

# 不同电压类型作用下过冷却水滴运动特性及 绝缘子雾凇覆冰试验

胡玉耀<sup>1</sup>, 迟明辰<sup>1</sup>, 蒋兴良<sup>2</sup>, 咸日常<sup>1</sup>, 刘晓阳<sup>3</sup>, 耿凯<sup>4</sup>

(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. 雪峰山能源装备安全国家野外科学观测研究站(重庆大学), 重庆 400044; 3. 国网山东省电力公司潍坊市寒亭区供电公司, 潍坊 261000; 4. 山东汇能电气有限公司, 淄博 255089)

**摘要:** 覆冰严重威胁输电线路的安全稳定运行。已有试验研究表明电场对绝缘子覆冰确有影响, 但是不同电压类型作用下, 水滴的微观运动过程及其对冰树枝生长的影响机理尚未厘清。文中以 3 片串 LXY-160 绝缘子为研究对象, 基于电磁学、流体力学和场致荷电理论, 首次对比分析了在交流电场和负极性直流电场作用下水滴的受力特性和运动偏移特性。在此基础上, 通过自然环境下的雾凇覆冰试验解释了不同类型电场对覆冰增长过程的影响。结果表明: 荷电水滴的运动特性与电场类型密切相关, 交流电场下荷电水滴的运动轨迹出现振荡, 且水滴捕获时间是直流的 1.15 倍。直流作用下绝缘子伞裙边缘的法向电场最大, 绝缘子雾凇覆冰冰树枝集中分布于此。由于交流情况下荷电水滴受到的电场力在一个周期内有抵消效应, 因此单位时间内捕获的水滴数量较直流少, 且直流电场作用下的绝缘子覆冰质量和覆冰长度分别较交流提高了 13.7% 和 8.75%。

**关键词:** 电压类型; 过冷却水滴; 绝缘子; 雾凇覆冰; 荷电水滴

## Movement Characteristics of Supercooled Water Droplets Under AC and DC Electric Fields and Its Effect on Rime Ice Accretion on the Insulator

HU Yuyao<sup>1</sup>, CHI Mingchen<sup>1</sup>, JIANG Xingliang<sup>2</sup>, XIAN Richang<sup>1</sup>, LIU Xiaoyang<sup>3</sup>, GENG Kai<sup>4</sup>

(1. Shandong Engineering Laboratory of Smart Grid and Equipment, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China; 2. Xuefeng Mountain Energy Equipment Safety National Observation and Research Station, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. Weifang City Hanting District Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Weifang 261000, China; 4. Shandong Huineng Electric Co., Ltd., Zibo 255089, China)

**Abstract:** Experimental studies have been conducted to show the effect of electric field on insulator icing. However, the motion process of droplets and its influence mechanism on the growth of ice dendrites under different types of voltages have not been understood. In the research, based on electromagnetism, hydrodynamics and field charging theory, the force characteristics and motion deviation features of the droplets under different electric fields were compared and analyzed by numerical simulations. On this basis, the impact of electric field on icing growth process was explained combined with icing tests. The results indicate that the trajectory of charged droplet presents oscillating in AC electric field, and the capture time of the droplet is 1.15 times that of DC. The normal electric field at the edge of the shed is the largest under DC, and ice branches are concentrated in this area. Since the electric force on the charged droplet has a counteracting effect in one cycle in the case of AC, the number of the droplets captured by the insulator per unit time is less than that of DC. Consequently, ice amount and length of icing insulator under DC are 13.7% and 8.75% higher than those under AC, respectively.

**Key words:** voltage type; supercooled water droplet; insulator; rime ice; charged droplet

## 0 引言

由输电线路覆冰导致的倒塔、断线等机械故障以及绝缘子串闪络等电气事故一直是电力系统外绝缘领域尚未解决的关键技术难题<sup>[1-3]</sup>。而且,随着全球极端气候的频发,输电线路外绝缘性能面临空前的考验<sup>[4-6]</sup>。2020年11月,哈尔滨地区发生严重覆冰灾害,导致11.2万户居民停电。2021年2月初,美国德克萨斯州遭遇持续低温寒潮,导致400多万用户停电,10余人罹难。2022年2月,中国广西累计147条线路覆冰,79个供电台区部分供电设施因灾停运,广西电网10 kV及以上线路跳闸停运44条,近3 000用户供电中断。2023年12月13日,山西垣曲多条输电线路因覆冰出现故障,导致全县断电。

为了厘清绝缘子的覆冰致灾机理,国内外学者在人工气候室内开展了大量的试验研究。文献[4-6]基于计算流体动力学原理,研究了硅橡胶绝缘子在不同环境参数及结构配置下的覆冰增长特性,结果表明:随着风速、温度、液滴中值体积直径和液态水含量的增大,绝缘子表面的覆冰量增加。在此基础上,提出了适用于覆冰地区的伞裙结构,并进行了人工试验验证<sup>[7-9]</sup>。文献[10-12]通过建立覆冰数值计算模型,对绝缘子覆冰增长进行了迭代仿真计算,结果表明:不同环境条件下绝缘子表面的覆冰类型、覆冰面积、覆冰速率、增长过程等均有较大差异。文献[13-14]研究了交流电场对硅橡胶绝缘子表面覆冰的影响,结果表明:随着交流电压的升高,冰凌向芯棒侧弯曲的程度越明显,而且伞裙表面覆冰粗糙度增大,覆冰密度减小。文献[15]基于流体力学和电磁学原理建立了水滴运动数学模型,探究了水滴在绝缘子表面的碰撞特性,研究表明:在低风速、小粒径条件下,电场能有效促进水滴向绝缘子移动,使碰撞系数显著提高,而随着水滴直径的增大该值减小。

上述关于绝缘子覆冰的试验研究大多是在人工气候室开展的,而且仅有部分学者研究了交流电场对覆冰增长的影响。与交流相比,直流电场对荷电水滴有吸附作用,导致其覆冰机理与交流覆冰有着本质区别<sup>[16-19]</sup>。在两种不同性质的电场作用下,荷电水滴的运动规律及其与绝缘子碰撞的物理过程缺乏研究。同时,自然环境随机可变的气象参数与人工气候室固定的环境参数不同,使得实验室绝缘

子覆冰规律与自然覆冰增长特性有着差异。因此,有必要对直流和交流电压作用下水滴的运动特性及绝缘子覆冰的物理过程开展深入研究。

本文基于流体力学、电磁学和场致荷电理论,综合考虑电场力、曳力和重力的作用,建立了荷电水滴运动数值模型,首次对比研究了交流电场和直流电场对水滴运动特性的影响,计算得到了荷电水滴在不同类型电场作用下的轨迹偏移量和捕获时间。在数值仿真分析的基础上,结合自然环境下的绝缘子带电覆冰试验,分析了不同类型电场对绝缘子覆冰增长过程以及冰树枝形态的影响。本文从水滴的运动过程出发揭示了交直流电场对覆冰影响的差异,可为进一步建立绝缘子带电覆冰模型提供有益参考。

## 1 物理场控制方程

### 1.1 流场控制方程

覆冰绝缘子所处环境由于外流场流速较低,可视为常温、低速、不可压缩的湍流流动。湍流模型采用RANS  $k-\varepsilon$ 模型构建<sup>[20-21]</sup>,如下所示:

$$\begin{cases} \rho(\mathbf{v}_a \cdot \nabla) \mathbf{v}_a = \nabla \cdot (-\rho \mathbf{I} + (\mu + \mu_T)(\nabla \mathbf{v}_a + (\nabla \mathbf{v}_a)^T)) + \mathbf{F} \\ \rho \nabla \cdot \mathbf{v}_a = 0 \\ \rho(\mathbf{v}_a \cdot \nabla) k = \nabla \cdot ((\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k}) \nabla k) + P_k - \rho \varepsilon \\ \rho(\mathbf{v}_a \cdot \nabla) \varepsilon = \nabla \cdot ((\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon}) \nabla \varepsilon) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \\ \mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \\ P_k = \mu_T (\nabla \mathbf{v}_a : (\nabla \mathbf{v}_a + (\nabla \mathbf{v}_a)^T)) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{v}_a$  是流场中的速度矢量;  $\mu$  是空气的动力黏粘度;  $\mu_T$  是由于空气湍流额外产生的动力黏度;  $\rho$  是空气密度;  $k$  为湍流动能;  $\varepsilon$  是湍流耗散率;  $\mathbf{I}$  是主应力张量;  $\mathbf{F}$  为体积力;  $C_{\varepsilon 1}$ 、 $C_{\varepsilon 2}$ 、 $C_{\varepsilon 3}$  为湍流模型参数;  $P_k$  为湍流动能源项。

### 1.2 电场控制方程

直流由于电场方向恒定对荷电水滴的作用与交流有着本质的不同。直流电场的控制方程可用静电场原理表述,方程如下<sup>[22]</sup>:

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_v \\ \mathbf{E} = -\nabla U \\ \mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_1 \mathbf{E} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{D}$  表示电位移矢量;  $\rho_v$  表示体电荷密度;  $U$  表示电势;  $\mathbf{E}$  表示电场强度;  $\varepsilon_0$  表示真空介电常数;  $\varepsilon_1$  表示相对介电常数。

交流电场采用频域分析, 其控制方程<sup>[22]</sup>为:

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{J} = Q_j \\ \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + \mathbf{J}_e \\ \mathbf{E} = -\nabla U \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\mathbf{J}$  表示总电流密度;  $\sigma$  表示电导率;  $Q_j$  表示电荷量;  $\mathbf{J}_e$  表示外部电流密度。

### 1.3 水滴运动控制方程

本文采用拉格朗日法模拟荷电水滴在电场中的运动轨迹, 为方便研究, 做如下设定:

- 1) 将过冷却水滴等效为球形, 且不考虑水滴的反弹和破裂;
- 2) 过冷却水滴的初始速度大小和方向与气流一致。

过冷却水滴远离绝缘子时, 电场作用可以忽略, 当随气流运动至绝缘子附近时, 气流沿绝缘子表面绕流, 过冷却水滴由于曳力、重力、电场力的协同作用, 其运动轨迹偏离气流。此时由过冷却水滴在流场中的受力分析可知, 过冷却水滴主要受压差力、Saffman 升力等作用, 忽略较小的力, 可认为水滴在流场中只受到曳力  $F_d$  的作用<sup>[23]</sup>:

$$F_d = \frac{1}{\tau_w} m_w (v - V) \quad (4)$$

水滴的剩余重力为:

$$F_g = m_w g \frac{(\rho_w - \rho)}{\rho_w} \quad (5)$$

式中:  $v$  和  $V$  分别为气流和水滴瞬时速度;  $\tau_w$  为水滴弛豫时间;  $m_w$  和  $g$  分别为水滴质量和重力加速度;  $\rho_w$  与  $d_w$  分别为水滴密度与直径。

绝缘子在雾凇覆冰条件下过冷却水滴的中值体积直径(MVD)分布在 10~50  $\mu\text{m}$  之间。由文献<sup>[24]</sup>可知, 过冷却水滴在电场中的荷电方式可用场致荷电理论解释。由于过冷却水滴从不带电到饱和荷电经历的时间短, 为简化模型, 本文认为水滴在靠近绝缘子直至被捕获的过程中, 荷电量始终饱和。过冷却水滴的饱和荷电量<sup>[25]</sup>为:

$$q_s = \frac{3\pi\epsilon_0\epsilon_w E_0 d_w^2}{\epsilon_w + 2} \quad (6)$$

式中:  $\epsilon_w$  为水滴相对介电常数;  $E_0$  为电场强度。

过冷却水滴在电场中主要受极化力、库仑力和电场力等, 库仑力与极化力比电场力低 2~5 个数量级, 故忽略不计<sup>[26]</sup>。因此可看作只受电场力的作用, 即:

$$F_e = q_s E_0 = \frac{3\pi\epsilon_0\epsilon_w E_0^2 d_w^2}{\epsilon_w + 2} \quad (7)$$

综上所述, 过冷却水滴在带电绝缘子周围运动过程中仅受到重力、气流曳力以及电场力的作用, 如下所示:

$$F = F_g + F_d + F_e \quad (8)$$

## 2 多物理耦合场的建立

### 2.1 LXY-160 绝缘子模型建立及网格剖分

本文以 3 片串 LXY-160 玻璃绝缘子为研究对象, 其外观结构及参数如图 1 所示。电场-流场耦合仿真计算模型及其模型网格剖分如图 2 和图 3 所示。

### 2.2 参数设置

本研究中部分材料的物理属性设置如下:

- 1) 计算域材料设置为空气, 其动力黏度为  $1.84 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。

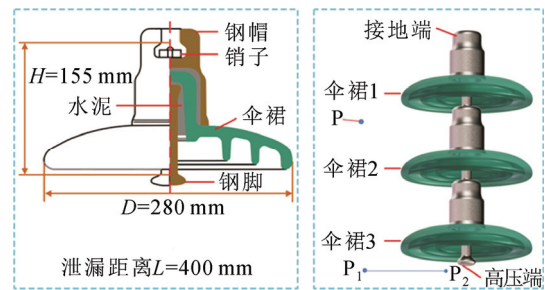


图 1 绝缘子 LXY-160 结构图

Fig.1 Structural configuration of LXY-160

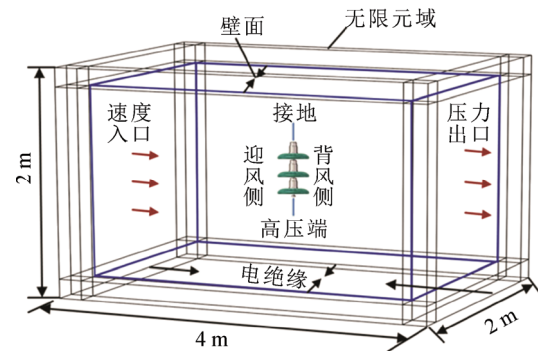


图 2 仿真计算模型

Fig.2 Simulation calculation model

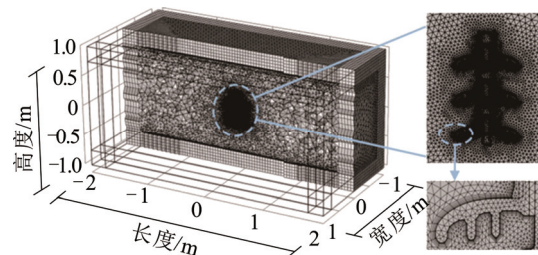


图 3 模型网格剖分

Fig.3 Mesh generation of the model

2) 伞裙的相对介电常数为 4.2。

3) 过冷却液滴密度设置为  $1\ 000\ \text{kg}/\text{m}^3$ 。

对于图 2 中的流场计算域, 左侧为气流速度入口, 右侧为压力出口。在电场计算域中, 将绝缘子第 1 片伞裙的钢帽设为接地端, 钢脚设为高压端。在粒子追踪模块中, 绝缘子外壁条件设置为冻结, 压力出口壁面条件设为消失。

### 3 数值模拟结果对比与分析

#### 3.1 荷电水滴运动轨迹及偏移特性

风速( $v$ )、外施电压( $U$ )的大小和类型、水滴中值体积直径(MVD)的变化均会影响绝缘子周围的空气流场和电场, 进而改变水滴的运动轨迹, 影响绝缘子表面覆冰特性。

图 4 给出了不同条件下直流负极性与交流电场作用下过冷却水滴的运动轨迹, 其中深蓝色、红色和浅蓝色流线分别代表未荷电、荷正电和荷负电水滴的运动轨迹。

为进一步探究电压类型对水滴运动特性的影响, 本文引入轨迹偏移量表征水滴在电场中的偏移程度。在直流电场中, 取不带电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力作用较中性水滴运动轨迹的偏移程度, 其表达式为:

$$\Delta s = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2} \quad (9)$$

式中:  $\Delta x$ 、 $\Delta y$ 、 $\Delta z$  分别表示从  $P_1$  点释放的荷电水滴运动  $\Delta t$  ( $\Delta t = |l_{P_1P_2}|/v$ ,  $l_{P_1P_2}$  为  $P_1$ 、 $P_2$  点之间的距离,  $v$  为运动速度) 时间内, 相对于未荷电水滴在  $x$ 、 $y$ 、

$z$  方向上的位移差。

交流电场对荷电水滴的作用力是周期变化的, 由图 4 可知, 在水滴最终碰撞的时刻其偏移量并不是最大的, 若采用与直流相同的表征方式并不具有代表性。因此, 交流电场中取水滴释放处  $P_1$  的纵坐标  $y$  为基准, 计算荷电水滴在运动  $\Delta t$  时间内其在竖直方向上的最大偏移量  $\Delta y(|y-y_0|)$ 。

直流和交流电场作用下的  $\Delta s$  和  $\Delta y$  分别如图 5 和 6 所示。同时, 为了衡量不同类型电场作用下绝缘子对水滴的捕获效率, 仿真计算了绝缘子表面单位时间内捕获的水滴数量, 如图 7 所示。由图 4—图 7 可得如下结论:

1) 当水滴远离绝缘子时, 无论绝缘子外施交流电压还是直流电压, 水滴在气流曳力的作用下其运动轨迹与流线一致, 均是一组平行的直线。当水滴运动至绝缘子附近位置, 电场力逐渐起主导作用, 其运动轨迹发生明显变化。

2) 在直流电场作用下, 荷负电水滴趋向于远离钢脚或偏向伞裙下表面运动, 荷正电水滴则与之相反。荷正电水滴的偏移量较荷负电水滴更大, 而且, 随着负极性直流电压的升高, 这种增大的趋势越明显(见图 5)。其原因解释如下: 荷正电水滴在电场吸引力作用下趋向于强场区运动, 而荷负电水滴由于电场斥力作用向弱场区运动。

3) 在交流电场作用下, 由于电压极性呈周期性变化, 荷电水滴在绝缘子附近的运动轨迹出现振荡, 而且, 随着  $U$  的增加, 水滴运动轨迹出现振荡

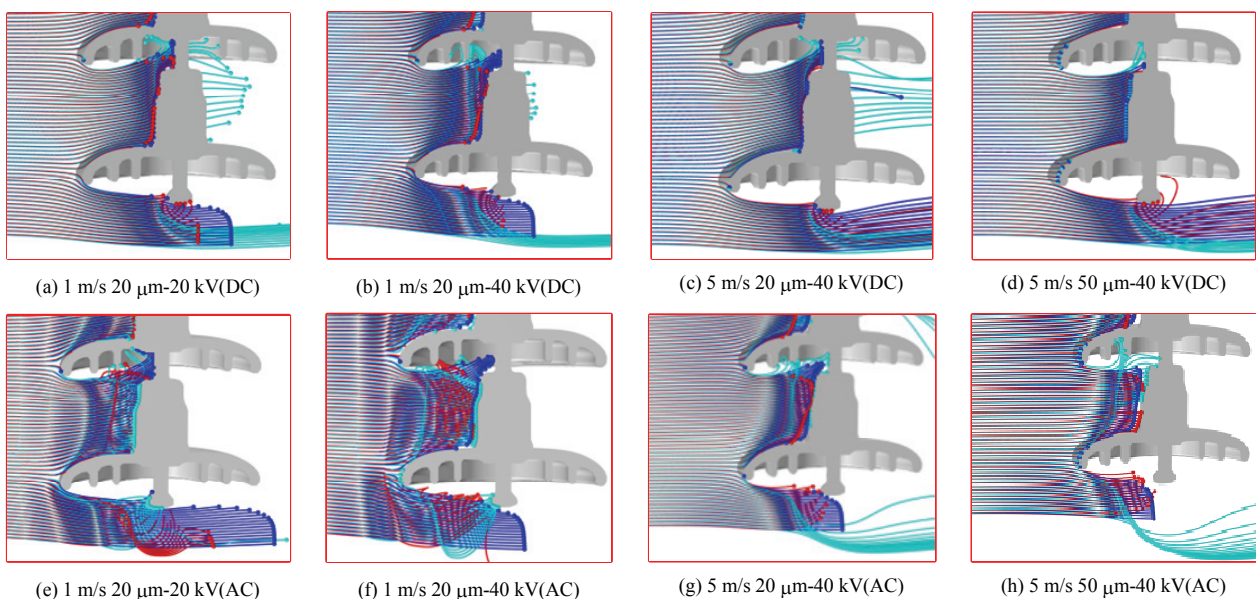
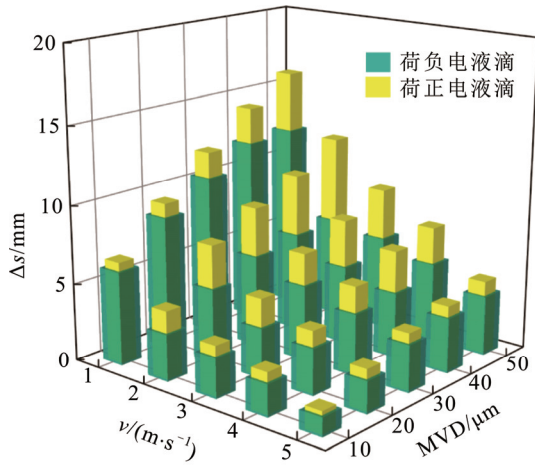
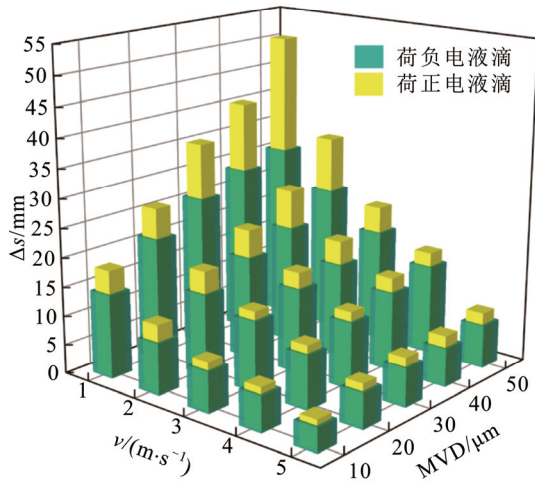


图 4 不同电压极性下水滴的运动轨迹

Fig.4 Trajectories of water droplets under different types of voltages



(a) -20 kV



(b) -40 kV

图5 负极性直流电压下荷电水滴位移差  $\Delta s$

Fig.5 Displacement difference( $\Delta s$ ) of charged droplets under different negative DC voltages

的时刻提前。其原因解释见 3.2 节。随着交流电压升高, 电场力增大, 水滴从  $P_1$  运动到  $P_2$  的时间缩短, 电场力作用效果强于重力, 导致水滴倾向于沿着电场线方向运动, 因此  $\Delta y$  减小。与直流相比, 在交流电场下, 虽然不同荷电类型的水滴均能到达绝缘子表面, 而在单位时间内, 直流电场捕获水滴数量较交流更多, 如图 7 所示。

4) 保持  $U$  和  $v$  不变, 在直流下, 由于电场力与水滴直径的平方成正比, 其轨迹偏移量均随 MVD 的增大而增大。在交流电场下, 风速为 1~3 m/s 时,  $\Delta y$  随 MVD 的变化规律与直流电场相同, 而当风速  $v$  增大到 4 m/s 时, 与重力和交变的电场力相比, 气流曳力起主导作用, 因此  $\Delta y$  随 MVD 的增大而减小。当水滴直径增大至 50  $\mu\text{m}$  时, 由于水滴的惯性和曳

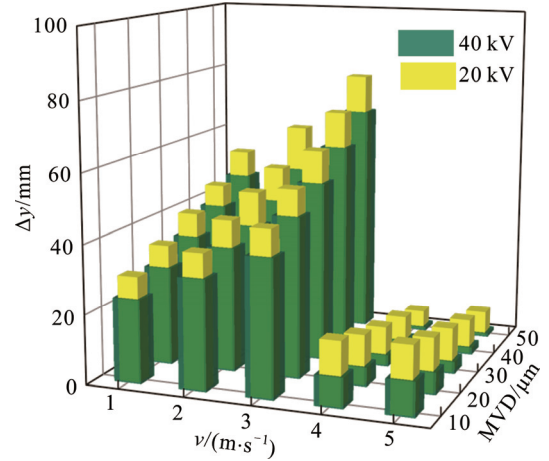


图6 交流电场下负电水滴最大偏移量  $\Delta y$

Fig.6 The optimum offset( $\Delta y$ ) of charged droplets under AC voltage

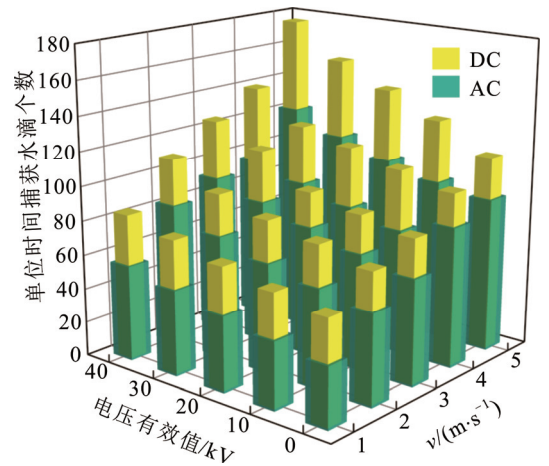


图7 单位时间内捕获水滴个数

Fig.7 Number of captured droplets per unit time

力作用大于电场力的作用, 因此未观察到水滴出现明显的振荡现象。

5) 在  $U$  和 MVD 不变的情况下, 直流电场下荷电水滴轨迹偏移量随  $v$  的增加而减小, 而在交流电场中,  $\Delta y$  主要为重力和电斥力共同作用的结果。风速为 1~3 m/s 时, 水滴从进入强电场到被绝缘子捕获的运动时间均较小于交流电场的周期。在此时间内, 交流电场由负极性转换为正极性。风速增大, 荷负电水滴进入强电场区域的时刻提前, 因此电斥力的作用时间增大, 电斥力作用效果越明显, 从而  $\Delta y$  增大; 当风速增大到 4 m/s 时, 水滴运动速度大幅度增大, 运动时长明显缩短, 电场对水滴的作用效果几乎可以忽略, 水滴因曳力作用在极短时间内碰撞到绝缘子上, 因此  $\Delta y$  较 3 m/s 时大幅度减小, 且风速继续增大,  $\Delta y$  变化非常微小。

### 3.2 荷电水滴的运动特性

由 3.1 节可知, 荷电水滴在不同类型电场作用下的运动轨迹存在明显差异。为了进一步揭示其原因, 本节以荷正电水滴为例, 水滴从  $P_1$  释放, 在电场中的运动时间  $\Delta t=l_{P1P2}/v$ , 释放速度为 1 m/s。为了表征不同电压类型下电场力  $F_e$  对水滴运动速度  $v$  及运动轨迹的影响, 引入  $F_e$  方向和  $v$  方向的夹角  $\theta$  的余弦值, 如图 8 所示。交直流电场中, 将荷正电水滴在同一位置释放, 其运动轨迹如图 9(a)所示, 其中, 箭头表示电场力  $F_e$  方向, 蓝色曲线表示荷正电水滴的运动轨迹,  $\cos\theta$  计算结果如图 9(b)所示。

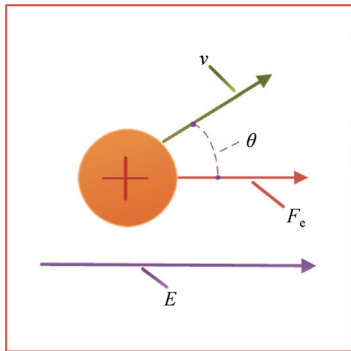
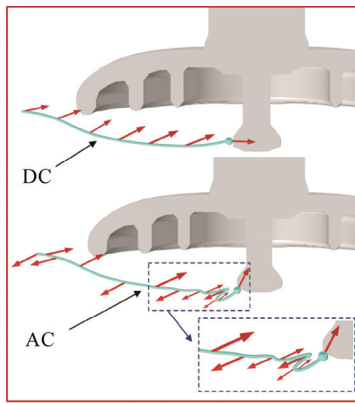


图 8  $F_e$  和  $v$  夹角示意图

Fig.8 Schematic diagram of the angle  $\theta$  between  $F_e$  and  $v$



(a) 荷正电液滴运动轨迹

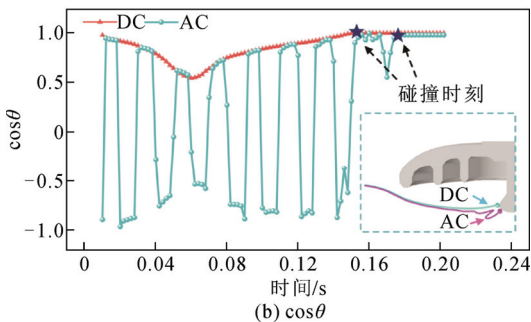


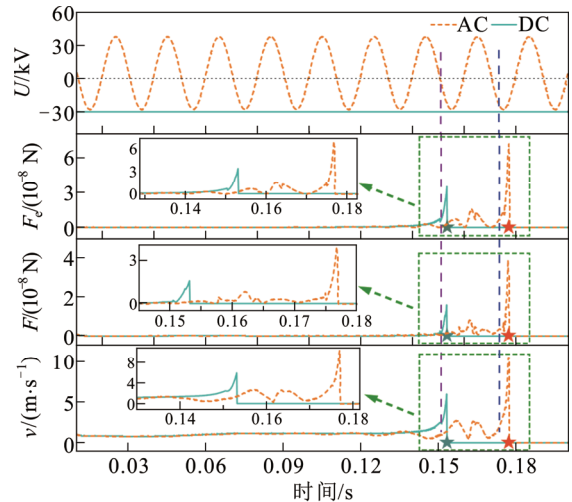
图 9 不同电压下荷正电液滴运动轨迹及  $\cos\theta$

Fig.9 Trajectories of the positive droplets and  $\cos\theta$  under different voltage types

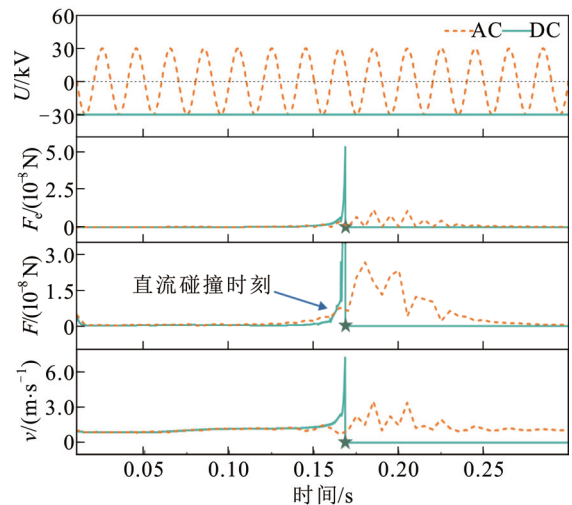
水滴释放后在交直流电场下均能被捕获情况下, 其水滴受到的电场力、合力、速度与外施电压之间的关系如图 10(a)所示。水滴在直流电场下能被捕获, 而在交流电场中无法被绝缘子捕获情况下, 其水滴受到的电场力、合力、速度与外施电压之间的关系如图 10(b)所示。

由图 9 和图 10 可知:

1) 在直流电场中, 荷电水滴受重力、气流曳力和电场力的共同作用向绝缘子运动。远离绝缘子时水滴重力作用强于电场力, 而当水滴运动至绝缘子附近时, 电场力起主导作用, 导致  $F_e$  与  $v$  的夹角先增大后减小, 但均小于  $90^\circ$ , 即  $\cos\theta$  恒大于零, 因此  $F_e$  对  $v$  的作用效果恒为加速。由图 10(a)可知, 荷电水滴捕获前电场力陡然增大, 碰撞前 0.01 s 内, 水滴受到的电场力由  $0.9775 \times 10^{-8}$  N 增大到



(a) 交直流作用下水滴均被捕获



(b) 仅有直流作用下水滴均被捕获

图 10 不同电压类型下水滴运动过程受力及速度变化

Fig.10 Changes in force and velocity during droplet movement under different voltage types

$3.023 \times 10^{-8} \text{ N}$ , 运动速度由  $2.022 \text{ m/s}$  提高到  $6.235 \text{ m/s}$ ; 对应的捕获时间为  $0.153 \text{ s}$ 。

2) 在交流电场中, 荷电水滴在交变电场作用下  $\cos\theta$  正负交替变化, 靠近绝缘子时,  $F_e$  对水滴运动起主导作用。当  $F_e$  对水滴运动提供正加速度时, 即  $\cos\theta$  大于零时, 水滴向钢脚运动; 当  $\cos\theta$  小于零时, 水滴在  $F_e$  作用下做减速甚至反向运动。在碰撞前  $0.01 \text{ s}$  内, 水滴的电场力由  $1.11648 \times 10^{-8} \text{ N}$  增大到  $7.51308 \times 10^{-8} \text{ N}$ , 速度由  $1.9669 \text{ m/s}$  增大到  $10.9610 \text{ m/s}$ 。对应的捕获时间为  $0.176 \text{ s}$ , 其捕获时间和碰撞速度分别是直流电场的 1.15 倍和 1.76 倍。这是由于水滴在直流电场中受到持续的电场吸引力作用, 而在交流电场中斥力和吸引力并存。直到水滴在直流电场中被捕获前, 水滴在直流电场中的运动速度几乎均比交流中的大, 因此捕获时间更短。水滴被捕获前一时刻, 交流电场施加在振荡运动的水滴上的电场力更大, 由于水滴的质量相同, 因此加速度正比于水滴所受的合力。由图 10(a)可知, 交流电场中水滴碰撞前一时刻的加速度几乎为直流电场的两倍, 因此水滴在交流电场下碰撞速度更大。

3) 由图 10(b)可知, 改变释放位置, 直流电场下水滴仍能被捕获; 而在交流电场中, 水滴在从释放位置运动至绝缘子附近时, 任一周期内施加到水滴的电场吸引力均不足以使水滴被绝缘子捕获。因此在入口处水滴流量一定时, 相同时间内直流电场吸附水滴的数量更多, 与 3.1 节得到的单位时间内直流电场相较于交流电场捕获的水滴数量更多的结论一致。

## 4 试验结果对比与分析

### 4.1 试验原理与方法

采用自然降水开展绝缘子覆冰试验具有试验周期长的弊端, 且环境参数的差异将降低试验数据之间的可比性<sup>[27]</sup>。因此, 本文在现场搭建了如图 11 所示的试验平台。其中, 水滴通过高压雾化喷嘴喷射到空气中, 利用大功率风扇将雾化水滴吹向绝缘子。风扇的作用不仅使雾化水滴均匀地流向绝缘子, 而且使水滴和外部环境之间实现更加充分的热交换。当水滴被绝缘子捕获时, 在其表面迅速冻结形成雾凇。整个过程与绝缘子自然雾凇覆冰机理一致, 因此采用这种方法开展雾凇覆冰试验具有合理性。

在现场开展绝缘子雾凇覆冰试验时, 水滴的电导率和直径分别为  $800 \mu\text{s/cm}$  和  $30 \mu\text{m}$ , 试验环境的

温度和风速变化范围如表 1 所示。

绝缘子雾凇覆冰试验步骤如下所述。

1) 试品清洁: 试验前, 清洗绝缘子表面并将绝缘子悬挂于试验架上等待干燥以供使用。

2) 预处理: 将试验用水放置在  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  以下的室外环境冷却  $5\sim 8 \text{ h}$  备用; 并调整雾化装置与试验架的距离为  $8 \text{ m}$ 。

3) 绝缘子覆冰: 当温度达到  $-8 \text{ }^\circ\text{C}$  及以下时, 在绝缘子上施加所需电压类型, 随后打开雾化装置进行覆冰试验。

4) 数据测量: 实验开始后, 每隔  $20 \text{ min}$  测量一次伞裙边缘的最大覆冰厚度, 并测量覆冰质量, 覆冰试验持续时间为  $2 \text{ h}$ 。

### 4.2 电场对冰树枝形态的影响

不同电压类型下的绝缘子表面雾凇冰树枝形态如图 12 所示。由图 12 可得到如下结论:

1) 绝缘子表面的覆冰形态与外施电压密切相关。当绝缘子不带电覆冰时, 覆冰表面光滑。与不带电覆冰相比, 无论电压类型如何, 带电绝缘子表面雾凇覆冰出现大量冰树枝, 导致冰面粗糙度增加。

2) 与交流相比, 在相同的电压等级下, 直流电场作用的绝缘子雾凇覆冰冰树枝更明显。这是由

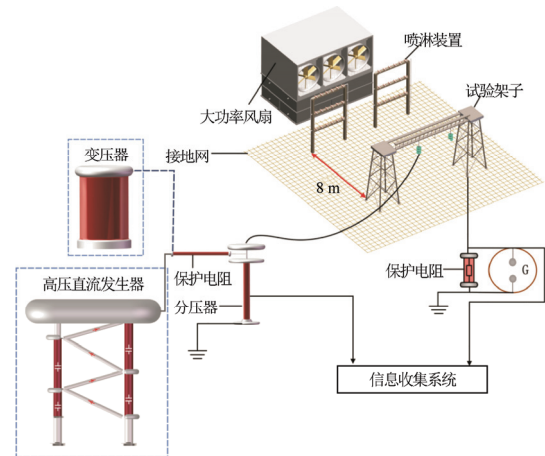


图 11 绝缘子覆冰试验平台

Fig.11 Test platform for energized insulator icing

表 1 不同时刻的风速及温度

Table 1 Temperature and wind speed at different times

覆冰时间/h	温度/ $^\circ\text{C}$	风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
0	-8.1	2.7
0.5	-9.4	3.0
1.0	-10.2	3.0
1.5	-10.5	2.7
2.0	-12.3	3.0

于直流对荷电的过冷却水滴施加的是恒定的作用力，而荷电水滴在交流电场中受到的电场力是周期性变化的，一个周期内作用力具有抵消效应。

3) 在电场作用下，雾凇覆冰存在明显分叉的冰树枝。这是因为覆冰表面产生冰树枝后，其末端较为尖锐，电场也较大，形成极不均匀电场。其中，水滴由于受到指向强场方向的作用力，冰树枝末端吸引大量水滴沿电场线方向冻结，导致分叉的冰树枝形成。

### 4.3 电场对绝缘子覆冰形态的影响

在不同外施电压下，绝缘子高压端雾凇覆冰 2 h 后的形态如图 13 所示。

由图 13 可分析得到电场对绝缘子表面覆冰增长特性的影响如下：

1) 不带电覆冰绝缘子表面的雾凇呈白色颗粒状堆积，分布均匀。覆冰沿着绝缘子表面增长。

2) 在交直流电场作用下，绝缘子雾凇覆冰形态较为疏松。当电压为 20 kV 时，绝缘子伞裙边缘出现树枝状雾凇覆冰。当电压增至 40 kV 时，雾凇冰树枝更为明显。而且由于直流电场对过冷却水滴

的吸引作用，导致冰树枝较交流更为显著。

3) 对比交直流电场作用下冰树枝的形态发现。随着外施电压的升高，冰树枝逐渐由伞裙边缘向伞裙表面过渡，而且其生长方向垂直于伞裙表面。其原因可以采用如下解释。雾凇覆冰的环境温度较低，水滴一旦被绝缘子捕获立即冻结形成覆冰<sup>[7]</sup>。因此，雾凇覆冰的生长方向取决于水滴最终碰撞速度方向。由前文分析可知，电场导致荷电水滴的运动轨迹发生偏移并趋向于沿电场线方向运动，因此绝缘子表面的电场分布对雾凇覆冰过程影响显著。

以交流电场为例，绝缘子高压端伞裙表面电场分布如图 14 所示。LXY-160 绝缘子伞裙表面电场的方向趋向于径向，其与冰树枝的生长方向一致。为揭示冰树枝集中分布于绝缘子伞裙边缘的原因，将绝缘子表面的电场  $E$  分解为切向电场  $E_T$  与法向电场  $E_N$ ，由此可知  $E_N$  对荷电水滴的运动轨迹起主导作用。

图 15 分别给出了交直流电场作用下沿绝缘子高压端伞裙表面路径 A-B 的法向电场  $E_N$  分布。由图 15 可知：

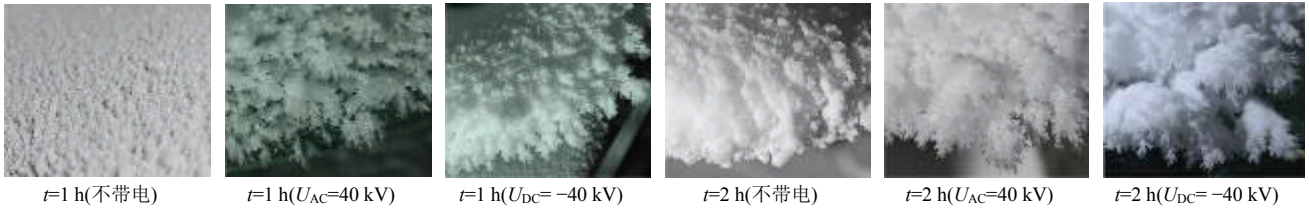


图 12 不同电压类型下绝缘子表面冰树枝形态

Fig.12 Morphology of rime ice dendrites under different types of voltages

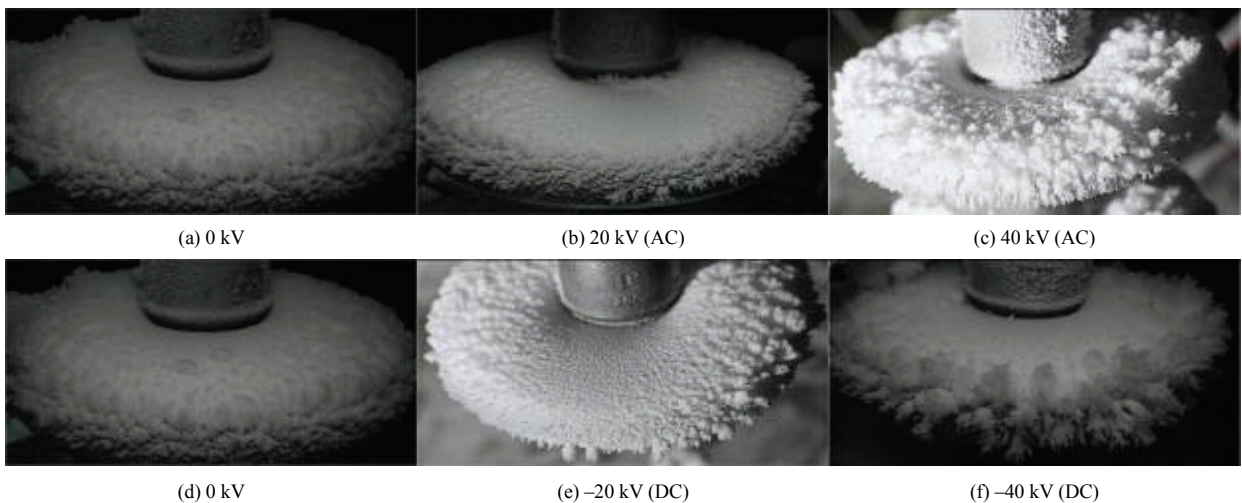


图 13 不同类型电压下 LXY-160 伞裙雾凇覆冰

Fig.13 Rime ice morphology on the shed surface under different types of voltages

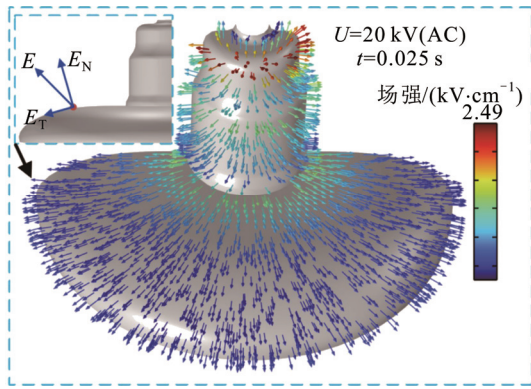


图 14 交流电压下高压端伞裙场强分布图

Fig.14 Electric field distribution on the shed surface at high-voltage terminal under AC voltage

1) 在直流作用下, 伞裙边缘处  $E_N$  较大, 越远离伞裙边缘其值越小, 导致电场对绝缘子伞裙边缘覆冰的影响较伞裙表面更显著。冰树枝最先在伞裙边缘区域形成, 且随电压增大, 当伞裙表面  $E_N$  达到一定值时, 冰树枝逐渐过渡到伞裙表面。

2) 在交流电压作用一个周期内, 法向电场对荷电水滴的作用力在正负半个周波是相反的, 具有抵消效应, 其总体电场作用力效果比直流要小得多。因此冰树枝生长速度、树枝长度与数量均小于直流电场。

为进一步探究电场对绝缘子串不同部位覆冰形态的影响, 在不带电和直流-40 kV 电压下, 绝缘子各伞裙自然雾凇覆冰 2 h 后的形态如图 16 所示。由图 16 可以得到如下结论:

1) 对于不带电覆冰, 3 片绝缘子伞裙表面的覆冰均光滑, 而且相互之间的覆冰程度相近。

2) 对于带电覆冰的绝缘子, 由于高压端伞裙表面的电场强度较其他部位高, 电场对空气中的水滴产生极化吸引作用, 其方向沿着电力线方向, 导致高压端伞裙表面的雾凇覆冰量高于其他位置, 而且冰树枝沿着电力线生长。

#### 4.4 电场对绝缘子覆冰质量和长度的影响

经过 2 h 的覆冰试验, 带电绝缘子的覆冰质量(换算为每米泄漏距离的覆冰量)及覆冰长度如表 2 和表 3 所示。由表 2 和表 3 可知:

1) 随着覆冰时间的增加, 绝缘子带电和不带电覆冰长度和覆冰质量均呈非线性增加, 且带电绝缘子覆冰较不带电严重。以覆冰质量为例, 覆冰 2 h 后, 直交流电压大小为 40 kV 作用下, 覆冰量分别为 0.564 kg/m 和 0.496 kg/m, 较不带电分别增加长

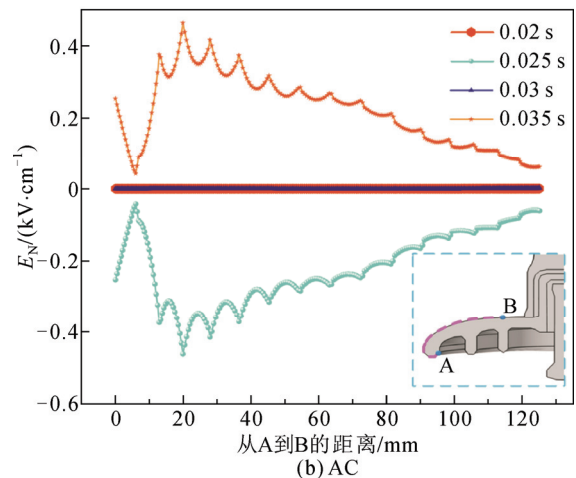
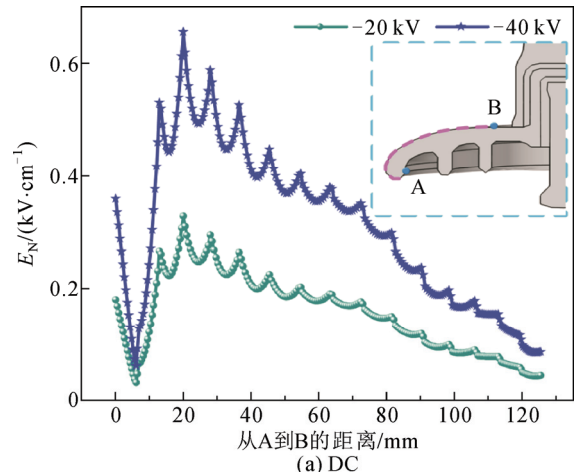


图 15 参考路径 A-B 法向电场强度

Fig.15 Distribution of the  $E_N$  along path A-B

了 43.1%和 25.9%。

2) 直流电场作用下, 绝缘子的覆冰程度比交流严重。交直流 40 kV 下, 覆冰 2 h 后, 直流情况下的覆冰量和覆冰长度分别为 0.564 kg/m 和 3.23 cm, 而交流下分别为 0.496 kg/m 和 2.97 cm, 分别增长了 13.7%和 8.75%。其原因可以解释如下: (1)由第 3 章仿真分析可知, 绝缘子施加直流电压时单位时间内捕获的过冷却水滴多于交流电压; (2)在电场作用下形成的树枝状雾凇末端成尖针状, 导致局部电场增大, 进而直流电场对荷电水滴的吸引作用增强; (3)由前述试验结果可知, 直流电场作用下的覆冰表面更粗糙, 更容易捕获过冷却水滴。

## 5 结论

1) 在直流负极性电场中, 荷负电水滴在电场作用下向弱场方向偏移, 而荷正电的水滴向强场方向运动。在交流电场中, 由于作用在荷电水滴上的电场力呈周期性变化, 水滴的运动轨迹出现振荡。

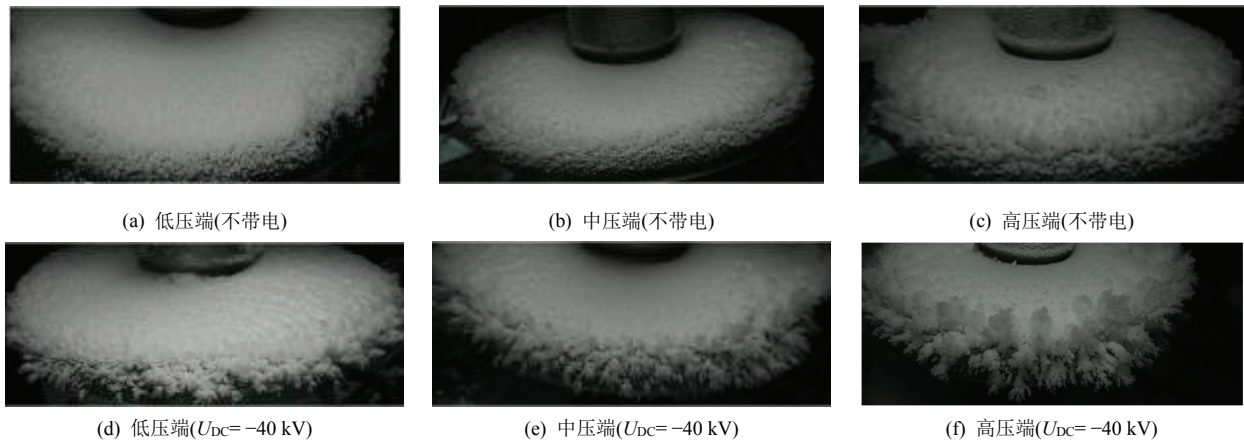


图 16 带电与不带电绝缘子串各伞裙覆冰形态

Fig.16 Rime icing morphology of each shed in an insulator string under 0 and -40 kV DC voltage

表 2 绝缘子雾凇覆冰质量

Table 2 Rime ice amount of the insulator

外施电 外施电		覆冰质量/(kg·m <sup>-1</sup> )					
压类型	压/kV	20 min	40 min	60 min	80 min	100 min	120 min
DC	0	0.064	0.124	0.183	0.255	0.317	0.394
	-20	0.069	0.132	0.201	0.279	0.358	0.441
	-40	0.081	0.157	0.225	0.324	0.443	0.564
AC	20	0.065	0.129	0.196	0.264	0.342	0.425
	40	0.073	0.143	0.203	0.294	0.389	0.496

表 3 绝缘子雾凇覆冰长度

Table 3 Rime icing length of the insulator

外施电 外施电		覆冰长度/m					
压类型	压/kV	20 min	40 min	60 min	80 min	100 min	120 min
DC	0	0.41	0.77	1.16	1.54	1.92	2.31
	-20	0.44	0.82	1.21	1.67	2.13	2.67
	-40	0.49	0.88	1.35	1.92	2.49	3.23
AC	20	0.42	0.79	1.19	1.56	1.99	2.49
	40	0.46	0.80	1.26	1.81	2.35	2.97

且随着交流电压的升高,水滴出现振荡的时刻提前,振荡幅度增大。

2) 不同电压类型下,在相同位置释放的荷电水滴,交流电场中的水滴捕获时间和碰撞速度是直流电场的 1.15 倍和 1.76 倍。而且,在单位时间内,绝缘子施加直流电压时的水滴捕获数量高于施加交流电压。

3) 直流电场下,  $F_e$  与  $v$  的夹角的余弦值  $\cos\theta$  先减小后增大且均大于零,因此  $F_e$  对  $v$  的作用效果恒为加速。而在交流电场下,荷电水滴在交变电场作用下  $\cos\theta$  正负交替变化,在一个周期内对荷电水滴的作用力有抵消效应,因此直流电场较交流电场的覆冰速率更快。

4) 由于直流电场作用下,绝缘子伞裙边缘法向电场分量最大,因此雾凇冰树枝主要集中分布在此处。交直流电场下绝缘子表面的覆冰质量和覆冰长度随覆冰时间增加均呈非线性增长,且直流电场下覆冰质量和长度较交流分别增加了 13.7% 和 8.75%。

## 参考文献 References

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 郭裕钧, 闫向龙, 黄桂灶, 等. 非均匀覆冰下输电导线的脱冰跳跃动力特性[J]. 高电压技术, 2023, 49(10): 4411-4420.  
GUO Yujun, YAN Xianglong, HUANG Guizao, et al. Dynamic characteristics of transmission line conductors with non-uniform accreted ice after ice-shedding[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(10): 4411-4420.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.

- [7] 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.
- [8] 孙磊, 贾志东, 李亚伟, 等. 环境条件对线路绝缘子覆冰形态和密度的影响规律[J]. *高电压技术*, 2018, 44(8): 2612-2619. SUN Lei, JIA Zhidong, LI Yawei, et al. Influence law of line insulator ice shape and density by environmental conditions[J]. *High Voltage Engineering*, 2018, 44(8): 2612-2619.
- [9] JIANG X L, WANG Q L, ZHANG Z J, et al. Estimation of rime icing weight on composite insulator and analysis of shed configuration[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2018, 12(3): 650-660.
- [10] 迟明辰, 胡玉耀, 蒋兴良, 等. 复合绝缘子无溢流覆冰增长数值模拟及自然覆冰试验验证[J]. *高电压技术*, 2024, 50(4): 1694-1703. CHI Mingchen, HU Yuyao, JIANG Xingliang, et al. Numerical simulation and natural icing experimental verification on non-overflow and wet growth on composite insulators[J]. *High Voltage Engineering*, 2024, 50(4): 1694-1703.
- [11] 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.
- [12] 马建桥, 丁思瑜, 张瑞谦, 等. 抑制冰棱桥接的斜腕臂复合绝缘子结构设计[J]. *高电压技术*, 2023, 49(7): 2900-2908. MA Jianqiao, DING Siyu, ZHANG Ruiqian, et al. Structural design of oblique cantilever composite insulator suppressing icicle bridging[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(7): 2900-2908.
- [13] 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.
- [14] SHU L C, WANG S J, JIANG X L, et al. Effect of grading ring on ice characteristics and flashover performance of 220 kV composite insulators with different shed configurations[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2015, 22(2): 951-960.
- [15] 韩兴波, 蒋兴良, 黄亚飞, 等. 复合绝缘子直流电场下的水滴运动及覆冰特性[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(9): 2042-2050. HAN Xingbo, JIANG Xingliang, HUANG Yafei, et al. Icing properties of composite insulator and droplet movement under DC electric field[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(9): 2042-2050.
- [16] 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.
- [17] 张志劲, 周天宇, 蒋兴良, 等. 典型覆冰形状下输电线路风荷载影响研究[J]. *电网技术*, 2023, 47(12): 5247-5255. ZHANG Zhijin, ZHOU Tianyu, JIANG Xingliang, et al. Influence of wind loads on transmission lines under typical ice shapes[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(12): 5247-5255.
- [18] 向泽, 蒋兴良, 张志劲, 等. 玻璃绝缘子串自然覆冰(雪)交流闪络特性[J]. *高电压技术*, 2014, 40(5): 1345-1350. XIANG Ze, JIANG Xingliang, ZHANG Zhijin, et al. AC flashover performance of glass insulators covered with ice or snow at natural station[J]. *High Voltage Engineering*, 2014, 40(5): 1345-1350.
- [19] YANG Z Y, JIANG X L, HUANG Y F, et al. Influence of electric field on the ice-coating process of insulators with a different dielectric surface[J]. *IET Science, Measurement & Technology*, 2020, 14(5): 585-592.
- [20] 胡玉耀, 刘宗源, 李欣, 等. 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[J]. *高电压技术*, 2024, 50(2): 793-804. HU Yuyao, LIU Zongyuan, LI Xin, et al. Influence mechanism of positive DC electric field on rime ice accretion on the insulators and its experimental verification[J]. *High Voltage Engineering*, 2024, 50(2): 793-804.
- [21] 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.
- [22] UCKOL H I, KARACA B, ILHAN S. DC and AC electric field analysis and experimental verification of a silicone rubber insulator[J]. *Electrical Engineering*, 2020, 102(1): 503-514.
- [23] HUANG Y C, HUANG X B. Flow field distribution around insulator and contamination uneven characteristic of insulator[J]. *IET Science, Measurement & Technology*, 2020, 14(10): 1088-1097.
- [24] 申南轩, 苏子寒, 张远航, 等. 湿度对悬浮液滴荷电特性及离子流场特性的影响[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(13): 3422-3430, 3452. SHEN Nanxuan, SU Zihan, ZHANG Yuanhang, et al. Influence of humidity on the charge characteristics of suspension droplets and the characteristics of ion flow field[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(13): 3422-3430, 3452.
- [25] 黄志成, 刘云鹏, 耿江海, 等. 复合绝缘子表面颗粒碰撞捕集模型与试验验证[J]. *高电压技术*, 2022, 48(3): 902-913. HUANG Zhicheng, LIU Yunpeng, GENG Jianghai, et al. Model and experimental verification of particle collision capture on composite insulator surface[J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(3): 902-913.
- [26] GAO B, YANG F, ZHANG S Y, et al. The movement characteristics of charged haze particles in ionized field and its influence on contamination of insulator[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2018, 54(3): 1-4.
- [27] LIU Z Y, HU Y Y, JIANG X L, et al. Influence of positive DC electric field on rime icing on the insulator and its experimental verification in the natural environment[J]. *High Voltage*, 2023, 8(5): 954-966.



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

E-mail: hyuyao@sdut.edu.cn

HU Yuyao

Ph.D.

Associate professor  
Corresponding author

迟明辰

1998—, 女, 硕士, IEEE PES WIP 会员

主要从事极端环境下输电线路外绝缘状态评估的研究

E-mail: chimebz@163.com

CHI Mingchen



蒋兴良

1961—, 男, 博士, 教授, 博导

主要从事高电压与外绝缘技术以及输电线路覆冰与防护工作的研究

E-mail: xljiang@cqu.edu.cn

JIANG Xingliang

Ph.D., Professor

收稿日期 2024-06-13 修回日期 2024-10-09 编辑 曹昭君