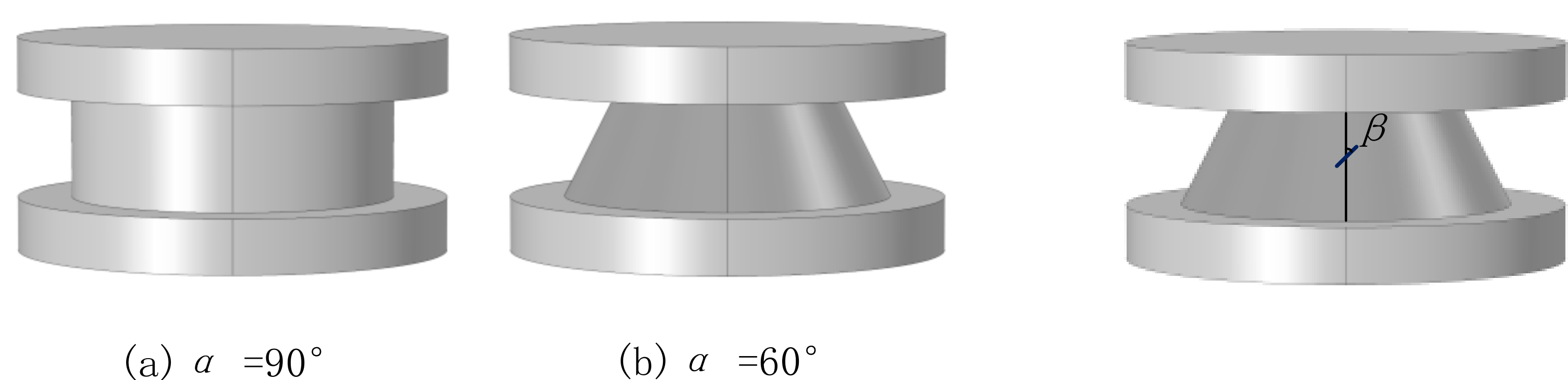


直流GIL内金属微粒对表面电荷积聚影响的COMSOL® 三维仿真研究

倪潇茹, 王志远, 王靖瑞, 于万水, 常帅
电气与电子工程学院, 华北电力大学, 北京市, 昌平区

简介:为金属微粒与绝缘子表面电荷积聚的关系, 本文建立了可以灵活设置微粒与绝缘子相对位置的三维模型。在仿真计算时选用+20kV作为外施电压, 且不考虑悬浮金属微粒作用, 上电极接入外施电压, 下电极接地。故建立如图1所示为无微粒粘附情况的柱式与圆台式绝缘子三维模型; 图2为考虑微粒不同粘附形态的三维模型, 微粒中线与边线夹角记为 β 。



(a) $\alpha = 90^\circ$ (b) $\alpha = 60^\circ$

图1. 三维仿真模型

图2. 微粒粘附示意图

计算方法:电场环境中, 气体侧载流子的运动取决于粒子所受库仑力, 扩散则由载流子浓度的均匀程度决定, 正负载流子浓度的动态变化可由正负离子的产生、复合、迁移作用表达:

$$\frac{\partial n^+}{\partial t} = \frac{\partial n_{IP}}{\partial t} - k_r n^+ n^- - \text{div}(n^+ b^+ \mathbf{E}) + D^+ \nabla^2 n^+ \quad (1)$$

$$\frac{\partial n^-}{\partial t} = \frac{\partial n_{IP}}{\partial t} - k_r n^+ n^- + \text{div}(n^- b^- \mathbf{E}) + D^- \nabla^2 n^- \quad (2)$$

根据Einstein equation可得,

$$D^{+/-} = b^{+/-} \frac{kT}{e} \quad (3)$$

忽略温度对气压的影响和电极的场致发射, 正负离子的复合系数 k_r 由langevin原理可得:

$$k_r = \frac{e}{\epsilon} (b^+ + b^-) \quad (4)$$

基于绝缘子表面电荷的积聚过程, 交界面处绝缘子侧和气体侧电流密度如式(5)(6)所示, 可作为绝缘子与气体交界面处的重要边界条件:

$$\mathbf{J} = \gamma_2 \mathbf{E}_{n2} \quad (5)$$

$$\mathbf{J}_G = e \mathbf{E}_{n1} (n^+ b^+ + n^- b^-) - \text{grad}(D^+ n^+ + D^- n^-) e \quad (6)$$

在气固交界表面处电荷积聚可由公式给出:

$$\frac{\partial \sigma_s}{\partial t} = \mathbf{n} \cdot \mathbf{J}_1 + \mathbf{n} \cdot \mathbf{J}_G \quad (7)$$

$$-\mathbf{n} \cdot (D_1 - D_2) = \sigma_s \quad (8)$$

对于电极处的边界条件可由狄立克雷条件给出:

$$U_h = U \quad (9) \quad U_g = 0 \quad (10)$$

结果:图3表示了气体环境及外施电压等条件相同时, 不同底角绝缘子表面电荷的积聚的单位分布; 图4展示不同 α 绝缘子沿边线电荷密度分布, 可以看出不同底角的绝缘子表面电荷均呈带状分布; 图5为附着微粒后的电荷分布, 可以看到电荷大量积聚与金属微粒及附近绝缘子表面, 金属微粒的存在大大改变了粘附位置附近的电荷分布; 表1记录的是不同 β 角情况下微粒引起电荷激增的最大值, 金属微粒的存在极大的改变了绝缘子表面的电荷分布, 与无微粒存在时相比, 表面电荷密度最大值增大了近三倍。

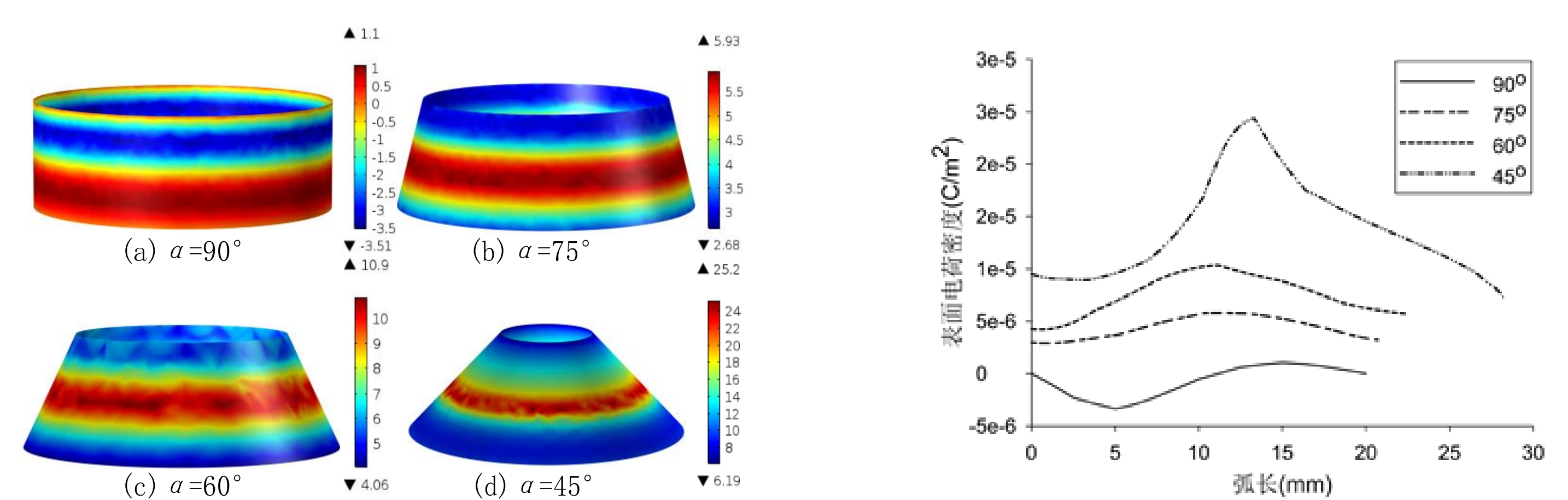


图3. 不同 α 时绝缘子表面电荷分布图

图4. 不同 α 绝缘子沿边线电荷密度图

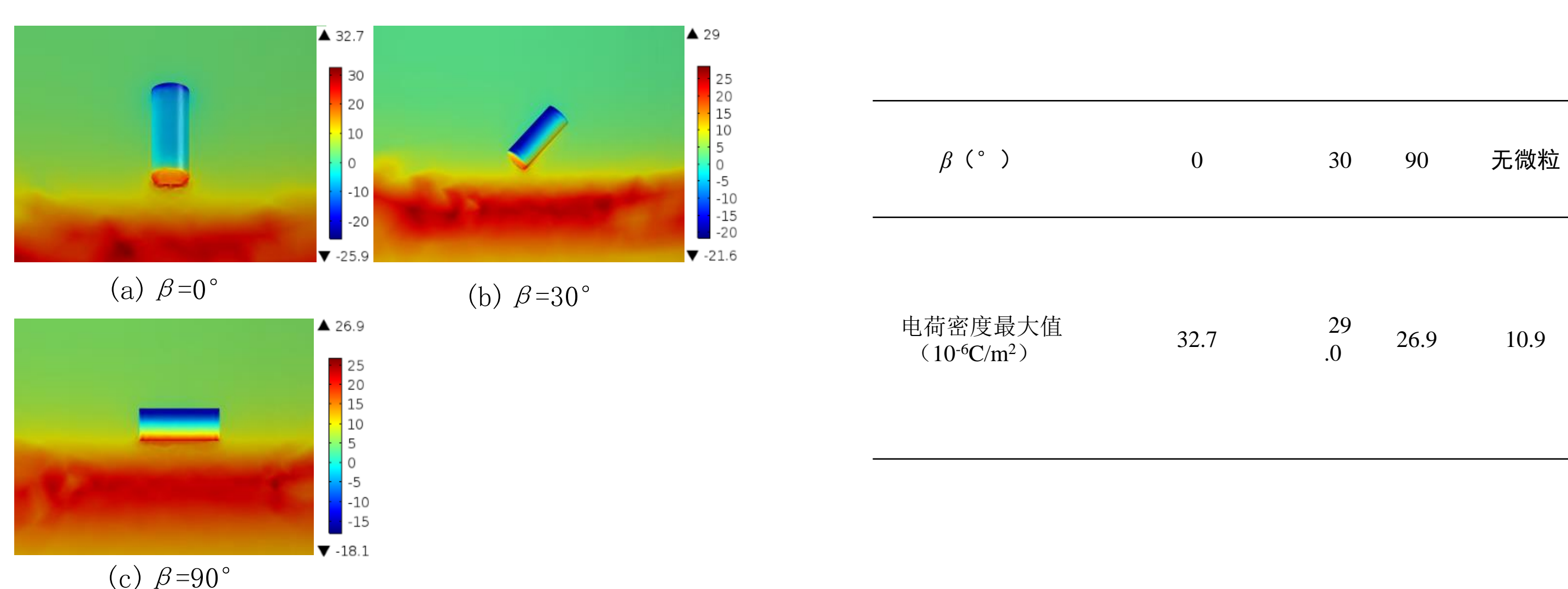


图5. 不同粘附方式下电荷分布图

表1. 不同 β 微粒时表面电荷密度最大值

结论:不同底角的绝缘子表面电荷均呈带状分布, 随截面底角减小, 电荷更多积聚于绝缘子表面; 粘附在绝缘子中部的金属微粒会引起表面电荷量的激增, 金属微粒的不同粘附形态会引起不同程度的电荷积聚, 粘附角度 β 与表面电荷最大值呈负相关。

参考文献:

- 王健, 李伯涛, 李庆民, 等. 直流GIL中线形金属微粒对柱式绝缘子表面电荷积聚的影响分析[J], 电工技术学报, 2016, 31(15): 213-222.
- Winter A, Kindersberger J. Stationary resistive field distribution along epoxy resin insulators in air under DC voltage[J]. Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, 2012, 19(5): 1732-1739.