

文章编号:1000-582X(2010)05-041-07

有限元法分析尖板电极结构的空静电场分布

汪朝晖,廖振方,陈德淑

(重庆大学机械工程学院,重庆 400044)

摘要:为了研究尖板电极结构的空静电场分布,基于有限元数值计算方法,分别对完全空气介质和空气介质中掺有液态介质的空静电场的场强变化进行了深入分析。有限元分析结果显示:空气介质的尖板电极结构的空静电场是极不均匀的电场,在喷嘴尖端位置,场强迅速增加,达到最大场强值。单颗液滴在空气介质中的存在将引起液滴附近场域的场强发生较大变化;多颗液滴对喷嘴尖端的场强沿垂直方向上有明显的拉伸作用,由于液滴自身的场强叠加效应,它对空静电场产生了垂直向扩张影响,从而扩大了整个空静电场的电晕区。

关键词:有限元法;静电场;尖板电极;电场强度

中图分类号: TM151

文献标志码: A

Analysis of spatial electric field with point-plate electrodes configuration using finite element method

WANG Zhao-hui, LIAO Zhen-fang, CHEN De-shu

(College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: To investigate the spatial electric field with the point-plate electrodes configuration, variations of the electric field intensity are analyzed for absolute air dielectric and liquid dielectrics contained in air dielectric based on the finite element method of numeric computation. The results show that the electric field intensity of the spatial electric field is great non-uniform with the point-plate electrodes configuration for absolute air dielectric, and it can be increased rapidly at the nozzle point to achieve a maximum value. Single oil drop existed in air dielectric induces a biggish deformation of the gradient of the electric field intensity in its neighbor field. Many oil drops along with horizontal distribution have an obvious tensioning operation on the electric field, so the electric field intensity on the normal at the nozzle point has an evident augment for overlapping effects among the oil drops, and it can spread electric corona area of the total spatial electric field.

Key words: finite element method; electrostatic fields; point-plate electrodes; electric field intensity

计算机技术的飞速发展使数值分析法备受重视,特别是有限元法,因其通用性和适应性而广泛地应用于电磁场计算中。应用三维有限元法分析了高压架空线路附近建筑物及其邻近区域中的电场分

布,结果表明架空线路附近的实际建筑物会改变其周围空间电场的分布^[1];利用有限元方法研究了水树枝初步生长阶段其几何参数对水树内部电场的影响,它对于正确地评价电场分布和理解水树的生长

收稿日期:2009-12-26

基金项目:科技部国际科技合作项目(2008DFA70300);国家创新研究群体基金资助项目(50621403)

作者简介:汪朝晖(1981-),男,博士研究生,主要从事高压静电场中液体射流的雾化理论和试验研究。

廖振方(联系人),男,重庆大学教授,博士生导师,(Tel) 023-65103535;(E-mail) liaozf@263.net。

机理及水树引起的介质击穿非常重要^[2];基于有限元数值计算方法,对棒-板长空气间隙的电晕云模型进行了仿真研究,计算结果可为超特高压外绝缘的设计提供可靠的理论依据^[3];使用有限元运算法则计算了电晕三极管中的电荷密度,电场强度和电晕电流分布^[4-5];借助有限元法分别研究了固定微粒在靠近 252 kV GIS 绝缘子的高压导体上和接地外壳内侧时 GIS 的电场分布情况,其计算结果对研究 GIS 内部微粒污染所致击穿电压降低及局部放电有一定意义^[6]。

目前,静电喷涂技术已被广泛地应用在各种工业之中^[7-9],然而大部分研究均是基于试验探讨不同电压下的液体雾化情况,而对于在尖板电极结构下的空间静电场分布并没有进行大规模的研究。为此笔者基于有限元计算方法,借助 Ansoft Maxwell 软件,分别探讨完全空气介质和空气介质中掺有液态介质的尖板电极结构的空间静电场变化规律,将为获得荷电液体最佳的雾化效果和控制液滴在空间静电场中的运动提供重要的参考依据。

1 静电场有限元数值算法的基本原理

有限元法是以变分原理和近似插值离散为基础的一种数值计算方法。该方法首先利用变分原理把所要求解的边值问题转化为相应的变分问题,也就是泛函极值问题,然后利用对场域的网格剖分离散和在单元上对场函数的插值近似,将变分问题转化为普通多元函数的极值问题,最终归结为一个代数方程组,解之即得待求边值问题的数值解^[10-11]。

对于计算静电场问题的泊松方程

$$\nabla^2 \varphi = -\rho/\epsilon_0 \quad (1)$$

在场域为 Ω 时,它的等价泛函为

$$I(\varphi) = \iiint_{\Omega} \frac{\epsilon}{2} |\nabla \varphi|^2 d\Omega - \iiint_{\Omega} \varphi \rho d\Omega, \quad (2)$$

即使得该泛函取得极值的函数必满足方程(1)。因此,求解方程(1)的问题转化成了求解式(2)所示的泛函极值问题。

若将场域 Ω 离散化,划分为许多个小单元,且在每个单元内将电位的分布近似看作是线性变化,即单元内各点的电位由该单元各顶点电位线性表示。由此,式(2)中对场域 Ω 的积分可以变为在单个单元上的积分之和,而在各单元上的积分由于给出了电位函数的近似表达式,相关积分可以求出,从而式(2)变为一个多元函数:

$$I(\varphi) = \sum_{\epsilon=1}^m \iiint_{\Omega} \frac{\epsilon}{2} |\nabla \varphi|^2 d\Omega - \sum_{\epsilon=1}^m \iiint_{\Omega} \varphi \rho d\Omega =$$

$$[\varphi]^T [S][\varphi] - [\varphi]^T [G], \quad (3)$$

其中 S, G 为已知系数矩阵。为使函数 $I(\varphi)$ 取得极值,仅需使得式(3)所示的多元函数对每个自变量的导数为零,即 $\partial I/\partial \varphi_i = 0 (i = 1, 2, \dots, n)$,从而可以得到一个以单元节点上电位为未知量的方程组,其矩阵形式为: $[K][\varphi] = [G]$ 。

求解该代数方程组,即可得到各节点的电位值,进而可以通过节点电位求得单元的电场强度。

2 尖板电极结构的空间静电场分析过程

Ansoft Maxwell 是一个功能强大、计算结果精确、易于使用的电磁场有限元软件。该软件可采用自适应有限元分析方法,在模型建立完成后,只需给定正确的介质材料、边界条件和求解精度,不需人工干预,即可自动完成分析计算。笔者分析了尖板电极结构空间静电场的电势等值线和电场强度幅值的分布情况,其研究过程如下^[12]:

1) 创建物理环境,选择静电场分析环境。

2) 建立几何模型、赋予材料特性。依据通常能够获得喷涂时较小粒径的实际情况,取喷嘴尖端出口直径为 1 mm,喷嘴尖端出口曲率半径为 0.2 mm,喷嘴尖端壁厚为 0.2 mm,喷嘴外围直径为 3 mm,喷嘴锥角为 20° 左右。钢板距离喷嘴尖端 200 mm,钢板厚度选取为 0.8 mm,宽度为 160 mm。据此,建立的空间静电场模型结构参数如图 1 所示。同时,选取喷嘴出口尖端材料为 perf_conductor,钢板材料假定为 steel_1008。此外,空气的相对介电常数为 1,电导率为 0;根据实验室条件,防锈油液的相对介电常数取为 2.3,电导率为 10^{-12} S/m。

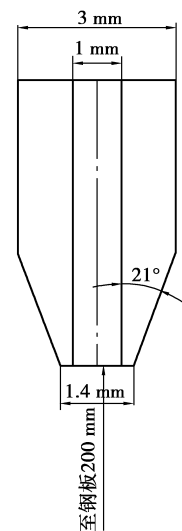


图 1 喷嘴尖端示意图

3)加边界条件和载荷。由于自由电子对液滴的荷电率比离子荷电率高得多,从而使负电晕液滴的荷电量明显高于正电晕液滴的荷电量,并且负电晕产生电晕放电的起晕电压低而击穿电压高,有较大的电晕离子电流和较宽的工作电压范围,有利于装置的运行,因此,尖板电极结构的高压静电场优先选用负电晕放电^[13]。考虑到只研究电场情况,暂不考虑电磁场之间的相互影响,故边界条件选择喷嘴尖端电极加负 60kV 电压,钢板接地(以地面电位为参考点),以此作为计算载荷。

4)划分网格后进行求解,再进入后处理,查看计算结果。Ansoft Maxwell 采用的是全自动自适应网格剖分,同时也可将初次分析结果中数值梯度较大的地方再次进行网格密化^[14]。在运算过程中可以人为地设置每步增加的单元百分数、自适应的总步数和误差百分数,这 3 个不同的参数分别取为 15%,30 和 0.01%。划分好的高压静电场喷嘴尖端的有限元网格剖分如图 2 所示。求解之后,进入后处理就可以查看电势等值线和电场强度幅值的分布云图。

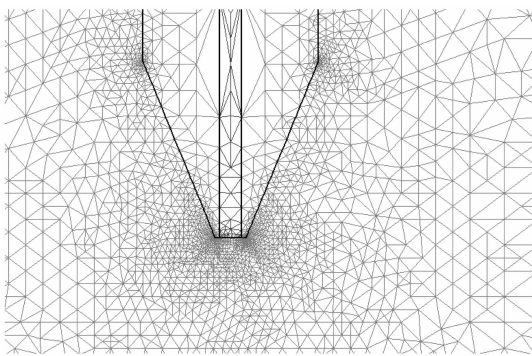


图 2 喷嘴尖端的有限元网格剖分图

椭圆状分布,由于喷嘴尖端的曲率半径很小,因此尖端有局部场强增大的现象,并且在端部处的电场强度最大。在笔者所研究的特定喷嘴尖端结构中,喷嘴尖端处的电场强度最大值可达到 $E_{max} = 8.076 0 \times 10^6 \text{ V/m}$ 。从结果可以看出所计算的区域是个极不均匀的静电场,喷嘴尖端电场强度最大,有利于空间气体发生电离,并且电离强度越大,从喷嘴尖端流出的液体荷电几率就越大。

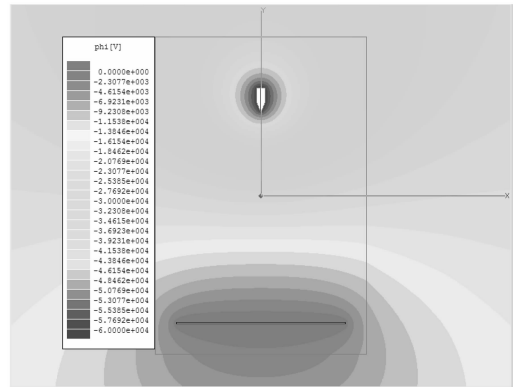
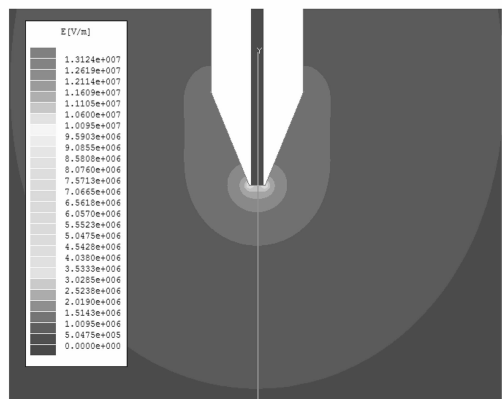
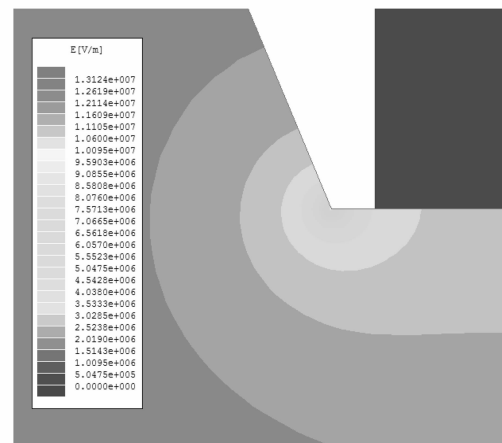


图 3 电势等值线分布图



(a)喷嘴尖端附近场域分布图



(b)局部放大图

图 4 空气介质的电场强度幅值分布云图

3 计算结果分析

3.1 空气介质的空间静电场结果分析

当选取如图 1 所示的喷嘴尖端电极参数时,经计算在后处理中可以看到如图 3 所示的空间静电场的电势等值线分布图。高电压被限定在喷嘴尖端的周围,电压的变化从喷嘴尖端到钢板呈现梯度式的减小,喷嘴尖端电压值为 60 kV,钢板电压值为 0。电场强度幅值的分布云图如图 4 所示,可以看到:采用相应的网格密化后,其电场分布曲线圆滑优美,这也在一定程度上证明了网格划分的正确性。喷嘴尖端和钢板组成的空间静电场成轴向对称分布,与实际情况相同。从其中一处喷嘴尖端的局部场强分布云图可以看出,发生电晕的区域将围绕喷嘴尖端呈

从图 5(a)中可以看出,在喷嘴尖端沿水平方向上,远离喷嘴尖端的场强变化比较平缓,到喷嘴尖端位置处,场强迅速增加,达到最大值,这有利于液滴的荷电,继而从喷嘴尖端垂直地向钢板运动,实现最佳的喷涂效果。由于此位置是喷嘴尖端油液出口处,在出口处的同一水平面上,不存在电势差,所以喷嘴尖端附近电势减小时,相对应的场强降低就会非常迅速。图 5(b)中给出了距离钢板 150 mm, 100 mm 和 50 mm 水平位置处的电场强度分布曲线,可以看出,距离钢板越近,电场强度在同一水平面内的变化越趋于平缓。在远离喷嘴尖端的垂直方向处,不同水平面上电场强度值趋于一致。从图 6 中可以看出喷嘴尖端到钢板的电场强度变化趋势,沿垂直方向上喷嘴尖端处的电场强度的下降速度要比钢板电极处快得多,越接近钢板,其场强的下降速度越趋于平缓。但在实际应用中,喷嘴尖端和钢板之间的距离不能太小,否则容易引起火花放电。

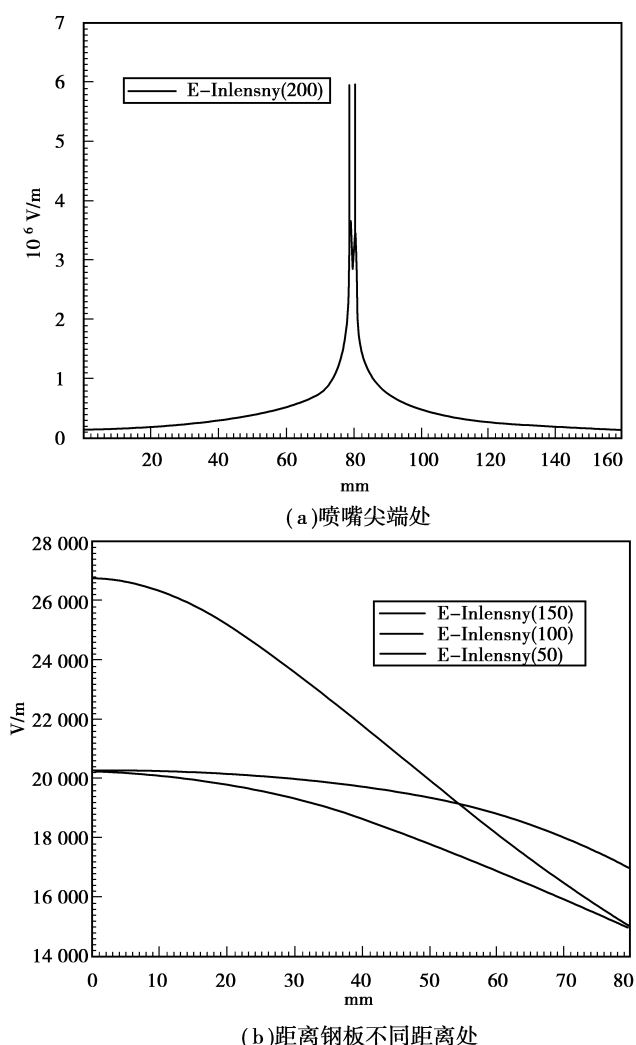


图 5 沿水平方向上电场强度幅值的变化曲线

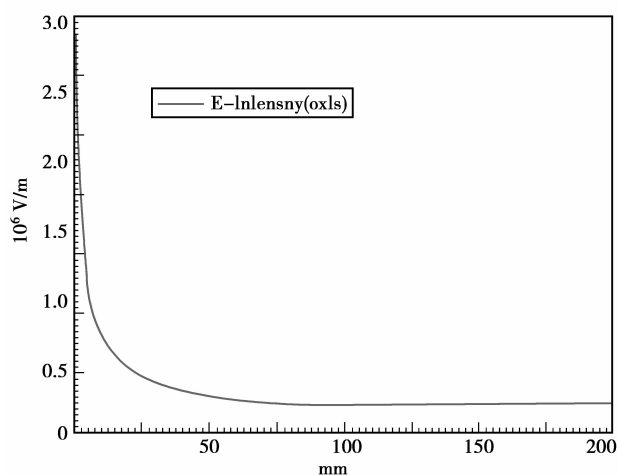


图 6 沿垂直方向上从喷嘴尖端到钢板电场强度幅值的变化曲线

3.2 掺有液态介质的空间静电场结果分析

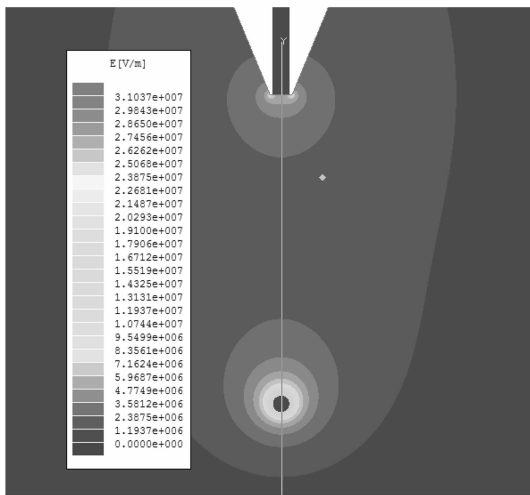
静电喷涂时,实际工作环境中除空气介质外,还有大量的油液液滴存在,所以研究空气介质中掺有液态介质的空间静电场分布具有非常重要的实际意义^[15]。笔者以空气介质中掺有防锈油液滴为研究对象,分析有若干油滴存在时的空间静电场分布,进而得到大量油滴存在于空间静电场时,其电场强度的变化规律。

3.2.1 单颗液滴存在时

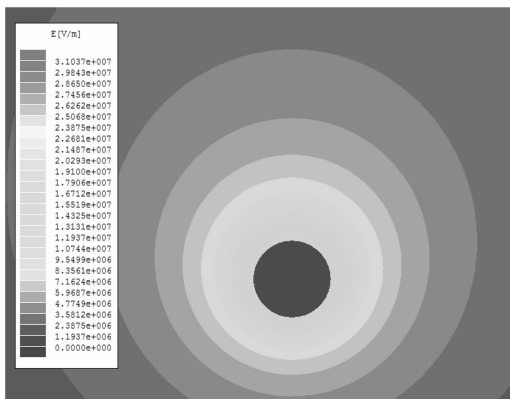
由于油液从喷嘴尖端喷出后,在离喷嘴尖端较远处还未发生充分的雾化,此时液体形成的是射流状,其液滴的粒径相对较大,故假设有一颗直径为 0.8 mm 的球形液滴存在于喷嘴尖端附近。从图 7 中可以看出,一颗液滴的存在对整个空间静电场的分布没有多大影响。但是通过局部放大图发现,该液滴的存在引起液滴附近场域的场强发生畸变,与完全空气介质相比,液滴附近的场强显著增大,在液滴表面处的电场强度一度达到了 $E=2.0293 \times 10^7$ V/m。随后该单颗液滴附近场域的场强迅速降低,与没有液滴存在时的场强相比并无太大差异,这说明液滴及其邻域的场强变化梯度相当大,它很容易导致液滴被迅速拉伸而破裂,易于雾化。同时局部的高电场强度也将诱发在该区域的气体电晕放电。

3.2.2 多颗液滴存在时

1)沿水平方向的分布。从图 8 中可以看出,每颗液滴都将引起前述单颗液滴局部静电场的畸变,当液滴间距远远大于液滴直径时,两液滴之间的电场强度所发生的畸变并未互相影响。每颗液滴引发的电场强度畸变的形态与单个液滴类似,但范围有所增大,因此可以看到多颗液滴的存在对于整个空



(a)喷嘴尖端附近场域分布图

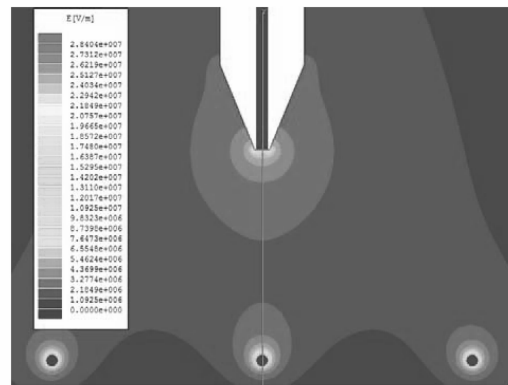


(b)局部放大图

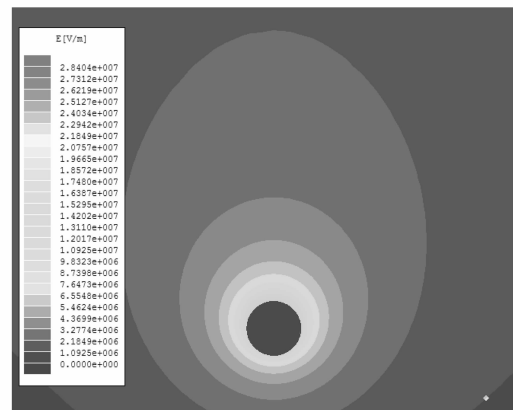
图 7 单颗油滴存在时的
电场强度幅值分布云图

间电场强度的影响较一颗液滴存在时发生了明显的变化。沿喷嘴尖端到钢板的轴线上,喷嘴尖端处的场强幅值在垂直方向上较单颗液滴和空气介质时有所增大,达到了 $E=1.0925 \times 10^7$ V/m。这是因为沿水平方向分布的多颗液滴对喷嘴尖端的场强沿垂直方向上有明显的拉伸作用,相互叠加后使得喷嘴尖端的场强沿垂直方向上有所增大。因此,垂直方向上液滴表面区域局部场强梯度的巨变可导致液滴局部发生击穿放电,使大液滴破裂。而多颗液滴对于喷嘴尖端的场强在水平方向上产生相互抵消的作用,故喷嘴尖端的场强在水平方向上并未发生太大的变化。同时,从场强的局部放大图可以看出,由于受到其他液滴的影响,中间液滴附近场域的电场强度较单颗液滴存在时也发生了变化,它的变化趋势同喷嘴尖端场域的场强变化特点大致相同,均是在垂直方向上有较大的梯度改变。

2)沿垂直方向的分布。沿垂直方向上多颗液滴



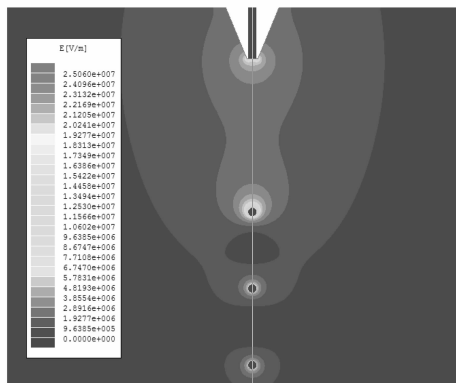
(a)喷嘴尖端附近场域分布图



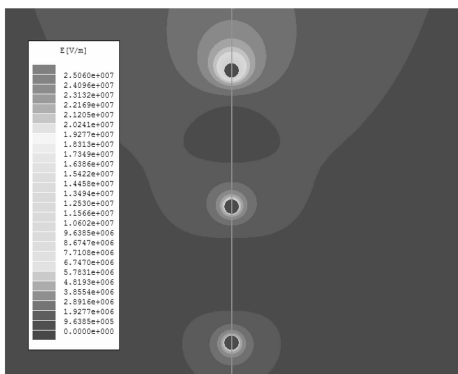
(b)局部放大图

图 8 多颗油滴沿水平方向分布时的
电场强度幅值分布云图

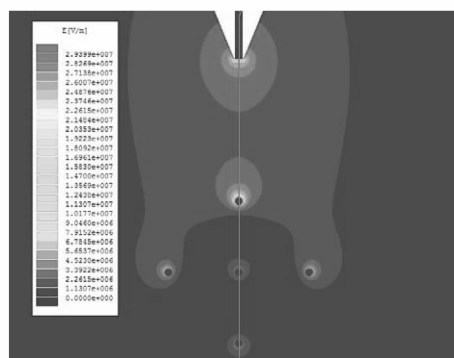
的场强分布如图 9 所示,从场强分布的局部放大图可看出:垂直方向上,在多颗液滴间距相等的情况下,距离喷嘴尖端较近的液滴之间的电场强度幅值增大的区域相比单颗液滴有所增加,局部区域的场强值达到了 $E=1.4458 \times 10^7$ V/m。而在离喷嘴尖端较远距离的液滴附近的电场强度虽然发生了变化,但是液滴之间电场作用的相互影响相比距离喷嘴尖端较近的液滴的效果逐渐削弱。因此,就整个垂直方向来说,喷嘴尖端电极的高场强将使沿垂直方向的多颗液滴产生叠加效应,只要电场强度达到一定的数值,距离负尖端电极远的区域也可能诱发电晕,从而扩大整个空间静电场的电晕区。由此可以推断,在静电喷涂过程中,大量沿垂直方向分布的液滴将会有利于扩展非平衡等离子体产生的区域,诱发电晕。而在水平方向上,除离喷嘴尖端较近的液滴附近的场强稍有变化外,其余液滴附近的场强沿水平方向基本没有发生大的变化。这也在一定程度上证明了液滴的存在对空间静电场分布的影响是垂直向扩张性质的,而在液滴的水平向则导致相对低电位和相对低场强。



(a)喷嘴尖端附近场域分布图



(b)局部放大图

图 9 多颗油滴沿垂直方向分布时的
电场强度幅值分布云图

(a)喷嘴尖端附近场域分布图



(b)局部放大图

图 10 多颗油滴沿任意方向分布时的
电场强度幅值分布云图

3)沿任意方向的分布。对于多颗油滴在静电场中的任意分布情况,假设多颗液滴沿着水平方向和垂直方向均有分布,将其设定为对称分布,其分布示意图如图 10(a)所示。从图中可以看到电场强度的分布情况在水平方向和垂直方向上基本与前述 2 种情况的组合相同。由于静电喷涂过程中,大量液滴的运动可以看成是沿垂直方向的轴对称运动,因此其任意分布模型的局部放大图均可简化为如图 10(b)所示。它表明沿任意方向分布的每个液滴都具备被击穿的条件且附近场域易诱发电晕,这意味着大量液滴的存在将导致空间电场梯度改变更大,从而更有利于激发电晕放电,最终导致液滴的破碎而雾化。

4 结 论

1)空气介质的尖板电极结构空间静电场是极不均匀的电场,在喷嘴尖端沿水平方向上,远离喷嘴尖端的场强变化比较平缓,到中间尖端位置,场强迅速增加,所研究的特定喷嘴结构中空间电场强度可达到最大值 $E_{\max} = 8.076 0 \times 10^6$ V/m。垂直方向上喷嘴尖端附近电场强度的下降速度要比钢板电极处快得多,越接近钢板,其场强的下降速度越趋于平缓。

2)单颗液滴在空气介质中的存在将引起附近场域的场强发生畸变,与完全空气介质相比,液滴表面的场强显著增大,但随后该单颗液滴附近场域的场强迅速降低,与没有液滴存在时的场强相比并无太大差异,表明液滴及其邻域的场强变化梯度相当大。

3)沿水平方向分布的多颗液滴对尖板电极结构的喷嘴尖端的场强沿垂直方向上有明显的拉伸作用,相互叠加后使得喷嘴尖端的场强沿垂直方向上有所增大;喷嘴尖端电极的高场强将使沿垂直方向分布的多颗液滴产生叠加效应,从而扩大整个空间静电场的电晕区。它进一步证明了多颗液滴对空间静电场分布的影响是垂直向扩张性质的,在液滴的水平向则导致相对低电位和相对低场强。

参考文献:

- [1] 甘艳,阮江军,邬雄.有限元法分析高压架空线路附近电场分布[J].高电压技术,2006,32(8):52-55.
GAN YAN, RUAN JIANG-JUN, WU XIONG. Analysis of the electric field intensity nearby high voltage transmission line by FEM[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(8):52-55.
- [2] KIM C, JANG J, HUANG X, et al. Finite element analysis of electric field distribution in water treed XLPE cable insulation: The influence of geometrical

- configuration of water electrode for accelerated water treeing test [J]. *Polymer Testing*, 2007, 26(4): 482-488.
- [3] 洪川, 胡建林, 孙才新, 等. 棒—板长空气隙击穿电场稳态条件的仿真[J]. *高电压技术*, 2007, 33(11): 75-79.
HONG CHUAN, HU JIAN-LIN, SUN CAI-XIN, et al. Simulation of the steady-state breakdown field in rod-plane long air gap[J]. *High Voltage Engineering*, 2007, 33(11):75-79.
- [4] DENG X, ADAMIAK K. A numerical algorithm for simulation of the electric corona discharge in the triode system [J]. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 1999, 23(7):597-602.
- [5] SAMAL M K, SESHU P, PARASHAR S, et al. A finite element model for nonlinear behaviour of piezoceramics under weak electric fields [J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2005, 41(15): 1464-1480.
- [6] 陈文会, 李忠, 景占荣, 等. 基于有限元法的含固定微粒的GIS静电场分析[J]. *高电压技术*, 2006, 32(1): 16-17.
CHEN WEN-HUI, LI ZHONG, JING ZHAN-RONG, et al. Static electric field analyses of GIS including fixed particle based on finite element method [J]. *High Voltage Engineering*, 2006, 32(1):16-17.
- [7] 汪朝晖, 廖振方, 高全杰, 等. 静电涂油机油液雾化试验与仿真研究[J]. *机械科学与技术*, 2008, 27(5): 662-666.
WANG ZHAO-HUI, LIAO ZHEN-FANG, GAO QUAN-JIE, et al. Research on experiment and simulation of oil atomization in electrostatic oiler[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2008, 27(5):662-666.
- [8] PETERA J, WEATHERLEY L R, ROONEY D, et al. A finite element model of enzymatically catalyzed hydrolysis in an electrostatic spray reactor [J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2009, 33(1):144-161.
- [9] LINTANF A, NEAGU R, DJURADO E. Nanocrystalline Pt thin films prepared by electrostatic spray deposition for automotive exhaust gas treatment[J]. *Solid State Ionics*, 2007, 177(26):3491-3499.
- [10] KHADDOUR B, ATTEN P, COULOMB J L. Numerical solution of the corona discharge problem based on mesh redefinition and test for a charge injection law[J]. *Journal of Electrostatics*, 2008, 66(5/6):254-262.
- [11] 卢泽杰, 高全杰, 权秀敏. 基于ANSOFT有限元分析的静电涂油机刀梁极结构优化设计[J]. *机械设计与制造*, 2007(5):21-23.
LU ZE-JIE, GAO QUAN-JIE, QUAN XIU-MIN. Design on structural optimization based on ANSOFT finite element analysis for the beam electrode of electrostatic oiler [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2007(5):21-23.
- [12] 刘国强, 赵凌志, 蒋继娅. Ansoft工程电磁场有限元分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [13] SEKIMOTO K, TAKAYAMA M. Influence of needle voltage on the formation of negative core ions using atmospheric pressure corona discharge in air [J]. *International Journal of Mass Spectrometry*, 2007, 261(1):38-44.
- [14] RODRIGUEZ-MATTALIA S, NUNO L, JODAR L, et al. An improvement of the finite-element method for computing the electric field of waveguides with complex geometry[J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2005, 41(6/7): 791-805.
- [15] 王晓明, 赵莹. 等离子体反应器多相介质电场畸变分析[J]. *高电压技术*, 2005, 31(5):41-46.
WANG XIAO-MING, ZHAO YING. Analysis of electric field distortion with multi-phase medium in plasma reactor[J]. *High Voltage Engineering*, 2005, 31(5):41-46.

(编辑 王维朗)