第 50 卷 第 2 期：793-804　　高电压技术　　Vol.50, No.2: 793-804
2024 年 2 月 29 日　　High Voltage Engineering　　February 29, 2024
**DOI**: 10.13336/j.1003-6520.hve.20230079

# 正极性直流电场对绝缘子雾凇覆冰的影响机理及覆冰试验验证

胡玉耀[1]，刘宗源[1]，李　欣[2]，蒋兴良[3]，咸日常[1]，杜钦君[1]
（1. 山东理工大学山东省智能电网及装备工程实验室，淄博 255000；2. 贵州电网有限责任公司电力科学研究院，贵阳 213022；3. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室，重庆 400044）

**摘　要**：复杂大气环境下绝缘子覆冰是影响电网安全运行的关键科学问题。与交流相比，直流电场对荷电水滴具有较强的吸附作用，但鲜有研究涉及。基于场致荷电、流体力学和电磁学原理，对两种典型悬式绝缘子开展了电场-流场耦合仿真分析以及自然覆冰试验研究。结果表明，荷电水滴在直流电场中趋向于沿电场线运动，且其轨迹偏移量随着外施电压和水滴直径的增加而增大，而随着风速的增加而减小；直流电场下绝缘子表面产生冰树枝，不同绝缘子表面法向电场分量存在较大差异，进而影响冰树枝的生长特性；随着外施电压的升高，冰树枝逐渐从绝缘子伞裙边缘扩散至其表面，且冰树枝尖端逐渐变钝；带电情况下两种绝缘子覆冰量和覆冰长度大于不带电情况，且增长幅度均超过 15%。研究结果对于建立带电绝缘子覆冰增长模型奠定了基础。
**关键词**：正极性直流电场；绝缘子覆冰；荷电水滴；冰树枝；电场-流场耦合

## Influence Mechanism of Positive DC Electric Field on Rime Ice Accretion on the Insulators and Its Experimental Verification

HU Yuyao[1], LIU Zongyuan[1], LI Xin[2], JIANG Xingliang[3], XIAN Richang[1], DU Qinjun[1]
(1. Shandong Engineering Laboratory of Smart Grid and Equipment, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China; 2. Electric Power Research Institute of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 213022, China; 3. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract**: Insulator icing is a key scientific problem in a complex atmospheric environment, which impairs the safe operation of power grid. Compared with the AC, DC electric field exerts adsorption on supercooled water droplets. However, few studies on this issue are available. In this paper, an electric field-flow field coupled simulation, as well as natural icing tests were carried out on two typical suspension insulators based on the principles of field charging, fluid mechanics, and electromagnetics. The results indicate that charged water droplets tend to move along the electric field lines in a DC electric field, and their trajectory deviation increases with increasing applied voltage and droplet diameter, while decreases with an increase of wind speed. Under DC electric field, ice branches form on the surface of the insulators. And there are significant differences in the normal electric field components on different insulator surfaces, which further affect the growth characteristics of ice branches. As the applied voltage increases, ice branches gradually spread from the edge of the shed to its surface. Moreover, the tips of ice branches become increasingly blunt. Ice amount and ice length of two insulators under energization are greater than those under non-energization, and the growth rate is more than 15%. The results lay the foundation for establishing a model for ice growth on energized insulator.
**Key words**: positive DC electric field; insulator icing; charged water droplets; ice branch; electric field-flow field coupling

## 0　引言

近年来，受拉尼娜效应的持续影响，北半球冬季气温普遍降低，导致冰冻雨雪等极端气象灾害频发，对电力系统的安全可靠运行构成了严重威胁。2020 年 11 月中旬，吉林省遭受有气象记录以来最强冻雨暴雪大风天气侵袭。吉林电网电力线路出现多条次覆冰舞动跳闸故障，造成 10 kV 及以上电压

**基金资助项目**：国家自然科学基金 (51907109)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (51907109).

等级输电线路停运 1040 条、变电站停运 166 座[1]。2021 年 2 月初，美国多地出现长时间低温、冰冻、降雪天气。最严重的得克萨斯州因冰灾导致当地电力系统瘫痪，长时间断电加剧了极寒天气下市政供水、供暖、医疗、生活物资供应等一系列困难[2]。

输电线路覆冰积雪不仅增加了冰风荷载[3-5]，而且易导致绝缘子闪络[6-7]。目前，对于绝缘子覆冰特性的研究大多集中在雨凇对绝缘子电气性能方面的影响，国内外学者针对不同结构配置和不同布置方式的绝缘子开展大量的闪络试验及覆冰增长特性试验，建立了绝缘子闪络模型[8-10]和覆冰增长模型[11-12]。文献[13-14]通过对不同结构配置的 220 kV 复合绝缘子开展交流覆冰闪络试验发现，随着外施电压的升高，冰面粗糙度增加，冰凌向芯棒弯曲的程度增大，且不同型式的绝缘子覆冰闪络时，空气间隙电弧和沿面电弧特性的不同以及剩余冰层电阻的差异是导致绝缘子冰闪电压不一致的主要因素。为进一步探究绝缘子覆冰后电气性能下降机理，文献[15-16]对绝缘子开展了交流带电覆冰试验，结果表明过冷却水在由液态至固态相变过程中的晶释效应大大提高了融冰期绝缘子表面水膜的电导率。

雾凇覆冰对绝缘子电气性能的影响同样不可忽略[17]。文献[18]对不同覆冰类型绝缘子的泄漏电流进行研究，发现融冰期雾凇覆冰绝缘子的电阻小于雨凇覆冰绝缘子。为探究绝缘子雾凇覆冰增长特性，蒋兴良等基于热平衡原理，推导了水滴在绝缘子表面冻结的控制方程，建立绝缘子覆冰增长预测模型，并进行了覆冰试验验证[19-21]。潘杨、黄亚飞等分别通过自然雾凇覆冰[22]及数值模拟方法[23-24]，优化了绝缘子防覆冰结构配置。

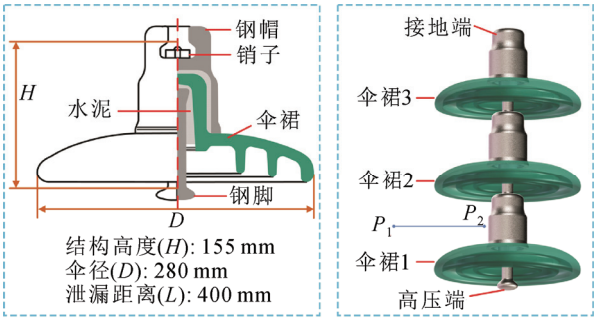
为更好地理解电场对绝缘子覆冰过程的影响，需进行电场–流场耦合仿真分析。由于覆冰是一种特殊的污秽，在进行多物理场耦合分析时可借鉴电力系统污秽方面的研究。文献[25]指出交流电场对荷电粒子施加的力在一个周期内几乎为零，因此，在交流条件下建立的覆冰模型可忽略电场的影响。文献[26]考虑直流电压作用下标称电场和离子流场对颗粒荷电的影响，建立了颗粒的动态荷电模型。文献[27]建立污秽条件下复合绝缘子表面电荷积聚动态仿真模型，分析了交流与直流条件下污秽颗粒电导率、直径、浓度及风速对伞裙表面电荷分布的影响。为探究电场对导线覆冰的影响机理，文献[28]计算了输电导线周围的离子流电场，分析了水滴在直流电场中的荷电过程，发现电场改变了荷电水滴的运动轨迹，水滴的碰撞率增大，从而提高了输电导线覆冰增长速率。

基于上述分析发现，与交流相比，直流电场对空气中污秽颗粒、水滴等影响更显著，导致更加严重的外绝缘问题。为研究直流电场下绝缘子覆冰机理，本文基于场致荷电、流体力学以及电磁学理论，构建了典型悬式绝缘子电场–流场耦合仿真模型，推导了重力、气流曳力及电场力等协同作用下水滴运动控制方程，研究了不同外施电压下水滴的受力特性和运动偏移特性，获得了水滴运动方向与电场方向夹角随时间的变化规律；提取了绝缘子表面电场的法向分量和切向分量，结合绝缘子直流雾凇覆冰试验，分析了不同电场强度对雾凇覆冰生长特性的影响，对比了不同绝缘子带电运行情况下覆冰形态的差异。本研究揭示了正极性直流电场对雾凇覆冰的作用机理，为进一步建立带电绝缘子覆冰生长模型奠定了基础。

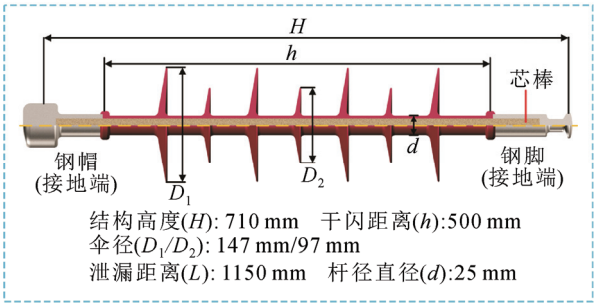
## 1 绝缘子外流场及电场数值计算模型

### 1.1 试品绝缘子

本文以 3 片串玻璃绝缘子 LXY-160 及复合绝缘子 FXBW-35/70 为研究对象，其结构见图 1。为后文研究方便，在 LXY-160 绝缘子顺着气流方向设置了 $P_1(-200, -100, 0)$ mm，$P_2(-20, -100, 0)$ mm 两点。




(a) LXY−160




(b) FXBW−35/70

图 1 绝缘子结构及其参数

Fig.1 Diagram and structure parameters of the insulators

### 1.2　直流电场控制方程

电场对于绝缘子覆冰过程有着极其重要的影响，直流电压下静电场的控制方程[29]如下：

$$\begin{cases}\nabla\cdot\boldsymbol{D}=\rho_{\mathrm{v}}\\ \boldsymbol{E}=-\nabla\varphi\\ \boldsymbol{D}=\varepsilon_0\varepsilon_{\mathrm{r}}\boldsymbol{E}\end{cases}\tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{E}$ 为电场强度；$\boldsymbol{D}$ 为电位移；$\varepsilon_0$ 为真空介电常数，其值为 $8.85\times10^{-12}$ F/m；$\varepsilon_{\mathrm{r}}$ 为相对介电常数；$\rho_{\mathrm{v}}$ 为体电荷密度；$\varphi$ 为电动势。

### 1.3　空气流场控制方程

覆冰绝缘子外流场可视为常温、低速、不可压缩湍流流动。湍流模型采用 RANS $k$-$\varepsilon$模型[19]构建：

$$\begin{cases}\rho(\boldsymbol{v}\cdot\nabla)\boldsymbol{v}=\nabla\cdot(-p\boldsymbol{I}+(\mu+\mu_{\mathrm{T}})(\nabla\boldsymbol{v}+(\nabla\boldsymbol{v})^{\mathrm{T}}))+\boldsymbol{F}\\ \rho\nabla\cdot\boldsymbol{v}=0\\ \rho(\boldsymbol{v}\cdot\nabla)k=\nabla\cdot\left(\left(\mu+\dfrac{\mu_{\mathrm{T}}}{\sigma_{\mathrm{k}}}\right)\nabla k\right)+P_{\mathrm{k}}-\rho\varepsilon\\ \rho(\boldsymbol{v}\cdot\nabla)\varepsilon=\nabla\cdot\left(\left(\mu+\dfrac{\mu_{\mathrm{T}}}{\sigma_{\varepsilon}}\right)\nabla\varepsilon\right)+C_{\varepsilon1}\dfrac{\varepsilon}{k}P_{\mathrm{k}}-C_{\varepsilon2}\rho\dfrac{\varepsilon^2}{k}\\ \mu_{\mathrm{T}}=\rho C_{\mu}\dfrac{k^2}{\varepsilon}\\ P_{\mathrm{k}}=\mu_{\mathrm{T}}(\nabla\boldsymbol{v}:(\nabla\boldsymbol{v}+(\nabla\boldsymbol{v})^{\mathrm{T}}))\end{cases}\tag{2}$$

式中：$\varepsilon$为湍流耗散率；$\boldsymbol{v}$ 为流场中的速度矢量；$\boldsymbol{I}$ 为主应力张量；$\mu$、$\mu_{\mathrm{T}}$ 分别为流体的动力粘度以及由于湍流而额外产生的动力粘度；$\rho$ 为流体密度；$k$ 为湍流动能；$\boldsymbol{F}$ 为体积力；$\sigma_{\mathrm{k}}$、$\sigma_{\varepsilon}$、$C_{\varepsilon1}$、$C_{\varepsilon2}$、$C_{\mu}$ 分别为湍流模型经验参数，其值分别为 1、1.3、1.44，1.92 及 0.09；$P_{\mathrm{k}}$ 为湍流动能源项；$p$ 为压力；“:”表示时均值。

### 1.4　水滴运动控制方程

悬浮在空气中的水滴在气流场、重力场以及电场的协同作用下运动至绝缘子表面，经过一系列热量及质量交换过程冻结成冰。

水滴的剩余重力[26]为：

$$F_{\mathrm{g}}=m_{\mathrm{w}}g\frac{\rho_{\mathrm{w}}-\rho}{\rho_{\mathrm{w}}}\tag{3}$$

式中：$F_{\mathrm{g}}$ 为水滴的重力减去空气浮力的结果；$m_{\mathrm{w}}$ 和 $g$ 分别为水滴的质量和重力加速度；$\rho_{\mathrm{w}}$ 为水滴密度，本文取值为 1000 kg/m$^3$。

在空气流场中忽略较小的 Saffman 升力、附加质量力、压差力等，可认为水滴在流场中只受到气流曳力 $F_{\mathrm{d}}$ 的作用[19]：

$$\begin{cases}F_{\mathrm{d}}=\dfrac{1}{\tau_{\mathrm{w}}}m_{\mathrm{w}}(v-V)\\ \tau_{\mathrm{w}}=\dfrac{\rho_{\mathrm{w}}d_{\mathrm{w}}}{18\mu_{\mathrm{a}}}\end{cases}\tag{4}$$

式中：$v$ 和 $V$ 分别为流体相和水滴相瞬时速度；$\tau_{\mathrm{w}}$ 为水滴弛豫时间；$d_{\mathrm{w}}$ 为粒径；$\mu_{\mathrm{a}}$ 为空气流体的动力粘度，$\mu_{\mathrm{a}}$ 为 $1.66\times10^{-5}$ Pa·s。

带电运行绝缘子附近的水滴除了受到重力及曳力外还会受到极化力、电场力(荷电水滴在带电绝缘子外电场中受到的力)和库仑力(两荷电水滴由于积聚电荷而产生电场导致的相互作用力)的作用。其中，库仑力与极化力比电场力低 2~5 个数量级，可以忽略不计[30]。现有研究表明，粒径在 1 μm 以上的颗粒荷电方式主要是场致荷电[31]。绝缘子雾凇覆冰条件下水滴的中值体积直径(median volume diameter, MVD)在 10~50 μm 之间，故其荷电情况可用场致荷电理论来解释。场致荷电过程为：空气离子受到电场的作用而剧烈运动，与同在电场中运动的水滴碰撞，水滴捕获带有电荷的离子从而使自身带电。水滴上聚集的同种电荷会产生一个有排斥力的电场，随着荷电量的增加，该电场的强度会增大，直到足以阻碍离子到达颗粒，此时荷电达到饱和。场致荷电的饱和荷电量[30]表示为：

$$q_{\mathrm{s}}=\frac{3\pi\varepsilon_0\varepsilon_{\mathrm{w}}}{\varepsilon_{\mathrm{w}}+2}E_0d_{\mathrm{w}}^2\tag{5}$$

式中：$\varepsilon_{\mathrm{w}}$ 为水滴相对介电常数，本文取值为 87.9；$E_0$ 为液滴所处位置处的电场强度。

故电场对荷电水滴的作用力可表示为：

$$F_{\mathrm{e}}=q_{\mathrm{s}}E_0=\frac{3\pi\varepsilon_0\varepsilon_{\mathrm{w}}}{\varepsilon_{\mathrm{w}}+2}E_0^2d_{\mathrm{w}}^2\tag{6}$$

综上，荷电水滴在绝缘子周围运动时，忽略较小的力，可认为只受到重力、气流曳力及电场力的作用。单个水滴拉格朗日运动控制方程为：

$$\frac{\mathrm{d}(m_{\mathrm{w}}V)}{\mathrm{d}t}=m_{\mathrm{w}}g\frac{\rho_{\mathrm{w}}-\rho}{\rho_{\mathrm{w}}}+\frac{18\mu_{\mathrm{a}}}{\rho_{\mathrm{w}}d_{\mathrm{w}}}m_{\mathrm{w}}(v-V)+\frac{3\pi\varepsilon_0\varepsilon_{\mathrm{w}}}{\varepsilon_{\mathrm{w}}+2}E_0^2d_{\mathrm{w}}^2\tag{7}$$

## 2　仿真模拟方法

覆冰绝缘子的电场–流场耦合仿真计算模型如图 2 所示。流场与电场均采用有限元法计算。

建立 4 m×2 m×2 m 的电场–流场仿真计算域，其中试品绝缘子尺寸参数如图 1 所示，绝缘子悬挂

高度为 0.75 m，伞裙 3 连接的钢帽设置为接地端，伞裙 1 连接的钢脚设置为高压端；为准确模拟绝缘子周围空间电场分布，在计算域边界添加一层“无限元域”(粗线框外层)以近似模拟几何上无限大的“有限”单元，无限元域单元层设置为 0.2 m 并沿着笛卡尔坐标轴拉伸 $10^3$ 倍；将无限元域的外壁设置为零电荷，静电场模拟所需材料的相对介电常数根据文献[32]设置；外施直流电压分别设置为 0、20、30 及 40 kV。

粗线框内的区域减去绝缘子(仅保留绝缘子的外壁部分)是空气流场的计算域。计算域左侧被定义为速度入口，空气沿 $x$ 轴的正方向流动；计算域右侧为压力出口，静压力为 0，意味着回流被抑制；绝缘子的表面设置为无滑移壁面，其速度和压力分布通过壁函数求解。

颗粒跟踪的计算域与流场的计算域一致。水滴从气流入口处释放，其速度与方向与入口处气流场一致；出口设置为“消失”壁面，即水滴穿过出口即从计算域中消失，不再进行追踪；绝缘子壁面设置为“冻结”壁面，即水滴接触绝缘子即附着在表面且不存在反弹、破碎等现象，“冻结”壁面能保留水滴与绝缘子表面碰撞时的位置坐标、速度大小和方向等物理信息；水滴密度设置为 1000 kg/m$^3$，尺寸范围为 10~50 μm。

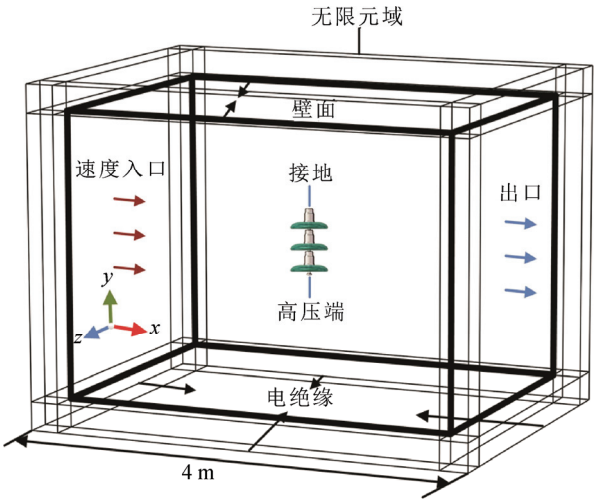



图 2 绝缘子流场-电场耦合计算模型

Fig.2 Settings of coupled simulation of the insulator

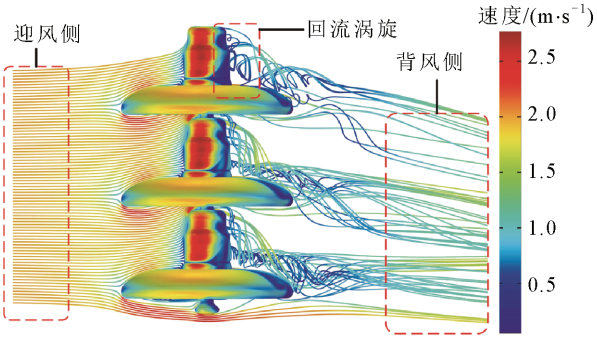
## 3 仿真结果及讨论

### 3.1 绝缘子外流场

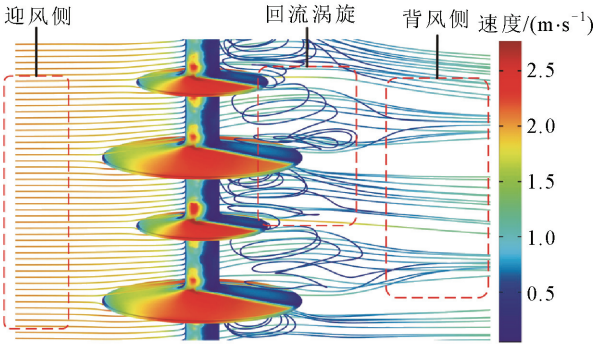
当风速为 2 m/s 时绝缘子流场分布如图 3 所示。

1）在迎风侧，两种绝缘子流场特性较为相似，即气流远离绝缘子时，其速度和方向基本保持不变；随着气流运动至绝缘子附近，因绝缘子的阻滞作用，来流速度与方向均发生了明显的改变。由于 LXY-160 伞裙边缘半径较大，其附近气流场较 FXBW-35/70 变化更剧烈。而且受气流粘性效应的影响，迎风侧驻点处的气流速度会显著下降，气流从驻点沿压力梯度流向绝缘子两侧时速度增加。

2）气体在绕流绝缘子过程中，背风侧的空气流速很低且有涡流产生。原因是气体具有粘性，在沿绝缘子表面流动时受到阻滞力而减速并与外边界层形成压差，从而引起边界层分离并产生回流涡旋现象，导致少量水滴随着涡流绕流到背风侧，使得背风侧覆冰。玻璃绝缘子较复合绝缘子回流速度略大，且其尾流有向中心汇聚的趋势。




(a) LXY-160




(b) FXBW-35/70

图 3 绝缘子外部流场

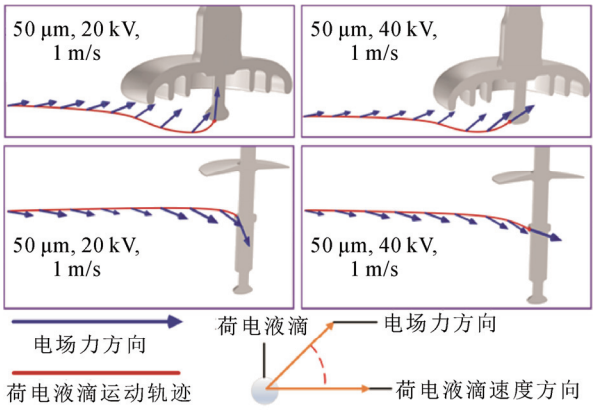
Fig.3 External flow field of the insulator

### 3.2 荷电水滴的运动偏移特性

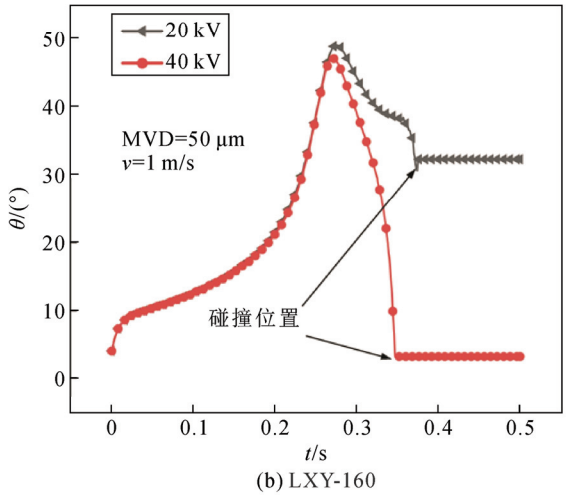
以荷负电水滴为例，取电场力方向与水滴运动方向之间的夹角 $\theta$ 表征直流电场对荷电水滴运动的影响程度。荷电水滴从释放到被绝缘子捕获过程中 $\theta$ 随水滴运动时间的变化规律如图 4 所示。

分析图 4 可得到如下规律：

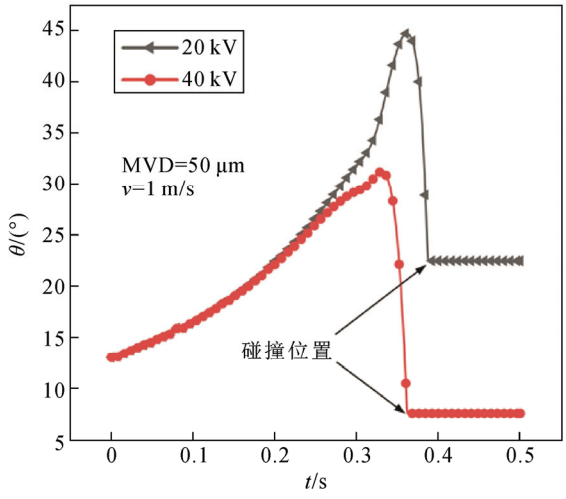
1）当水滴远离绝缘子时，带负电的水滴在气




(a) 荷电水滴运动轨迹与电场方向




(b) LXY-160




(c) FXBW-35/70

图 4　不同电压下 $\theta$ 与时间的关系

Fig.4　Relationship between $\theta$ and $t$ under different $U$

流曳力、重力和电场力的综合作用下向绝缘子运动。在水滴释放初始时刻，由于电场力较小，气流曳力起主导作用，$\theta$值较小。当水滴随气流运动至绝缘子附近时，由于绝缘子的阻滞作用，气流场急剧变化(如图 3)，导致水滴的运动方向随气流发生改变，故$\theta$迅速增大。而当水滴进入高电场区域时，电场力逐渐起主导作用，水滴趋向于沿着电场方向运动，$\theta$ 减小，直至被绝缘子捕获。

2）电场对荷电水滴最终碰撞过程的影响随电场强度的增强而增大。在外施电压为 20 kV 时，荷电水滴最终碰撞到 LXY-160 时的 $\theta$ 为 32.29°，而外施电压为 40 kV 时 $\theta$ 为 3.35°，减小率为 1.45°/kV。对于 FXBW-35/70，当电压从 20 kV 提高到 40 kV 时，$\theta$ 从 22.51°减小到 7.65°，减小率为 0.74°/kV。

综上可知，当荷电水滴远离结构物时，绝缘子表面电场对其影响有限。只有当水滴运动至绝缘子附近时电场力的作用才得以体现，而且电场越强的地方作用越明显。受电场力的影响，荷电水滴在外施直流电压下趋向于沿着电场线方向运动。

### 3.3　环境条件对液滴运动偏移特性的影响

不同的环境条件下电场对荷电水滴的影响程度有所差异，水滴在不同环境条件下的运动轨迹如图 5 所示。其中箭头、圆点与无样式线条分别表示未带电，带负电和带正电的液滴的运动轨迹。

风速($v$)、外施电压($U$)和水滴中值直径(MVD)的改变均会导致绝缘子周围的空气流场和电场发生变化，进而改变水滴的运动轨迹，影响绝缘子表面覆冰特性。以中性水滴的运动轨迹为基准，采用位移差 $\Delta s$ 表征荷电水滴因受电场的作用而较中性水滴运动轨迹的偏移量，其值由式(8)决定：

$$\Delta s=\sqrt{(x_1-x)^2+(y_1-y)^2+(z_1-z)^2} \tag{8}$$

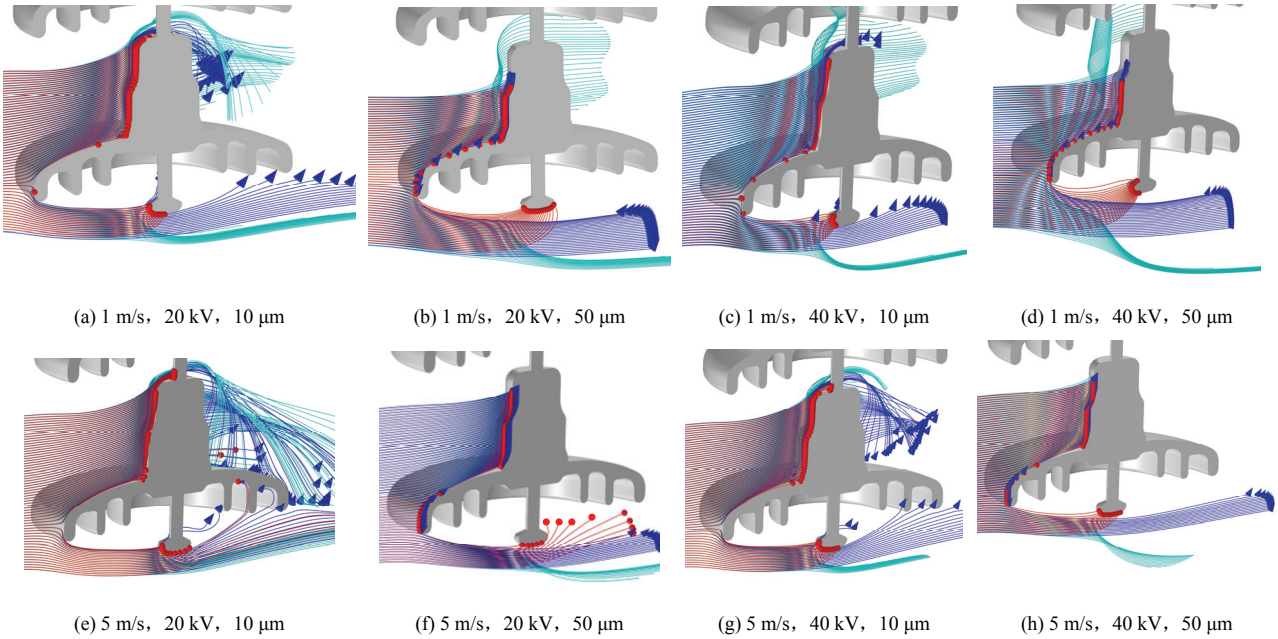
式中：$x_1$、$y_1$、$z_1$ 分别为中性水滴在运动过程中的 3 维坐标；$x$、$y$、$z$ 分别为同初始位置、同速度、同方向释放的荷电水滴运动过程中 3 维坐标。

假设荷电水滴及中性水滴在 $P_1$ 点处释放，经过 $\Delta t$($\Delta t$=$P_{12}/v$，$P_{12}$ 指 $P_1$ 到 $P_2$ 点的距离)的运动时间，在不同 $U$、$v$ 和 MVD 下的 $\Delta s$ 如图 6 所示。

结合图 5、图 6 分析可得到如下结论：

1）部分荷正电的水滴偏向绝缘子伞裙下表面，而荷负电的水滴偏向钢脚及伞裙上表面；且荷负电水滴的偏移量大于荷正电水滴的偏移量。其原因是荷正电水滴由于斥力的作用向弱场区运动，而荷负电水滴由于吸引力的作用向强场区运动。与斥力相比，引力作用越来越强。

2）在一定的环境条件下，荷电水滴的 $\Delta s$ 随着 $U$ 的增加而增大。这是因为随着外施电压的增大，绝缘子附近的电场强度增大，从而荷电水滴受到的斥力和吸引力越来越强，导致偏移量增大。

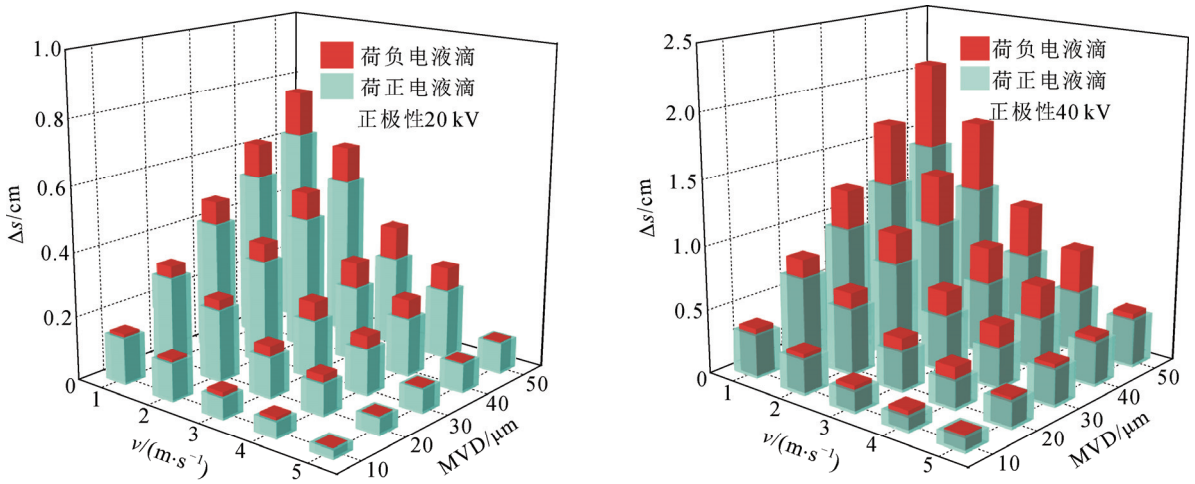


(a) 1 m/s，20 kV，10 μm (b) 1 m/s，20 kV，50 μm (c) 1 m/s，40 kV，10 μm (d) 1 m/s，40 kV，50 μm

(e) 5 m/s，20 kV，10 μm (f) 5 m/s，20 kV，50 μm (g) 5 m/s，40 kV，10 μm (h) 5 m/s，40 kV，50 μm

图 5 荷电水滴和中性水滴的运动轨迹

Fig.5 Trajectories of charged and neutral water droplets




(a) $U$=20 kV (b) $U$=40 kV

图 6 荷电水滴运动偏移特性

Fig.6 Motion deviation characteristics of charged droplets

3）在外施电压以及风速不变的情况下，带电水滴轨迹偏移量随 MVD 的增加而增大。由式(6)可知，在一定的电场强度下，$F_e$ 与 MVD 的平方成正比。MVD 越大，水滴受到的 $F_e$ 越大，$\Delta s$ 越大。

4）在相同的 $U$ 和 MVD 下，带电水滴的 $\Delta s$ 随着 $v$ 的增加而减小。其原因包括两个方面：一是随着 $v$ 的增加，空气曳力增加，电场力的作用相对减小；二是水滴的运动速度随风速的增加而增大，水滴从发射到被绝缘子捕获的时间大大减少，从而导致电场对水滴的作用时间减少。

## 4 自然雾凇覆冰试验

### 4.1 试验原理

在现场若采用自然降水对绝缘子开展带电雾凇覆冰试验，不仅要求环境条件苛刻、试验周期长，而且由于环境参数的差异导致获得的试验数据不具有可比性[33]。基于此，本文在现场搭建了如图 7 所示试验平台。试验直流电源由高压直流发生器提供，其标称电压为±600 kV，额定电流为 20 mA，系统

纹波系数≤3%。高压分压器采用 FRC-150 交直流阻容分压器，其阻抗为 1800 MΩ，精度为 0.5%。风速的调节范围为 1~10 m/s。

水滴通过高压雾化喷嘴喷射到空气中，大功率风扇将雾化水滴吹向绝缘子。风扇的作用不仅将雾化水滴均匀地吹向绝缘子，而且使水滴和外部环境之间实现更加充分的热交换，使水滴被绝缘子捕获时，在其表面迅速形成雾凇覆冰。

### 4.2　试验方法

绝缘子带电雾凇覆冰试验程序如下：

1）试品清洁。试验开始前，清洗绝缘子以去除表面污秽，将清洗好的绝缘子悬挂于试验架上晾干待用。设置相邻绝缘子之间的距离为 2 m，以确保绝缘子之间的电场和空气流场互不影响。

2）预处理。将试验用水放置在 0 ℃以下的室外环境冷却 5~8 h 备用；调整雾化装置与试验架的距离为 8 m，确保雾化水滴均匀地向绝缘子运动。

3）绝缘子覆冰。当环境温度降至–8 ℃及以下时，首先将所需正极性直流电压施加到绝缘子上，一段时间后打开雾化装置进行覆冰试验。

### 4.3　试验测量

在试验过程中，记录风速、温度等环境参数，同时，每隔 20 min 分别测量复合绝缘子和玻璃绝缘子伞裙边缘的覆冰长度 $L_{i1}$、$L_{i2}$(如图 8)和绝缘子覆冰质量，并将绝缘子的覆冰质量换算为单位泄漏距离的覆冰量，其计算方法如下：覆冰前用拉力传感器测量绝缘子的质量，在覆冰过程中每隔 20 min 记录拉力传感器数值，将数值对应的质量减去绝缘子的质量即为覆冰量，最后将得到的覆冰量除以绝缘子的泄漏距离。

## 5　直流电场对绝缘子雾凇覆冰的影响机理

### 5.1　直流电场对绝缘子雾凇覆冰形态的影响

由于电场的作用，绝缘子表面会产生树枝状雾凇覆冰，图 9 展示了不同外施电压下 LXY-160 绝缘子高压端伞裙表面生长的冰树枝形态。

当 $U$ 为 0 kV 时，雾凇覆冰呈絮状物黏附在绝缘子表面。当 $U$ 升高至 20 kV 时，雾凇覆冰表面逐渐生长出冰树枝，且其尖端较尖锐。当 $U$ 达到 30 kV 时，冰面冰树枝仍然存在，但尖端变钝。当 $U$ 持续升高到 40 kV 时，冰树枝形态退化，侧枝减少，尖端变得圆滑。其原因是随着外施电压的增加，强电场使得雾凇覆冰表面电晕活动剧烈，泄漏电流产生

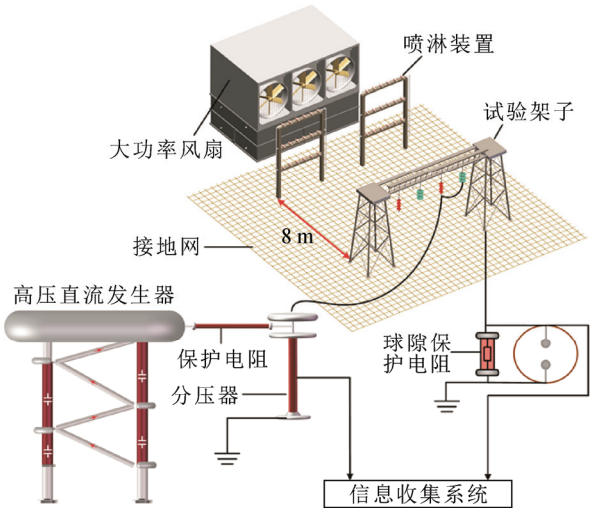
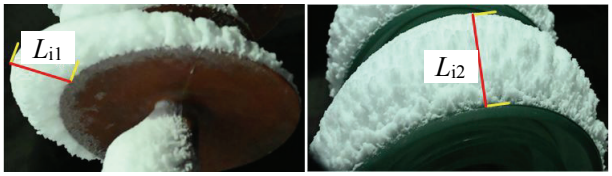



图 7　绝缘子雾凇覆冰试验平台

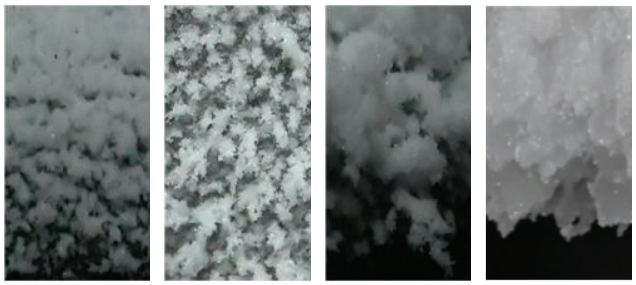
Fig.7　Test platform for rime ice accretion on the insulator




(a) FXBW-35/70　　(b) LXY-160

图 8　绝缘子覆冰长度测量

Fig.8　Icing length on the edge of the shed



(a) 0 kV　(b) 20 kV　(c) 30 kV　(d) 40 kV

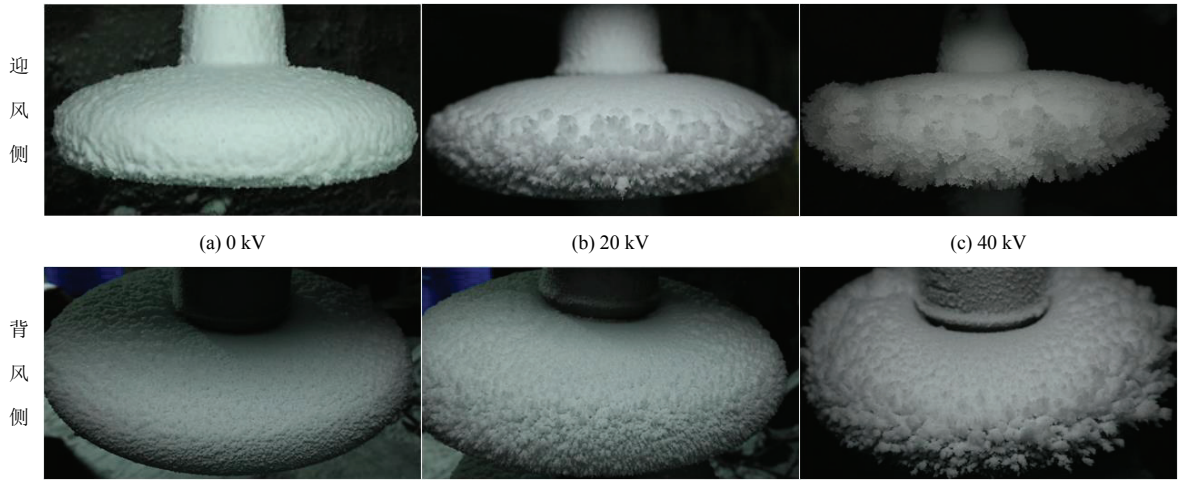
图 9　不同外施电压下冰树枝形态

Fig.9　Ice branches morphology under different voltages

的焦耳热效应以及离子轰击作用导致冰树枝尖端融解和退化[34]。

图 10 和图 11 分别为 LXY-160 及 FXBW-35/70 两种绝缘子在不同外施电压下覆冰 2 h 后高压端伞裙雾凇覆冰形态。其中，图 10(a)—(c)与图 11(a)—(c)分别为两绝缘子迎风侧雾凇覆冰形态；图 10(d)—(f)与图 11(d)—(f)为两绝缘子背风侧雾凇覆冰形态。

分析图 10 和图 11 可得到绝缘子伞裙表面的覆冰特性如下：

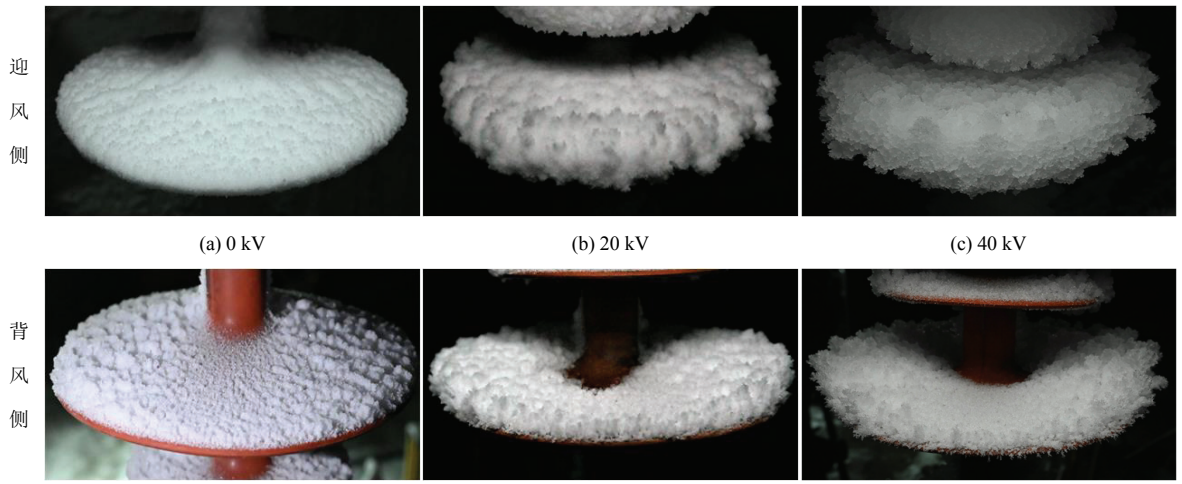



(a) 0 kV (b) 20 kV (c) 40 kV

(d) 0 kV (e) 20 kV (f) 40 kV

图 10 不同外施电压下 LXY-160 绝缘子雾凇覆冰形态

Fig.10 Rime icing morphology on LXY-160 under different applied voltages




(a) 0 kV (b) 20 kV (c) 40 kV

(d) 0 kV (e) 20 kV (f) 40 kV

图 11 不同外施电压下 FXBW-35/70 绝缘子雾凇覆冰形态

Fig.11 Rime icing morphology on FXBW-35/70 under different applied voltages

1）不带电情况下，玻璃绝缘子与复合绝缘子迎风侧、背风侧的覆冰较为均匀、密实，覆冰沿着绝缘子表面生长，背风侧覆冰量较迎风侧少得多。

2）带电情况下，两种绝缘子雾凇覆冰变得较为疏松，当外施电压为 20 kV 时，两种绝缘子表面均有树枝状雾凇覆冰产生。玻璃绝缘子仅在迎、背风侧的伞裙边缘出现冰树枝，其生长方向趋向于伞裙径向。而复合绝缘子的冰树枝则覆盖了伞裙表面，其生长方向趋向于绝缘子轴向。当外施电压升高到 40 kV 时，玻璃绝缘子冰树枝逐渐向伞裙表面过渡。高电压下两种绝缘子雾凇冰树枝均发生退化，侧树枝基本消失，端部变钝，覆冰逐渐由干冰向湿冰过渡。

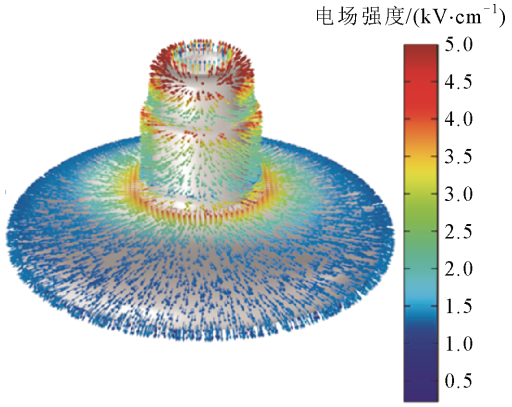
3）两种绝缘子表面的冰树枝形态在迎风侧较粗而背风侧较细。原因是带电情况下绝缘子迎风侧捕获的水滴由大量荷电及中性水滴组成，而背风侧捕获的水滴大部分为荷电水滴。由于电场的作用，荷电水滴形成的覆冰沿着电场线方向生长，未荷电水滴沿着绝缘子表面生长，迎风侧覆冰生长由两者的耦合作用形成，而背风侧覆冰主要受前者影响。

### 5.2 直流电场对冰枝形态的影响机理

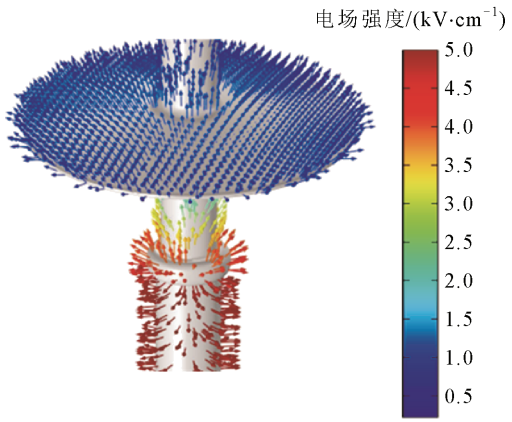
雾凇覆冰一般于较低的环境温度下形成，水滴一旦被绝缘子捕获即刻冻结成冰，故雾凇生长方向取决于水滴最终碰撞速度方向。由前文分析可知，直流电场偏移了荷电水滴的运动轨迹使其趋向于沿电场线方向运动，因此绝缘子表面电场分布特性对雾凇覆冰形态有重要影响。

图 12(a)、(b)展示了两种绝缘子高压端伞裙表面电场强度示意图。

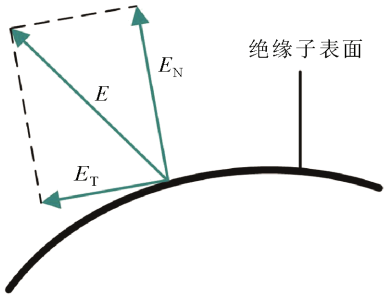
玻璃绝缘子伞裙表面电场强度的方向趋向于径向，而复合绝缘子趋向于轴向，这与上述冰树枝的生长方向一致。两种绝缘子伞裙边缘的电场强度值均小于靠近高压端的伞裙部分，而由前述试验结果可知受电场影响而产生的冰树枝集中在伞裙边缘。为揭示其原因，将绝缘子表面任一点电场强度 $E$ 分解为法向电场强度 $E_N$ 与切向电场强度 $E_T$，如图 12(c)。法向电场施加在荷电水滴上的力垂直于绝缘子表面，而切向电场施加在荷电水滴上的力平行于绝缘子表面，故法向电场 $E_N$ 对于荷电水滴运动轨迹的影响起着主导作用。




(a) LXY-160




(b) FXBW-35/70




(c) 电场分解

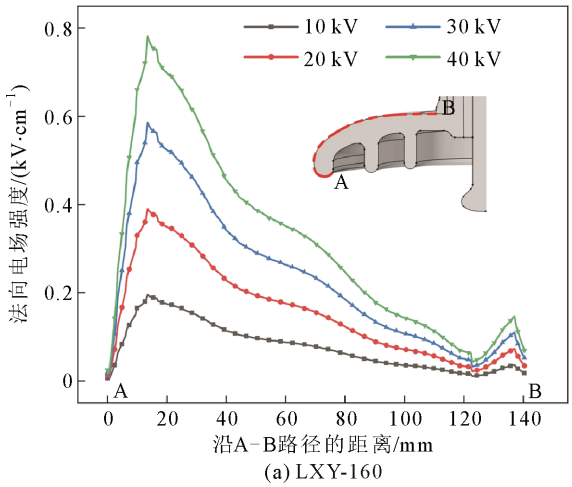
图 12　不同绝缘子电场分布

Fig.12　Electric field distribution of different insulators

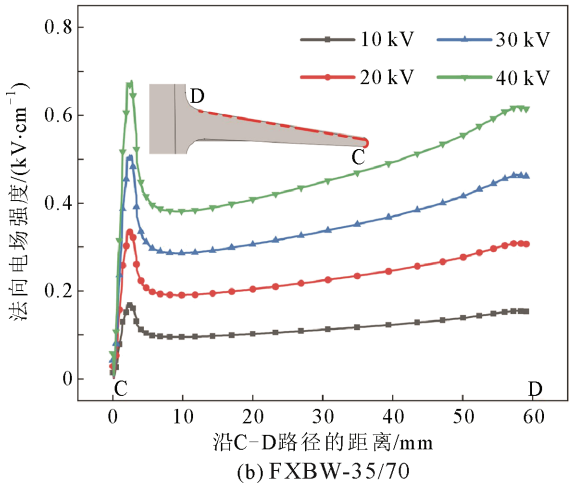
图 13 给出了 LXY-160 和 FXBW-35/70 伞裙表面法向电场强度分布。根据图 13 可得到如下结论：

1）两种绝缘子 $E_N$ 较大区域均位于伞裙边缘。对于 LXY-160 绝缘子，伞裙边缘 $E_N$ 值最大，越远离伞裙边缘 $E_N$ 值越小，导致电场对 LXY-160 绝缘子伞裙边缘覆冰的影响大于伞裙表面。冰树枝最先出现在伞裙边缘区域，且随着外施电压的增加，当伞裙表面 $E_N$ 值也随之增大，冰树枝逐渐过渡生长到伞裙表面。对于 FXBW-35/70 绝缘子，$E_N$ 最大值也出现在伞裙边缘，在所选路径上伞裙表面 $E_N$ 值呈现先下降后增长的趋势，整体 $E_N$ 值差异较小，故对于 FXBW-35/70 绝缘子冰树枝几乎同时出现，且覆盖整个伞裙表面。

2）由图 1 可知，LXY-160 绝缘子较 FXBW-35/70 绝缘子伞径更大且伞裙边缘更厚，故前者伞裙边缘的面积远远大于后者，这就导致玻璃绝缘子的冰树枝数量更多、更明显。根据尖端放电理论，冰树枝端部附近电场强度更强，且绝缘子表面不均匀度的




(a) LXY-160




(b) FXBW-35/70

图 13　绝缘子伞裙表面法向电场

Fig.13　Normal electric field on insulator shed surface

增加在一定程度上也畸变了电场，上述因素的共同作用增强了伞裙边缘对带电水滴的吸引作用，从而使电场对玻璃绝缘子雾凇覆冰的影响明显强于复合绝缘子。

### 5.3 直流电场对绝缘子覆冰量的影响

经过 120 min 的覆冰试验，两种绝缘子覆冰长度如表 1 所示。换算为单位泄漏距离的覆冰质量如表 2。

由表 1 和表 2 可知：

1）带电情况下，FXBW-35/70 覆冰质量较不带电情况下增长 18.64%，覆冰长度增长 19.38%；而对于 LXY-160，与不带电相比，带电情况下覆冰质量和覆冰长度分别增长 21.34%和 22.08%。

2）LXY-160 的覆冰质量大于 FXBW-35/70，而伞裙边缘覆冰长度则小于 FXBW-35/70。如前文所述，玻璃绝缘子伞裙边缘附近的空气流场扰动较复合绝缘子更剧烈，导致水滴更容易绕过玻璃绝缘子，从而导致覆冰增长速率较复合绝缘子小。但由于其盘径及覆冰面积更大而泄漏距离相近，且根据 5.2 节所述，在电场作用下伞裙边缘能吸引更多的荷电水滴形成更多覆冰，故 LXY-160 的覆冰质量大于 FXBW-35/70。

表 1 绝缘子伞裙边缘覆冰长度

Table 1 Icing length on the surface of the shed on the insulator

| 绝缘子型号 | 外施电压/kV | 覆冰长度/cm | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 20 min | 40 min | 60 min | 80 min | 100 min | 120 min |
| FXBW-35/70 | 0 | 0.56 | 1.12 | 1.68 | 2.11 | 2.71 | 3.25 |
| | 30 | 0.59 | 1.22 | 1.82 | 2.41 | 3.12 | 3.88 |
| LXY-160 | 0 | 0.41 | 0.77 | 1.16 | 1.54 | 1.92 | 2.31 |
| | 30 | 0.45 | 0.81 | 1.27 | 1.78 | 2.21 | 2.82 |

表 2 绝缘子覆冰质量

Table 2 Ice amount on the surface of the insulator

| 绝缘子型号 | 外施电压/kV | 覆冰质量/(g·m$^{-1}$) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 20 min | 40 min | 60 min | 80 min | 100 min | 120 min |
| FXBW-35/70 | 0 | 51 | 107 | 162 | 211 | 258 | 311 |
| | 30 | 56 | 121 | 176 | 231 | 289 | 369 |
| LXY-160 | 0 | 64 | 128 | 186 | 253 | 317 | 389 |
| | 30 | 68 | 136 | 202 | 277 | 358 | 472 |

## 4 结论

1）荷电水滴在直流电场中的偏移轨迹随着外施电压和水滴中值直径的增加而增大，而随着风速的增大而减小。在相同外施直流电压下，荷正电水滴会向弱场区运动，而荷负电水滴则会向强场区运动，且荷负电水滴的偏移量大于荷正电水滴的偏移量。

2）受直流电场的影响，LXY-160 伞裙表面生成的冰树枝沿径向生长，而 FXBW-35/70 伞裙表面的冰树枝则沿轴向生长。此外，由于焦耳热及离子的轰击效应，随着外施电压的升高，冰树枝的侧枝逐渐消失，尖端逐渐变钝。

3）伞裙边缘的法向电场强度 $E_N$ 对于冰树枝的形成有很大的影响。对于 LXY-160，伞裙边缘 $E_N$ 最大，则冰树枝先出现在伞裙边缘，且随着外施电压的增加逐渐过渡到伞裙表面。而对于 FXBW-35/70，$E_N$ 分布较为均匀，导致冰树枝几乎同时出现并覆盖整个伞裙表面。

4）在相同覆冰环境下，由于绝缘子结构配置的差异，LXY-160 单位泄漏距离的覆冰质量大于 FXBW-35/70，而伞裙边缘覆冰长度前者则小于后者。当外施电压为 30 kV 时，FXBW-35/70 覆冰质量较不带电情况下增长 18.64%，覆冰长度增长 19.38%，而对于 LXY-160 则分别增长 21.34%和 22.08%。

## 参考文献 References


[1] SUN J L, HU Y Y, JIANG X L, et al. Discharge development process and flashover performance of snow-accreted insulators under natural environment[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 146: 108678.

[2] DONG B B, HU Y Y, YIN F H, et al. Simulation calculation of 3D electric field and natural flashover analysis of ice-covered silicone rubber insulator[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2023, 17(5): 1166-1178.

[3] 王新宽，喻建波，刘振华，等. 等效扩径导线与分裂导线覆冰比较[J]. 高电压技术，2022，48(7)：2698-2705.
WANG Xinkuan, YU Jianbo, LIU Zhenhua, et al. Comparison of icing between equivalent expanded diameter conductor and bundle conductor[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(7): 2698-2705.

[4] 胡建林，刘 杰，蒋兴良，等. 基于弧垂测量的综合荷载下导线等值覆冰厚度监测方法[J]. 高电压技术，2022，48(2)：584-593.
HU Jianlin, LIU Jie, JIANG Xingliang, et al. Monitoring method for equivalent icing thickness of conductor under complex load based on sag measurement[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(2): 584-593.

[5] 王 斌，李立涅，魏发生，等. 不均匀覆冰下的架空地线覆冰在线监测力学计算模型改进[J]. 高电压技术，2022，48(11)：4538-4545.
WANG Bin, LI Licheng, WEI Fasheng, et al. Research on improvements in the mechanical calculation model of on-line icing monitoring of overhead ground wires under uneven icing[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4538-4545.

[6] QIAO X H, ZHANG Z J, JIANG X L, et al. AC failure voltage of iced and contaminated composite insulators in different natural environments[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 120: 105993.

[7] 蒋兴良，郭思华，胡建林，等. 不同覆雪形态对悬式绝缘子直流负极性闪络特性的影响[J]. 电工技术学报，2018，33(2)：451-458.
JIANG Xingliang, GUO Sihua, HU Jianlin, et al. Influence of snow accretion with different shape on negative DC flashover characteristics of suspension insulators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(2): 451-458.

[8] 舒立春，刘延庆，蒋兴良，等. 盘型悬式绝缘子串自然覆冰直流放电发展路径特点及影响因素分析[J]. 电工技术学报，2021，36(8)：1726-1733.
SHU Lichun, LIU Yanqing, JIANG Xingliang, et al. Analysis on the DC discharge path of ice-covered disc type suspension insulators under natural conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(8): 1726-1733.

[9] 胡玉耀，孙建亮，蒋兴良，等. 覆冰绝缘子直流闪络双电弧动态电路模型[J]. 高电压技术，2023，49(2)：515-524.
HU Yuyao, SUN Jianliang, JIANG Xingliang, et al. Double-arc dynamic circuit model of DC flashover of ice-covered insulator[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(2): 515-524.

[10] 朱梅林，蒋兴良，刘延庆，等. 直流冰面局部电弧运动特性[J]. 高电压技术，2023，49(5)：1939-1948.
ZHU Meilin, JIANG Xingliang, LIU Yanqing, et al. Motion characteristics of DC local arc on ice surface[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5): 1939-1948.

[11] 高　晋，郭思华，韩兴波，等. 绝缘子表面三维覆冰特性的影响因素[J]. 电工技术学报，2021，36(14)：3072-3080.
GAO Jin, GUO Sihua, HAN Xingbo, et al. Influence factors of three-dimensional icing characteristics on insulators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(14): 3072-3080.

[12] 蒋兴良，韩兴波，胡玉耀，等. 绝缘子湿增长动态覆冰模型研究[J]. 中国电机工程学报，2018，38(8)：2496-2503.
JIANG Xingliang, HAN Xingbo, HU Yuyao, et al. The study of dynamic wet-growth icing model of insulator[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(8): 2496-2503.

[13] 胡　琴，殷攀程，吴　彬，等. 交流工作电压下染污方式对 220 kV 复合绝缘子覆冰及闪络特性的影响[J]. 中国电机工程学报，2015，35(18)：4817-4824.
HU Qin, YIN Pancheng, WU Bin, et al. Influence of polluting methods on icing and flashover characteristics of 220 kV composite insulators under AC working voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(18): 4817-4824.

[14] HU Q, WANG S J, SHU L C, et al. Comparison of AC icing flashover performances of 220 kV composite insulators with different shed configurations[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(2): 995-1004.

[15] HU Y Y, JIANG X L, YANG Z Y, et al. Influence of crystallization effect during icing water phase transition on the flashover characteristics of ice-covered insulators[J]. IEEE Access, 2020, 8: 176521-176529.

[16] 胡玉耀，蒋兴良，谢　梁，等. 电场对冰水相变过程晶释效应的影响[J]. 高电压技术，2018，44(6)：2074-2080.
HU Yuyao, JIANG Xingliang, XIE Liang, et al. Influence of electric field strength on crystallization effect during phase transition[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(6): 2074-2080.

[17] 薛艺为，阳　林，郝艳捧，等. 输电线路悬式复合绝缘子雨凇与轻雾凇覆冰形态和覆冰过程对比研究[J]. 电工技术学报，2016，31(8)：212-219.
XUE Yiwei, YANG Lin, HAO Yanpeng, et al. A comparative study on icing morphology and process of glaze and light rime in suspension composite insulators on transmission lines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(8): 212-219.

[18] 李亚伟，张星海，贾志东，等. 不同覆冰类型绝缘子串的泄漏电流特征分析[J]. 电网技术，2017，41(11)：3691-3697.
LI Yawei, ZHANG Xinghai, JIA Zhidong, et al. Characteristic analysis of leakage current of insulator strings under different icing types[J]. Power System Technology, 2017, 41(11): 3691-3697.

[19] LIU Z Y, HU Y Y, JIANG X L, et al. Three-dimensional numerical simulation of rime ice accumulation on silicone rubber insulator and its experimental verification in the natural environment[J]. Electric Power Systems Research, 2022, 213: 108713.

[20] JIANG X L, HAN X B, HU Y Y, et al. Model for ice wet growth on composite insulator and its experimental validation[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(3): 556-563.

[21] HAN X B, JIANG X L. Characteristics of icing without icicle on insulators under natural conditions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2020, 180: 103153.

[22] 潘　杨. 复合绝缘子雾凇覆冰特性与伞形结构优化研究[J]. 电气应用，2022，41(8)：1-6.
PAN Yang. The rime icing characteristics of composite insulator and the optimization of shed configuration[J]. Electrotechnical Application, 2022, 41(8): 1-6.

[23] 蒋兴良，黄亚飞，胡建林，等. 基于 CFD 的高速动车组车顶支柱绝缘子覆冰特性研究及防覆冰伞裙优化[J]. 高电压技术，2021，47(10)：3548-3557.
JIANG Xingliang, HUANG Yafei, HU Jianlin, et al. Study of ice simulation and anti-icing structure optimization of high-speed train roof insulators based on CFD method[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(10): 3548-3557.

[24] HUANG Y F, JIANG X L, VIRK M S. Ice accretion study of FXBW4-220 transmission line composite insulators and anti-icing geometry optimization[J]. Electric Power Systems Research, 2021, 194: 107089.

[25] LV Y K, LI J G, ZHANG X M, et al. Simulation study on pollution accumulation characteristics of XP13-160 porcelain suspension disc insulators[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(4): 2196-2206.

[26] ZHANG G D, LAN L, WANG Y, et al. Simulation study on the pollution accumulation of the porcelain insulator in a wind tunnel under direct-current composite electric field[J]. Electric Power Systems Research, 2022, 209: 108014.

[27] 袁　伟. 污秽条件下复合绝缘子表面电荷积聚动态仿真研究[D]. 长沙：湖南大学，2018.
YUAN Wei. Dynamic simulation of surface charge accumulation of composite insulator under polluted condition[D]. Changsha, China: Hunan University, 2018.

[28] 李振宇. 输电线路覆冰增长机理和防治策略研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2020.
LI Zhenyu. Study of icing mechanism and prevention and control strategy of power transmission line[D]. Harbin, China: Harbin Institute of Technology, 2020.

[29] HAN X B, JIANG X L. Effect of DC electric field on water droplets' movement and icing process on insulator[J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, 164: 102780.

[30] 张东东，张志劲，蒋兴良，等. 典型悬式绝缘子风洞直流积污特性与分析[J]. 电工技术学报，2018，33(19)：4636-4645.
ZHANG Dongdong, ZHANG Zhijin, JIANG Xingliang, et al. Wind tunnel DC contamination performance of typical suspension insulator

and its analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(19): 4636-4645.

[31] 骆仲泱，江建平，赵　磊，等. 不同电场中细颗粒物的荷电特性研究[J]. 中国电机工程学报，2014，34(23)：3959-3969.
LUO Zhongyang, JIANG Jianping, ZHAO Lei, et al. Research on the charging of fine particulate in different electric fields[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(23): 3959-3969.

[32] SHU L C, LIU Y Q, JIANG X L, et al. Three-dimensional electric field simulation and flashover path analysis of ice-covered suspension insulators[J]. High Voltage, 2020, 5(3): 327-333.

[33] ZONG C Y, HU Y Y, JIANG X L, et al. AC flashover characteristics and arc development process of glaze ice-covered insulators in natural environment[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 135: 107559.

[34] 陈　吉，蒋兴良，舒立春，等. 绞线带电雾凇覆冰后的电晕起始特性[J]. 高电压技术，2014，40(6)：1738-1747.
CHEN Ji, JIANG Xingliang, SHU Lichun, et al. Corona onset characteristics of stranded conductor after energized rime icing[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(6): 1738-1747.



**胡玉耀**(通信作者)
1989—，男，博士，副教授，硕导
主要从事极端环境下输电线路外绝缘状态评估的研究工作
E-mail: hyuyao@sdut.edu.cn

HU Yuyao
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author



**刘宗源**
1997—，男，硕士
主要从事极端环境下输电线路外绝缘状态评估的研究工作
E-mail: 1421437451@qq.com

LIU Zongyuan

收稿日期　2023-01-16　修回日期　2023-08-03　　编辑　卫李静