1 \times 3}{2 \times 4}\right)^2 k'^4 + \left(\frac{1 \times 3 \times 5}{2 \times 4 \times 6}\right)^2 k'^6 + \dots \right] \quad (12)$$

$$k' = \sqrt{\frac{4a'r\sin\varphi}{a'^2 + r^2 + h^2 - 2rh\cos\varphi + 2a'r\sin\varphi}} \quad (13)$$

式中  $K(k')$ ——模为  $k'$  的第 1 类椭圆积分

根据公式(11), 环形电极  $V_2 = 1$  kV 时,  $q' = 4.6840 \times 10^{-10}$  C; 环形电极  $V_2 = 2$  kV 时,  $q' = 9.368 \times 10^{-10}$  C; 环形电极  $V_2 = 3$  kV 时,  $q' = 1.4052 \times 10^{-9}$  C。

喷嘴在场强  $P$  点产生的场强为

$$E_{1x} = \int_{-L}^0 \int_0^{2\pi} \frac{\mathbf{R}' \sigma a}{4\pi \varepsilon_0 R'^3} d\theta' dz_0 = \int_{-L}^0 \int_0^{2\pi} \frac{q [(r' \sin\varphi' - a \cos\theta') \mathbf{i} - a \sin\theta' \mathbf{j} + r' \cos\varphi' \mathbf{k}]}{8\pi^2 \varepsilon_0 L (a^2 + r'^2 - 2ar' \sin\varphi' \cos\theta')^{\frac{3}{2}}} d\theta' dz_0 \quad (14)$$

将式(2)~(4)代入式(14), 可得

$$E_{1x} = \int_{-L}^0 \frac{q}{4\pi^2 \varepsilon_0 r L \sin\varphi \sqrt{a^2 + r^2 + z_0^2 - 2rz_0 \cos\varphi + 2a \sin\varphi}} \left[ K(k) - \frac{a^2 + 2(r \cos\varphi - z_0)^2 - r^2 - z_0^2 + 2rz_0 \cos\varphi}{a^2 + r^2 + z_0^2 - 2rz_0 \cos\varphi - 2a \sin\varphi} E(k) \right] dz_0 \quad (15)$$

$$E_{1y} = 0 \quad (16)$$

$$E_{1z} = \int_{-L}^0 \frac{q E(k)}{2\pi^2 \varepsilon_0 L (a^2 + r^2 + z_0^2 - 2rz_0 \cos\varphi - 2a \sin\varphi)} \frac{r \cos\varphi - z_0}{\sqrt{a^2 + r^2 + z_0^2 - 2rz_0 \cos\varphi + 2a \sin\varphi}} dz_0 \quad (17)$$

$$E(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 x} dx = \frac{\pi}{2} \left[ 1 - \left(\frac{1}{2}\right)^2 k^2 - \left(\frac{1 \times 3}{2 \times 4}\right)^2 \frac{k^4}{3} + \left(\frac{1 \times 3 \times 5}{2 \times 4 \times 6}\right)^2 \frac{k^6}{5} + \dots \right] \quad (18)$$

式中  $E(k)$ ——模为  $k$  的第 2 类椭圆积分

喷嘴电极单独作用时, 在雾化区空间任一点产生的场强公式为

$$E_1 = \sqrt{E_{1x}^2 + E_{1z}^2} \quad (19)$$

同理可得环形电极在  $P$  点的场强为

$$E_2 = \int_0^{2\pi} \frac{\mathbf{R}''}{4\pi \varepsilon_0 R''^3} \frac{q'}{2\pi} d\theta'' = \int_0^{2\pi} \frac{q' d\theta'' [(r'' \sin\varphi'' - a' \cos\theta'') \mathbf{i} - a' \sin\theta'' \mathbf{j} + r'' \cos\varphi'' \mathbf{k}]}{8\pi^2 \varepsilon_0 (a'^2 + r''^2 - 2a'r'' \sin\varphi'' \cos\theta'')^{\frac{3}{2}}} d\theta'' \quad (20)$$

将式(8)~(10)代入式(20), 可得环形电极单独作用时, 在  $P$  点产生的电场强度为

$$E_{2x} = \frac{q'}{4\pi^2 \varepsilon_0 r \sin\varphi \sqrt{a'^2 + r^2 + h^2 - 2rh\cos\varphi + 2a'r\sin\varphi}} \left[ K(k') - \frac{a'^2 + 2(r \cos\varphi - h)^2 - r^2 - h^2 + 2rh\cos\varphi}{a'^2 + r^2 + h^2 - 2rh\cos\varphi - 2a'r\sin\varphi} E(k') \right] \quad (21)$$

$$E_{2y} = 0 \quad (22)$$

$$E_{2z} = \frac{q' E(k')}{2\pi^2 \varepsilon_0 (a'^2 + r^2 + h^2 - 2rh\cos\varphi - 2a'r\sin\varphi)} \frac{r \cos\varphi - h}{\sqrt{a'^2 + r^2 + h^2 - 2rh\cos\varphi + 2a'r\sin\varphi}} \quad (23)$$

环形电极单独作用时, 在射流区空间任一点产生的场强公式为

$$E_2 = \sqrt{E_{2x}^2 + E_{2z}^2} \quad (24)$$

图 5 给出了组合电场示意图。  $E_{1x}$  和  $E_{1z}$  是喷嘴电极产生的  $x$  方向和  $z$  方向的场强大小。  $E_{2x}$  和  $E_{2z}$  是由环形电极产生的  $x$  方向和  $z$  方向的场强大小。雾滴在喷嘴处带正电荷, 离开射流区进入雾化区, 该雾滴受到喷嘴和环形电极的共同排斥作用。

利用叠加定理, 喷嘴电极和环形电极共同作用在雾化区空间任一点的场强公式为

$$E_{12} = \sqrt{(E_{1x} + E_{2x})^2 + (E_{1z} + E_{2z})^2} \quad (25)$$

电场强度与  $z$  轴的夹角为

$$\beta_{12} = \arctan \frac{E_{1x} + E_{2x}}{E_{1z} + E_{2z}} \quad (26)$$

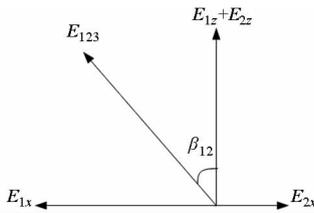


图 5 组合电场场强示意图

Fig. 5 Diagram of combined electric field strength

## 2.2 空间电荷产生电场的数学模型

雾滴连续不断地从喷嘴喷出, 在环形电极上方的雾化区, 形成稳定均匀的葫型喷雾。为了对空间电荷产生的电场进行计算, 假设: ①葫型喷雾区近似为圆锥区。②雾滴粒径相等并均匀分布在雾锥区中。③各雾滴带电量相等, 即圆锥体内任意一点的电荷量都是相等的, 则荷电喷雾区横截面是一个电荷分布均匀的带电圆盘, 根据圆盘电荷空间电场的求解方法即可求出带电雾锥区产生电场的分布情况。

按照图 6 所示坐标系, 将喷嘴形成的近似圆锥状雾锥区的顶点放在坐标系  $(0, 0, 0)$  点上, 雾锥区锥角为  $2\xi$ , 雾锥区轴线与  $z$  轴重合, 雾滴运动方向与  $z$  轴方向一致, 雾锥区高度为喷嘴与金属网格的距离 21 mm, 则雾锥区在  $xz$  面上的投影如图 6 所示。

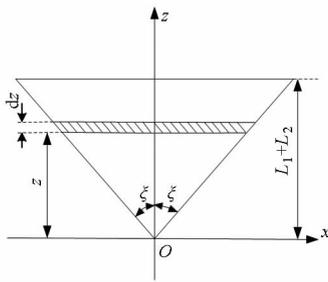


图 6 雾锥区在  $xz$  平面上的投影图

Fig. 6 Projection map of spraying area in  $xz$  plane

圆锥喷雾区体积为

$$V = \frac{1}{3} \pi (L_1 + L_2)^3 \tan^2 \xi \quad (27)$$

圆锥喷雾区总带电量为  $q''$ , 故体积电荷密度为

$$\sigma' = \frac{3q''}{\pi (L_1 + L_2)^3 \tan^2 \xi} \quad (28)$$

沿圆锥轴向取宽度为  $dz$  的单位元, 该单位元视为一个电荷均匀分布的圆盘电荷, 其在  $xy$  平面上的投影见图 7。设单位元与坐标系圆心  $O$  的垂直距

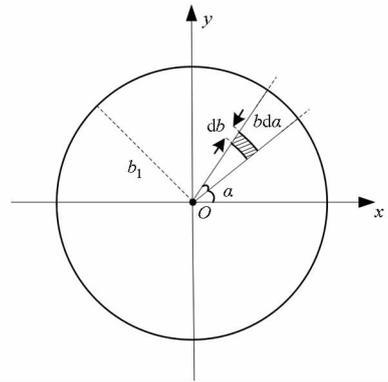


图 7 圆盘电荷微电荷选取示意图

Fig. 7 Diagram of unit charge selected in disk charge

离为  $z$ , 则圆盘半径为

$$b_1 = z \tan \xi \quad (29)$$

如图 7 所示, 取微电荷元  $dq$ , 其体积为

$$V_q = b d\alpha dz db \quad (30)$$

微电荷量为

$$dq'' = \sigma' b d\alpha dz db = \frac{3q'' b d\alpha dz db}{\pi (L_1 + L_2)^3 \tan^2 \xi} \quad (31)$$

该微电荷元可看作点电荷, 在  $P(X, Y, Z)$  点产生的电势为

$$dV_3 = \frac{dq''}{4\pi \epsilon_0 \epsilon_r r_q} \quad (32)$$

式中  $r_q$ —— $P$  点与微电荷元之间的距离

$$r_q = \sqrt{(X - b \cos \alpha)^2 + (Y - b \sin \alpha)^2 + (Z - z)^2} \quad (33)$$

整个圆锥喷雾区在  $P$  点产生的电位为

$$V_3 = K' \int_0^{L_1+L_2} dz \int_0^{z \tan \xi} b db \int_0^{2\pi} \frac{1}{r_q} d\alpha \quad (34)$$

其中 
$$K' = \frac{3q''}{4\pi^2 (L_1 + L_2)^3 \epsilon_0 \epsilon_r \tan^2 \xi} \quad (35)$$

空间电荷在  $P$  点产生的电场强度为

$$E_{3x} = -\frac{\partial V_3}{\partial X} = K' \int_0^{L_1+L_2} dz \int_0^{z \tan \xi} b db \int_0^{2\pi} \frac{X - b \cos \alpha}{r_q} d\alpha \quad (36)$$

将  $X = r \sin \varphi, Y = 0, Z = r \cos \varphi$  代入式 (36), 可得

$$E_{3x} = -\frac{\partial V_3}{\partial X} = K' \int_0^{L_1+L_2} dz \int_0^{z \tan \xi} b db \int_0^{2\pi} \frac{r \sin \varphi - b \cos \alpha}{r_q} d\alpha \quad (37)$$

其中

$$r_q = \sqrt{(r \sin \varphi - b \cos \alpha)^2 + (b \sin \alpha)^2 + (r \cos \varphi - z)^2} \quad (38)$$

同理可得

$$E_{3y} = -\frac{\partial V_3}{\partial Y} = K' \int_0^{L_1+L_2} dz \int_0^{z \tan \xi} b db \int_0^{2\pi} \frac{-b \sin \alpha}{r_q} d\alpha \quad (39)$$

$$E_{3z} = -\frac{\partial V_3}{\partial Z} = K' \int_0^{L_1+L_2} dz \int_0^{\xi \tan \xi} b db \int_0^{2\pi} \frac{r \cos \varphi - z}{r_q} d\alpha \quad (40)$$

空间电荷在雾化区空间任一点的场强公式为

$$E_3 = \sqrt{E_{3x}^2 + E_{3y}^2 + E_{3z}^2} \quad (41)$$

### 2.3 荷电喷雾空间电场的数学模型

由于荷电喷雾空间电场是组合电极诱导电场和带电雾锥区雾滴空间电荷产生电场的合成电场,所以根据叠加原理可以得到在雾化区空间任一点的场强公式为

$$E_{123} = \sqrt{(E_{1x} + E_{2x} + E_{3x})^2 + E_{3y}^2 + (E_{1z} + E_{2z} + E_{3z})^2} \quad (42)$$

由于场强  $|E_{3y}| \ll |E_{3x}|$ ,  $|E_{3y}| \ll |E_3|$  且  $|E_{3y}| \approx 0$ , 因此电场强度与  $z$  轴的夹角为

$$\beta_{123} = \arctan \frac{E_{1x} + E_{2x} + E_{3x}}{E_{1z} + E_{2z} + E_{3z}} \quad (43)$$

## 3 计算结果与分析

根据实验观察,利用单电极或者组合电极可形成稳定的“锥-射流”喷雾模式,主要结构特征为:整个射流雾化流场总体可分为射流区和雾化区;射流区喷嘴出口液面呈圆锥状,液面顶点处具有一股很细的射流;在雾化区该股射流的端部开始破碎成很小的雾滴,从而形成稳定的具有一定锥角的伞状喷雾。

稳定的“锥-射流”喷雾模式下雾化区产生的雾滴群具有单分散性,有利于燃料液滴下一阶段的蒸发气化,最终得以充分燃烧。本文的目的主要通过理论计算单电极和双电极的雾化区场强分布,讨论参数变化对组合场强分布的影响,为微小型荷电喷雾燃烧器的合理设计提供参考。

### 3.1 环形电极单独作用的场强分布

利用公式(21)~(24)即可计算得出环形电极单独作用下的空间电场分布,当所加电压  $V_2$  为 1.0 kV 时计算结果如图 8 所示。计算过程中,选取球坐标系  $\varphi$  分别为  $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $46^\circ$  来进行对比分析。

场强  $E_{2z}$  在球坐标系  $\varphi$  为定值时,随着  $r$  的增大,逐渐升到峰值后又逐渐减小。峰值随着  $\varphi$  的增大而增大;当给定球坐标系  $\varphi$  时,随着  $r$  的增大,场强  $E_{2x}$  为负值逐渐升到峰值后减小到零,然后变为正值,逐渐增大再减小,其峰值随着  $\varphi$  的增大而增大。环形电极  $z$  轴上 ( $\varphi = 0^\circ$ ) 的场强  $E_{2x} = 0$ 。即随着  $r$  的增大,场强  $E_{2x}$  的方向由负  $x$  轴方向变为正  $x$  轴方向。从图中不难看出  $|E_{2z}| > |E_{2x}|$ 。

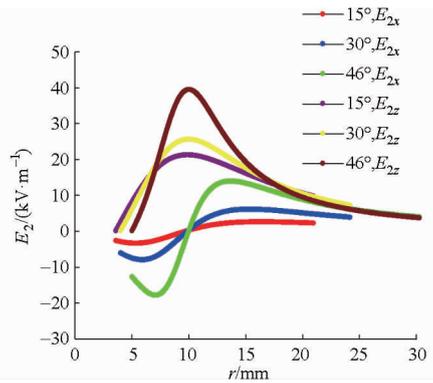


图 8 环形电极单独作用时的场强分布

Fig. 8 Distribution of electric field strength using ring electrode alone

### 3.2 改变参数对电极诱导场强分布的影响

根据实验工况条件,选取喷嘴所加电压  $V_1 = 4.2$  kV,  $V_2 = 1.0$  kV, 半雾化角为  $\xi = 92^\circ/2 = 46^\circ$ , 喷嘴到金属网格的高度  $L_1 + L_2 = 21$  mm 不变,改变参数极距  $L_1$ 、喷嘴所加电压  $V_1$ 、环形电极所加电压  $V_2$ , 可得出 4 种不同的计算工况。图 9 为利用公式(25)得到喷嘴与环形电极共同作用的场强分布对比,其场强轴对称,也是极不均匀的场强。当  $r > 7.8$  mm 时,场强随电压  $V_2$  的增大而增大,即环形电极和喷嘴电极共同在雾化区产生的电场强度与喷嘴电极单独作用的场强相比起到了明显增强的作用。

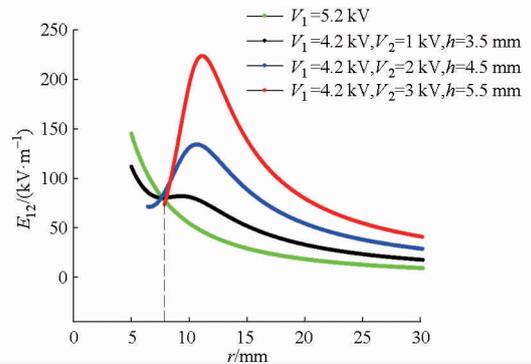


图 9 不同参数组合电极诱导场强分布

Fig. 9 Distribution of electric field strength in combined electrode induction region at different parameters

图 10 为利用公式(26)得到喷嘴与环形电极共同作用的场强角  $\beta_{12}$  分布对比。当喷嘴单独作用时,  $\beta_{12}$  的变化随着  $r$  的增大而增大;当喷嘴和环形电极共同作用时,随着  $r$  的增大,  $\beta_{12}$  先逐渐减小,然后逐渐增大。从图中不难看出,采用组合电场,有利于增大雾化角,增强了雾化的均匀性。当极距  $L_1 = 3.5$  mm,  $V_2 = 1$  kV 时,如图 11 所示,场强方向从 1 至 2 再回到 1 的过程。因为随着  $r$  的增大,  $V_2$  场强  $E_{2x}$  的方向由负  $x$  轴方向变为正  $x$  轴方向,从而改变了  $\beta_{12}$ 。电压  $V_2$  越大,场强  $E_{2x}$  对喷嘴场强  $E_{1x}$  影响越大,  $\beta_{12}$  的变化范围也越大。但是,当极距  $L_1 =$

5.5 mm、 $V_2 = 3$  kV 时,  $\beta_{12}$  从正值变化到负值再变化为正值。即如图 11 所示, 场强方向经历了从 1 至 3 再回到 1 的过程。

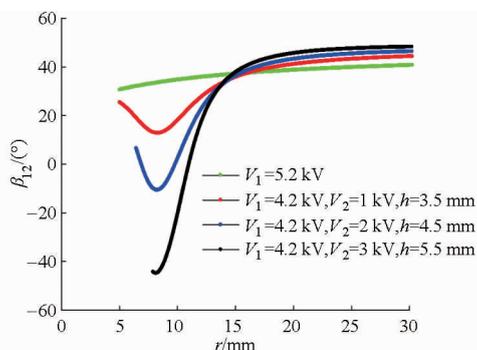


图 10 不同参数下组合电极诱导场强角  $\beta_{12}$  分布

Fig. 10 Distribution of electric field strength angle in combined electrode induction region at different parameters

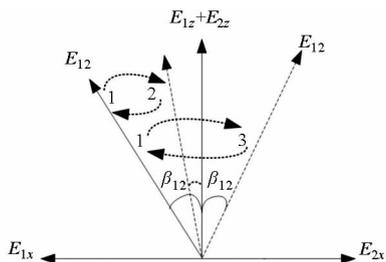


图 11 改变参数对组合电极诱导场强的影响

Fig. 11 Effects of parameters on combined electrode induction field strength

对比分析这 4 种计算工况, 选择喷嘴与环形电极之间的最小距离为 1 mm ( $h = 3.5$  mm) 和环形电极的电压为 1 kV 的组合电极, 有利于稳定的“锥-射流”雾化模式的形成。

### 3.3 空间电荷产生的场强分布

利用公式(27) ~ (41) 即可计算出空间电荷产生的电场分布如图 12 所示, 荷电雾滴所带的电荷量  $q''$  可以通过测量荷质比的实验装置测得。如图 1 所示, 装置包括电阻、金属网格和数据采集仪。金属网格作为收集器拦截荷电液滴, 其电荷量转移到金属网格, 再经检流仪器流向地极。为提高测量精度, 现采用数据采集仪和电阻替代毫安表作为检流仪器, 测出该电流  $I$ , 即可得出一定时间  $t$  雾滴的总带电量  $q''$ 。经测量当  $q_v = 1.6$  mL/h、 $V_1 = 4.2$  kV、 $V_2 = 1$  kV 时, 雾滴的轴向速度  $v$  为 5 m/s (PDA 实验测量), 放电电压为  $U = 0.06$  V,  $I$  为检测电流,  $R = 1$  M $\Omega$ ,  $t$  为测量雾滴经喷头到达金属网格所需时间, 则喷雾区总带电量  $q''$  为

$$q'' = It = \frac{U}{R} \frac{L_1 + L_2}{v} = 2.52 \times 10^{-10} \text{ C} \quad (44)$$

根据组合电场的实验工况条件, 半雾化角为  $92^\circ/2 = 46^\circ$ , 因此选取球坐标系  $\varphi$  分别为  $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、

$35^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $46^\circ$  5 种情况来进行对比分析。从图中不难看出, 球坐标系  $\varphi$  变化过程中, 场强是轴对称的极不均匀场强, 场强大小随着  $r$  的增大而减小。

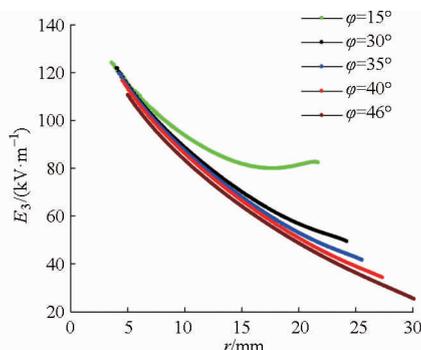


图 12 空间电荷产生的场强大小分布

Fig. 12 Distribution of electric field strength values produced by space charges

### 3.4 荷电喷雾空间场强分布

根据实验工况条件, 选取喷嘴所加电压  $V_1 = 4.2$  kV、 $V_2 = 1.0$  kV, 半雾化角为  $\xi = 92^\circ/2 = 46^\circ$ , 图 13 为利用公式(42) 得到荷电喷雾空间的场强大小分布对比, 都是随着  $r$  的增大而减小; 从图中不难看出荷电靠近电极附近, 喷雾空间的场强与电极诱导电场相比起到了略微增强的作用。但是靠近金属网格附近, 空间电荷产生的电场起到明显的增强作用, 即空间电荷产生的电场起主导作用。

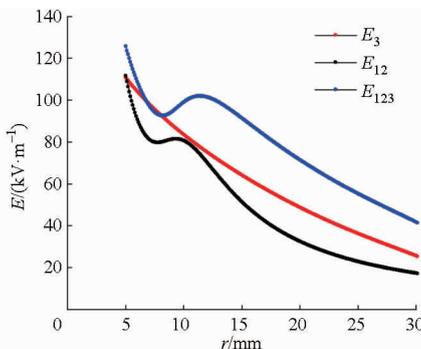


图 13 荷电喷雾空间的场强分布

Fig. 13 Distribution of electric field strength in charged spraying space

### 3.5 改变参数对荷电喷雾空间场强分布的影响

根据实验工况条件, 当  $q_v = 1.6$  mL/h、 $V_1 = 5.2$  kV 时, 放电电压为  $U = 0.027$  V, 喷雾区总带电量  $q''$  为  $1.13 \times 10^{-10}$  C。当  $q_v = 1.6$  mL/h、 $V_1 = 5.2$  kV、 $V_2 = 2$  kV 时, 放电电压为  $U = 0.07$  V, 喷雾区总带电量  $q''$  为  $2.94 \times 10^{-10}$  C。喷嘴到金属网格的高度  $L_1 + L_2 = 21$  mm 不变, 改变参数极距  $L_1$ , 可得出 4 种不同的计算工况。从图 14 中可以看出, 荷电喷雾空间场强是轴对称的极不均匀场强。当  $r > 10$  mm 时, 场强大小随电压  $V_2$  的增大而增大, 即组合电极条件下的荷电喷雾空间电场强度与喷嘴电极单独作用的荷

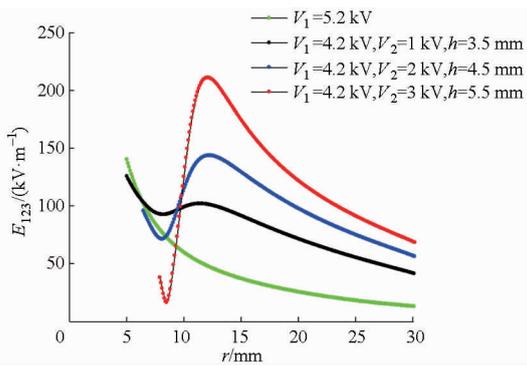


图 14 不同参数下荷电喷雾空间场强分布

Fig. 14 Distribution of electric field strength values in charged spraying space at different parameters

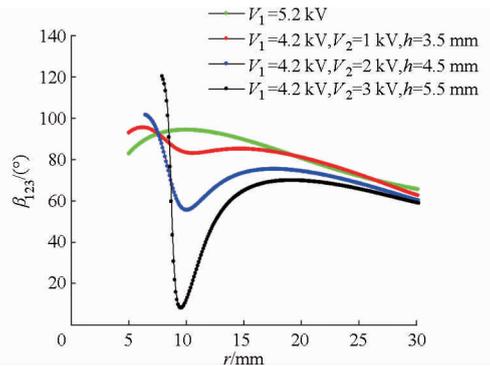


图 15 不同参数下荷电喷雾空间场强角  $\beta_{123}$  分布

Fig. 15 Distribution of electric field strength angle in charged spraying space at different parameters

电喷雾空间场强相比起到了明显增强的作用。

图 15 为利用公式 (43) 得到的不同参数下荷电喷雾空间场强角  $\beta_{123}$  分布对比。当喷嘴单独作用时,荷电喷雾空间场强曲线的变化随着  $r$  的增大而减小;当组合电极作用时,荷电喷雾空间场强曲线随着  $r$  的增大, $\beta_{123}$  先逐渐减小,然后增大再继续减小。从图中不难看出,环形电极电压越高导致场强角变化越大。场强角变化越大越不利于稳定的“锥-射流”雾化模式的形成。

对比分析这 4 种计算工况,选择喷嘴与环形电极之间的最小距离为 1 mm ( $h = 3.5$  mm)、环形电极的电压为 1 kV 的组合电极,有利于稳定“锥-射流”雾化模式的形成。

## 4 结论

(1) 实验结果发现在相同的乙醇流量下,同处于稳定“锥-射流”的雾化模式下,采用组合电场燃烧器的雾化角大于采用单电场时的雾化角,表明环

形电极的引入可提高乙醇的雾化效果。

(2) 由雾化区场强分布的计算结果可以看出,环形诱导电极在雾化区产生的场强是轴对称的极不均匀场强。

(3) 当喷嘴电压  $V_1$  处于一定值时,增大极距和环形电极电压  $V_2$ ,对组合电极在雾化区产生的电场强度大小有明显增强的作用,场强角  $\beta$  有明显变化。

(4) 空间电荷产生的场强是轴对称的极不均匀场强,场强大小随着  $r$  的增大而减小。与电极诱导电场相比,空间电荷产生的场强在荷电喷雾空间的场强作用不容忽视。尤其靠近金属网格附近,空间电荷产生的电场起主导作用。

(5) 组合电极条件下的荷电喷雾空间电场强度比喷嘴电极单独作用的荷电喷雾空间场强有明显的增强。

(6) 通过对比不同参数组合场强分布的变化,发现选择合适的极距和环形电极的电压才有利于荷电喷雾系统形成稳定的“锥-射流”雾化模式。

## 参 考 文 献

- 1 潘剑锋, 范宝伟, 吴庆瑞, 等. 微尺度下氢氧预混合气催化燃烧的研究 [J]. 机械工程学报, 2011, 47(24):111-116.  
PAN Jianfeng, FAN Baowei, WU Qingrui, et al. Study on catalytic combustion of premixed hydrogen and oxygen in the micro-scale [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(24):111-116. (in Chinese)
- 2 FAN A W, MINAEV S, SERESHCHENKO E, et al. Experimental and numerical investigations of flame pattern formations in a radial microchannel [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2009, 32: 3059-3066.
- 3 YAN Y F, TANG W M, ZHANG L, et al. Numerical investigation of components influence on characteristics of autothermal reforming of methane in micro premix chamber [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(22): 11583-11591.
- 4 TAYLOR G I. Disintegration of water drops in an electric field [J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1964, 280(1382):383-397.
- 5 SON P H, OHBA K. Theoretical and experimental investigations on instability of an electrically charged liquid jet [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2001, 24(4):605-615.
- 6 AGATHOU M, KYRITSIS D. Electrostatic atomization of hydrocarbon fuels and bio-alcohols for engine applications [J]. Energy Conversion and Management, 2012, 60:10-17.
- 7 JAWOREK A, KRUPA A. Jet and drops formation in electrohydrodynamic spraying of liquids. A systematic approach [J]. Experiments in Fluids, 1999, 27(1):43-52.
- 8 JAWOREK A, KRUPA A. Classification of the modes of EHD spraying [J]. Journal of Aerosol Science, 1999, 30(7):873-893.
- 9 LI J L. On the stability of electrohydrodynamic spraying in the cone-jet mode [J]. Journal of Electrostatics, 2007, 65(4): 251-255.

- 10 陈汇龙, 赵春英. 感应荷电喷雾静电场与荷电特性分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(10):2519-2524.  
CHEN Huilong, ZHAO Chunying. Electrostatic induction field and charging property of droplet in electrostatic spraying process [J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(10):2519-2524. (in Chinese)
- 11 DENG W W, KLEMIC J F, LI X H, et al. Liquid fuel microcombustor using microfabricated multiplexed electro spray sources [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31(2): 2239-2246.
- 12 YULIATI L, SEO T, MIKAMI M. Liquid-fuel combustion in a narrow tube using an electro spray technique [J]. Combustion and Flame, 2012, 159(1):462-464.
- 13 甘云华, 佟洋, 罗智斌. 乙醇在微尺度单电极燃烧器内雾化与燃烧实验研究[J]. 化工学报, 2015, 66(11): 4597-4602.  
GAN Yunhua, TONG Yang, LUO Zhibin. Electro-spraying and combustion of alcohol in micro-combustor with single electrode [J]. CIESC Journal, 2015, 66(11): 4597-4602. (in Chinese)
- 14 GAN Y H, WANG M, LUO Y L, et al. Effects of direct-current electric fields on flame shape and combustion characteristics of ethanol in small-scale [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2016, 8(1):1-14.
- 15 MIKAMI M, MAEDA Y, MATSUI K, et al. Combustion of gaseous and liquid fuels in meso-scale tubes with wire mesh [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2013, 34(2):3387-3394.
- 16 GAN Y H, LUO Z B, CHENG Y P, et al. The electro-spraying characteristics of ethanol for application in a small-scale combustor under combined electric field [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 87: 595-604.
- 17 GAN Y H, LUO Y L, WANG M, et al. Effect of alternating electric fields on the behavior of small-scale laminar diffusion flames [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 89:306-315.
- 18 史艳玲, 罗智斌, 甘云华, 等. 小尺度荷电锥射流场强分布特性分析[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4):15-20.  
SHI Yanling, LUO Zhibin, GAN Yunhua, et al. Analysis on the distribution of electric field strength of a small-scale cone-jet electro-spraying [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4):15-20. (in Chinese)
- 19 周海英, 陈浩. 均匀带电细圆环的电场的一般分布[J]. 大学物理, 2004, 23(9): 32-34.  
ZHOU Haiying, CHEN Hao. Space distribution of electrical field generated by a uniformly charged ring [J]. College Physics, 2004, 23(9): 32-34. (in Chinese)
- 20 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)
- 21 程昌林, 李业凤, 王慧. 有限长均匀带电薄圆柱面的电场[J]. 大学物理, 2004, 23(2):34-35.  
CHENG Changlin, LI Yefeng, WANG Hui. The electric field of finite length uniformly charged thin cylindrical surface [J]. College Physics, 2004, 23(2):34-35. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 299 页)

- 17 鲍一丹, 沈杰辉. 基于叶片电特性和叶水势的植物缺水度研究[J]. 浙江大学学报:农业与生命科学版, 2005, 31(3):341-345.  
BAO Yidan, SHEN Jiehui. Study of plant water lack message based on electric property and water potential of leaf [J]. Journal of Zhejiang University: Agric. & Life Sci., 2005, 31(3): 341-345. (in Chinese)
- 18 郭文川, 刘东雪, 周超超, 等. 基于电容特性的植物叶片含水率无损检测仪[J]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 288-293.  
GUO Wenchuan, LIU Dongxue, ZHOU Chaochao, et al. Non-destructive moisture detector for plant leaves based on capacitance [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10):288-293. (in Chinese)
- 19 BAO J Z, DAVIS C C, SCHMUKLER R E. Frequency domain impedance measurements of erythrocytes [J]. Biophys. J., 1992, 61(5): 1427-1434.
- 20 HINTON A J, SAYERS B. Advanced instrumentation for bioimpedance measurements [EB/OL]. [2015-11-13]. [http://www.solartronanalytical.com/download/Advanced instrumentation for bioimpedance measurements. pdf](http://www.solartronanalytical.com/download/Advanced%20instrumentation%20for%20bioimpedance%20measurements.pdf).
- 21 JORCIN J B, ORAZEM M E, PEBERE N, et al. CPE analysis by local electrochemical impedance spectroscopy [J]. Electrochimica Acta, 2006, 51(8-9): 1473-1479.
- 22 YASUMASA A, KOICHI M, NAOTO W. Electrical impedance analysis of potato tissues during drying [J]. Journal of Food Engineering, 2014, 121: 24-31.
- 23 ANA F, JOSÉ L, MARÍA B, et al. Application of nondestructive impedance spectroscopy to determination of the effect of temperature on potato microstructure and texture [J]. Journal of Food Engineering, 2014, 133:16-22.