

双毛细管静电雾化电场特性研究

王贞涛¹ 张永辉¹ Sau Amalendu² 夏磊¹ 詹水清¹

(1. 江苏大学能源与动力工程学院, 镇江 212013; 2. 庆尚国立大学机械与航空学院, 晋州 660701)

摘要: 为探究毛细管电极形成的空间电场对静电雾化过程的影响,建立了适用于单、双毛细管静电雾化的实验系统,并采用高速数码相机记录了无水乙醇的静电雾化过程,通过系统分析雾化图像获得了滴状、纺锤形、脉动锥射流、旋转锥射流、稳定锥射流和多股射流等典型的静电雾化模式;并依据锥射流雾化模式下对应的实验工况,利用静电场叠加原理与椭圆积分方法,对单、双毛细管静电雾化电极产生的空间电场进行了理论分析与数值计算。研究表明:单、双毛细管电极的轴线上电场强度最大,电场强度随着 φ (空间中的任意一点 P 与毛细管轴线正向的夹角)的增大而减小,随着 r (原点 O 与点 P 的距离)的增大而减小;与毛细管单电极相比,相同条件下,毛细管双电极中间区域的径向电场强度减小,轴向电场强度增大,非相干区域的电场强度均增大;毛细管双电极的空间电场的分布使得静电雾化产生的射流与雾滴群等呈现“八”字状,即偏离双毛细管几何对称面向外倾斜。

关键词: 毛细管; 静电雾化; 雾化模式; 锥射流; 电场分布

中图分类号: S491 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)12-0062-08

Characteristics of Electro-field in Electro-hydrodynamics Atomization with Double Capillary

Wang Zhentao¹ Zhang Yonghui¹ Sau Amalendu² Xia Lei¹ Zhan Shuiqing¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China
2. School of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang National University, Jinju-si 660701, Korea)

Abstract: In order to investigate the effect of electric field formed by charged capillary on electrostatic atomization process, an electrostatic atomization system which was suitable for a single or double capillary was designed. Based on the electrostatic atomization system, a study on the atomization mode with ethanol was experimented, and the electro-spraying images were continuously recorded in memory by using high-speed camera. The dripping mode, spindle mode, oscillating-jet mode, precession mode, cone jet mode and multi-jet mode were obtained by systematically analyzing plenty of electrostatic atomization pictures. Under the experimental condition of the cone jet mode, based on the superposition principle of electric field and elliptic integral method, electric field of the single and double capillary electrode space was carried out by theoretical analysis and numerical calculation. The research results showed that electric field strength along the axis of capillary electrode reached its maximum value. The electric field was decreased with the decrease of φ and r , which represented the angle of point P to capillary axis in positive direction and the distance between points of O and P . Compared with single capillary under the same conditions, the electric field strength between the two capillaries along radial direction was decreased, while it was increased along axial direction. The angle between electric field and jet axis was from -9° to -2° . The electric field formed by the double capillary electrode was symmetrical with respect to $x = 0.5h$ plane, and the electric field intensity generated around each

收稿日期: 2016-07-14 修回日期: 2016-08-23
基金项目: 国家自然科学基金项目(51106064)、江苏大学青年基金扶持计划项目(FCJJ2015001)、江苏大学青年骨干教师培养工程项目和江苏省高校优势学科建设工程项目
作者简介: 王贞涛(1978—),男,副教授,主要从事荷电多相理论与应用研究,E-mail: zhentao.wang@ujs.edu.cn

capillary was opposite in the x direction. Due to the characteristics of the electric field produced by two capillaries, the droplets formed by electrostatic atomization were deviated from the geometrical symmetry of the capillary.

Key words: capillary; electrostatic atomization; atomization modes; cone jet; electric field distribution

引言

静电雾化产生的微小液滴具有粒径小、粒径均匀以及运动轨迹可控性强等优点^[1-2],因而在多种领域得到广泛的应用^[3-11]。静电雾化通过静电力作用把电势能输入给液体,为液体表面积增大提供所需能量,并且通过调整静电电压、电极形状与大小、极板间距等,可有效改变空间电场的分布,从而获得滴状模式、锥射流模式和多股射流模式等几种典型的雾化模式。在毛细管电极形成的静电场中,液体通过接触荷电方式带电后,需经过射流区、过渡区和雾化区,而空间电场的分布可影响射流、液锥与液滴的形成及破碎等过程,从而影响液滴的粒径与速度的分布等。因此,空间电场的分布对液体静电雾化过程具有影响,有必要深入开展毛细管静电雾化电场特性的研究。

吴有金等^[12]运用 Fluent 软件模拟了单毛细管静电雾化的空间电场,探讨了电场对雾化的影响。孙英琨^[13]设计了环形针状电晕放电电极,建立了诱导电场数学模型,采用模拟电荷法对该电极诱导电场进行了数值计算;选用空心圆锥喷头,建立了空间电荷产生电场的数学模型,利用 Matlab 给出了 3 类电场的电势、电场强度及其分布图。茹煜等^[14]对航空感应充电喷头环状电极诱导的电场进行了数值计算。陈汇龙等^[15]运用 Fluent 软件对感应荷电喷雾中喷嘴与环状电极静电场进行了数值模拟,并对静电场分布特性进行了详细的分析。高全杰等^[16]建立了多针电极喷雾刀梁静电场的数学模型,运用 Ansoft Maxwell 软件分析了多针电极喷雾刀梁空间中电压及电场强度,并探讨了针电极间距对静电场的影响。史艳玲等^[17]采用椭圆积分的方法求解了毛细管静电雾化锥射流模式下组合电极在射流区的电场强度。

通过对静电雾化电场特性研究现状的分析可知,国内外对静电雾化过程中电极形成的电场分布的研究较少,因而探讨毛细管静电雾化电场特性有助于深入了解静电雾化现象。本文基于单、双毛细管静电雾化模式实验系统,研究无水乙醇的静电雾化现象,获得典型的静电雾化模式;利用静电场叠加原理,运用椭圆积分方法,获得单、双毛细管电极的电势与电场强度公式;结合 Matlab

软件,求解锥射流模式下电极对应的电场强度分布规律,以期合理设计毛细管静电雾化电极提供理论支撑。

1 静电雾化模式实验

静电雾化模式实验装置如图 1 所示。实验装置包括:RSP01-B 型数字注射泵(嘉善瑞创电子科技有限公司,最大线速度 65 mm/min,最小线速度 1 $\mu\text{m}/\text{min}$;误差控制在 $\pm 0.5\%$ 范围内)、液体输送管、储液装置、负高压静电发生器、不锈钢毛细管和接收极板(直径为 150 mm 的铜板)、MotionPro X4puls 型高速数码摄像机(最大拍摄频率 10⁵ 帧/s,本实验中选择拍摄频率为 10⁴ 帧/s)、Navitar12X 型显微变焦镜头和 LED 冷光源。实验中不锈钢毛细管的型号如表 1 所示,毛细管末端与底板接收电极间距为 20 mm。不锈钢毛细管连接在注射器上,双毛细管时毛细管内径圆心的间距为 2.00 mm。雾化介质选择常用的无水乙醇,密度为 791.0 kg/m³,表面张力为 0.022 N/m,介电常数为 24,电导率为 5.0 $\times 10^{-5}$ S/m,粘度为 1.64 $\times 10^{-6}$ Pa·s。

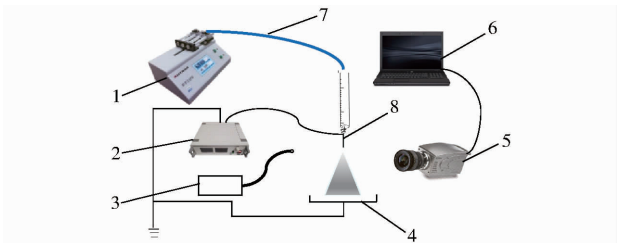


图 1 毛细管静电雾化模式实验装置
Fig. 1 Experimental equipment for EHD atomization with capillary

1. 数字注射泵 2. 负高压静电发生器 3. LED 光源 4. 接收极板 5. 高速数码相机 6. 计算机 7. 液体输送管 8. 雾化喷嘴

表 1 毛细管参数
Tab. 1 Capillary parameters

编号	型号	内径/mm	外径/mm	长度/mm
1	30G	0.16	0.23	13.00
2	24G	0.30	0.55	13.00

在单毛细管静电雾化模式实验中,采用 30G 型的单毛细管进行实验。获得了滴状模式、纺锤模式、脉动锥射流模式、旋转锥射流模式、摆动锥射流模式与多股射流模式等几种典型的雾化模式,如图 2 所示。滴状模式时,在较低的外加电压下,在毛细管末

端逐渐形成一个直径显著大于毛细管内径的液滴，当液滴重力大于表面张力的束缚时，液滴下落，形成滴状模式，如图 2a 所示。随着荷电电压的增大，电场强度有所增加，毛细管末端的弯月面在静电力作用下被拉长形成一股类似纺锤状的液丝，如图 2b 所示，纺锤与液锥分离后破碎成尺度相差较大的主液滴与一个或者几个卫星液滴。当电压与流量在一定范围内时，在毛细管末端的液体形成一个轴对称的锥，即锥射流状态，锥的末端产生关于毛细管轴线对

称的射流，其端部由于轴对称不稳定性或扭曲不稳定性破碎成微小液滴，液滴均匀地分布在毛细管轴线周围，雾化半角为 $25^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 。锥射流模式下按照其末端液滴破碎运动形态的不同，又可以分为脉动锥射流、旋转锥射流、摆动锥射流及稳定锥射流，分别如图 2c ~ 2f 所示。当电压或者流量发生改变时，毛细管末端弯月面产生多股射流，弯月面基本呈平面状，射流的位置与数量稳定，如图 2g 所示；此外还会出现分支破碎模式，如图 2h 所示。

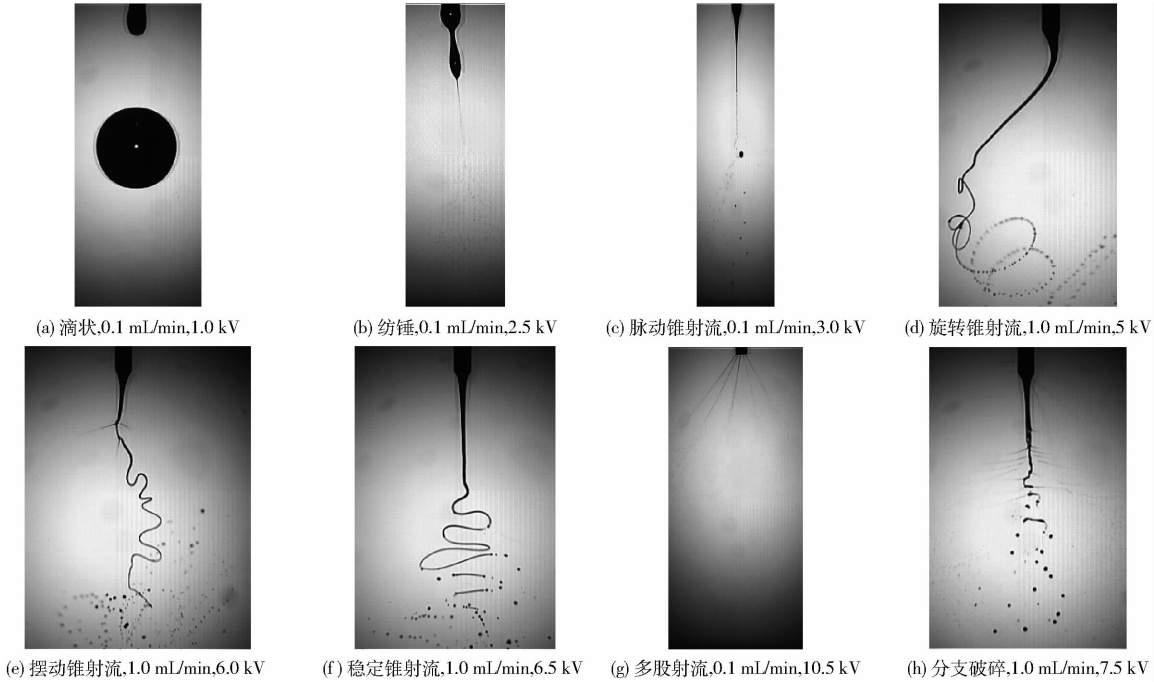


图 2 单毛细管静电雾化模式

Fig. 2 EHD atomization modes with single capillary

在双毛细管静电雾化过程中，采用型号为 24G 的毛细管作为雾化喷嘴，观察并记录了静电雾化模式。实验中依次观察到了滴状模式、纺锤模式、锥射流模式、旋转锥射流模式、摆动锥射流模式与多股射流模式等几种典型的雾化模式，与单毛细管雾化模式基本一致，如图 3 所示。在较低电压下双毛细管形成一对交替下落的液滴，如果稍微增大电压滴状模式形成的单液滴在另一侧电极的作用下将产生倾斜，仍表现为交替脱落，如图 3a、3b 所示。在纺锤模式、锥射流模式和多股射流模式下，每个毛细管末端形成的雾化模式形态与单毛细管静电雾化形成的雾化模式基本一致，不同之处在于，射流异性带电作用，双毛细管静电雾化形成的液锥与射流偏离毛细管轴线向外侧倾斜，呈现“八”字形。另外，在锥射流模式下，3 种锥射流由于带电液滴本身带电形成的局部小电场对周围液滴运动产生影响，因此雾化模式有时会交替出现。

通过单、双毛细管静电雾化形态的观察与分析

可知，不同电压与流量下的液锥、射流与液滴等运动与几何特性均不同。而这些不同的特性与毛细管形成的电场分布紧密相关，因此探讨毛细管电极形成的电场特性有利于深入理解毛细管静电雾化模式及其对应的雾化特性。

2 毛细管电极静电场理论分析

2.1 毛细管单电极

将毛细管轴心线和液体入口所在的平面（圆柱底面）的交点为坐标原点 O ，将与轴向垂直的平面作为 xOy 平面。在液体入口所在平面以半径为 a 的圆作为底面， z 轴作为高度 L 的圆柱面的轴线，从而建立如图 4 所示的直角坐标系。此时底面半径为 a 、高度为 L 的圆柱面即为金属毛细管，其中 a 为毛细管的内外径平均值。设毛细管电极为带电量为 q 金属薄圆柱面，所带电荷量均匀分布在圆柱表面，则其电荷面密度为 $\sigma = q / (2\pi aL)$ 。由对称性可知，带电金属毛细管所形成的空间电势与电场必定以 z 轴对

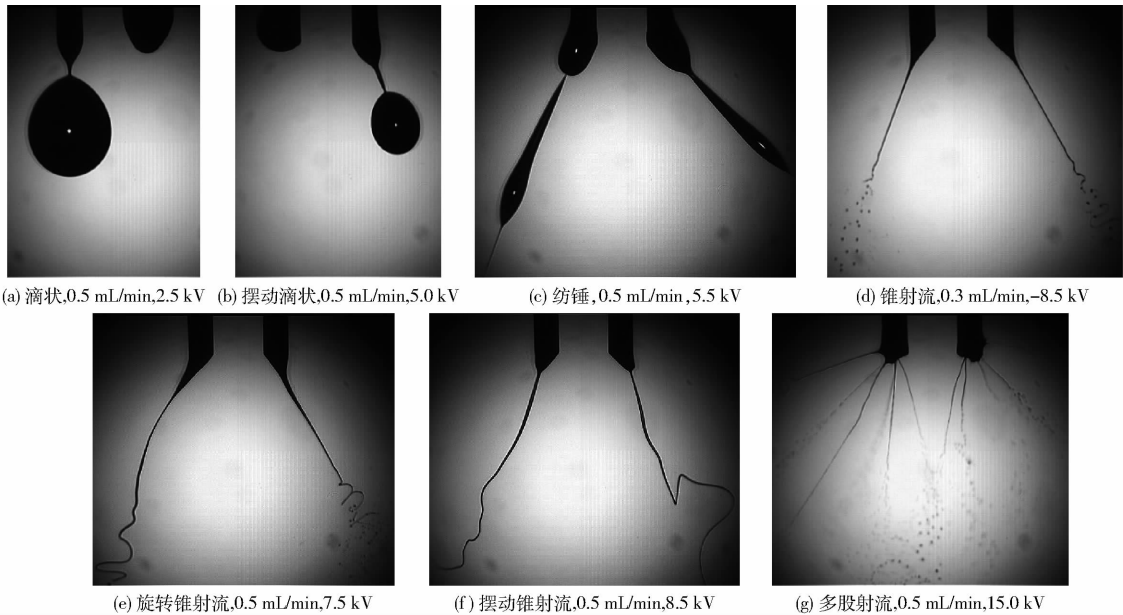


图 3 双毛细管静电雾化模式

Fig. 3 EHD atomization modes with double capillary

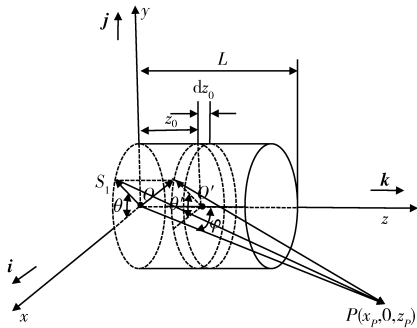


图 4 毛细管单电极的空间坐标

Fig. 4 Space coordinates of single capillary electrode

称,只要求得 xOz 平面内的电势与电场分布,则整个空间内电势与电场的分布也可以获得。

直角坐标系中,空间中任一点 P 用 x 、 y 和 z 表示,在球坐标系中用 r 、 φ 和 θ 表示。当点 P 位于 xOz 平面内时,坐标为 $(x_p, 0, z_p)$ 。 r 为矢量 O 到 P 的大小, φ 为矢量 O 到 P 与 z 轴的夹角, θ 为矢量 O 到 S 与 x 轴的夹角, r' 是矢量 O' 到 P 的大小, φ' 是矢量 O' 到 P 与 z 轴的夹角, θ' 为矢量 O' 到 S' 与 x 轴的夹角, $\theta' = \theta$, 矢量 O 到 P 与矢量 O' 到 P 分别为: $\mathbf{r} = r\sin\varphi\mathbf{i} + r\cos\varphi\mathbf{k}$, $\mathbf{r}' = r'\sin\varphi'\mathbf{i} + r'\cos\varphi'\mathbf{k}$ 。矢量 O 到 S' 与矢量 P 到 S' 分别为: $\mathbf{r}'_s = a\cos\theta'\mathbf{i} + a\sin\theta'\mathbf{j} + z_0\mathbf{k}$, $\mathbf{R}' = \mathbf{r}'_s - \mathbf{r}$ 。在金属毛细管表面上取一个角度为 $d\theta'$ 、宽度为 dz_0 的面元,与 x 轴的距离为 z_0 ,带电量 $dq = \sigma a d\theta' dz_0$, σ 为面电荷密度,则根据文献[18 - 20]可推导出毛细管壁面在点 $P(x_p, 0, z_p)$ 的电势为

$$V_P = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_0^L \int_0^{2\pi} \frac{\sigma a d\theta' dz_0}{R'} = \frac{q}{8\pi^2\epsilon_0 L} \int_0^L \int_0^{2\pi} \frac{d\theta' dz_0}{\sqrt{a^2 + r'^2 - 2ar'\sin\varphi'\cos\theta'}} \quad (1)$$

式中 ϵ_0 ——真空介电常数
令 $\theta' = \pi - 2u$, 则由换元积分法得

$$V_P = \frac{1}{2\pi^2\epsilon_0} \int_0^L \frac{K(k) dz_0}{\sqrt{a^2 + r'^2 + 2ar'\sin\varphi'}} \quad (2)$$

其中

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

即 $K(k)$ 是模为 k 的第一类椭圆积分。换算得

$$r' = \sqrt{z_0^2 + r^2 - 2rz_0\cos\varphi} \quad (4)$$
$$r'\cos\varphi' = r\cos\varphi - z_0 \quad (5)$$
$$r'\sin\varphi' = r\sin\varphi \quad (6)$$

将式(4) ~ (6)代入式(2)得毛细管单电极在 P 点产生的电势

$$V_P = \frac{q}{2\pi^2\epsilon_0 L} \int_0^L \frac{K(k) dz_0}{\sqrt{a^2 + r^2 + z_0^2 - 2rz_0\cos\varphi + 2arsin\varphi}} \quad (7)$$

其中

$$k = \sqrt{\frac{4arsin\varphi}{a^2 + r^2 + z_0^2 - 2rz_0\cos\varphi + 2arsin\varphi}} \quad (8)$$

$$q = \frac{2\pi^2\epsilon_0 LV_P}{\int_0^L \frac{K(k) dz_0}{\sqrt{a^2 + r^2 + z_0^2 - 2rz_0\cos\varphi + 2arsin\varphi}}} \quad (9)$$

毛细管单电极在 P 点产生的电场强度

$$\mathbf{E}_P = \int_0^L \int_0^{2\pi} \frac{\mathbf{R}'\sigma a}{4\pi\epsilon_0 R'^3} d\theta' dz_0 = \int_0^L \int_0^{2\pi} \frac{q[(\cos\theta' - r'\sin\varphi')\mathbf{i} + a\sin\theta'\mathbf{j} - r'\cos\varphi'\mathbf{k}]}{8\pi^2\epsilon_0 L (a^2 + r'^2 - 2ar'\sin\varphi'\cos\theta')^{\frac{3}{2}}} d\theta' dz_0 \quad (10)$$

$$E_{Px} = \frac{q}{4\pi^2 \epsilon_0 L} \cdot \int_0^L \frac{a^2 + 2(r \cos \varphi - z_0)^2 - r^2 - z_0^2 + 2rz_0 \cos \varphi}{r \sin \varphi \sqrt{a^2 + r^2 + z_0^2 - 2rz_0 \cos \varphi + 2arsin\varphi}} E(k) - K(k) dz_0 \tag{11}$$

$$E_{Pz} = \frac{q}{2\pi^2 \epsilon_0 L} \cdot \int_0^L \frac{E(k)(z_0 - r \cos \varphi)}{(a^2 + r^2 + z_0^2 - 2rz_0 \cos \varphi - 2arsin\varphi) \sqrt{a^2 + r^2 + z_0^2 - 2rz_0 \cos \varphi + 2arsin\varphi}} dz_0 \tag{12}$$

其中 $E(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \delta} d\delta =$
 $\frac{\pi}{2} \left[1 - \left(\frac{1}{2}\right)^2 k^2 - \left(\frac{1 \times 3}{2 \times 4}\right)^2 \frac{k^4}{3} + \left(\frac{1 \times 3 \times 5}{2 \times 4 \times 6}\right)^2 \frac{k^6}{5} + \dots \right]$ (13)

即 $E(k)$ 为模为 k 第二类椭圆积分。

毛细管电极单独加电时,在雾化区任一点产生的电场强度为

$$E_P = \sqrt{E_{Px}^2 + E_{Pz}^2} \tag{14}$$

电场强度与 z 轴的夹角为

$$\beta_E = \arctan \frac{E_{Px}}{E_{Pz}} \tag{15}$$

2.2 毛细管双电极

在如图 4 所示的 x 轴正方向与原点 O 的距离为 h 处添加一个均匀带电毛细管电极(圆柱体),其圆心 O_1 的坐标为 $(h, 0, 0)$, $h = 2.00 \text{ mm}$, 建立毛细管双电极的空间坐标,如图 5 所示。在毛细管双电极上施加相同的电压,其带电量也设为 q ,且均分分布在毛细管表面。

设 r'_1 为矢量 O'_1 到 P 的大小, φ'_1 是矢量 O'_1 到 P 与 z 轴的夹角,矢量 O'_1 到 S'_1 可表示为 $\mathbf{r}'_{1S} = (a \cos \theta' + h) \mathbf{i} + a \sin \theta' \mathbf{j} + z_0 \mathbf{k}$, 矢量 S'_1 到 P 可表示为 $\mathbf{R}'_1 = \mathbf{r} - \mathbf{r}'_{1S} = (r \sin \varphi - h - a \cos \theta') \mathbf{i} - a \sin \theta' \mathbf{j} + (r \cos \varphi - z_0) \mathbf{k}$, 则矢量 S'_1 到 P 的模为

$$R'_1 = \sqrt{r^2 + a^2 + h^2 + z_0^2 - 2rz_0 \cos \varphi - 2rh \sin \varphi - 2a(r \sin \varphi - h) \cos \theta'}$$

$$E_{1Px} = \frac{q}{4\pi^2 \epsilon_0 L} \int_0^L \frac{K(k'_1) - \frac{r^2 + a^2 + h^2 + z_0^2 - 2rz_0 \cos \varphi - 2rh \sin \varphi - 2(r \sin \varphi - h)^2}{r^2 + a^2 + h^2 + z_0^2 - 2rz_0 \cos \varphi - 2rh \sin \varphi - 2a(r \sin \varphi - h)} E(k'_1)}{(r \sin \varphi - h) \sqrt{r^2 + a^2 + h^2 + z_0^2 - 2rz_0 \cos \varphi - 2rh \sin \varphi + 2a(r \sin \varphi - h)}} dz_0 \tag{20}$$

$$E_{1Pz} = \frac{q}{2\pi^2 \epsilon_0 L} \int_0^L \frac{r \cos \varphi - z_0}{\sqrt{r^2 + a^2 + h^2 + z_0^2 - 2rz_0 \cos \varphi - 2rh \sin \varphi - 2a(r \sin \varphi - h)} E(k'_1) dz_0} \tag{21}$$

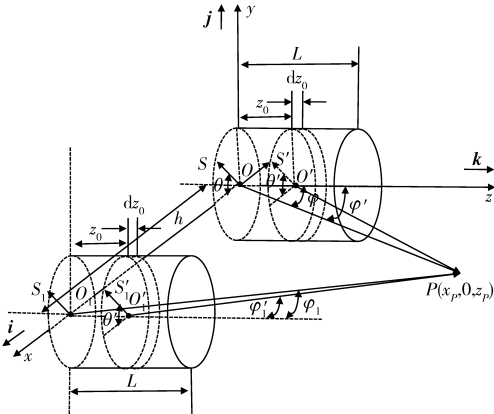


图 5 毛细管双电极的空间坐标
Fig.5 Space coordinates of double capillary electrode
则位于点 O_1 的毛细管电极在 P 点的电势为

$$V_{1P} = \int_0^L \int_0^{2\pi} \frac{\sigma a d\theta' dz_0}{4\pi \epsilon_0 R'_1} = \frac{q}{2\pi^2 \epsilon_0 L} \cdot \int_0^L \frac{K(k'_1) dz_0}{\sqrt{r^2 + a^2 + h^2 + z_0^2 - 2rz_0 \cos \varphi - 2rh \sin \varphi + 2a|r \sin \varphi - h|}} \tag{16}$$

其中 $K(k'_1) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{du}{\sqrt{1 - k_1'^2 \sin^2 u}} =$
 $\frac{\pi}{2} \left[1 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 k_1'^2 + \left(\frac{1 \times 3}{2 \times 4}\right)^2 k_1'^4 + \left(\frac{1 \times 3 \times 5}{2 \times 4 \times 6}\right)^2 k_1'^6 + \dots \right]$ (17)

$$k'_1 = \sqrt{\frac{4a|r \sin \varphi - h|}{r^2 + a^2 + h^2 + z_0^2 - 2rz_0 \cos \varphi - 2rh \sin \varphi + 2a(r \sin \varphi - h)}} \tag{18}$$

毛细管双电极在 P 点形成的空间电势为

$$V_2 = V_P + V_{1P} = \frac{q}{2\pi^2 \epsilon_0 L} \left(\int_0^L \frac{K(k) dz_0}{\sqrt{a^2 + r^2 + z_0^2 - 2rz_0 \cos \varphi + 2arsin\varphi}} + \int_0^L \frac{K(k'_1) dz_0}{\sqrt{r^2 + a^2 + h^2 + z_0^2 - 2rz_0 \cos \varphi - 2rh \sin \varphi + 2a|r \sin \varphi - h|}} \right) \tag{19}$$

基于毛细管单电极的电场强度,得到新增加的毛细管电极在 P 点形成的电场强度分量分别为:

(1) 当 $r \sin \varphi > h$ 时

$$E_{1Px} = \frac{q}{4\pi^2 \epsilon_0 L} \int_0^L \frac{K(k'_1) - \frac{r^2 + a^2 + h^2 + z_0^2 - 2rz_0 \cos \varphi - 2rh \sin \varphi - 2(r \sin \varphi - h)^2}{r^2 + a^2 + h^2 + z_0^2 - 2rz_0 \cos \varphi - 2rh \sin \varphi - 2a(r \sin \varphi - h)} E(k'_1)}{(r \sin \varphi - h) \sqrt{r^2 + a^2 + h^2 + z_0^2 - 2rz_0 \cos \varphi - 2rh \sin \varphi + 2a(r \sin \varphi - h)}} dz_0 \tag{20}$$

$$E_{1Pz} = \frac{q}{2\pi^2 \epsilon_0 L} \int_0^L \frac{r \cos \varphi - z_0}{\sqrt{r^2 + a^2 + h^2 + z_0^2 - 2rz_0 \cos \varphi - 2rh \sin \varphi - 2a(r \sin \varphi - h)} E(k'_1) dz_0} \tag{21}$$

(2) 当 $r \sin \varphi < h$ 时

$$E_{1P_x} = \frac{q}{4\pi^2 \varepsilon_0 L} \int_0^L \frac{r^2 + a^2 + h^2 + z_0^2 - 2rz_0 \cos \varphi - 2rh \sin \varphi + 2(h - r \sin \varphi)^2}{(h - r \sin \varphi) \sqrt{r^2 + a^2 + h^2 + z_0^2 - 2rz_0 \cos \varphi - 2rh \sin \varphi + 2a(h - r \sin \varphi)}} E(k'_1) - K(k'_1) dz_0 \quad (22)$$

$$E_{1P_z} = \frac{q}{2\pi^2 \varepsilon_0 L} \int_0^L \frac{r \cos \varphi - z_0}{r^2 + a^2 + h^2 + z_0^2 - 2rz_0 \cos \varphi - 2rh \sin \varphi - 2a(h - r \sin \varphi)} \cdot \frac{E(k'_1) dz_0}{\sqrt{r^2 + a^2 + h^2 + z_0^2 - 2rz_0 \cos \varphi - 2rh \sin \varphi + 2a(h - r \sin \varphi)}} \quad (23)$$

其中 $E(k'_1) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - k_1'^2 \sin^2 \delta} d\delta =$

$$\frac{\pi}{2} \left[1 - \left(\frac{1}{2} \right)^2 k_1'^2 - \left(\frac{1 \times 3}{2 \times 4} \right)^2 \frac{k_1'^4}{3} + \left(\frac{1 \times 3 \times 5}{2 \times 4 \times 6} \right)^2 \frac{k_1'^6}{5} + \dots \right] \quad (24)$$

即 $E(k'_1)$ 为模为 k'_1 第二类椭圆积分。利用电场的叠加原理, 毛细管双电极在 P 点的场强分量为

$$E_{2x} = E_{Px} + E_{1Px} \quad (25)$$

$$E_{2z} = E_{Pz} + E_{1Pz} \quad (26)$$

合场强为

$$E_2 = \sqrt{(E_{Px} + E_{1Px})^2 + (E_{Pz} + E_{1Pz})^2} \quad (27)$$

电场强度与 z 轴的夹角为

$$\beta_{E2} = \arctan \frac{E_{Px} + E_{1Px}}{E_{Pz} + E_{1Pz}} \quad (28)$$

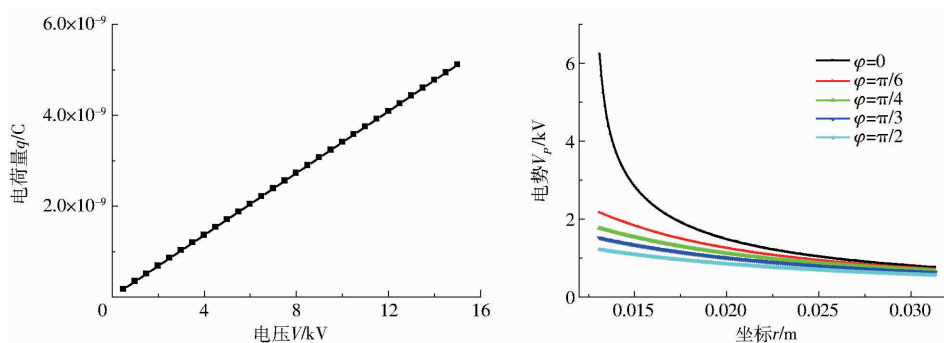


图 6 单毛细管电极的电荷量 q 与电势 V_p 分布

Fig. 6 Distributions of charge (q) and potential (V_p) of single capillary

毛细管单电极的电场强度 E_p 及其与 z 轴夹角 β_E 的分布如图 7 所示。当 r 为定值时, 合场强 E_p 随着 φ 的增大而减小; 当 φ 为定值时, 合场强随着 r 的

3 计算结果与分析

3.1 毛细管单电极

选择实验中的 30G 型毛细管单电极进行计算, 实验施加在毛细管上电压范围为 $0 \sim 15$ kV, 其内外径平均值 a 为 0.0975 mm, 长度 L 为 13.00 mm。根据式(9)可求出施加电压下毛细管单电极所带的电荷量 q , 其与电压基本保持线性关系, 如图 6 所示。根据式(7)可获得毛细管单电极在空间形成的电势分布, 如图 6 所示。当 r 为固定值, 毛细管单电极所产生的空间电势 V_p 随 φ 的增大而减小; 当 φ 为常量时, V_p 随着 r 的增大而减小; 当 $\varphi = 0$ 时, V_p 在 $r < 0.020$ m 下降幅度较大, 而当 $r > 0.020$ m, V_p 衰减得比较慢。

增大而减小, 分量电场强度 E_{Px} 与 E_{Pz} 也遵循这一规律, 并且合场强 E_p 的值与 z 方向电场强度 E_{Pz} 的数值接近, 这表明带电毛细管所形成的空间电场强度

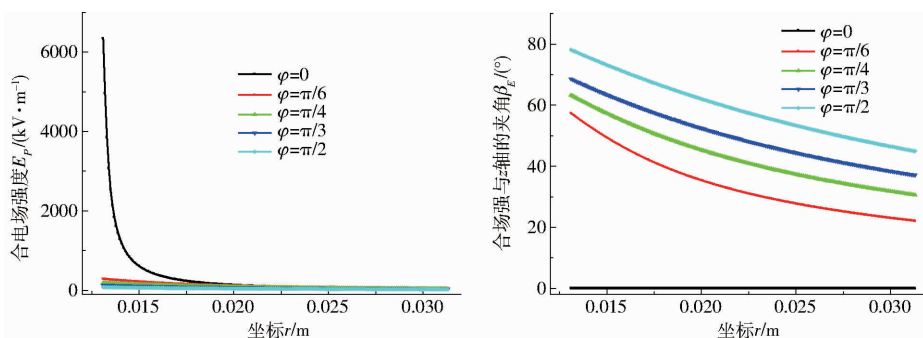


图 7 电场强度 E_p 与夹角 β_E

Fig. 7 Electric field intensity (E_p) and angle (β_E)

主要受轴向分量的影响,径向电场强度在整个空间范围内远小于轴向电场强度。合场强 E_p 与 z 轴夹角 β_e 随着 φ 的增大而增大,随着 r 的增大而减小,最大夹角约为 80° 。这与单毛细管静电雾化模式呈现的过程基本一致,当电压较低时,电场强度主要集中在 z 方向,即毛细管射流方向,毛细管射流呈现出滴状、纺锤和脉动锥射流模式,射流方向基本保持不变。当电压较高时,液滴的带电量增加,液滴表面张力在电场力作用下进一步降低,射流破碎为更为细小的液滴,液滴数量也逐渐增多。此时,在距离毛细管末端较远的射流末端,由于复杂的电场作用,射流或雾滴在电极形成的非均匀电场作用下,受到来自库仑力和取向力、梯度力等电场极化力的影响,且运动形态出现了各种形态,在毛细管雾化射流的末端出现旋转、摆动锥射流模式。此外运动的液滴还受到重力和流体粘性力的作用,射流与雾滴的运动是受力综合作用的结果,而主导作用取决于射流与液滴的尺度。静电雾化射流和雾滴的运动及雾化模式

与毛细管电极形成的电场关系十分复杂,其内在的关系需要进一步探讨。

3.2 毛细管双电极

毛细管双电极的场强 E_2 和夹角 β_{E2} 如图 8 所示。场强 E_2 随着 r 的增大而减小,随着 φ 的增大而减小,即每支毛细管轴线上的点的场强最大,但是 E_2 与 z 轴的夹角 β_{E2} 在 $-9^\circ \sim -2^\circ$ 之间。当 r 为定值时, β_{E2} 的绝对值随着 φ 的增大而增大。 $\varphi \neq \pi/2$, β_{E2} 的绝对值随着 r 的增大而减小; $\varphi = \pi/2$, 在 $r \leq 0.0185\text{ m}$ 范围内, β_{E2} 在 $-90^\circ \sim -80^\circ$ 之间, β_{E2} 的绝对值随着 r 的增大而增大; 而 $r > 0.0185\text{ m}$, β_{E2} 在 $70^\circ \sim 90^\circ$ 之间, 且随着 r 的增大而减小。这是因为 $\varphi = \pi/2$ 为垂直于毛细管壁的方向,由式(28)可知 β_{E2} 的绝对值不可超过 90° , 且仅反映了场强与 z 轴之间的夹角。因此当半径超过某个临界值时,合电场强度的方向将等于或者超过 90° 。图 8 中夹角 β_{E2} 为式(28)中数值的大小,也正说明了此处电场强度方向的突变性。

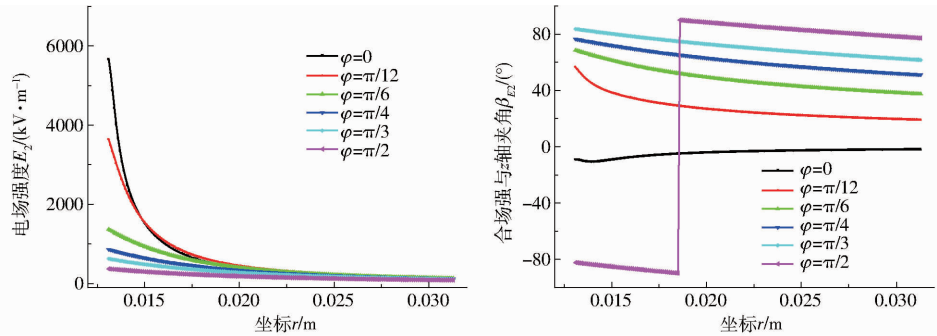


图 8 电场强度 E_2 与夹角 β_{E2}

Fig. 8 Electric field intensity (E_2) and angle (β_{E2})

当 $\varphi = 0$ 时, E_{Px} 为零, E_{1Px} 为负值, 当 $\varphi > 0$ 且 $0 < r \sin \varphi < a$, E_{Px} 和 E_{1Px} 均为负值; $a < r \sin \varphi < 0.5h$, E_{Px} 为正, E_{1Px} 为负值, $E_{Px} < |E_{1Px}|$ 。这表明在 $0 \leq r \sin \varphi < 0.5h$ 范围内, 双毛细管电极沿 x 方向场强 E_{2x} 为负值, 如图 9 所示。当 $r \sin \varphi = 0.5h$, $E_{Px} + E_{1Px} = 0$, E_{2x} 为零。当 $0.5h < r \sin \varphi < h - a$, E_{Px} 为正, E_{1Px} 为负值, $E_{Px} > |E_{1Px}|$, E_{2x} 为正值; 当 $h - a < r \sin \varphi < h$, E_{Px} 为正, E_{1Px} 为正, E_{2x} 为正值。由此可知, 双毛细管电极

形成的电场关于平面 $x = 0.5h$ 对称。在 $0 \leq x \leq 0.5h$ 区域内, E_{2x} 沿 x 负方向, 在 $x > 0.5h$ 区域内, E_{2x} 沿 x 正方向。相比单毛细管电极的电场, 在相同位置时双毛细管在 z 方向形成的电场强度有所增加, 而在 x 方向形成的电场强度也有所增加。在电场力、重力与气流粘性剪切力的作用下产生了射流与雾滴呈现出更为复杂的运动, 其运动的随机性有所增大。由于 2 个毛细管产生的电场强度方向与大

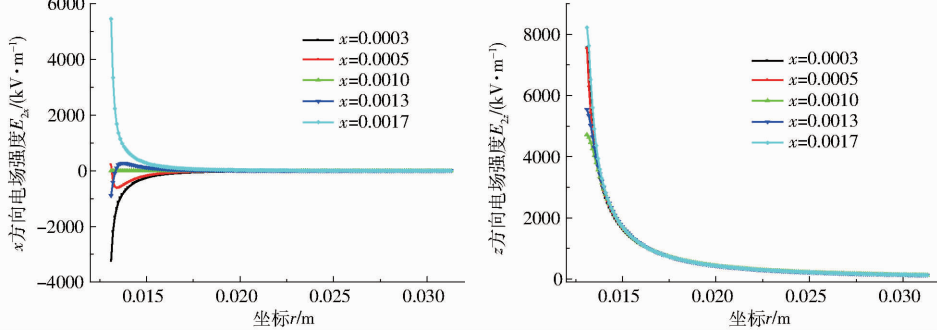


图 9 双毛细管中间区域的电场强度 E_{2x} 与 E_{2z}

Fig. 9 Electric field intensity (E_{2x}) and (E_{2z}) in coherent region of double capillary

小均关于平面 $x = 0.5h$ 对称,因此每个射流与雾滴之间形成较为明显的库仑斥力作用,毛细管末端的弯月面、液锥和射流及形成的雾滴等偏离 $x = 0.5h$ 轴线向外侧倾斜,使得双毛细管的锥射流模式雾化形态呈现“八”字状。

从图 9 中 z 方向的电场强度可看出,5 条曲线近似重合,在 $0 \leq r \sin \varphi \leq h$ 范围内, z 方向的合场强 E_z 均为正值,即毛细管双电极中间区域的轴向电场强度明显强于毛细管单电极时的情形。在 $r \leq 0.015\text{ m}$ 范围内, $r \sin \varphi$ 对应的 E_z 的差值较大, E_z 也随着 r 的增大下降得较快;而 $r > 0.015\text{ m}$,差值随着 r 的增大而减小,5 条曲线趋近于一个定值。

4 结论

(1)采用高速数码摄像机详细记录了单、双毛细管的静电雾化过程,单、双毛细管末端均出现了滴

状模式、纺锤模式、脉动锥射流模式、旋转锥射流模式、摆动锥射流模式和多股射流模式等典型的雾化模式。

(2)毛细管单电极在射流区产生的电场强度在喷嘴中心处最大,当夹角 φ 为定值时,电场强度随着圆柱坐标 r 的增大而减小,当圆柱半径 r 为定值时,电场强度随着夹角 φ 的增大而减小。

(3)毛细管双电极的场强随着圆柱坐标 r 和夹角 φ 的增大而减小。分支轴向的电场强度最大,电场强度与射流轴向的夹角在 $-9^\circ \sim -2^\circ$ 之间。毛细管双电极形成的电场关于 $x = 0.5h$ 平面具有对称性,每个毛细管周围产生的电场强度在 x 方向上是相反的,在电场力作用下毛细管双电极的模式雾化形态呈现“八”字状。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,轴向电场强度增大,非相干区域的电场强度均增大。

参 考 文 献

- 1 陈效鹏,董绍彤,程久生,等. 电雾化装置及雾化模型研究[J]. 实验力学,2000,15(1):97-103.
CHEN Xiaopeng, DONG Shaotong, Cheng Jiusheng, et al. Electrostatic atomization and the spray modes in fluid atomization[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2000, 15(1):97-103. (in Chinese)
- 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 JAWOREK A, SOBCZYK A T. Electro spraying route to nanotechnology: an overview [J]. Journal of Electrostatics, 2008, 66(3-4):197-219.
- 4 FILLMORE G L, BUEHNER W L, WEST D L. Drop charging and deflection in an electrostatic ink jet printer [J]. IBM Journal of Research and Development, 1977, 21(1):37-47.
- 5 INCULET I I. Electrostatics in industry [J]. Journal of Electrostatics, 1978, 4(2):175-192.
- 6 WANG Z T, MITRARAŠINOVIĆ A M, WEN Z J. Investigation on electrostatic breakup of bio-oil droplets [J]. Energies, 2012, 5(11):4323-4339.
- 7 FENN F, MANN M, MENG C K, et al. Electrospray ionization for mass spectrometry of large biomolecules [J]. Science, 1989, 246(4926):64-71.
- 8 LAW S E. Electrostatic pesticide spraying: concepts and practice [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1983, 19(2):160-168.
- 9 KIM J H, LEE H S, KIM H H, et al. Electrospray with electrostatic precipitator enhances fine particles collection efficiency [J]. Journal of Electrostatics, 2010, 68(4):305-310.
- 10 MARTINEZ-SANCHEZ M, POLLARD J E. Spacecraft electric propulsion—an overview [J]. Journal of Propulsion and Power, 1998, 14(5):688-699.
- 11 MARGINEAN I, PARVIN L, HEFFERMAN L, et al. Flexing the electrified meniscus: the birth of a jet in electrosprays [J]. Analytical Chemistry, 2004, 76(14):4202-4207.
- 12 吴有金,吴亚雷,许晓慧,等. PZT 溶胶液静电雾化雾场模拟[J]. 中国科学技术大学学报,2006,36(7):755-760.
WU Youjin, WU Yalei, XU Xiaohui, et al. Simulation of the aerosol of electrostatic spray of PZT sol solution [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2006, 36(7):755-760. (in Chinese)
- 13 孙英琨. 电晕荷电喷雾空间电场数值计算及影响研究[D]. 镇江:江苏大学,2007.
SUN Yingkun. Numerical calculation and influence study of the spatial electric field in electrostatic spraying [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2007. (in Chinese)
- 14 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)
- 15 陈汇龙,赵英春. 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 Yingchun. Electrostatic induction field and charging property of droplet in electrostatic spraying process [J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(10):2519-2524. (in Chinese)

- 11 LI W F, FENG J J, WU H, et al. Numerical investigation of pressure fluctuation reducing in draft tube of francis turbines[J]. International Journal of Fluid Machinery and Systems, 2015, 8(3): 202–208.
- 12 黄茜, 袁寿其, 张金凤, 等. 叶片包角对高比转数离心泵性能的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2016, 34(9): 742–747.
HUANG Xi, YUAN Shouqi, ZHANG Jinfeng, et al. Effects of blade wrap angle on performance of high specific speed centrifugal pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2016, 34(9): 742–747. (in Chinese)
- 13 钱忠东, 陆杰, 郭志伟, 等. 水泵水轮机在水轮机工况下压力脉动特性[J]. 排灌机械工程学报, 2016, 34(8): 672–678.
QIAN Zhongdong, LU Jie, GUO Zhiwei, et al. Characteristics of pressure fluctuation in pump-turbine in turbine mode [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2016, 34(8): 672–678. (in Chinese)
- 14 LI Wei, SHI Weidong, XU Yandong, et al. Effects of guide vane thickness on pressure pulsation of mixed-flow pump in pumped-storage power station[J]. Journal of Vibroengineering, 2013, 15(3): 1077–1085.
- 15 张德胜, 施卫东, 王川, 等. 斜流泵叶轮和导叶叶片数对压力脉动的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(2): 167–170.
ZHANG Desheng, SHI Weidong, WANG Chuan, et al. Influence of impeller and guide vane blade number on pressure fluctuation in mixed-flow pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(2): 167–170. (in Chinese)
- 16 施卫东, 邹萍萍, 张德胜, 等. 高比转速斜流泵内部非定常压力脉动特性[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 147–152.
SHI Weidong, ZOU Pingping, ZHANG Desheng, et al. Unsteady flow pressure fluctuation of high-specific-speed mixed-flow pump [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(4): 147–152. (in Chinese)
- 17 王春林, 贾飞, 吴志旺, 等. 高比转数混流泵非定常流场压力脉动特性[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(2): 103–108.
WANG Chunlin, JIA Fei, WU Zhiwang, et al. Pressure fluctuation of unsteady flow in high specific speed mixed-flow pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(2): 103–108. (in Chinese)
- 18 黎义斌, 李仁年, 王秀勇, 等. 低比转速混流泵压力脉动特定的数值模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(3): 205–209.
LI Yibin, LI Rennian, WANG Xiuyong, et al. Numerical analysis of pressure fluctuation in low specific speed mixed-flow pump [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(3): 205–209. (in Chinese)
- 19 黎义斌, 李仁年, 王秀勇, 等. 混流泵内部流动不稳定特性的数值模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(5): 384–389.
LI Yibin, LI Rennian, WANG Xiuyong, et al. Numerical simulation of unstable characteristics in head curve of mixed-flow pump [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(5): 384–389. (in Chinese)
- 20 靳栓宝, 王永生, 常书平, 等. 混流泵内流场压力脉动特性研究[J]. 农业机械学报, 2013, 44(3): 64–68.
JIN Shuanbao, WANG Yongsheng, CHANG Shuping, et al. Pressure fluctuation of interior flow in mixed-flow pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(3): 64–68. (in Chinese)
- 21 李伟. 斜流泵启动过程瞬态非定常内流特性及实验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2012.
LI Wei. Experimental study and numerical simulation on transient characteristics of mixed-flow pump during starting period [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2012. (in Chinese)
- 22 李伟, 季磊磊, 施卫东, 等. 混流泵非均匀轮缘间隙流场数值计算[J]. 农业机械学报, 2016, 47(10): 66–72.
LI Wei, JI Leilei, SHI Weidong, et al. Numerical calculation of internal flow field in mixed-flow pump with non-uniform tip clearance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(10): 66–72. (in Chinese)
- 23 翟杰, 祝宝山, 李凯, 等. 低比转数混流泵导叶内部压力脉动特性研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(6): 42–46.
ZHAI Jie, ZHU Baoshan, LI Kai, et al. Internal pressure fluctuation characteristic of low specific speed mixed flow pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6): 42–46. (in Chinese)

(上接第 69 页)

- 16 高全杰, 夏志勇, 汪朝晖, 等. 多针电极喷雾刀梁静电场特性与雾化效果研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 111–116.
GAO Quanjie, XIA Zhiyong, WANG Zhaohui, et al. Electrostatic field and atomization effect of multiple needle electrodes spraying blade [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 111–116. (in Chinese)
- 17 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]. 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 conejet electro-spraying [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 15–20. (in Chinese)
- 18 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)
- 19 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): 32–35.
CHENG Changlin, LI Yefeng, WANG Hui. Electric field of a thin cylindrical surface having limited length charged uniformly [J]. College Physics, 2004, 23(2): 32–35. (in Chinese)
- 20 刘诚杰, 刘景世. 均匀带电细圆环电场的分布[J]. 大学物理, 2005, 24(8): 19–20, 24.
LIU Chengjie, LIU Jingshi. The electric field distribution of a uniformly charged ring[J]. College Physics, 2005, 24(8): 19–20, 24. (in Chinese)