

荷电喷雾电晕电极诱导电场数值计算与分析

陈志刚¹, 杨超珍², 孙英琨¹, 储金宇¹

(1. 江苏大学 环境学院, 江苏 镇江 212013; 2. 宁波工程学院 机械学院, 浙江 宁波 315016)

摘要:为深入研究电晕荷电喷雾产生电场的分布情况, 针对电晕荷电喷雾中常用的多针组合式电极, 采用电荷模拟法, 运用 matlab 软件编程, 对电极诱导电场进行数值计算, 得出了电场中任意点的电势、场强值及其分布图。通过计算分析发现, 电晕放电产生的静电场是极不均匀的, 场强由电极结构参数—极径、电极尖端曲率半径、电极电压、针状电极的个数以及电极环中心距地面的垂直高度决定, 雾滴从喷嘴到靶标的输运过程中, 电晕电极产生的电场仅在输运初始阶段对雾滴的运动起主导作用。

关键词:电晕荷电; 静电喷雾; 电极; 电荷模拟法; 数值计算

中图分类号: O359. 1 文献标识码: A 文章编号: 1005-6254(2007)04-0057-04

Calculation and analysis of electric field in electrostatic spraying by corona discharge method

CHEN Zhi-gang¹, YANG Chao-zhen², SUN Ying-kun¹, CHU Jin-yu¹

(1. School of Environment, Jiangsu university, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China; 2. School of Mechanical Engineering, Ningbo University of Technology, Ningbo, Zhejiang 315016, China)

Abstract: To study the distribution of the electric field in electrostatic spraying by corona discharge method, the electric field induced by a multi-needle electrode arranged in ring shape was calculated by simulation charge method and through running program based on matlab language. The values of the potential and electric strength as well as their distributing figures were obtained. It is found that the induced electric field is extremely uneven and field strength is affected by the structure parameters of electrode such as the diameter of the annular electrode, curvature radius of the needle electrode, voltage on the electrode, the number of the needle electrodes and the height from the centre of the annular electrode to the ground. During the transporting process of the droplets from the nozzle to target, the electric field induced by the electrode plays an important role only at the beginning.

Key words: corona charging; electrostatic spraying; electrode; simulation charge method; numerical analysis

静电喷雾是高效低污染喷、滴灌施药技术的有效手段^[1,2]。在静电喷雾中,最常用的荷电方法是电晕荷电法^[3],即利用高压电极产生电晕放电,形成等离子区,运动雾滴与离子碰撞而被荷电,在电场力的作用下到达靶标。静电喷雾空间电场由高压电极

与空间电荷共同作用产生,其中,高压电极诱导电场的分布情况对雾滴荷电、输运和沉积有着显著影响,因而对诱导电场分布情况开展研究具有重要意义。

由于电晕放电多发生在导体尖端^[4],故针状电极是电晕荷电喷雾中常采用的一种电极形式,且多

收稿日期: 2007-04-12

基金项目: 江苏省现代农业装备与技术重点实验室开放基金资助项目(NZ200612)

作者简介: 陈志刚(1963-)男,江苏镇江人,副教授,主要从事农业环境保护、电气工程技术的研究。

杨超珍(1955-)男,浙江宁波人,副教授,主要从事机电控制技术的研究。

采用环形排列的多针组合方式,其工作原理见图1。针状电极上施加高电压,电离周围空气,药液经喷嘴雾化与离子碰撞而荷电^[5]。

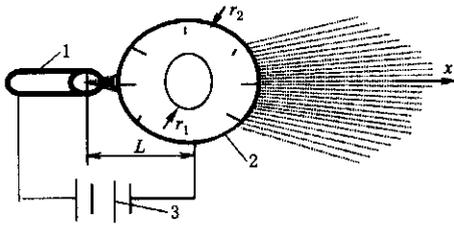


图1 针状电极电晕放电工作原理

笔者利用模拟电荷法对多针组合式电极产生的电场进行数值计算,得出电晕电极诱导电场数学模型,并利用 matlab 软件获得电场中各点的电场强度值及其分布图,由此分析电场分布规律,为静电喷雾技术的深化研究提供理论依据。

1 诱导电场电势、场强模型的建立

呈环形排列的多针组合式电极结构如图2所示。各针状电极连接在同一圆环导体上,沿绝缘电极环周向均匀分布,圆环导体用绝缘胶密封在电极环周向开槽内。可认为圆环导体对电晕放电不起作用,故可仅考虑针状电极的放电效果。

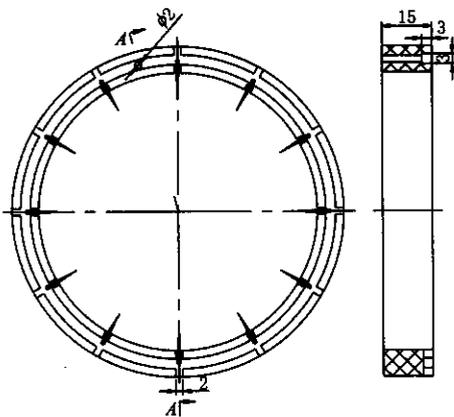


图2 环形针状的电极结构图

根据电磁学理论可知,该电极产生的电场呈旋转对称型分布,故可以采用电荷模拟法对电场进行数值计算。可用的模拟电荷有点电荷、环状电荷和线电荷三种^[6]。由于针状电极产生的电晕以及自身尺寸远小于它与大地目标之间的距离,且其电晕放电主要发生在针尖(曲率半径很小,电荷密度很大)处一个很小的区域内,因而在分析时可将针状电极简化为位于电极尖端的点电荷。

为了不破坏所求场域的场分布特性,模拟点电荷应被设置在被求场域以外,即须把它们置于放电电极体内。根据多针组合式电极的结构特点,把模拟点电荷取置于曲率半径为 r_0 的电极尖端的球心上,轮廓点取在针尖上。对静电喷雾施药工作状态,将大地对电极诱导电场的影响用镜像电荷来表示,即在对象距大地镜像另一侧相等距离处,添置极性相反的电荷^[7],故电场中任意点的电位应由两种电荷相互作用共同产生。模拟点电荷、镜像电荷和轮廓点的位置分布图如图3所示。

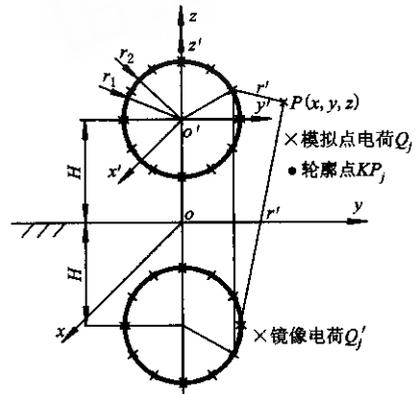


图3 模拟点电荷、镜像电荷和轮廓点位置分布图

如图2所示,设针尖所在位置处的圆环半径(即极径)为 r_1 ,球心所在位置处的圆环半径为 r_2 ($r_1 + r_0 = r_2$),电极环中心距地面垂直距离为 H ,所取模拟电荷和轮廓点的个数均与针的根数 n 相同。坐标系 $oxyz$ 的原点 o 取在地面上, z 轴垂直向上,模拟点电荷或轮廓点所在圆环的圆心放在 z 轴上,坐标为 $o'(0, 0, H)$, x 轴向外垂直于圆环面。为了计算方便,以 o' 点为原点设立局部坐标系 $o'x'y'z'$,其坐标轴与地面坐标系坐标轴平行,方向一致。

因为轮廓点和模拟点电荷都是空间均匀分布的,所以各模拟点电荷的电荷量相等。设在电极上施加的电压为 V ,则电场计算的边界条件为:模拟点电荷群在轮廓点上产生的电位和等于 V 。根据模拟电荷法计算方法,可得各模拟点电荷的电量为:

$$Q = \frac{V}{\sum_{j=1}^n P_j} \quad (j = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (1)$$

式中 Q 为模拟点电荷电荷量 C ; V 为电极电压 V ; P_j 为第 j 个模拟点电荷在轮廓点产生的电位系数

$$P_j = \frac{1}{4\pi\epsilon} \left(\frac{1}{r_j} - \frac{1}{r'_j} \right) \quad (j = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (2)$$

式中 ε 为介电常数,空气中通常取 $\varepsilon = \varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$; r_j 为第 j 个模拟点电荷与轮廓点之间的直线距离, cm ; r'_j 为第 j 个模拟点电荷的镜像电荷与轮廓点之间的直线距离, cm 。

设 $P(x, y, z)$ 为地面坐标系中不与模拟点电荷重合的任意一点, 则各模拟点电荷 Q_j 在 P 点产生的电位系数为:

$$P'_j = \frac{1}{4\pi\varepsilon} \left(\frac{1}{R_j} - \frac{1}{R'_j} \right) \quad (j = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (3)$$

式中 P'_j 为第 j 个模拟点电荷在 P 点产生的电位系数; R_j 为第 j 个模拟点电荷与 P 点之间的直线距离, cm ; R'_j 为第 j 个模拟点电荷的镜像电荷与 P 点之间的直线距离, cm 。

电晕电极诱导电场中任意一点 P 处的电位为:

$$\varphi = \sum_{j=1}^n P'_j Q \quad (\text{V}) \quad (4)$$

三维场强分量为:

$$E_x = - \frac{\partial \varphi}{\partial x} \quad (5)$$

$$E_y = - \frac{\partial \varphi}{\partial y} \quad (6)$$

$$E_z = - \frac{\partial \varphi}{\partial z} \quad (7)$$

合成场强

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2} \quad (8)$$

2 电场数值计算的 matlab 实现

由上述推导可知, 模拟点电荷的电荷量 Q 与极径 r_1 、电极尖端曲率半径 r_0 、电极上施加电压 V 、针状电极的个数 n 以及电极环中心距地面的垂直高度有关, 而这些参数会相应地影响电场电势和场强大小。为了得出电晕电场中任意点的电势、场强值及其分布图, 利用 matlab 软件编制了数值计算程序, 具有如下功能:

(1) 可以求解参数 r_0, r_1, n, V, H 任意取值组合下的电场分布。

(2) 一旦参数 r_0, r_1, n, V, H 确定, 轮廓点 KP_j 坐标、模拟点电荷 Q_j 坐标、模拟点电荷电荷量 Q 、空间任一点处电位系数 P_j 、场强系数 f_x, f_y, f_z 、电势 φ 、场强 E 及其分量均可分别求出。

(3) 可绘出不同参数取值下, 旋转对称电场纵剖面的场强分布图。

运用以上程序, 对荷电喷雾电晕电极诱导电场进行数值计算分析。由于该电晕电场对轴成旋转对称状, 所以仅求取其轴对称面上的各点电势、场强即可反映出整个电场的场值分布。为坐标取值方便, 现计算 $z' = 0$, 即 $z = H$ 纵剖面上的电位、电场值, 且根据对称性, 仅求取 $x \geq 0, y \geq 0$ 时的场值即可。

对在 $r_0 = 0.02 \text{ cm}, r_1 = 4.5 \text{ cm}, n = 6, V = -20000 \text{ V}, H = 50 \text{ cm}$ 的参数组合工况状态下进行电场数值计算, 运行程序进行计算, 结果发现, 电晕电场场强、电势在电极附近急剧衰减, 远离电极时衰减缓慢, 因此, 本文仅给出场强、电势发生明显变化时坐标点的场强、电势值, 见表 1, 相应的场强、电势分布图见图 4。

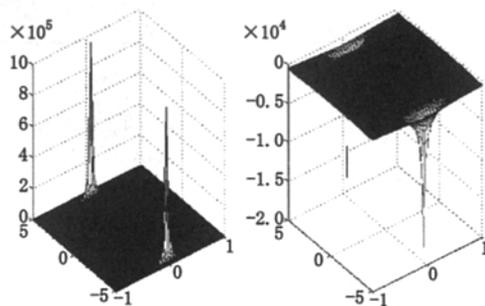


图 4 $r_0 = 0.02 \text{ cm}, r_1 = 4.5 \text{ cm}, n = 6, V = -20000 \text{ V}, H = 50 \text{ cm}$ 时场强、电势分布图 (左为场强, 右为电势)

改变参数组合, 取 $r_0 = 0.025 \text{ cm}, r_1 = 5.0 \text{ cm}, n = 8, V = -15000 \text{ V}, H = 40 \text{ cm}$ 及 $r_0 = 0.015 \text{ cm}, r_1 = 4.0 \text{ cm}, n = 4, V = -25000 \text{ V}, H = 30 \text{ cm}$ 进行计算。为简化输出结果, 现仅输出此两种参数组合下的场强、电势分布图, 分别见图 5、图 6。

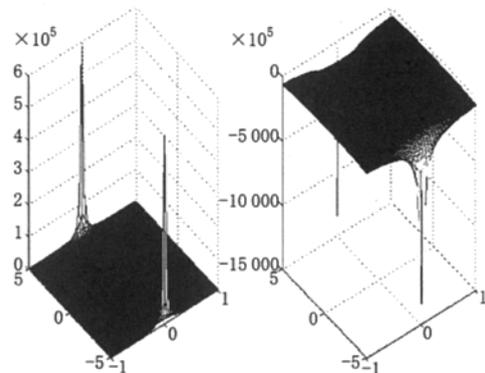


图 5 $r_0 = 0.025 \text{ cm}, r_1 = 5.0 \text{ cm}, n = 8, V = -15000 \text{ V}, H = 40 \text{ cm}$ 时场强、电势分布图 (左为场强, 右为电势)

表1 高压电极诱导电场各坐标点电势、电场强度值

X/cm	Y/cm	V/V	E/(V/cm)	X/cm	Y/cm	V/V	E/(V/cm)		
0	0.000 0	0.499 4 × 10 ³	0.236 8	1.0	0.000 0	0.487 1	0.023 8 × 10 ³		
	4.000 0	1.071 2 × 10 ³	1.422 2 × 10 ³		4.000 0	0.656 9	0.307 3 × 10 ³		
	4.400 0	3.583 1 × 10 ³	2.733 1 × 10 ⁴		4.400 0	0.685 1	0.396 4 × 10 ³		
	4.500 0	2.000 0 × 10 ⁴	9.851 4 × 10 ⁵		4.500 0	0.684 5	0.404 8 × 10 ³		
	4.505 0	2.656 7 × 10 ⁴	1.751 4 × 10 ⁶		4.505 0	0.684 3	0.405 0 × 10 ³		
	4.515 0	7.910 9 × 10 ⁴	1.576 3 × 10 ⁷		4.515 0	0.684 0	0.405 4 × 10 ³		
	4.550 0	1.343 0 × 10 ⁴	4.378 9 × 10 ⁵		4.550 0	0.682 7	0.406 0 × 10 ³		
	4.600 0	5.218 0 × 10 ³	6.160 8 × 10 ⁴		4.600 0	0.679 9	0.405 3 × 10 ³		
	4.700 0	2.477 9 × 10 ³	1.219 8 × 10 ⁴		4.700 0	0.671 6	0.398 2 × 10 ³		
	5.000 0	1.099 2 × 10 ³	1.744 7 × 10 ³		5.000 0	0.629 1	0.343 2 × 10 ³		
	5.500 0	0.663 6	0.443 0		5.500 0	0.539 2	0.228 8 × 10 ³		
	0.5	0.000 0	0.496 3 × 10 ³		0.125 7 × 10 ²	50.0	0.000 0	0.259 4 × 10 ²	0.866 2
		4.000 0	0.858 0 × 10 ³		0.737 1 × 10 ³		4.000 0	0.258 1 × 10 ²	0.860 4
		4.400 0	1.064 2 × 10 ³		1.488 0 × 10 ³		4.400 0	0.257 8 × 10 ²	0.859 1
		4.500 0	1.081 9 × 10 ³		1.578 1 × 10 ³		4.500 0	0.257 8 × 10 ²	0.858 8
4.505 0		1.082 0 × 10 ³	1.579 5 × 10 ³	4.505 0	0.257 8 × 10 ²		0.858 8		
4.515 0		1.081 9 × 10 ³	1.581 4 × 10 ³	4.515 0	0.257 7 × 10 ²		0.858 8		
4.550 0		1.079 3 × 10 ³	1.578 3 × 10 ³	4.550 0	0.257 7 × 10 ²		0.858 7		
4.600 0		1.069 1 × 10 ³	1.547 8 × 10 ³	4.600 0	0.257 7 × 10 ²		0.858 5		
4.700 0		1.029 0 × 10 ³	1.029 0 × 10 ³	4.700 0	0.257 6 × 10 ²		0.858 2		
5.000 0		0.845 7 × 10 ³	0.847 3 × 10 ³	5.000 0	0.257 4 × 10 ²		0.857 1		
5.500 0		0.618 7 × 10 ³	0.356 3 × 10 ³	5.500 0	0.256 9 × 10 ²		0.855 2		

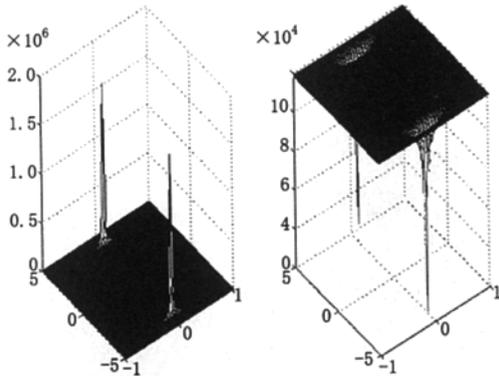


图6 $r_0 = 0.015 \text{ cm}$, $r_1 = 4.0 \text{ cm}$, $n = 4$, $V = -25\,000 \text{ V}$, $H = 30 \text{ cm}$ 时场强、电势分布图(左为场强,右为电势)

将图5、图6与图4进行对比分析,可以发现,改变电极结构参数—极径 r_1 、电极尖端曲率半径 r_0 、电极电压、针状电极个数 n 以及电极环中心距地面的垂直高度 H 将明显影响电晕放电电场场强、电势数值大小,但各场量的空间分布形状相似。继续改变电极结构参数组合取值,进行计算分析,将复现这一规律。

3 结 论

分析以上电极诱导电场中各点场强、电势值及其分布图可以得出以下结论:

(1) 静电喷雾中高压电极电晕放电产生的静电场是极不均匀的,由于空气分子的游离强度一般为 $20 \sim 30 \text{ kV/cm}$,所以只有在距离针尖 0.1 cm 左右的地方场强才足以使空气电离发生电晕放电。

(2) 电势、电场强度沿电极环径向、轴向在针尖附近急剧降低,然后变缓,当轴向距离 $x \geq 30 \text{ cm}$ 时(一般为靶标距离),诱导电场的作用已经衰退。这说明雾滴在从喷头到靶标的输运过程中,电晕电场仅在输运过程的开始阶段起主导作用,在靶标附近,电极诱导电场产生的作用已极其微弱,此时,由带电雾滴即空间电荷产生的电场对雾滴输运起主导作用。

参考文献 (References)

- [1] Edward Law S. Agricultural electrostatic spray application: a review of significant research and development during the 20th century[J]. Journal of Electrostatics, 2001, 51-52: 25-42.
- [2] 闻建龙, 陈汇龙, 王军锋, 等. 荷电两相流动颗粒运动微分方程的建立[J]. 排灌机械, 2003, 21(4): 43-45.
- [3] 陈志刚, 孙英琨, 储金宇, 等. 网状目标法测量雾滴或粉尘荷质比的精度分析[J]. 排灌机械, 2006, 24(4): 40-43.
- [4] 张海峰, 庞其昌, 陈秀春. 高压电晕放电特征及其检测[J]. 电测与仪表, 2006, 43(2): 5-8.
- [5] 邵 霞, 闻建龙, 王贞涛. 重油静电雾化燃烧的初步研究[J]. 排灌机械, 2005, 23(4): 46-48.
- [6] 河野照哉, 宅间董. 电场数值算法[M]. 尹克宁, 译. 北京: 高等教育出版社, 1985.
- [7] 王 荣. 植保机械理论与设计[M]. 长春: 吉林人民出版社, 2002: 667-668.