

小尺度荷电锥-射流场强分布特性研究*

史艳玲¹ 罗智斌^{2,3} 甘云华^{2,3} 徐敏^{2,3}

(1. 华南农业大学工程学院, 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: 基于微小尺度荷电喷雾燃烧系统,进行了组合电场下乙醇的荷电雾化实验,得出了稳定的锥-射流雾化模式,并基于该模式,进行了理论分析计算。借助直角坐标系与极坐标的关系,采用椭圆积分的方法,求解出组合电场下射流区的场强分布。研究结果表明:环形电极在射流区产生的场强在喷嘴中心处产生的电场强度最大,环形电极圆心处的场强为 0 V/m,当其他条件相同时,场强随着半锥角的增大而增大。环形电极的半径远大于喷嘴半径,极距较小,环形电极在射流区产生的场强与喷嘴电极所产生的场强相比可以忽略。在球坐标系 φ 为 $0^\circ \sim 49.3^\circ$ 范围内,射流区的电场强度分布是轴对称的极不均匀的场强,喷嘴中心处值较小,周围场强较高,利于雾滴荷电,改变环形电极电压参数,对射流区的场强分布没有影响,但对雾化区的场强起到了明显增强作用。

关键词: 微尺度燃烧 锥-射流 环形电极 场强分布 荷电喷雾

中图分类号: TK16 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)04-0015-06

Analysis on Distribution of Electric Field Strength of Small-scale Cone-jet Electro-spraying

Shi Yanling¹ Luo Zhibin^{2,3} Gan Yunhua^{2,3} Xu Min^{2,3}

(1. College of Engineering, 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: Experiments on electro-spraying were carried out under a combined electric field based on micro-scale combustion system by using ethanol as fuel. A stable cone-jet mode was obtained. And theoretical calculation was performed based on the cone-jet mode. The distribution of electric field strength was calculated by using ellipse integral method and the relationship between Cartesian coordinates and polar coordinates. The results showed that the electric field strength produced by the ring electrode alone at the center of nozzle reached its maximum value, which was 0 V/m at the position of the center of ring electrode. It increased with the increase of cone angle when all the other conditions were kept the same. The electric field strength produced by the ring electrode could be ignored compared with that produced by the nozzle electrode due to the much bigger diameter of ring electrode and smaller electrode spacing. The distribution of electric field strength in the jet region was axis-symmetry and extremely non-uniform in the angle range φ of $0^\circ \sim 49.3^\circ$. The strength in the center of nozzle was very small while it was bigger around the outer side of nozzle, which enhanced the electric induction. Changing the voltage of the ring electrode put little effect on the electric field distribution in the jet region, but the electric field strength in the spraying region was greatly increased.

Key words: Micro-scale combustion Cone-jet Ring electrode Distribution of electric field strength Electro-spraying

收稿日期: 2014-07-15 修回日期: 2014-09-07
* 国家自然科学基金资助项目(51376066)和广州市珠江科技新星资助项目(2012J220002)
作者简介: 史艳玲, 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
通讯作者: 甘云华, 教授, 博士生导师, 主要从事微小尺度燃烧及传热研究, E-mail: ganyh@scut.edu.cn

引言

微小尺度燃烧正面临着散热损失大、火焰不稳定、燃烧不完全等难题^[1]。采用荷电喷雾技术是微小尺度下液体燃料稳定燃烧的可行途径之一。因此,有必要对液体燃料在高压电场下的荷电射流及喷雾特性开展深入的研究分析。Verdoold 等^[2]给出了不同的荷电雾化模式。Stark 等^[3]通过对电流及流量的测量,讨论了锥-射流模式的稳定性。

Taylor 基于准静态假设,将圆锥体表面简化成等势面,计算出稳定的锥-射流模式下半垂直锥角约为 49.3° ^[4]。在这种锥-射流模式下形成的液滴具有粒径细小、粒径尺度单一的优点,并且可以通过电学参数来有效调节雾化效果,在纳米材料制备、农药喷洒、燃油燃烧等工程领域得到了广泛应用^[5-7]。

Hartman 等^[8]得出了一个液滴在锥-射流模式下的荷电喷雾物理模型。Li^[9]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。王贞涛等^[10]采用粒子图像速度场仪测量了毛细管微射流静电雾化流场,获得了毛细管静电雾化锥射流模式下雾场中雾滴的速度矢量图与流线图。张军等^[11]对毛细管环电极下流体的静电雾化模式进行了实验研究及理论分析。

静电场的空间非均匀分布特性对液体雾化效果产生很大的影响。陈汇龙等^[12]计算分析了喷嘴与环形电极静电场与荷电特性。汪朝晖等^[13]基于毛细管-平板电极的电喷雾二维对称模型,模拟得出酒精等液体的锥射流形状、锥射流内外部电势场和锥射流表面电场强度。

这些研究多基于单个电场下的雾化特性展开实验研究和计算分析。然而,在本课题组前期研究工作中发现,有必要采用组合电场来提高微小尺度液体燃料的雾化效果^[14-17]。本文基于微小尺度荷电喷雾燃烧系统,进行组合电场下乙醇的荷电雾化实验研究,得出稳定的锥-射流雾化模式。并基于该模式,进行理论分析计算。利用直角坐标系与极坐标的关系,采用椭圆积分的方法,求解出组合电场下射流区的场强分布。

1 实验方法与结果

本研究所采用的实验装置如图 1 所示。实验采用无水乙醇为燃料。一定流量下的乙醇由高精度的注射泵控制并输送到燃烧器喷嘴。该喷嘴为一金属毛细管,内径 0.9 mm,外径 1.2 mm。在喷嘴出口的正上方,以喷嘴的轴线为中心布置一个环形电极。该环形电极内径 12.8 mm,外径 16 mm。喷嘴出口

与环形电极的垂直距离 $L_1 = 1.0$ mm。喷嘴与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 。在环形电极正上方布置一个金属网格,该网格接地,主要起收集雾滴的作用。金属网格与环形电极之间的垂直距离 $L_2 = 30$ mm。

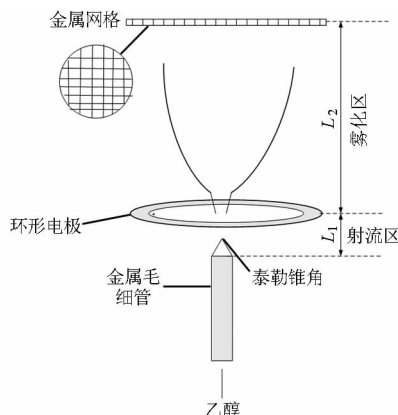


图 1 实验装置简图

Fig. 1 Experimental setup

图 2 给出了某工况下的实验照片。采用体视显微镜结合数字摄像头,并辅以激光源,对乙醇的荷电喷雾过程进行了拍摄。该实验工况条件为:乙醇流量为 $q_v = 1.0$ mL/h, $V_1 = 4.19$ kV, $V_2 = 1$ kV。由图 2 可以看出,该工况为典型的锥-射流稳定雾化模式。在喷嘴的出口,形成稳定的 Taylor 锥,经实验照片后处理测量得出其 Taylor 锥角为 74.88° 。在环形电极上方形成具有一定锥角的伞状雾化区。本文由于篇幅所限,主要基于该工况的实验结果,讨论射流区的场强分布特性。

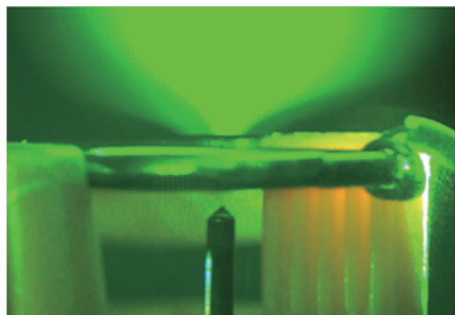


图 2 锥-射流实验照片

Fig. 2 Electro-spraying at cone-jet mode

2 理论分析

2.1 喷嘴和环形电极的电荷量

设喷嘴为均匀带电圆环,半径取喷嘴内外半径的平均值 a 为 0.525 mm,所加电压为 V_p ,半径为 a 的圆环中心为原点坐标 $O(0,0,0)$, z 轴垂直于圆环所在平面,所带电荷为 q ,电荷线密度为 $\lambda = q/(2\pi a)$ 。

另外,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的平均值 a' 为 7.1 mm, 所加电压为 V_p' , 所带电荷为 q' , 电荷线密度为 $\lambda' = q' / (2\pi a')$ 。其中环形电极圆心的坐标 O' 为 $(0, 0, h)$, 在本实验中 $h = L_1 = 1.0$ mm。

如图 3 所示, 空间一点 P 在球坐标系中用 r, φ 和 θ 表示, r 是矢量 OP 的大小, φ 为 OP 与 z 轴的夹角, θ 为 OS 与 x 轴的夹角, r' 是矢量 $O'P$ 的大小。由于空间各点电势关于 z 轴对称, 只需考虑 xOz 平面内的观测点 $P(r, \varphi, 0)$ 的电势, 则原点的位矢为: $OS = r_s = a \cos \theta i + a \sin \theta j$, 场点 P 的位矢为: $r = r \sin \varphi i + r \cos \varphi k^{[18]}$ 。于是可得矢量 PS , 即 $R = r - r_s$ 。

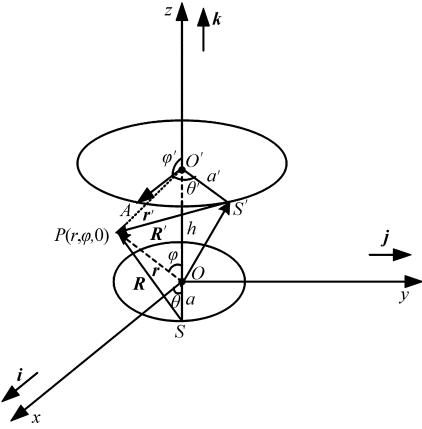


图 3 喷嘴及环形电极的空间坐标图

Fig. 3 Coordinates of nozzle and ring electrode

根据文献[19]可知, 均匀带电圆环单独作用的空间任一点 P 的电势为

$$V_p = \frac{q}{2\pi^2 \epsilon_0} \frac{1}{\sqrt{a^2 + r^2 + 2arsin\varphi}} K(k) \tag{1}$$

其中

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

$$k = \sqrt{\frac{4arsin\varphi}{a^2 + r^2 + 2arsin\varphi}} \tag{3}$$

式中 ϵ_0 ——真空介电常数

$K(k)$ ——模为 k 的第一类椭圆积分

由式(1)可得喷嘴电极的电荷 q 为

$$q = 2\pi^2 \epsilon_0 V_p \frac{\sqrt{a^2 + r^2 + 2arsin\varphi}}{K(k)} \tag{4}$$

当 P 位于 S 点时, 喷嘴圆周上的电势为外加电压 V_p , 由于第一类椭圆积分 k 隐含了条件 $k^2 < 1$, 即 $\varphi = 90^\circ$ 时 $r \neq a$ 。所以将 $\varphi = 90^\circ, r = 0.99a, V_p = 4.19$ kV, 代入式(2)~(4), 估算出该实验条件下喷嘴电极的电荷为 $q = 114.54$ pC。

从图 3 中不难看出环形电极原点的位矢为: $OS' = r'_s = a' \cos \theta' i + a' \sin \theta' j + h k$, 场点 P 的位矢为: $r = r' \sin \varphi' i + (h + r' \cos \varphi') k$ 。于是可得矢量 $PS' = R' = r - r'_s$ 。

环形电极 dl 线段电荷在 P 点电势为

$$dV'_p = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda' dl}{R'} = \frac{\lambda'}{4\pi\epsilon_0} \frac{a' d\theta'}{\sqrt{a'^2 + r'^2 - 2a'r' \sin \varphi' \cos \theta'}} \tag{5}$$

环形电极单独作用的空间任一点 P 的电势为

$$V'_p = \frac{q'}{2\pi^2 \epsilon_0} \frac{1}{\sqrt{a'^2 + r'^2 + 2a'r' \sin \varphi'}} K(k') \tag{6}$$

根据直角坐标与极坐标的关系, 则

$$r' = \sqrt{r^2 + h^2 - 2rh \cos \varphi} \tag{7}$$

$$r \sin \varphi = r' \sin \varphi' \tag{8}$$

$$h = r \cos \varphi - r' \cos \varphi' \tag{9}$$

将式(7)~(9)代入式(6), 可得环形电极单独作用时, 在 P 点产生的电势为

$$V'_p = \frac{q'}{2\pi^2 \epsilon_0} \frac{1}{\sqrt{a'^2 + r^2 + h^2 - 2rh \cos \varphi + 2a'r \sin \varphi}} K(k') \tag{10}$$

其中

$$K(k') = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{dx}{\sqrt{1 - k'^2 \sin^2 x}} = \frac{\pi}{2} \left[1 + \left(\frac{1}{2} \right)^2 k'^2 + \left(\frac{1 \times 3}{2 \times 4} \right)^2 k'^4 + \left(\frac{1 \times 3 \times 5}{2 \times 4 \times 6} \right)^2 k'^6 + \dots \right] \tag{11}$$

$$k' = \sqrt{\frac{4a'r \sin \varphi}{a'^2 + r^2 + h^2 - 2rh \cos \varphi + 2a'r \sin \varphi}} \tag{12}$$

式中 $K(k')$ ——模为 k' 的第一类椭圆积分

由式(10)不难得出环形电极的电荷 q' 为

$$q' = 2\pi^2 \epsilon_0 V'_p \frac{\sqrt{a'^2 + r^2 + h^2 - 2rh \cos \varphi + 2a'r \sin \varphi}}{K(k')} \tag{13}$$

当 P 位于 S' 点时, 环形电极圆周上电势为外加电压 V'_p , 第一类椭圆积分 k' 隐含了条件 $k'^2 < 1$, 所以将 $\varphi' = 90^\circ (\varphi = 81.9^\circ), r' = 0.99a' (r = 7.1$ mm), $V'_p = 1.0$ kV 代入式(11)~(13), 可以估算出环形电极作用下产生的电荷 $q' = 369.51$ pC。

图 4 给出了喷嘴及环形电极各自的电荷量随外加电压之间的变化曲线。

2.2 射流区组合电场强度

根据文献[19]可知, 喷嘴电极单独作用时, 场域内任一点的电场强度为

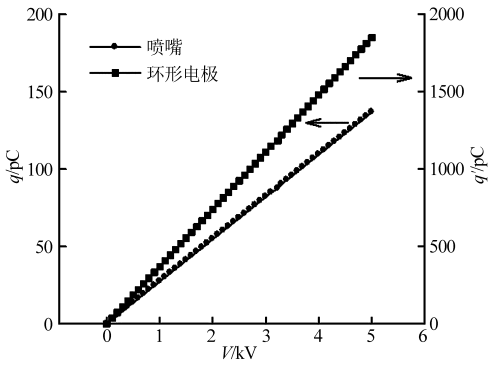


图4 喷嘴与环形电极的电荷量

Fig. 4 Electric charge on nozzle and ring electrode

$$E_x = \frac{q}{4\pi^2 \varepsilon_0 r \sin \varphi \sqrt{a'^2 + r^2 + 2ar \sin \varphi}} \cdot \left[K(k) - \frac{(a^2 + r^2 \cos 2\varphi) E(k)}{a^2 + r^2 - 2ar \sin \varphi} \right] \quad (14)$$

$$E_y = 0 \quad (15)$$

$$E_z = \frac{E(k) q r \cos \varphi}{2\pi^2 \varepsilon_0 (a^2 + r^2 - 2ar \sin \varphi) \sqrt{a'^2 + r^2 + 2ar \sin \varphi}} \quad (16)$$

$$E(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 x} dx = \frac{\pi}{2} \left[1 - \left(\frac{1}{2} \right)^2 k^2 - \left(\frac{1 \times 3}{2 \times 4} \right)^2 \frac{k^4}{3} + \left(\frac{1 \times 3 \times 5}{2 \times 4 \times 6} \right)^2 \frac{k^6}{5} + \dots \right] \quad (17)$$

式中 $E(k)$ ——模为 k 的第二类椭圆积分

喷嘴电极单独作用时,在射流区空间任一点产生的场强为

$$E_1 = \sqrt{E_x^2 + E_z^2} \quad (18)$$

同理设环形电极上的电荷元为 $dq' = \lambda' a' d\theta'$, 根据场强的计算公式可得

$$dE' = \frac{\mathbf{R}' dq'}{4\pi \varepsilon_0 R'^3} =$$

$$\frac{\lambda' a' d\theta' [(r' \sin \varphi' - a' \cos \theta') \mathbf{i} - a' \sin \theta' \mathbf{j} + r' \cos \varphi' \mathbf{k}]}{4\pi \varepsilon_0 (a'^2 + r'^2 - 2a'r' \sin \varphi' \cos \theta')^{3/2}} \quad (19)$$

将式(7)~(9)代入式(19),可得环形电极单独作用时,在 P 点产生的电场强度为

$$E'_x = \frac{q'}{4\pi^2 \varepsilon_0 r \sin \varphi \sqrt{a'^2 + r^2 + h^2 - 2rh \cos \varphi + 2a'r \sin \varphi}} \cdot \left[K(k') - \frac{a'^2 + 2(r \cos \varphi - h)^2 - r^2 - h^2 + 2rh \cos \varphi}{a'^2 + r^2 + h^2 - 2rh \cos \varphi - 2a'r \sin \varphi} E(k') \right] \quad (20)$$

$$E'_y = 0 \quad (21)$$

$$E'_z = \frac{q' E(k')}{2\pi^2 \varepsilon_0 (a'^2 + r^2 + h^2 - 2rh \cos \varphi - 2a'r \sin \varphi)} \cdot \frac{r \cos \varphi - h}{\sqrt{a'^2 + r^2 + h^2 - 2rh \cos \varphi + 2a'r \sin \varphi}} \quad (22)$$

$$E(k') = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - k'^2 \sin^2 x} dx = \frac{\pi}{2} \left[1 - \left(\frac{1}{2} \right)^2 k'^2 - \left(\frac{1 \times 3}{2 \times 4} \right)^2 \frac{k'^4}{3} + \left(\frac{1 \times 3 \times 5}{2 \times 4 \times 6} \right)^2 \frac{k'^6}{5} + \dots \right] \quad (23)$$

式中 $E(k')$ ——模为 k' 的第二类椭圆积分

环形电极单独作用时,在射流区空间任一点产生的场强为

$$E_2 = \sqrt{E'_x{}^2 + E'_z{}^2} \quad (24)$$

图5给出了组合电场的示意图。 E_x 是由喷嘴电极单独作用时,产生的 x 方向的场强; E_z 是由喷嘴电极单独作用时,产生的 z 方向的场强。 E'_x 是由环形电极单独作用时,产生的 x 方向的场强; E'_z 是由环形电极单独作用时,产生的 z 方向的场强。雾滴在喷嘴处带正电荷,离开喷嘴后进入射流区,射流区的电场强度由喷嘴和环形电极的电场共同起作用。利用叠加定理,可得到喷嘴和环形电极共同作用时,射流区空间任一点的场强为

$$E = \sqrt{(E_x + E'_x)^2 + (E_z + E'_z)^2} \quad (25)$$

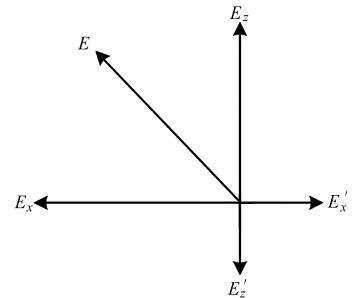


图5 组合电场的场强

Fig. 5 Combined electric field strength

3 计算结果与分析

3.1 环形电极单独作用

当喷嘴所加电压 V_1 为 0 kV, 环形电极 V_2 为 1 kV 时,利用式(24)即可计算得出环形电极单独作用下的空间电场分布,其计算结果如图6所示。当圆环半径 r 为常量时,场强随着球坐标系中 φ 的增大而增大。在喷嘴中心处 O 点 ($r = 0$ mm, $\varphi = 0^\circ$) 产生的电场强度最大,可达 9 kV/m, 环形电极圆心 O' 点 ($r = h = 1.0$ mm, $\varphi = 0^\circ$) 处场强最小为 0 kV/m。

实验条件下测得的 Taylor 锥的半锥角 α 为 37.44° , 而 Taylor 简化计算得出的半锥角 α 理论值

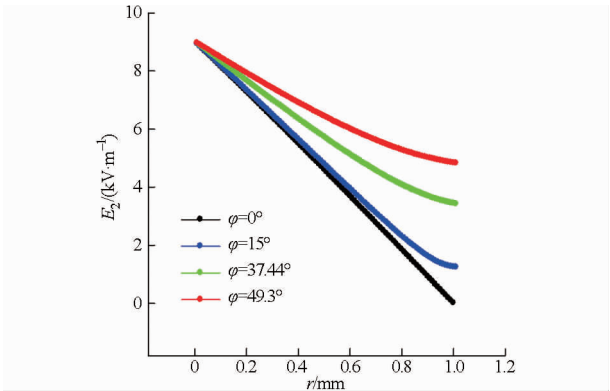


图 6 环形电极单独作用时的场强分布
Fig. 6 Distribution of electric field strength under ring electrode alone

为 49.3°,因此本文计算过程中,选取球坐标系中 φ 分别为 0°、15°、37.44°和 49.3° 4 种情况来进行对比分析。

3.2 喷嘴和环形电极共同作用

图 7 为喷嘴和环形电极分别单独作用与共同作用时的场强分布对比。

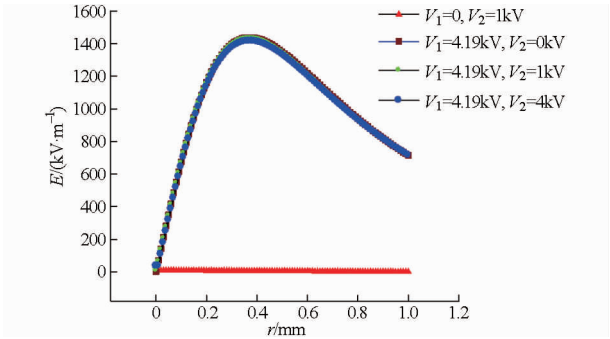


图 7 喷嘴与环形电极分别单独与共同作用的场强分布对比
Fig. 7 Comparisons of electric field strengths

根据实验工况,喷嘴所加电压 V_1 为 4.19 kV, 环形电极所加电压 V_2 为 1 kV,极距 $L_1 = 1$ mm,球坐标系中 $\varphi = 0^\circ$ 。从图中可以看出曲线 ($V_1 = 4.19$ kV, $V_2 = 0$ kV) 和曲线 ($V_1 = 4.19$ kV, $V_2 = 1.0$ kV) 基本重合,继续增大 V_2 为 4 kV,曲线 ($V_1 = 4.19$ kV, $V_2 = 0$ kV) 和曲线 ($V_1 = 4.19$ kV, $V_2 = 4$ kV) 仍基本重合,即环形电极在射流区产生的电场强度与喷嘴电压产生的场强相比可以忽略。因为环形电极的半径远大于喷嘴半径尺寸,极距较小,环形电极中心附近场强很小,所以喷嘴和环形电极共同作用时产生的场强与喷嘴单独作用产生的场强近似相等。

喷嘴和环形电极共同作用的场强是轴对称的,也是极不均匀的场强。在 $\varphi = 0^\circ$ 时,喷嘴场强从喷嘴中心即 $r = 0$ 开始,随着 r 增大开始增大,在 $r = a/\sqrt{2} = 0.525/\sqrt{2} = 0.371$ mm 处出现峰值,然后场强迅速下降。

3.3 组合电场下的场强分布

图 8 给出了喷嘴及环形电极共同作用时组合电场强度的分布规律。当给定球坐标系 φ 时,随着 r 的增大,场强逐渐升到峰值后又逐渐减小。峰值所在位置随着 φ 的增大向 r 增大的方向移动,峰值随着 φ 的增大而增大。实验条件下测得的 Taylor 锥半锥角 α 为 37.44°,Taylor 半锥角 α 理论值 49.3°,因此球坐标系中 φ 的变化范围取 0° ~ 49.3°,喷嘴周围存在不均匀的高场强, φ 越大越有利于无水乙醇离开喷嘴后充电带正电荷和电离。在本实验条件下,没有气体发生电离和激励,即无电晕放电现象,实验中所形成的锥-射流雾化模式是稳定的。

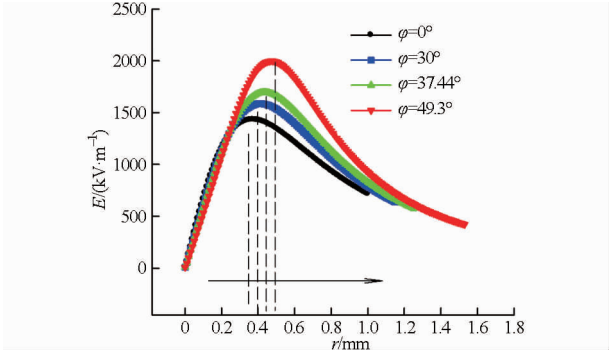


图 8 射流区的场强分布 ($V_1 = 4.19$ kV, $V_2 = 1$ kV)
Fig. 8 Distribution of electric field strength in jet region ($V_1 = 4.19$ kV, $V_2 = 1$ kV)

图 9 当球坐标系 $\varphi = 37.44^\circ$ 时,喷嘴及环形电极共同作用时锥射流的场强分布。当喷嘴电压 V_1 为 4.19 kV,将 V_2 从 0 kV 增至 4 kV,3 条曲线在射流区基本重合,即增大环形电极电压对射流区的场强没有影响,实验过程中不会发生气体电离,但环形电极电压对雾化区的场强起到了明显增强作用。

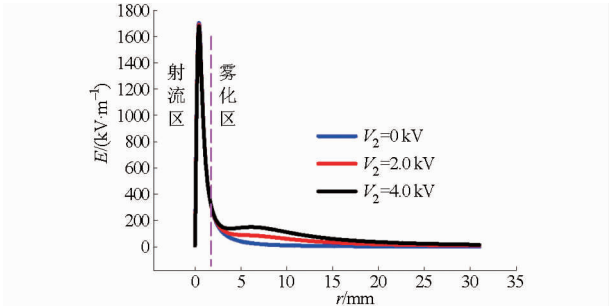


图 9 锥射流的场强分布 ($V_1 = 4.19$ kV, $\varphi = 37.44^\circ$)
Fig. 9 Distribution of electric field strength in cone-jet region ($V_1 = 4.19$ kV, $\varphi = 37.44^\circ$)

因此,通过理论计算得到的场强分布规律,可为进一步的实验提供指导,也可为优化微型燃烧器的结构设计提供理论基础。

4 结论

(1) 环形电极在射流区产生的场强在喷嘴中心

处产生的电场强度最大,环形电极圆心处的场强为 0 V/m 。当 r 为常量时,场强随着球坐标系中 φ 的增大而增大。

(2) 由于本实验系统中环形电极的半径远大于喷嘴半径,极距较小,环形电极在射流区产生的场强与喷嘴电极所产生的场强相比可以忽略。

(3) 射流区的电场强度电场分布是轴对称的极不均匀的场强,喷嘴中心数值较小。当给定球坐标系 φ 时,随着 r 的增大,场强逐渐升到峰值后又逐渐

减小,峰值所在位置随着 φ 的增大而向 r 增大方向移动,峰值随着 φ 的增大而增大。

(4) 结合理论计算和实验研究结果表明,本实验条件下,球坐标系 φ 在 $0^\circ \sim 49.3^\circ$ 范围内,在射流区,喷嘴周围的不均匀高场强无法使气体发生电离,即形成稳定的锥-射流雾化模式。改变环形电极电压参数,对射流区的场强分布没有影响,但对雾化区的场强起到了明显增强作用。

参 考 文 献

- Ju Y G, Maruta K. Microscale combustion: technology development and fundamental research [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2011, 37(6): 669–715.
- Verdoold S, Agostinho L L F, Yurteri C U, et al. A generic electrospray classification [J]. Journal of Aerosol Science, 2014, 67: 87–103.
- Stark J P W, Alexander M S, Smith K L. Electrospray pulsation: a diagnostic to understand cone-jet stability and minimum flow [J]. Journal of Applied Physics, 2014, 115(4): 044905.
- 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.
- Jaworek A, Sobczyk A T. Electrospraying route to nanotechnology: an overview [J]. Journal of Electrostatics, 2008, 66(3–4): 197–219.
- 闻建龙,王军锋,陈松山,等. 荷电喷雾燃烧的研究[J]. 农业机械学报, 2003, 34(5): 4–7.
Wen Jianlong, Wang Junfeng, Chen Songshan, et al. Experimental research on electrostatic charged spray combustion [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(5): 4–7. (in Chinese)
- 李世武,高延令,徐绍曾,等. 燃油荷电改变雾化的机理与试验研究[J]. 农业机械学报, 2000, 31(3): 19–23.
Li Shiwu, Gao Yanling, Xu Shaozeng, et al. Principle and experimental research on electrization of fuel aiming at assisting atomization [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2000, 31(3): 19–23. (in Chinese)
- Hartman R P A, Borra J P, Brunner D J, et al. The evolution of electrohydrodynamic sprays produced in the cone-jet mode, a physical model [J]. Journal of Electrostatics, 1999, 47(3): 143–170.
- Li J L. On the stability of electrohydrodynamic spraying in the cone-jet mode [J]. Journal of Electrostatics, 2007, 65(4): 251–255.
- 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)
- 张军,闻建龙,王军锋,等. 毛细管环电极下的静电雾化模式的研究[J]. 农业机械学报, 2006, 37(6): 124–127.
Zhang Jun, Wen Jianlong, Wang Junfeng, et al. Investigation on modes of electrostatic spray under capillary-annular electrode configuration [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(6): 124–127. (in Chinese)
- 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)
- 汪朝晖,蒋圣伟,高全杰. 静电喷雾轴对称锥射流模型与数值模拟[J]. 农业机械学报, 2013, 44(8): 84–89.
Wang Zhaohui, Jiang Shengwei, Gao Quanjie. Axisymmetric cone-jet model and numerical simulation for electrostatic spraying [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8): 84–89. (in Chinese)
- Gan Y H, Xu J L, Yan Y Y, et al. A comparative study on free jet and confined jet diffusion flames of liquid ethanol from small nozzles [J]. Combustion Science and Technology, 2014, 186(2): 120–138.
- 甘云华,王美,史艳玲. 乙醇小尺度射流扩散火焰燃烧温度及稳燃特性[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(17): 2802–2807.
Gan Yunhua, Wang Mei, Shi Yanling. Combustion temperature and stability characteristics of ethanol small-scale jet diffusion flame [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(17): 2802–2807. (in Chinese)
- 甘云华,罗燕来,冯清颖,等. 受限空间下散热对微火焰稳定性的影响分析[J]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 37–41, 27.
Gan Yunhua, Luo Yanlai, Feng Qingying, et al. Effect of heat loss on micro flame stability in confined space [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 37–41, 27. (in Chinese)
- 甘云华,王美,杨泽亮. 液体乙醇小尺度扩散火焰稳燃极限的实验研究[J]. 燃烧科学与技术, 2013, 19(6): 488–492.
Gan Yunhua, Wang Mei, Yang Zeliang. Stable combustion limit of small diffusion flame using liquid ethanol as fuel [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2013, 19(6): 488–492. (in Chinese)
- 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)
- 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.