

锥射流模式下乙醇静电喷雾液滴速度特性分析¹⁾

甘云华²⁾ 江政纬 李海鸽

(华南理工大学电力学院, 广州 510640)

(广东省能源高效低污染转化工程技术研究中心, 广州 510640)

摘要 研究液滴在静电喷雾下的速度特性是理解喷雾形态的形成及演化的关键. 结合锥射流模式下乙醇静电喷雾实验数据, 建立了静电喷雾二维轴对称模型. 基于离散相液滴运动方程、连续相空气运动方程、电场方程以及用户自定义函数, 进行了数值求解, 获得了锥射流模式下的乙醇静电喷雾形态、空间电场分布以及液滴速度场分布. 考虑了不同空气入口流速的影响, 得到了乙醇/空气同轴射流静电喷雾形态的变化规律. 结果表明, 喷雾外围液滴与空气流场有较强的相互作用, 导致喷雾中轴线附近的液滴速度分布变化较小, 而在喷雾外围处的液滴速度分布沿径向剧烈变化; 随着空气入口速度的增大, 乙醇/空气同轴射流静电喷雾形态先趋于发散, 当空气入口速度大于喷雾外围液滴轴向速度时, 喷雾形态则趋于聚拢. 因此, 除改变施加电压、液体流量和电极结构外, 通过控制空气入口速度来影响喷雾液滴速度场, 也可获得不同的静电喷雾效果.

关键词 锥射流, 静电喷雾, 液滴速度, 喷雾形态

中图分类号: O361.4 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-17-226

A STUDY ON DROPLET VELOCITY OF ETHANOL DURING ELECTROSPRAYING PROCESS AT CONE-JET MODE¹⁾

Gan Yunhua²⁾ Jiang Zhengwei Li Haige

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

(Guangdong Province Engineering Research Center of High Efficient and Low Pollution Energy Conversion, Guangzhou 510640, China)

Abstract An analysis on the velocity characteristics of droplets generated from electrospaying is the key to understand the formation and evolution of the spray shape. Combining with the experimental results of ethanol electrospaying at cone-jet mode, a two-dimensional axisymmetric model of electrospaying was established. Based on the droplet motion equations, air motion equations, electric field equations and user-defined functions, the model was numerically solved to obtain the spray morphology, the space electric field distribution and the droplet velocity field distribution at cone-jet mode. The effect of air inlet velocity on the spray shape and velocity field distribution of ethanol/air coaxial jet was also discussed. The results indicate that the air flow field has a strong interaction with the droplets at the periphery of the spray, leading to a smooth variation of the droplet velocity distribution near the axis of the spray, while the droplet velocity distribution at the periphery of the spray varies drastically along the radial direction. As the coaxial air inlet velocity increases, the spray shape tends to diverge first. But when the air inlet velocity increases to be greater than the axial velocity of the spray droplets, the spray shape tends to gather. Therefore, in addition to changing the applied voltage,

2017-06-20 收稿, 2017-09-27 录用, 2017-09-27 网络版发表.

1) 国家自然科学基金 (51776077, 51376066), 广州市科技计划 (201707010071) 和内燃机燃烧学国家重点实验室开放基金 (K2016-01) 资助项目.

2) 甘云华, 教授, 主要研究方向: 荷电喷雾多相流, 微尺度燃烧, 微通道传热. E-mail: ganyh@scut.edu.cn

引用格式: 甘云华, 江政纬, 李海鸽. 锥射流模式下乙醇静电喷雾液滴速度特性分析. 力学学报, 2017, 49(6): 1272-1279

Gan Yunhua, Jiang Zhengwei, Li Haige. A study on droplet velocity of ethanol during electrospaying process at cone-jet mode. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2017, 49(6): 1272-1279

liquid flow rate or electrode pattern, controlling the air inlet velocity to affect the spray velocity field can be an efficient way to control the electro spraying.

Key words cone-jet, electro spraying, droplet velocity, spray shape

引言

静电喷雾是产生粒径在微米或纳米量级液滴的行之有效的办法。相比于传统的机械雾化^[1-2], 该技术产生的液滴具有较好的单分散性, 因此已被广泛应用在诸多场合, 包括静电沉积^[3-6]、电喷雾质谱探测^[7]、食品和药物加工^[8-9]、喷雾冷却^[10]、燃料喷雾燃烧^[11-13]等。静电喷雾^[14]通常是指在静电场的作用下将液体通过毛细管喷射进入气体介质中, 液滴带电后在毛细管出口处受表面张力、静电力等联合作用后形成细小射流, 并进一步破碎成微小的单分散性液滴。根据施加电压、液体流量、电极结构以及液体物性的不同, 静电喷雾可产生不同的喷雾模式。其中, 锥射流模式下的喷雾相对稳定且产生的液滴粒径分布较为均匀。在锥射流模式下, 在毛细管口处形成稳定的半月状的液锥(也称泰勒锥), 在泰勒锥顶端会喷射出一股细小射流, 射流因其不稳定性而破碎成液滴群, 随后液滴群在电场力等作用下运动。目前的研究大多集中于泰勒锥的形成和演变^[15-21], 以及射流的不稳定性^[22-23], 而关于喷雾液滴的相关特性的研究还比较少。

Gañán-Calvo 等^[24]通过利用拉格朗日模型求解带电液滴的动量方程, 对静电喷雾开展了数值模拟研究, 揭示了喷雾液滴群的一些空间和统计学特性。Hartman 等^[25]采用类似的方法对不同液体流量和电压下的乙二醇静电喷雾液滴运动演变进行了模拟, 对比模拟和实验结果后发现液滴带电量与液滴直径的 1.5 次方成线性关系, 这与 Tang 等^[26]通过实验获得的结果相一致。Gañán-Calvo 等^[27]通过实验和理论分析获得了液滴带电量 and 粒径以及喷雾电流三者之间的标度律关系, 并指出其与液体的黏度和电导率紧密相关。Gan 等^[28-29]针对乙醇在两种不同的电极结构下的静电喷雾特性开展了实验和模拟研究, 得出了无因次流量和无因次液滴粒径以及无因次流量和无因次喷雾电流之间的标度律关系。陈效鹏等^[30-32]则研究了多毛细管喷雾的模式转变以及稳定特性, 并发现在不同数量毛细管的稳定喷雾模式下, 其喷雾起始电压、电流以及粒径和流量之间的关系有着相似的规律。可以看出, 以上研究均主要关注

静电喷雾过程中的静态参数特性, 如喷雾电流、液滴粒径以及带电量分布等, 而有关喷雾形态以及液滴运动特性的研究较少。

研究液滴在静电喷雾下的运动特性有助于深入理解喷雾形态的形成及演变过程。Zhang 等^[33]通过建立二维拉格朗日模型, 研究了液-液静电喷雾中液滴群的运动特性, 并分析了液滴粒径和带电量对其运动的影响。Arumugham-Achari 等^[34]考虑因蒸发带来的液滴传热传质效应, 将其添加至拉格朗日模型中, 通过模拟计算对比了 3 种不同物性的液体喷雾情况。Yi^[35]则通过实验测量获得了液体静电喷雾在不同温度环境下的液滴粒径和速度的空间分布, 同时依此计算得到液滴的蒸发常数。可以看出, 目前针对静电喷雾中液滴速度场的研究还比较少, 空间电场及空气流场对液滴速度场的形成及分布的影响还值得进一步探讨。本文将在实验研究的基础上, 通过建立喷雾液滴运动模型, 考虑空间电场和空气流场的作用, 对锥射流模式下乙醇静电喷雾进行数值模拟, 以获得空间电场分布以及喷雾液滴的速度分布, 并考察空气流场对喷雾液滴速度分布的影响规律, 可为以乙醇为燃料的小型荷电喷雾燃烧器的设计提供理论指导。

1 实验系统

本文针对乙醇静电喷雾的实验系统如图 1 所示。液体乙醇由微量注射泵控制在一定流量下注入不锈钢毛细管内, 通过在毛细管和金属网格之间施加一定的电势差, 使得毛细管口的乙醇液滴接触荷电并在静电力的作用下破碎成更多的小液滴, 随后在电场力的作用下朝向金属网格移动, 并在毛细管口和金属网格之间形成持续稳定的喷雾区。实验采用的毛细管内径为 0.9 mm, 毛细管口与金属网格之间的距离 H 为 26 mm。为获得稳定的锥射流喷雾, 实验中乙醇体积流量设置为 3 mL/h, 毛细管与金属网格之间的电势差为 5 kV。

利用相位多普勒分析仪 (phase Doppler anemometer, PDA) 对上述喷雾区中乙醇液滴的粒径和速度分布进行测量和分析。同时, 为获得雾滴的荷电情况,

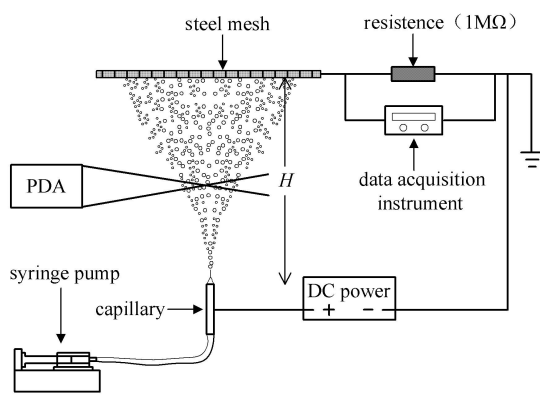


图1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic of the experimental system

对喷雾区中的喷雾电流进行测量, 即测量单位时间内金属网络上收集到的液滴带电量. 如图1所示, 在金属网格和电源地极之间串联一个标准电阻 ($1\text{ M}\Omega$), 通过数据采集仪 (Agilent 34970A) 的直流电压端口测量电阻上的电压, 根据欧姆定律可计算得到喷雾电流.

2 数值模拟

2.1 几何模型及求解方法

针对锥射流模式下喷雾区的特点, 建立二维轴对称模型, 如图2所示. 图中毛细管内径为 0.9 mm , 模拟计算区域为 $20\text{ mm}\times 30\text{ mm}$. 为提高模拟精度, 减少计算所需内存和模拟时间, 对毛细管口附近的网格进行局部加密划分. 计算时使用三套网格进行了网格独立性考核, 最终确定计算模型的网格数目为 28016.

使用 Fluent 软件进行数值模拟, 利用离散相模型模拟喷雾区中的液滴, 并采用与连续相的空气流场双向耦合计算方法. 离散相采用非稳态粒子追踪, 粒子计算时间步长为 $5\times 10^{-5}\text{ s}$. 连续相采用稳态计算, 湍流计算使用 Realizable $k-\varepsilon$ 模型和标准壁面函数法. 通过设置用户自定义标量 (user defined scalar, UDS) 引入电场, 编写用户自定义函数 (user defined function, UDF) 引入电场力并将其作为体积力加入到液滴的动量方程, 从而实现空气流场、离散雾场和空间电场的耦合模拟.

如图2所示, 两个开放边界分别代表空气入口和空气出口, 其边界类型分别设置为速度入口和压力出口, 毛细管和网格的边界类型均设置为壁面.

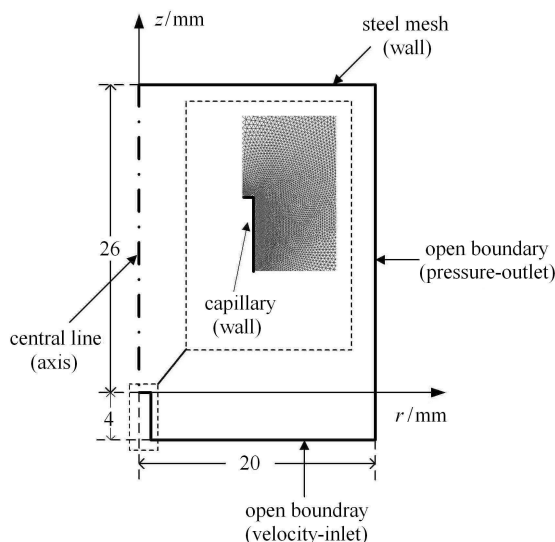


图2 二维轴对称模型示意图

Fig. 2 Schematic of the 2D axisymmetric model

2.2 液滴运动模型

在电场中运动的带电液滴主要受到黏滞阻力、重力、电场力和带电液滴间的库伦斥力作用. 带电液滴在轴线方向上的库伦斥力基本相互抵消^[3], 对液滴的轴向速度计算影响较小, 因此本模型未加考虑. 液滴在喷雾区的运动时间处于毫秒量级, 忽略液滴蒸发带来的影响. 经计算, 液滴所受重力大小较电场力和黏滞阻力小两个数量级, 因此忽略液滴重力. 此外, 假设液滴在运动过程中始终为球形, 且其带电量不随时间变化. 基于以上分析, 利用拉格朗日法计算单个带电液滴在电场中的运动轨迹, 可得到其运动方程为

$$\frac{\pi}{6}\rho d_i^3 \frac{d\mathbf{u}_i}{dt} = \mathbf{F}_d + \mathbf{F}_e \quad (1)$$

式中, ρ , d 和 \mathbf{u} 分别为液滴的密度 (kg/m^3)、直径 (m) 和速度 (m/s), 下标 i 代表第 i 个液滴, \mathbf{F}_d 和 \mathbf{F}_e 分别为液滴所受到的黏滞阻力 (N) 和电场力 (N).

由于液滴为球形, 则其所受阻力为

$$\mathbf{F}_d = C_D \frac{\pi}{8} \rho_g d_i^2 (\mathbf{u}_g - \mathbf{u}_i) |\mathbf{u}_g - \mathbf{u}_i| \quad (2)$$

式中, C_D 为阻力系数, ρ_g 为空气密度 (kg/m^3), \mathbf{u}_g 为空气速度 (m/s).

由文献 [20] 可知阻力系数为

$$C_D = \frac{24}{Re} \left(1 + \frac{Re^{2/3}}{6} \right), \quad 2 < Re < 800 \quad (3)$$

式中, Re 为液滴的雷诺数.

带电液滴在电场中所受的电场力为

$$\mathbf{F}_e = q_i \mathbf{E} \quad (4)$$

式中, q 为液滴带电量 (C), E 为电场强度 (V/m).

电场强度可由空间电势 (ϕ) 得到, 即

$$E = -\nabla\phi \quad (5)$$

静电场中空间电势分布满足泊松方程

$$\nabla^2\phi = -\frac{\rho_0}{\varepsilon_0} \quad (6)$$

式中, ρ_0 为空间电荷密度 (C/m^3), ε_0 为空气介电常数 ($C^2/N\cdot m^{-2}$). 空间电荷是指由于电极放电和带电液滴在运动过程中使空气电离而产生的分布在空气中的电荷. 由于本文中静电雾化采用的电极电压 (5 kV) 相对较低, 因此忽略电极放电的影响. 此外, 本文采用的乙醇流量 ($3 mL\cdot h^{-1}$) 也很小, 故空气中液滴分布较为稀疏, 同时经测算, 液滴的平均带电量仅为 $1.70\times 10^{-13}C$, 因此带电液滴对空间电势分布的影响可忽略. 综上, 可以忽略空间电荷对电势分布的影响, 即 $\rho_0 = 0$, 则上式可简化为拉普拉斯方程

$$\nabla^2\phi = 0 \quad (7)$$

2.3 空气运动模型

假设空气为不可压缩流体, 且其运动为绝热过程. 液滴受到空气的黏滞阻力反作用于周围空气并带动空气运动, 假设单元控制容积中的相对黏滞阻力为 $d(r, z)$, 则稳态下空气运动的连续性方程及动量方程可表示为

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(ru_r) + \frac{\partial}{\partial z}(u_z) = 0 \quad (8)$$

$$\rho_g \left(u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \mu_g \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(ru_r) \right) + \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} \right] + d_r \quad (9)$$

$$\rho_g \left(u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu_g \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right] + d_z \quad (10)$$

式中, u_r 和 u_z 分别为空气径向速度 (m/s) 和轴向速度 (m/s), μ_g 为空气动力黏度 (Pa·s).

2.4 初始条件

为得到准确的模拟结果, 需确定计算模型的初始条件, 包括乙醇液滴的粒径分布、带电量、初始速度以及初始位置等. 由 PDA 测量得到喷雾区液滴的平均直径为 $23 \mu m$, 使用 Rosin-Rammler 方法产生随

机液滴粒径分布. 根据文献 [24], 液滴的平均带电量可由喷雾电流和液体体积流量确定

$$q_{ave} = \frac{\pi}{6} d_{ave}^3 \cdot \frac{I}{Q} \quad (11)$$

式中, q_{ave} 为平均液滴带电量 (C), d_{ave} 为平均液滴直径 (m), I 为喷雾电流 (A), Q 为液体体积流量 (m^3/s).

由文献 [27], 随机产生的不同粒径的液滴带电量与其粒径服从以下关系

$$\frac{q_i}{q_{ave}} \approx \left(\frac{d_i}{d_{ave}} \right)^{1.5} \quad (12)$$

在锥射流模式下的喷雾液滴的产生位置通常在中轴线上, 初始无径向偏移. 考虑到泰勒锥的长度, 设置喷雾液滴初始位置在中轴线上, 位于毛细管口上方 1 mm 处. 根据 PDA 实验测得的射流破碎位置液体的流速, 喷雾液滴的初始轴向速度设为 8 m/s, 初始径向速度为 0.

3 结果与分析

3.1 模型验证

乙醇静电喷雾实验拍摄得到的喷雾照片和数值计算得到的喷雾形态如图 3 所示. 对比两者的外部轮廓 (outline of the spray) 可以看出两者的喷雾区形态相似, 但相比实验结果, 模拟的喷雾未出现明显的分界面 (interface of the spray), 这是由于在模拟计算中未考虑带电液滴间的库伦斥力造成的. 实验测量与数值计算得到的喷雾液滴在中轴线上的轴向速度对比如图 4 所示. 可以看出, 两者吻合较好, 实验值与模拟值的相对误差为 $-12.9\% \sim 14.7\%$, 进一步验证了模拟结果的准确性.

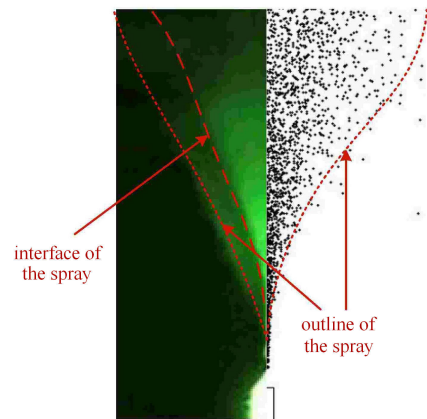


图 3 喷雾实拍图 (左) 和模拟图 (右) 对比

Fig. 3 Comparison between the experimental (left) and calculated (right) spray shape

从图 4 可见, 在由毛细管口向网格的运动过程中, 中心轴线上液滴的轴向速度先增大后减小, 最后逐渐趋于稳定. 空间电场强度轴向分量 E_z 在中心轴线上的分布如图 5 所示. 可以看出, 在靠近毛细管口处中心轴线上的轴向电场强度不断减小, 在距毛细管口大于 10 mm 之后趋于稳定, 大小约为管口处的 1/5. 由式 (1) 可知液滴主要在空气阻力和电场力的作用下运动, 在管口处由于液滴所受电场力大于其空气阻力, 导致液滴加速. 随着轴向电场强度的急剧减小, 液滴所受电场力也急剧减小, 空气阻力开始对液滴起主导作用, 液滴轴向速度因此不断减小. 由式 (2) 可知, 液滴所受空气阻力会随其速度减小而不断减小, 并逐渐与电场力达成平衡, 因此液滴轴向速度逐渐趋于稳定.

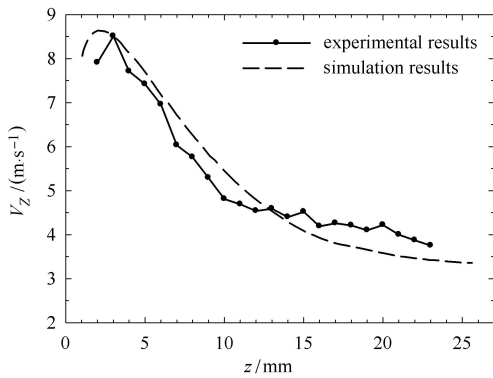


图 4 中轴线上液滴轴向速度分布

Fig. 4 The axial velocity distribution of droplets along the central axis

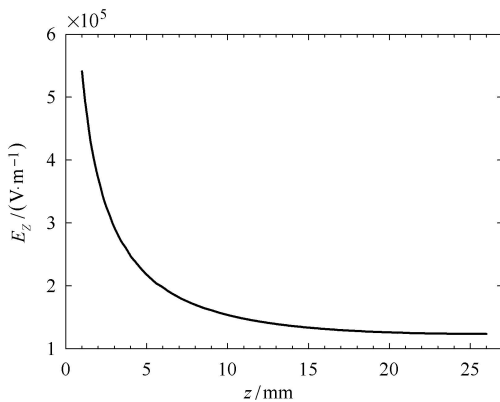


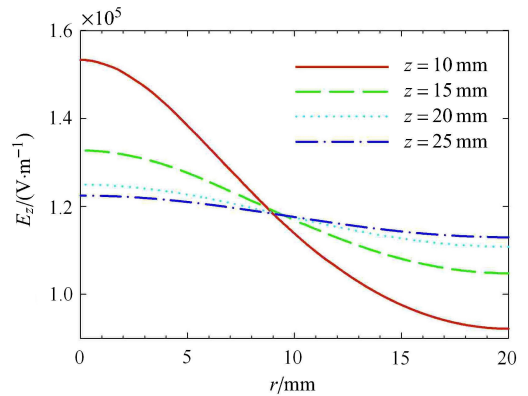
图 5 中轴线空间电场分布

Fig. 5 The distribution of electric field intensity along the central axis

3.2 空间电场与液滴速度场分布

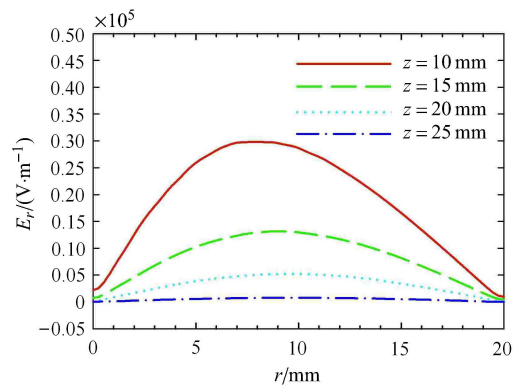
图 6(a) 和图 6(b) 分别为空间电场强度轴向分量和径向分量沿径向的分布曲线, 图 7(a) 和图 7(b) 分别为液滴轴向速度和径向速度沿径向的分布曲线,

各考察了距离毛细管口 10 mm, 15 mm, 20 mm 以及 25 mm 四个截面的情况. 由图 7(a) 可知, 不同截面离毛细管口越近液滴轴向速度越大, 且喷雾中心轴附近的液滴轴向速度比喷雾外围的液滴大. 图 7(b) 表明, 在中心轴附近一定距离之间的液滴径向速度最大, 这可由空间电场径向分量的分布 (图 6(b)) 来解释; 另外可以看出在 $z = 25$ mm 截面上, 尽管径向电场强度趋近于 0, 但液滴径向速度仍沿径向不断增加, 这是因为液滴由喷口向网格运动过程中, 其电势能不断转换为液滴的动能和空气的动能, 在喷口附近液滴对空气进行加速, 使空气沿轴向往网格流动, 而在网格附近往四周流动的空气反而对液滴产生加速作用, 使雾趋于发散. 值得注意的是, 中心轴附近的液滴速度分布较为稳定, 而在喷雾边缘处的液滴速度分布沿径向剧烈变化, 这是由于喷雾液滴群与周围空气流场发生动能交换的主要位置位于



(a) 轴向分量分布

(a) Distribution of the axial component

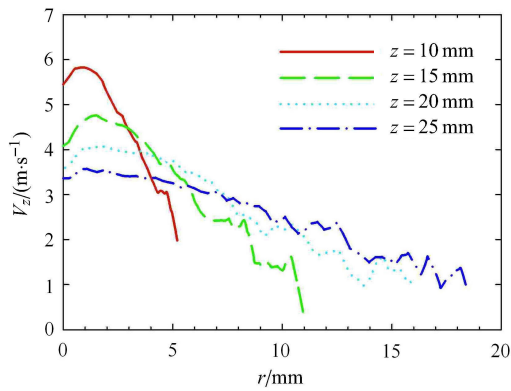


(b) 径向分量分布

(b) Distribution of the radial component

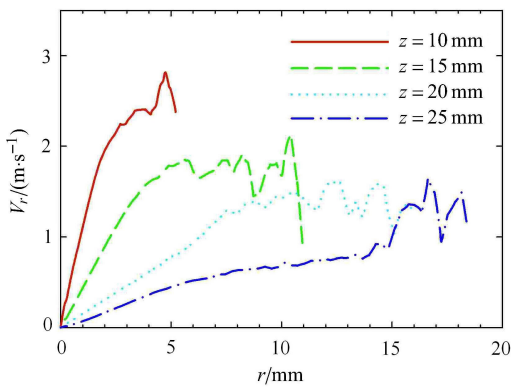
图 6 不同 z 截面电场强度分布

Fig. 6 The distribution of electric field intensity with different z-sections



(a) 轴向速度分布

(a) Distribution of the axial velocity



(b) 径向速度分布

(b) Distribution of the radial velocity

图 7 不同 z 截面液滴速度分布

Fig. 7 The velocity distribution of droplets with different z -sections

喷雾区与空气的交界面，即喷雾外围。由此可见静电喷雾是一个电场、液滴群和空气流场三者耦合的过程。

3.3 空气同轴进气速度对喷雾的影响

在实际应用中，静电喷雾可能会处于不同的环境状态中，由此本文基于上述数值模型和方法对不同空气入口速度下的静电喷雾形态进行了计算分析。图 8 为乙醇/空气同轴射流静电喷雾过程，考察空气入口速度分别为为 0 m/s, 0.5 m/s, 1 m/s, 2 m/s, 3 m/s 时喷雾形态以及流场的变化情况。图 9 为不同空气入口速度下，乙醇流量为 3 mL/h 时的喷雾形态变化情况，图 10(a) 和图 10(b) 分别为在 $z = 20$ 截面上的液滴轴向速度和径向速度分布情况。由图 9 可以看出，当空气入口速度由 0 增大到 1 m/s 时，喷雾形态趋于发散；但随着空气速度继续增大，喷雾形态开始趋于聚拢。结合液滴群的轴向速度分布来分析，可解释上

述现象。从图 7(a) 中可以看出，喷雾外围液滴轴向速度在 1 m/s 左右，当空气入口速度同样为 1 m/s 时，喷雾外围液滴在轴向上相对于空气的速度很小，此时其径向速度（见图 7(b)）占主导作用，驱使外围液滴沿径向运动，导致喷雾形态发散；当空气入口速度继续逐渐增大时，空气对液滴产生加速作用，导致液滴轴向速度增大（见图 10(a)），液滴在抵达网格前的运动时间缩短。而不同空气流速下同一截面上的外围液滴径向速度基本相等（见图 10(b)），因此外围液滴来不及沿径向发散便已到达网格，导致喷雾形态趋于聚拢。由上可知，通过控制同轴空气入口速度来影响喷雾液滴速度场，也可获得不同的静电喷雾效果。

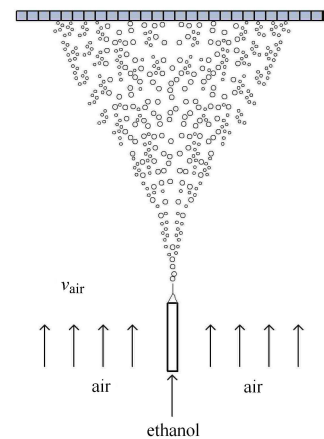


图 8 乙醇/空气同轴射流静电喷雾示意图

Fig. 8 Schematic of the electrostatic spraying of coaxial ethanol/air

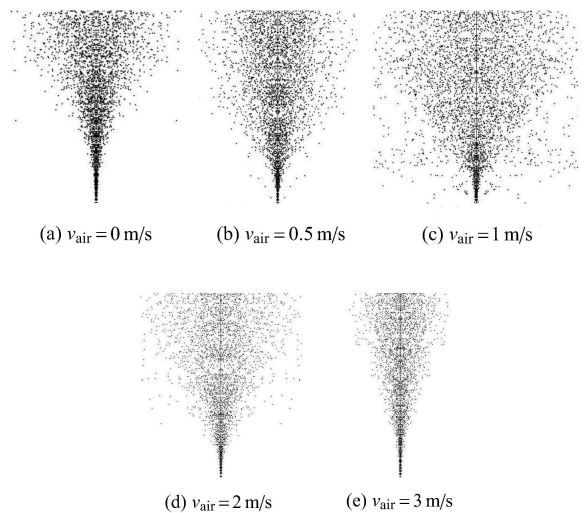
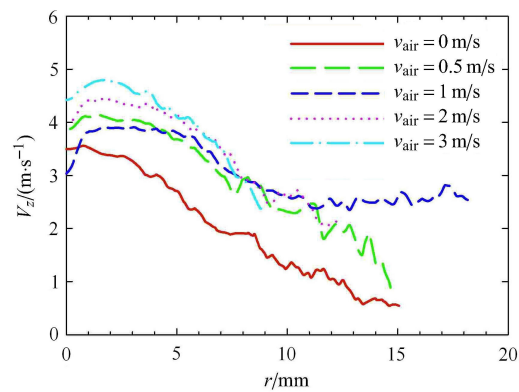


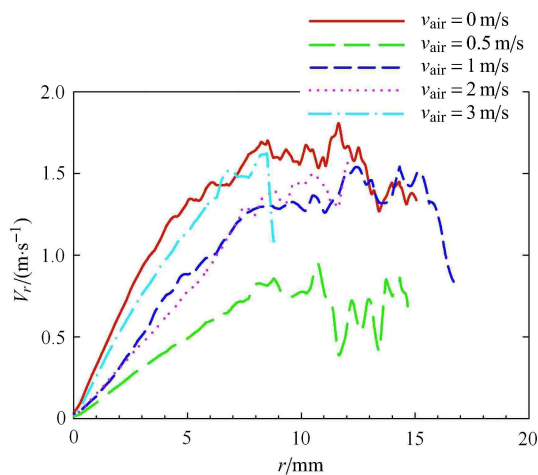
图 9 不同空气入口速度下的喷雾形态 (乙醇流量 3 mL/h)

Fig. 9 Effect of the air inlet velocity on the spray shape of ethanol (at the flow rate of 3 mL/h)



(a) 轴向速度分布

(a) Distribution of the axial velocity



(b) 径向速度分布

(b) Distribution of the radial velocity

图 10 不同空气速度下液滴速度分布 ($z = 20$ mm)

Fig.10 Effect of the air velocity on the velocity distribution of droplets

($z = 20$ mm)

4 结 论

本文通过对锥射流模式下的乙醇静电喷雾开展数值模拟,对喷雾区空间电场和液滴速度场的分布进行了分析,并探讨了空气流速对乙醇/空气同轴射流静电喷雾形态的影响,主要结论如下:

(1) 液滴向网格运动过程中,其电势能不断转换为液滴的动能和空气的动能,在喷口附近液滴对空气进行加速,使空气沿轴向方向往网格流动,而在网格附近往外部流动的空气对液滴产生加速作用,使喷雾趋于发散。

(2) 由于喷雾液滴群与周围空气发生动能交换的主要位置位于喷雾与空气的交界面,导致喷雾中心轴线附近的液滴速度分布较为稳定,而在喷雾外围

的液滴速度分布沿径向剧烈变化。

(3) 随着同轴空气流速的增大,乙醇/空气同轴射流静电喷雾先趋于发散;当空气入口速度大于喷雾外围液滴轴向速度时,喷雾趋于聚拢。因此可通过控制空气入口速度来影响喷雾液滴速度场,从而获得不同的静电喷雾效果。

参 考 文 献

- 刘赵森, 杨洋. 几何构型对流动聚焦生成微液滴的影响. 力学学报, 2016, 48(4): 867-876 (Liu Zhaomiao, Yang Yang. Influence of geometry configurations on the microdroplets in flow focusing microfluidics. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2016, 48(4): 867-876 (in Chinese))
- 阎凯, 宁智, 吕明等. 圆环旋转黏性液体射流破碎液滴粒径与速度数量密度分布相关性研究. 力学学报, 2016, 48(3): 566-575 (Yan Kai, Ning Zhi, Lü Ming, et al. Study on correlation of breakup droplet size and velocity distributions of an annular swirling viscous liquid sheet. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2016, 48(3): 566-575 (in Chinese))
- Rietveld IB, Kobayashi K, Yamada H, et al. Electro spray deposition, model, and experiment: Toward general control of film morphology. *Journal of Physical Chemistry B*, 2006, 110(46): 23351-23364
- Kim JW, Yamagata Y, Kim BJ, et al. Direct and dry micro-patterning of nano-particles by electro spray deposition through a micro-stencil mask. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2009, 19(2): 025021
- Oh H, Kim K, Kim S. Characterization of deposition patterns produced by twin-nozzle electro spray. *Journal of Aerosol Science*, 2008, 39(9): 801-813
- Temperton RH, O'Shea JN, Scurr DJ. On the suitability of high vacuum electro spray deposition for the fabrication of molecular electronic devices. *Chemical Physics Letters*, 2017, 682: 15-19
- Hsu RY, Liao JH, Tien HW, et al. Gas chromatography electro spray ionization mass spectrometry analysis of trimethylsilyl derivatives. *Journal of Mass Spectrometry*, 2016, 51(10): 883-888
- Nguyen DN, Clasen C, Van den Mooter G. Encapsulating darunavir nanocrystals within Eudragit L100 using coaxial electro spraying. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 2017, 113(Sup C): 50-59
- Khan MKI, Nazir A, Maan AA. Electro spraying: a novel technique for efficient coating of foods. *Food Engineering Reviews*, 2017, 9(2): 112-119
- Gibbons MJ, Robinson AJ. Heat transfer characteristics of single cone-jet electro sprays. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 113: 70-83
- Gan YH, Tong Y, Ju YG, et al. Experimental study on electro spraying and combustion characteristics in meso-scale combustors. *Energy Conversion and Management*, 2017, 131: 10-17
- Gan YH, Luo ZB, Cheng YP, et al. The electro-spraying characteristics of ethanol for application in a small-scale combustor under combined electric field. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 87: 595-604

- 13 Higuera FJ, Tejera JM. Vaporization and gas-phase combustion of electrospayed heptane in a small chamber. *Combustion and Flame*, 2017, 177: 144-154
- 14 尹协振, 李芳. 电雾化、电纺丝和带电射流稳定性研究. 力学与实践, 2009, 41(1): 1-7 (Yin Xiezhen, Li Fang. Electrospaying, electrospinning and instability of electrified jets. *Mechanics in Engineering*, 2009, 41(1): 1-7 (in Chinese))
- 15 Herrada MA, Lopez-Herrera JM, Ganan-Calvo AM, et al. Numerical simulation of electrospay in the cone-jet mode. *Physical Review E-Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 2012, 86(2Pt 2): 026305
- 16 Li JL. On the stability of electrohydrodynamic spraying in the cone-jet mode. *Journal of Electrostatics*, 2007, 65(4): 251-255
- 17 Rahman K, Ko JB, Khan S, et al. Simulation of droplet generation through electrostatic forces. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2010, 24(1): 307-310
- 18 王晓英, 闻建龙. 静电雾化锥射流模式下液锥形态的研究. 实验力学, 2013, 28 (3): 347-351(Wang Xiaoying, Wen Jianlong. Study of liquid cone shape in electrostatic atomization cone-jet mode. *Journal of Experimental Mechanics*, 2013, 28(3): 347-351 (in Chinese))
- 19 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. 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. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(8): 84-89 (in Chinese))
- 20 Rahmanpour M, Ebrahimi R. Numerical simulation of electrohydrodynamic spray with stable Taylor cone-jet. *Heat and Mass Transfer*, 2016, 52(8): 1595-1603
- 21 Wei W, Gu ZL, Wang S, et al. Numerical simulation of the cone-jet formation and current generation in electrostatic spray—modeling as regards space charged droplet effect. *Journal of Micromechanics & Microengineering*, 2013, 23(1): 15004-15014(11)
- 22 Hartman RPA, Brunner DJ, Camelot DMA, et al. Jet break-up in electrohydrodynamic atomization in the cone-jet mode. *Journal of Aerosol Science*, 2000, 31(1): 65-95
- 23 李广滨, 司廷, 尹协振. 电场作用下无黏聚焦射流的时间不稳定性研究. 力学学报, 2012, 44(5): 876-883 (Li Guangbin, Si Ting, Yin Xiezhen. Temporal instability study of inviscid focused jets under an electric field. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2012, 44(5): 876-883 (in Chinese))
- 24 Gañán-Calvo AM, Lasheras JC, Dávila J, et al. The electrostatic spray emitted from an electrified conical meniscus. *Journal of Aerosol Science*, 1994, 25(6): 1121-1142
- 25 Hartman RPA, Borra JP, Brunner DJ, et al. The evolution of electrohydrodynamic sprays produced in the cone-jet mode, a physical model. *Journal of Electrostatics*, 1999, 47(3): 143-170
- 26 Tang K, Gomez A. On the structure of an electrostatic spray of monodisperse droplets. *Physics of Fluids*, 1994, 6(6): 2317-2332
- 27 Gañán-Calvo AM, Dávila J, Barrero A. Current and droplet size in the electrospaying of liquids. Scaling laws. *Journal of Aerosol Science*, 1997, 28(2): 249-275
- 28 Gan YH, Zhang X, Li HG, et al. Effect of a ring electrode on the cone-jet characteristics of ethanol in small-scale electro-spraying combustors. *Journal of Aerosol Science*, 2016, 98: 15-29
- 29 Gan YH, Zhang X, Li HG, et al. The atomization current and droplet size of ethanol in two different small-scale electro-spraying systems. *Journal of Electrostatics*, 2017, 87: 228-235
- 30 陈效鹏, 王清华. 多毛细管稳定喷洒电雾化特征研究(一)——实验设备设计及粒径测量方法. 实验力学, 2011, 26(6): 692-698 (Chen Xiaopeng, Wang Qinghua. On the multi-capillary stable electrical atomization spray characteristics(I)—Experimental device design and particle size measuring method. *Journal of Experimental Mechanics*, 2011, 26(6): 692-698 (in Chinese))
- 31 刘明明, 陈效鹏, 徐晓建. 多毛细管电雾化喷洒模式及稳定喷雾特征研究. 力学学报, 2010, 42(3): 567-571 (Liu Mingming, Chen Xiaopeng, Xu Xiaojian. Experimental study on electrospay modes and steady spray characteristics with multiple metal capillaries. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2010, 42(3): 567-571 (in Chinese))
- 32 王清华, 陈效鹏, 赵梦华. 多毛细管稳定喷洒电雾化特征研究(二)——电压、电流、粒径与流量的关系. 实验力学, 2012, 27 (1): 102-107 (Wang Qinghua, Chen Xiaopeng, Zhao Menghua. On the multi-capillary stable electrical atomization spray characteristics (II) — Relation among voltage/current/droplet size and flow rate. *Journal of Experimental Mechanics*, 2012, 27 (1): 102-107 (in Chinese))
- 33 Zhang J, He HZ. The motion behavior of a group of charged droplets in liquid-liquid electrostatic spray. *Flow Turbulence and Combustion*, 2012, 89(4): 675-689
- 34 Arumugham-Achari AK, Grifoll J, Rosell-Llompart J. A comprehensive framework for the numerical simulation of evaporating electrospays. *Aerosol Science and Technology*, 2015, 49(6): 436-448
- 35 Yi TX. Laser diagnostics of an evaporating electrospay. *Experiments in Fluids*, 2014, 55(1): 1642