

硅橡胶表面湿空气滴状冷凝数值模拟与试验验证

舒胜文¹, 占兆璇¹, 黄雯桦¹, 张丽娜¹, 卞志文², 林一泓²

(1. 福州大学电气工程与自动化学院, 福州 350108;

2. 国网福建省电力有限公司电力科学研究院, 福州 350007)

摘要: 运行在沿海或山区的硅橡胶复合绝缘子常年处于高湿度、大温差的恶劣环境中, 由凝露诱发的沿面放电问题给复合绝缘子的运行可靠性带来了极大挑战。为深入研究硅橡胶表面凝露产生与发展机理, 该文首先在现有滴状冷凝模型的基础上, 构建出考虑不凝气体作用的湿空气滴状冷凝全周期数值仿真模型, 并采用相邻液滴逻辑搜索算法提高该模型的运行效率; 然后通过硅橡胶湿空气冷凝试验验证模型的有效性; 最后探讨环境温度、冷凝基底物化性质等因素对冷凝发展的影响规律。得到以下结论: 冷凝前期液滴主要通过直接冷凝生长, 后期则以聚结生长为主导, 冷凝后期聚结生长对最大液滴半径的贡献占比已超过 70%; 冷凝生长速率与相对湿度、温差呈正相关关系, 而与材料厚度、静态接触角呈现负相关关系。该研究有助于揭示湿空气滴状冷凝机理, 可以为绝缘材料抗凝露性能提升和电气设备预防凝露提供相应的理论基础和技术支持。

关键词: 硅橡胶; 滴状冷凝; 逻辑搜索法; 液滴尺寸分布; 聚结生长; 冷凝生长

Numerical Simulation and Experimental Verification of Wet Air Droplet Condensation on Silicone Rubber

SHU Shengwen¹, ZHAN Zhaoxuan¹, HUANG Wenhua¹, ZHANG Lina¹, BIAN Zhiwen², LIN Yihong²

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. Electric Power Research Institute, State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350007, China)

Abstract: Silicone rubber composite insulators running in coastal or mountainous areas are always in the harsh environment of high humidity and large temperature difference, and the problem of creeping discharge induced by condensation has brought great challenges to the operational reliability of composite insulators. In order to study the mechanism of condensation generation and development on the surface of silicone rubber, we firstly constructed a full-cycle numerical simulation model of wet air droplet condensation considering the role of non-condensable gases on the basis of the existing droplet condensation model, and adopted the neighboring droplet logic searching algorithm to improve the operation efficiency of the model. The validity of the model was then verified by a silicone rubber wet air condensation test. Finally, we discussed the influence law of environmental temperature and humidity, physical and chemical properties of condensation substrate on the development of condensation. Finally, we explored the law of influence of factors such as ambient temperature and humidity, and the physical and chemical properties of the condensed substrate on the development of condensation. The following conclusions can be drawn: The pre-condensation droplets grow mainly by direct condensation, while the later period is dominated by agglomeration growth, and the contribution of coalescence growth to the maximum droplet radius at the later stage of condensation is more than 70%; The condensation growth rate is positively correlated with relative humidity and temperature difference, and negatively correlated with material thickness and static contact angle. This study helps to reveal the mechanism of wet air droplet condensation, which can provide the corresponding theoretical basis and technical support for the improvement of anti-condensation performance of insulating materials and the prevention of condensation in electrical equipment.

Key words: silicone rubber; dropwise condensation; logic searching algorithm; droplet size distribution; coalescence growth; condensation growth

0 引言

随着我国“碳达峰·碳中和”战略目标的提出, 特高压输电在推动构建新型电力系统和实现“双碳”目标方面发挥的关键作用与日俱增^[1-3]。在特高压输电系统中, 硅橡胶复合绝缘凭借其优越的电学性能和机械性能而被广泛使用^[4], 覆盖率高达 75%以上^[5-6]。然而, 运行在沿海或山区的硅橡胶复合绝缘常年处于高湿度、大温差的恶劣环境中, 当硅橡胶表面温度下降到露点温度以下时, 湿空气中的水蒸气就会以离散液滴的形式在硅橡胶绝缘表面发生冷凝, 即凝露现象^[7-9]。表面凝露的产生会增大污秽硅橡胶复合绝缘表面的电导率, 且水珠、空气、硅橡胶三者的表面交界处还会诱发电场畸变, 进而引发沿面闪络甚至绝缘击穿, 严重危害到电力系统的稳定运行^[10-11]。因此, 深入研究硅橡胶表面凝露的演化规律, 有助于揭示湿空气滴状冷凝机理, 可以为硅橡胶复合绝缘材料抗凝露性能提升和绝缘结构增强提供理论基础和技术支持。

由于硅橡胶材料的疏水性, 硅橡胶表面的凝露现象属于湿空气条件下的滴状冷凝(dropwise condensation, DWC)^[12], 是一种涉及跨时空多尺度界面演化与气-液-固多相传递的复杂过程。滴状冷凝传热现象自 1930 年被 Schmidt 等人发现以来, 其传热机理与理论建模就成为了国内外学者的研究焦点^[13-17]。20 世纪 70 年代, Rose 首次提出了经典的单液滴四热阻传热模型^[13], 为滴状冷凝传热过程的深入探索奠定了坚实的理论基础。由于 Rose 提出的模型较为简化, 后续学者在其基础上进一步考虑了温差、液滴接触角以及冷凝基底物化特性等对滴状冷凝传热过程的影响, 对经典四热阻传热模型进行了修正与优化^[14-16]。传统的冷凝传热模型针对的是纯水蒸气条件下的滴状冷凝, 而不适用于湿空气中的水蒸气冷凝情况。区别于纯水蒸气冷凝, 湿空气条件下的滴状冷凝需要考虑空气中不凝气体(non-condensable gas, NCG)对气-液相变过程的影响。为此, 目前已有部分学者针对湿空气中水蒸气的滴状冷凝机理展开了研究。Zheng 基于连续介质理论、分子动理论等探讨了 NCG 含量对滴状冷凝热质传递过程的作用机理^[17], 并提出 NCG 层与液滴内部连续流区域概念, 建立起适用于湿空气条件下的单液滴冷凝传热模型。Baghel 分析了湿空气热物理性质、材料物化性质以及冷凝基底倾斜角度等对滴状冷凝演化过

程的影响规律^[17], 并修正了考虑 NCG 作用下的气-液相界面热阻表达式与临界成核半径表达式。综合现有研究可以发现, 目前针对湿空气条件下滴状冷凝过程的研究仍处于初步探索阶段, 相关理论模型还较为简化, 并且有关绝缘材料表面湿空气滴状冷凝的理论研究较为匮乏。

近年来, 计算机科学和计算机仿真技术飞速发展, 数值仿真已经成为重构和剖析复杂物理过程的有效方法^[18]。为实现滴状冷凝生长全过程的可视化, 目前已有学者尝试利用数值计算结合理论模型的方法对滴状冷凝全周期进行数值模拟。Xu 考虑了冷凝液滴的三维形状, 并利用优化后的聚结判据对竖直表面冷凝液滴从成核到滑落的完整生命周期进行数值模拟^[19]。Castillo 基于点汇方法, 提出一种考虑液滴相互作用的冷凝速率计算方法, 并通过求解三维扩散方程验证了该方法的有效性^[20]。然而, 现有的滴状冷凝数值仿真模型较少与冷凝试验结果进行对比验证, 并且目前仍缺乏能够应用于实际工程的数值模型来描述和预测绝缘材料表面湿空气滴状冷凝的完整过程。

因此, 为清晰再现出绝缘材料表面湿空气滴状冷凝生长全周期, 充分揭示湿空气滴状冷凝的产生与发展规律, 本文首先在现有滴状冷凝模型的基础上, 构建出考虑空气中不凝气体作用以及冷凝演化全过程的湿空气滴状冷凝数值模型, 并通过开发相邻液滴逻辑搜索算法提高该模型的运行效率; 然后, 通过开展硅橡胶湿空气冷凝试验验证该模型的有效性; 最后, 结合模拟结果探讨环境温湿度、冷凝基底物化性质等因素对滴状冷凝发展过程的影响规律。研究旨在揭示湿空气滴状冷凝机理, 为绝缘材料抗凝露性能提升和电气设备预防凝露提供理论支撑。

1 滴状冷凝模型与数值算法构建

1.1 湿空气滴状冷凝数学模型

滴状冷凝是一种跨时空多尺度的复杂周期性过程, 气-液界面在发生相变的同时伴随着热质传递。当湿空气冷却至露点温度时, 饱和湿空气中的水蒸气分子会首先在硅橡胶材料表面的成核位点上团簇形成初始液滴胚核; 随着大量潜热的释放, 在成核液滴的气-液交界面处, 水蒸气分子会持续从气相主体向液滴表面迁移, 成核液滴的尺寸因此而不断增长; 当相互独立的液滴胚核生长至某一临界尺寸时, 就会发生液滴间的聚结; 在表面张力的作用

下,液滴聚结后会有部分表面重新裸露出来,裸露表面上的成核位点被再次激活,形成新的液滴胚核,这一过程会呈周期性循环往复。因此,可以将滴状冷凝模型分解为一系列关联时间的子过程,主要包括初始液滴成核、液滴冷凝生长、液滴相互聚结以及再成核4个阶段^[21]。

1.1.1 湿空气热物理性质

湿空气中含有水蒸气和各种不凝气体,可以认为湿空气是由水蒸气和干燥空气组成的二元混合物。区别于纯水蒸气冷凝,湿空气中的滴状冷凝不仅取决于冷凝基底的物化特性,更取决于湿空气的热物理性质。湿空气中的水蒸气分压 P_v 通过干湿球温度差来计算^[22],表达式为:

$$P_v = P_w - AP_0(T - T_w) \quad (1)$$

式中: P_v 为水蒸气分压; P_0 为大气压; A 为干湿表系数; T 为干球温度; T_w 为湿球温度; P_w 为湿球温度对应的纯水平液面饱和水蒸气压。

湿空气中的相对湿度利用水蒸气分压 P_v 与干球温度对应的饱和水蒸气压 P_{sat} 的比值计算:

$$R_H = P_v / P_{sat} \times 100\% \quad (2)$$

式中: R_H 为相对湿度; P_{sat} 为干球温度对应的饱和水蒸气分压。

当湿空气气压一定时冷却至饱和,相对湿度达到 100%,此时的水蒸气分压 P_v 会等于饱和水蒸气分压 P_{sat} ,由此可以反推出对应的干球温度,这个温度即为露点温度 T_d ,利用马格努斯公式^[23]计算:

$$\lg P_{sat} = 7.5T_d / (T_d + 237.3) + 0.7858 \quad (3)$$

式中: T_d 为露点温度。

此外,湿空气的比湿 ω 与比热容 C_{pm} 可以根据水蒸气分压与相对湿度推导得出,表达式如下:

$$\omega = 0.622P_v / P_0 \quad (4)$$

$$C_{pm} = \frac{C_{pa}(1 - R_H(P_{sat} / P_0))M_a + C_{pv}R_H(P_{sat} / P_0)M_v}{M_a(1 - R_H(P_{sat} / P_0)) + M_vR_H(P_{sat} / P_0)} \quad (5)$$

式中: ω 为比湿; C_{pa} 为干空气比热容; C_{pv} 为水蒸气比热容; M_a 为干空气分子量,取值为 28.963 g/mol; M_v 为水蒸气分子量,取值为 18.02 g/mol。

1.1.2 初始液滴胚核形成阶段

滴状冷凝成核阶段主要包括初始液滴胚核的形成以及再成核,本文基于固定成核假说^[24]对水平硅橡胶表面的成核过程进行数值模拟。基础成核数密度 N_s 为 10^{10} m^{-2} ,成核位置采用随机均匀分布,如图 1 所示。首先将冷凝区域划分为边长 $l = 1/\sqrt{N_s}$ 的方形网状栅格^[25],每个栅格内随机分布一个成核

位点,成核液滴间的平均距离为 $l/2$ 。模拟过程中成核位置在初始阶段确定后便保持固定,一旦成核位点重新裸露,则会立即在暴露的成核位点上产生新的液滴胚核。模型假设冷凝液滴为球缺形,其静态接触角 θ 由硅橡胶的润湿特性决定,设置为 91° ;液滴胚核半径 r_{min} 采用湿空气条件下的初始成核半径公式,其表达式如下:

$$r_{min} = 2\sigma T_b / (h_{fg}\rho_l(T_d - T_b)) \quad (6)$$

式中: r_{min} 为成核半径; σ 为气-液界面的表面张力; T_b 为冷凝表面温度; h_{fg} 为汽化潜热; ρ_l 为冷凝水密度。

1.1.3 冷凝生长阶段

初始液滴胚核形成之后,会进入冷凝生长阶段,此阶段液滴半径会以一定的速率增长,直至与周围的液滴发生聚结。本文采用接触角恒定模型(constant contact angle, CCA)描述液滴的冷凝生长过程,如图 2 所示。

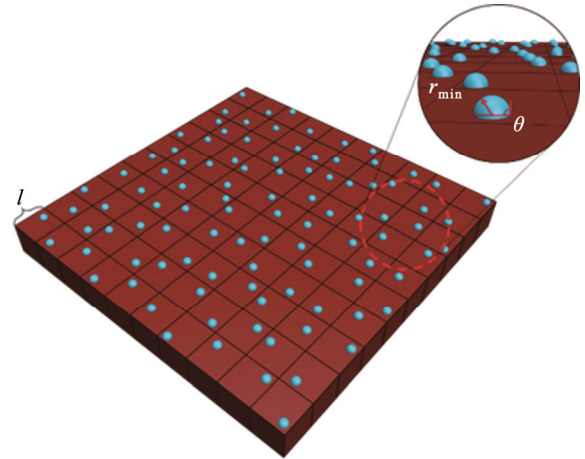


图1 初始成核液滴分布示意图

Fig.1 Diagram of initial nucleation droplet distribution

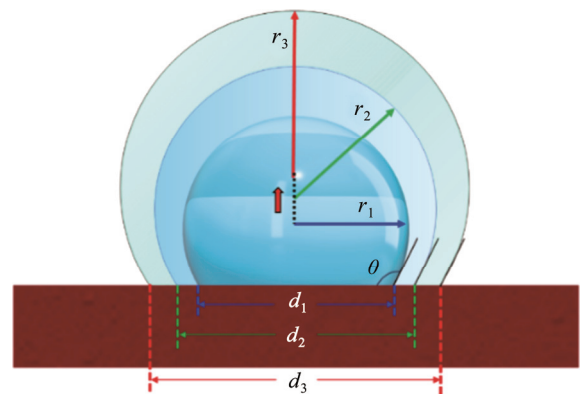


图2 冷凝液滴生长接触角恒定模型(CCA)

Fig.2 Constant contact angle model for condensation droplet growth (CCA)

冷凝过程中, 从气相主体传递到冷凝基底的热流密度等于二者的总温差与等效热阻之比。单液滴热阻等效模型如图3所示, 串联热阻包括湿空气与液滴相界面热阻 $R_{\text{int(NCG)}}$ 、液滴曲面热阻 R_c 、液滴内部导热热阻 R_d 以及冷凝基底热阻 R_p 。因此, 从湿空气经液滴传递至冷凝基底的总热流密度 Q 可以表示为:

$$Q = (T_d - T_{\text{bw}}) / (R_{\text{int(NCG)}} + R_c + R_d + R_p) \quad (7)$$

单位时间内的冷凝质量等于冷凝潜热除以热流密度, 总热流密度 Q 的计算式可以表达如下:

$$Q = \left(\rho_l \pi r^2 (2 - 3 \cos \theta + \cos^3 \theta) \frac{dr}{dt} \right) \cdot \left((1 + \omega) C_{\text{pm}} (T - T_d) / \omega + C_{\text{pl}} (T_d - T_{\text{bw}}) + h_{\text{fg}} \right) \quad (8)$$

式中: r 为液滴半径; C_{pm} 为湿空气比热容; C_{pl} 为冷凝水比热容; T_{bw} 为冷凝基底温度。

结合式(7)与式(8)可以推导出液滴半径增长率 dr/dt 的最终表达式, 串联热阻表达式参考文献[26], 推导出的 dr/dt 表达式^[7]为:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{4(T_d - T_{\text{bw}})}{\rho_l (C_{\text{pm}} (T - T_d) (1 + \omega) / \omega + h_{\text{fg}} + C_{\text{pl}} (T_d - T_{\text{bw}}))} \cdot \frac{(1 - r_{\text{min}} / r)}{4\delta / (k_b + k_b \cos \theta) + r\theta / (k_l \sin \theta) (1 - \cos \theta) + 2 / h_{\text{int(NCG)}}} \cdot \left((1 - \cos \theta) / (2 - 3 \cos \theta + \cos^3 \theta) \right) \quad (9)$$

式中: δ 为冷凝基底厚度; k_b 为冷凝基底导热系数; k_l 为冷凝水导热系数; $h_{\text{int(NCG)}}$ 为含不凝气体的界面换热系数。

其中, 含不凝气体的界面换热系数 $h_{\text{int(NCG)}}$ 利用 Baghel 推导出的公式^[7]计算:

$$h_{\text{int(NCG)}} = \chi_v (2\sigma / (2 - \sigma)) (h_{\text{fg}}^2 / T_w v_{\text{lv}}) \cdot \left(M_v / (2\pi R T_w) \right)^{1/2} (1 - P_{\text{sat}} v_{\text{lv}} / (2h_{\text{fg}})) \quad (10)$$

式中: σ 为纯水蒸气调节系数, 通常取 0.02~0.04; v_{lv} 为 1 kg 水气化为水蒸气后的比体积; R 为通用气体常数。

χ_v 为给定温度和压力下湿空气中水蒸气所占的百分比, 计算式为:

$$\chi_v = ((\omega / M_v) / (\omega / M_v + 1 / M_v)) \times 100\% \quad (11)$$

1.1.4 聚结阶段

初始液滴胚核从成核半径开始冷凝增长到一定程度后就会与周围的液滴发生合并, 此过程也称为液滴间的聚结。区别于冷凝生长, 聚结是大尺寸液滴生长的主要方式, 并且聚结生长带来的液滴尺

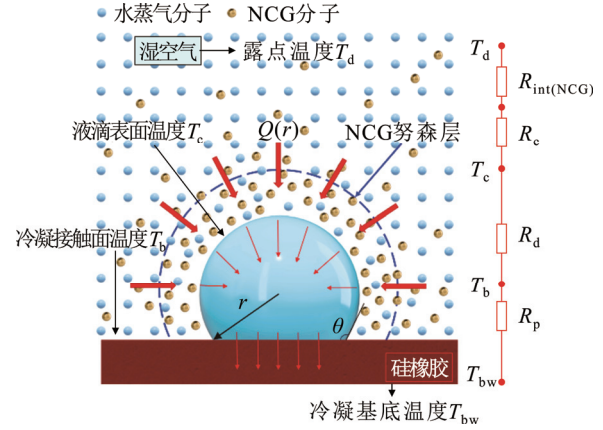


图3 湿空气冷凝单液滴热阻等效模型

Fig.3 Thermal resistance equivalent model of wet air condensation single drop

寸跨尺度演变往往是不连续的。两个液滴之间是否发生聚结需要通过聚结条件来判断, 如图4所示。采用三维笛卡尔坐标系来描述冷凝液滴所处空间, x 坐标与 y 坐标共同确定液滴球心在 xy 平面映射的位置, z 坐标确定球心的高度。考虑在冷凝表面上两个将要发生聚结的液滴, 其半径分别为 r_i 和 r_j , 球心坐标分别为 (x_i, y_i, z_i) 和 (x_j, y_j, z_j) , 判断这两个液滴之间能否发生聚结的条件为:

$$\begin{cases} l_{ij} = \left((x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2 \right)^{1/2} \\ l_{ij} \leq r_i + r_j \end{cases} \quad (12)$$

式中: l_{ij} 为两液滴球心距离。

液滴间发生聚结后会产生新的液滴, 其尺寸和空间位置均取决于两个原始液滴的状态, 新液滴的半径 r_c 与球心位置 (x_c, y_c, z_c) 由下式计算:

$$\begin{cases} V_c = V_i + V_j \\ x_c = (V_i x_i + V_j x_j) / V_c \\ y_c = (V_i y_i + V_j y_j) / V_c \\ z_c = r_c \cos(\pi - \theta) \\ r_c = \left(3V_c / (\pi (2 - 3 \cos \theta + \cos^3 \theta)) \right)^{1/3} \end{cases} \quad (13)$$

式中: V_i, V_j 为原始液滴体积; V_c 为新液滴体积。

1.2 模型假设与数值算法

基于湿空气滴状冷凝数学模型, 利用 MATLAB 软件开发出完整的数值算法对水平硅橡胶表面的滴状冷凝生长全过程进行数值模拟与可视化。模型假设如下:

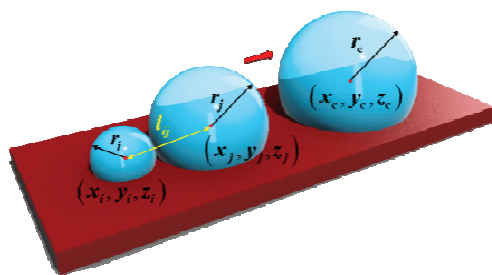


图4 冷凝液滴聚结示意图

Fig.4 Diagram of condensation droplet coalescence

1) 冷凝液滴视为理想球缺, 且形状保持固定, 不受外界因素影响。

2) 绝缘材料表面润湿性均匀, 冷凝过程液滴静态接触角保持恒定。

3) 不考虑液滴聚结时间, 聚结过程在瞬间完成。

模拟开始时, 首先设置湿空气物理特性、冷凝相变传热与绝缘材料物化特性等参数, 根据输入参数与相关公式计算出成核半径 $r_{\min}$ 、冷凝液滴表面张力 σ 以及湿空气界面传热系数 $h_{\text{int(NCG)}}$ 等参数; 基于成核密度公式, 利用改进的随机分布函数实现冷凝表面液滴胚核的随机均匀分布; 在激活初始成核位点后, 液滴胚核进入直接冷凝生长阶段, 此阶段通过 1.1.3 节中推导出的液滴半径增长率 dr/dt 计算每一颗液滴的半径增量; 所有液滴经历冷凝生长后进入聚结判断阶段, 采用相邻液滴逻辑搜索法对表面每一颗液滴进行聚结判断, 通过 1.1.4 节中的聚结条件判断当前液滴是否与周围液滴发生合并, 若满足条件, 则依据等体积原则计算出新液滴的空间位置坐标与半径并标记原始液滴; 待所有聚结行为均发生后, 删除聚结前的原始液滴, 激活重新裸露的成核位点; 冷凝液滴的生长被离散化为每个单位时间步长, 每个步长内包含直接冷凝生长、聚结与再成核行为的判断与执行, 此过程不断循环迭代以更新表面冷凝液滴不同时刻下的空间与尺寸分布, 直至满足时间终止条件, 模型算法流程如图 5 所示。

聚结判断过程中, 采用相邻液滴逻辑搜索算法对液滴的合并过程进行模拟, 如图 6 所示。以表面某一初始半径为 r 的液滴为例, 后续称为中心液滴, 利用逻辑索引寻找出距离中心液滴 k 倍最大凝露半径范围内的所有液滴; 根据搜索结果与中心液滴的球心距离大小对搜索结果中的液滴进行排序, 从距离最近的液滴开始逐滴判断与中心液滴是否发生合并, 依据聚结路径不断更新中心液滴的空间位置与

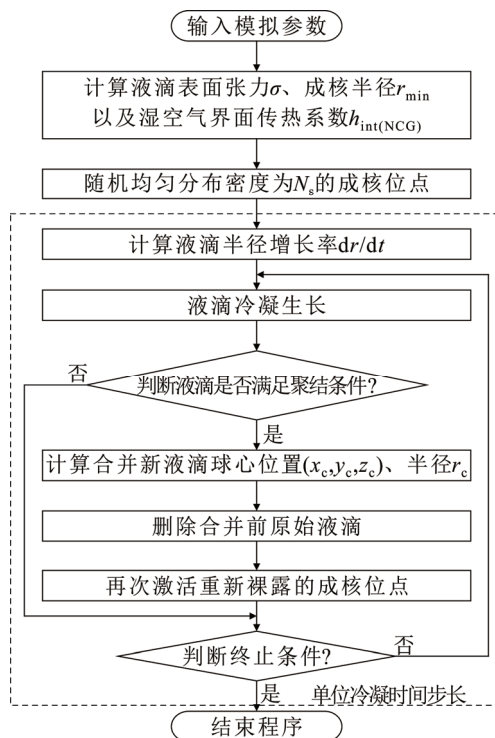


图5 数值仿真算法流程图

Fig.5 Flowchart of numerical simulation algorithm

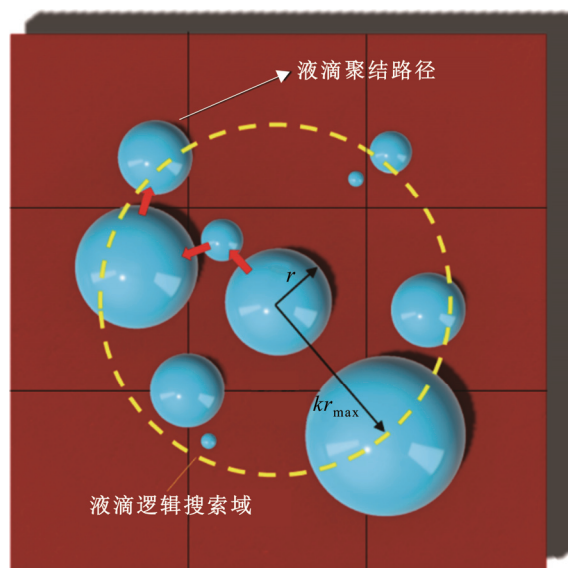


图6 相邻液滴逻辑搜索法示意图

Fig.6 Diagram of logical search method for adjacent drops

尺寸大小。相邻液滴逻辑搜索法遵循液滴聚结的物理规律, 能够避免庞大数量液滴群的遍历搜索, 加快了聚结过程的搜索进程, 在很大程度上提高了本算法的运行效率。

2 湿空气冷凝试验与模型可靠性验证

2.1 冷凝相变微观特性观测试验平台

为探究硅橡胶表面湿空气滴状冷凝机理, 验证

数值模型的有效性, 本文搭建了如图 7 所示的冷凝相变微观特性观测试验平台, 并开展了硅橡胶湿空气冷凝试验。试验平台由亚克力环境箱、金相显微镜、无线 WIFI 相机、半导体制冷台、超声波雾化器、制冷模块、加热器、温湿度测控设备、翅片干燥器、温湿度记录仪以及热电偶温度巡检仪等模块组成。超声波雾化器产生的雾滴直径范围为 4~6 μm , 半导体制冷台的控温精度为 1 $^{\circ}\text{C}$, 试验箱内部的控温精度为 0.5 $^{\circ}\text{C}$, 控湿精度为 5%。

试验过程中, 首先将箱体内部温湿度控制在预设值, 然后对金相显微镜进行调焦并找相, 看清样品表面纹路后启动半导体制冷台。样品表面温度将要接近露点温度时开启显微镜定点拍摄模式, 每 5 s 拍摄一张凝露图像。整个试验过程中利用热电偶和湿度探头测量箱体内部以及硅橡胶表面的温湿度数值, 同时控制箱体内部温湿度偏差稳定在允许范围内。冷凝开始 10 min 后将试品取出并关闭冷台, 同时启动环境箱的除湿模块, 待箱体内部温湿度控制至下一组预设值后开始第 2 组试验。

根据 1.1 节中对湿空气滴状冷凝数学模型的分析可知, 湿空气热物理特性与绝缘材料物化特性是影响冷凝过程的关键因素。因此, 为探究湿空气温度 T 、相对湿度 R_H 、湿空气与硅橡胶表面温差 ΔT 等因素对湿空气冷凝的影响, 冷凝试验工况设置如表 1 所示。

2.2 数值模型试验验证

2.2.1 数值模型参数设置

根据金相显微镜可见视野范围, 设置数值模型冷凝计算域为 1 000 μm ×1 000 μm 的正方形区域。基于固定成核假说, 模型采用成核数密度 N_s 为 10^{10}m^{-2} 。模拟材料为硅橡胶, 静态接触角 91° , 厚度为 2 mm。具体的湿空气热物理性质参数与硅橡胶性质参数如表 2 所示。

2.2.2 数值模型准确性验证

为了验证湿空气滴状冷凝数值模型的准确性, 以表 1 所示的冷凝试验工况数据作为模型的初始输入参数。湿空气温度保持在 25 $^{\circ}\text{C}$, 分别模拟相对湿度为 70%与 90%时不同温差条件下的冷凝情况, 两种相对湿度对应的露点温度分别为 19.17 $^{\circ}\text{C}$ 和 23.25 $^{\circ}\text{C}$ 。模拟过程中, 运行时长设置为 600 s, 步长设置为 1 s。冷凝试验结果与数值模拟结果对比如图 8、图 9 所示。可以发现, 本文提出的数值模型能比较准确地描述出不同冷凝工况下凝露的时空分

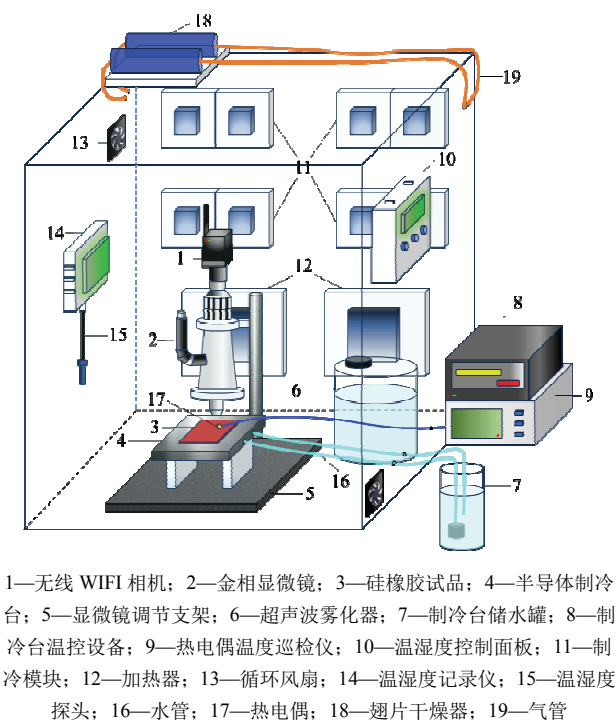


图 7 冷凝相变微观特性观测试验平台

Fig.7 Experimental platform for observation of microscopic properties of condensation phase transformation

表 1 硅橡胶凝露试验工况设置

condition setting					
环境温 度/ $^{\circ}\text{C}$	箱内温 度/ $^{\circ}\text{C}$	相对湿 度/%	冷台温 度/ $^{\circ}\text{C}$	露点温度 $T_d/^{\circ}\text{C}$	温差 $\Delta T/^{\circ}\text{C}$
25	25	70	15	19.17	10
			10		15
		90	15	23.25	10
			10		15

表 2 湿空气滴状冷凝数值模型模拟参数

condensation model	
模拟参数	数值
饱和水蒸气分压力 P_{sat}/Pa	3 169.2
冷凝水汽化潜热 $h_{\text{fg}}/(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	2 256
冷凝水密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	996.813
冷凝水比热容 $C_{\text{pl}}/(\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1})$	4 184.6
冷凝水导热系数 $k_l/(\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1})$	0.59
硅橡胶材料导热系数 $k_b/(\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1})$	0.3

布, 模拟结果与试验结果展现出较好的一致性。通过对图 8(a)和图 8(b)可知, 湿空气温度与相对湿度相同时, 露点温度保持不变, 较大的温差

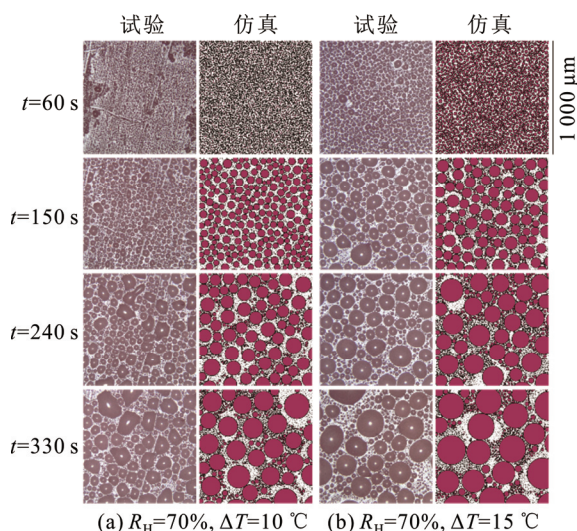


图8 相对湿度70%,不同温差条件下凝露液滴时空分布试验与数值模拟对比

Fig.8 Comparison of the experiment and numerical simulation of the spatiotemporal distribution of condensation droplets with relative humidity of 70% under different temperature differences

会导致冷凝速率加快。因此,试验与模拟的结果都体现出同一冷凝时刻下 $\Delta T=15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时凝露液滴尺寸普遍大于 $\Delta T=10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的情况。由于数值模拟并未考虑硅橡胶材料表面存在的不规则纹理,而实际表面裂纹处的成核密度往往会大于平整处,这使得模拟结果中的液滴分布更加均匀。对比图 9(a)和图 9(b)同样可以得到上述结论,但在较高湿度作用下,随着冷凝时间增长更大尺寸的液滴不断出现,聚结行为逐渐在冷凝过程中起主导作用。并且,在冷凝时长 $t=240\text{ s}$ 之后,可明显观察到液滴的再成核阶段。聚结行为发生后,合并产生的新液滴会在表面张力作用下迅速恢复至稳定状态,与此同时表面裸露的成核位点会被重新激活,从而产生新的液滴胚核。

为定量验证该数值模型的有效性,本文基于表征冷凝演化进程发展的关键因素,从理论结果和试验结果两个方面对数值模拟进行了对比验证。首先将数值模拟结果与 Zheng 理论模型^[17]的液滴半径增长率最大值计算结果进行对比,二者输入参数保持一致,结果如图 10 所示。从图 10 中可知,在不同的冷凝工况下,数值模型的液滴半径增长率最大值模拟结果与 Zheng 所提出的理论模型较相符,从理论的角度验证了该数值模型的可靠性。

最大凝露半径与凝露总数作为描述冷凝相变演化过程的关键状态量,可用其对湿空气滴状冷凝

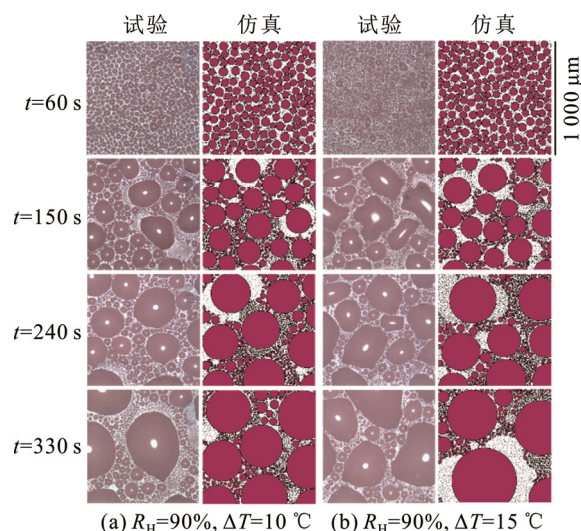


图9 相对湿度90%,不同温差条件下凝露液滴时空分布试验与数值模拟对比

Fig.9 Comparison of the experiment and numerical simulation of the spatiotemporal distribution of condensation droplets with relative humidity of 90% under different temperature differences

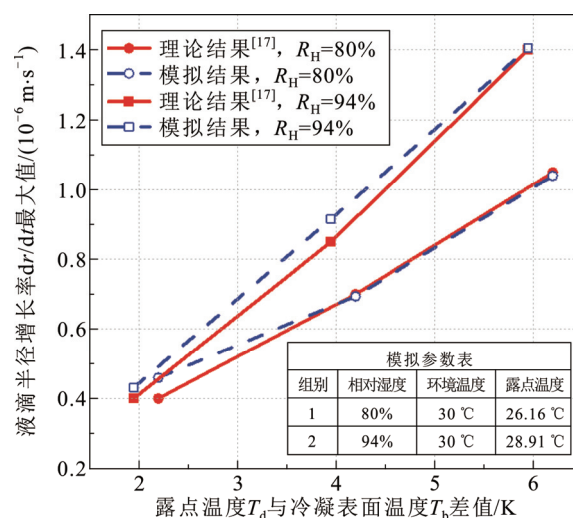


图10 数值模拟与 Zheng 模型的液滴半径增长率最大值对比
Fig.10 Comparison of numerical simulation with the maximum growth rate of droplet radius of Zheng model

数值模拟结果与试验结果进行对比以进一步验证数值模型的有效性。利用 ImageJ®软件对试验拍摄的凝露照片进行图像处理分析,经过二值化、膨胀与腐蚀、孔洞填充以及分水岭分割变换等操作步骤后提取出表面凝露不同时刻下的最大凝露半径与凝露总数数据,试验数据与模拟数据对比如图 11 所示。囿于试验观测的局限性以及图像处理过程中存在的误差,试验提取的凝露总数未包含表面不可见微滴,

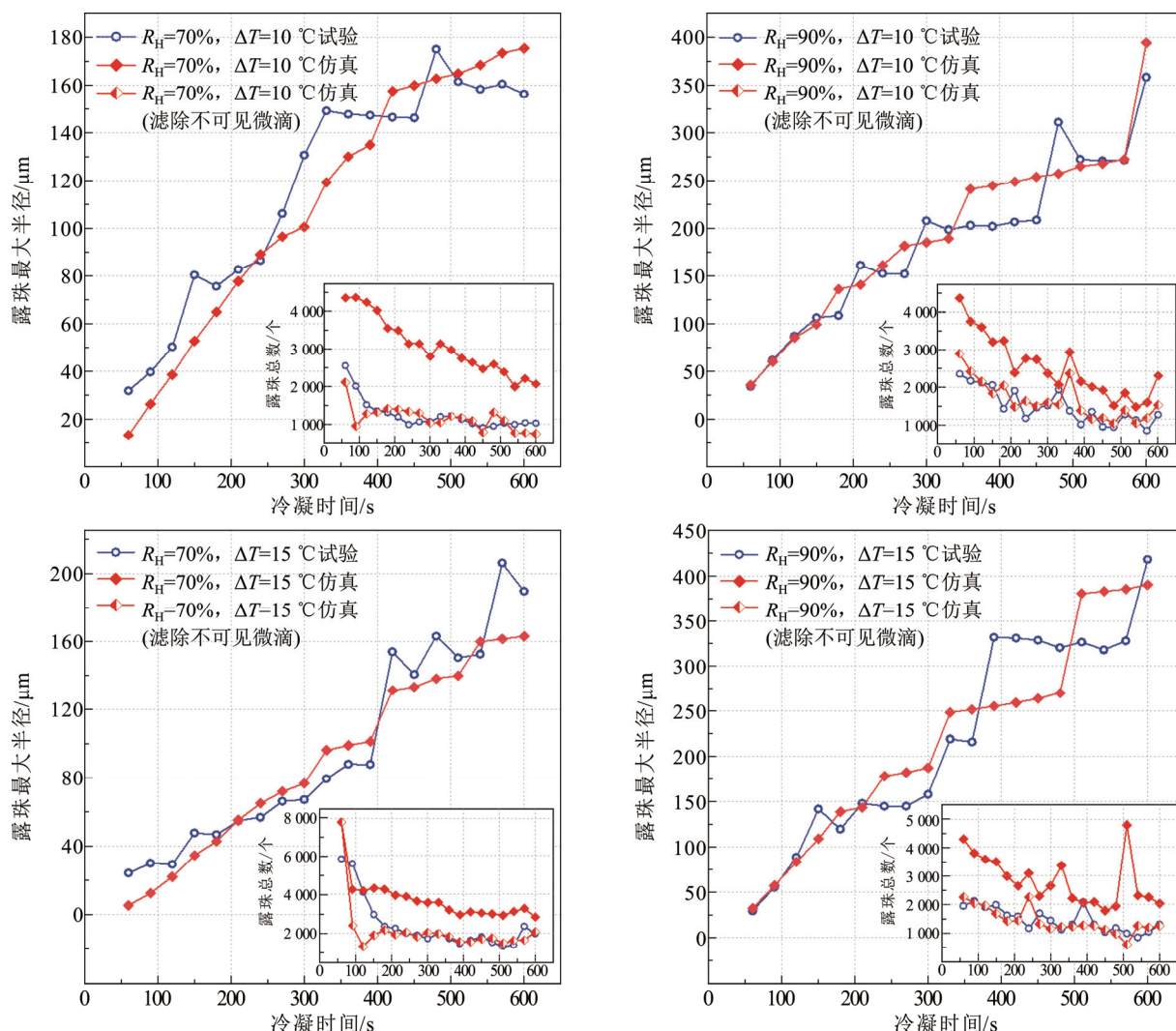


图 11 试验与数值模拟的露珠最大半径、凝露总数对比

Fig.11 Comparison of the maximum radius of dew drop and the total amount of condensation between test and numerical simulation

而数值模拟结果囊括了所有尺寸的液滴。因此,以每组凝露照片中最小凝露尺寸为基准,滤除模拟结果中小于此基准的微滴,以便与试验结果进行对比。

通过对比试验与模拟数据可知,不同冷凝条件下露珠最大半径和凝露总数模拟结果的变化趋势与试验结果一致,最大凝露半径的平均绝对百分比误差仅为 15.41%,凝露总数的平均误差为 19.38%。由于冷凝过程液滴生长行为的随机性,模拟结果很难做到与实验结果完全相符,但整体上模拟结果的变化趋势以及数值范围都能与试验结果保持较好的一致性。由图 11 可知,露珠最大半径的试验与模拟结果均呈现出前期线性增长、后期阶梯性增长的趋势。冷凝初期液滴尺寸较小,主要以冷凝生长方式为主,因此前期最大露珠半径大致呈现线性增长的趋势;后期凝露尺寸较大,聚结行为对于凝露半径

增长的贡献远远大于冷凝生长,因此最大凝露半径呈现阶梯增长的趋势。其中,最大凝露半径的试验结果出现局部降低是由于聚结发生后液滴的液滴形态不稳定,会在表面张力作用下收缩至稳定状态。凝露总数的试验与模拟结果则是均呈现出随时间先减少、后动态维持在某一数值的趋势。因此,不论从定量对比或是物理过程描述角度分析,都能较好地验证该数值模型的有效性与可靠性。

3 湿空气滴状冷凝演化与生长方式多因分析

3.1 湿空气滴状冷凝生长与演化行为分析

在湿空气滴状冷凝相变演化过程中,凝露液滴主要通过冷凝与聚结两种方式生长。其中,冷凝生长持续作用于表面所有尺度液滴并且同步进行,而聚结生长仅发生于表面相互接触的液滴间,使得液

滴的生长不仅取决于热流传递,而且还取决于表面液滴的尺寸分布。因此,在这两种生长方式的共同作用下,凝露的生长具有连续性和离散性的特点。

3.1.1 单液滴冷凝生长速率

液滴冷凝生长速率可以通过 1.1.3 节中提到的单液滴半径增长率计算式进行计算。图 12(a)和图 12(b)分别为不同温差与相对湿度下液滴冷凝生长速率随液滴尺寸的变化曲线。液滴尺寸小于成核半径 $r_{\min}$ 时,蒸发速率大于冷凝速率,此时半径增长率为负值;液滴达到成核半径时,由于此时气-液界面处于亚稳态,半径增长率为 0;当液滴尺寸超过成核半径,冷凝速率远大于蒸发速率而使得液滴半径增长率迅速增加,液滴尺寸连续增长。液滴尺寸从纳米级至毫米级的大跨度生长进程中,半径增长率会经历先急剧增加,达到最大值后在很大液滴尺寸范围内保持恒定,最后因液滴内部导热热阻随尺寸的增加而逐渐减小至 0 的变化过程。

液滴冷凝生长速率增加的驱动力实际上是露点温度 T_d 与冷凝表面温度 T_b 的差值,冷凝生长速率会随着此差值的增大而增大。相对湿度与湿空气温度固定时,露点温度恒定不变,冷凝表面温度越低, T_d 与 T_b 差值越大,故冷凝生长速率越大,如图 12(a)所示。当相对湿度与温差固定时,相对湿度越大露点温度越高, T_d 与 T_b 差值越大,因此液滴冷凝生长速率也会随相对湿度的增加而增加,如图 12(b)所示。

3.1.2 冷凝生长与聚结生长行为

通过分析冷凝与聚结两种生长方式在不同冷凝阶段对最大凝露尺寸的贡献占比,可以更好地理解不同生长行为对滴状冷凝演化进程的影响规律。图 13 为不同相对湿度和温差下两种生长方式对最大凝露半径贡献占比的时间变化序列图。从图中可以看出,相对湿度为 70%、温差为 10 °C 条件下冷凝时间 60 s 时,最大尺寸液滴以冷凝生长为主,随着冷凝演化进程继续推进,聚结生长对最大凝露尺寸的贡献不断增加,逐渐超过冷凝生长而成为主导,最终在最大值附近动态变化。而在相对湿度 70%、温差 15 °C 以及相对湿度为 90% 时,大温差和高湿度条件下的冷凝演化进程加快,冷凝时长 60s 时的聚结生长方式占比已经远远超过冷凝生长,并动态维持在最大值附近。这表明在整个滴状冷凝生长过程中,较大温差和较高湿度都会加快冷凝进程,聚结生长方式对冷凝演化进程的推进作用因此也更加

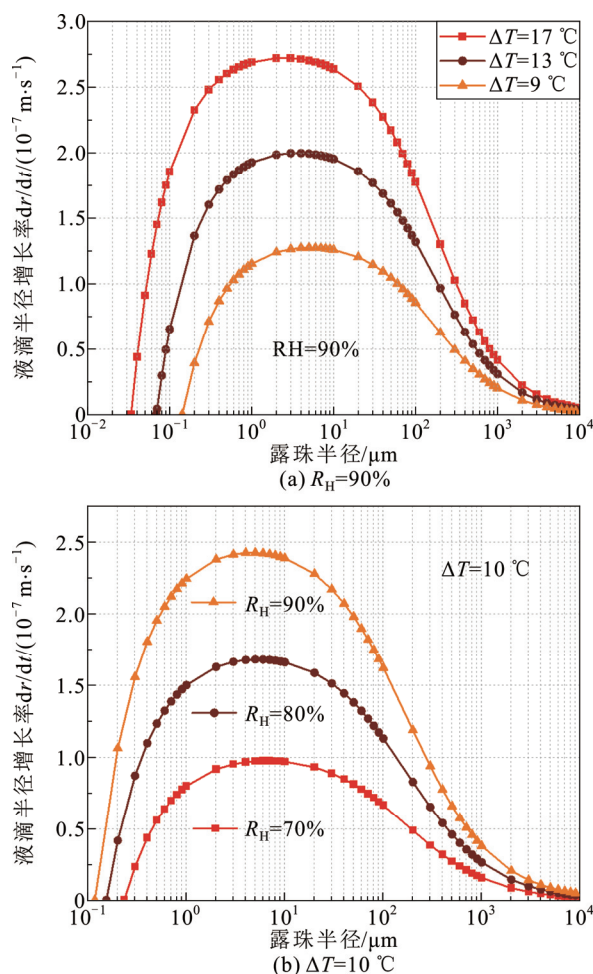


图 12 单液滴冷凝速率随液滴半径变化图

Fig.12 The condensation rate of a single drop varies with the drop radius

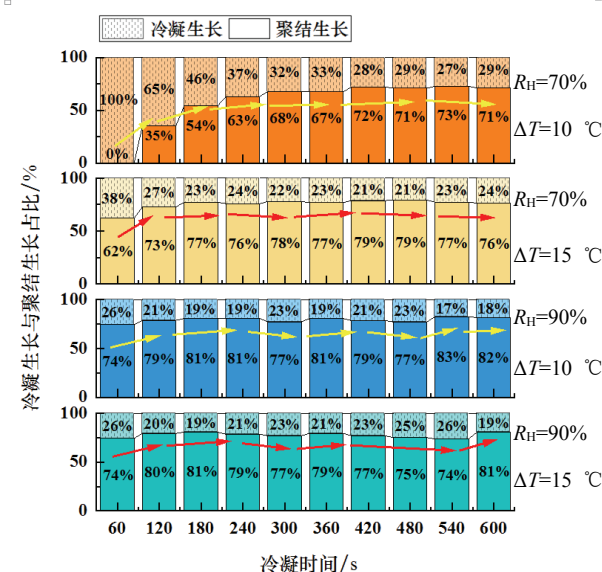


图 13 冷凝生长与聚结生长贡献占比

Fig.13 Contribution ratio of condensation growth and coalescence growth

凸显, 液滴尺寸变化前期源于冷凝生长, 但最大尺寸液滴主要通过液滴间的聚并形成, 冷凝生长在后期影响较小。

凝露最大半径增长速率如图 14 所示, 从图中可以更加直观地区分出冷凝与聚结行为的发生。冷凝开始后的前 50 s, 4 组模拟数据中的凝露最大半径增长速率都小于 $2\text{ }\mu\text{m/s}$, 此时液滴胚核主要在冷凝和聚结的共同作用下不断生长; 冷凝时长 100 s 之后, 聚结生长对最大凝露尺寸的影响愈发凸显, 较大液滴的生长也开始依赖于液滴间的聚结; 随着冷凝进程发展, 大尺寸液滴数量增多, 较大尺寸液滴间的合并使得最大半径增长速率出现离散性大幅增加; 冷凝时长 500 s 后, 最大尺寸液滴与其他较大尺寸液滴间的聚结频率逐渐降低, 并且因其内部导热热阻限制了传热而导致冷凝生长速率对于液滴生长的影响变得微乎其微。此外, 对比图 14 中 4 组模拟数据可知, 较高相对湿度和较大温差条件下的最大尺寸液滴半径增长速率都普遍高于低湿度与小温差条件。因此, 最大液滴尺寸变化不仅能体现湿空气滴状冷凝发展的物理规律, 也能直观地描述出滴状冷凝演化进程的快慢。

3.2 多因素对湿空气滴状冷凝演化过程的影响

湿空气滴状冷凝过程中伴随着复杂的热质传递, 冷凝过程的发展与许多因素有关。湿空气热物理性质、材料表面润湿特性、材料厚度等因素对冷凝过程都有重要影响。本文通过控制单一变量法对不同相对湿度、温差、材料厚度下的湿空气滴状冷凝进行了模拟, 并对环氧树脂、硅橡胶与超疏水纳米绝缘涂料 HCS-1B 3 种不同润湿性材料表面湿空气滴状冷凝演化规律进行了模拟分析, 不同影响因素对应组别的模拟参数设置如表 3 所示。

3.2.1 最大凝露半径

不同影响因素作用下, 冷凝时长 600 s 对应的凝露最大半径如图 15 所示。相对湿度与温差对冷凝演化进程快慢的影响在上文中已阐明, 主要取决于露点温度 T_d 与冷凝表面温度 T_b 的差值, 因此在高湿或温差较大的情况下冷凝进程会加快, 凝露最大尺寸也更大。当材料厚度改变时, 则是会影响液滴与冷凝基底之间的换热过程。从冷凝速率角度分析, 材料厚度增加会导致冷凝基底热阻 R_p 增加, 限制了热流传导, 液滴冷凝生长速率因此降低, 所以材料厚度越大最大凝露半径越小。液滴静态接触角则是与材料润湿特性有关, 本文选取了环氧树脂(亲水材

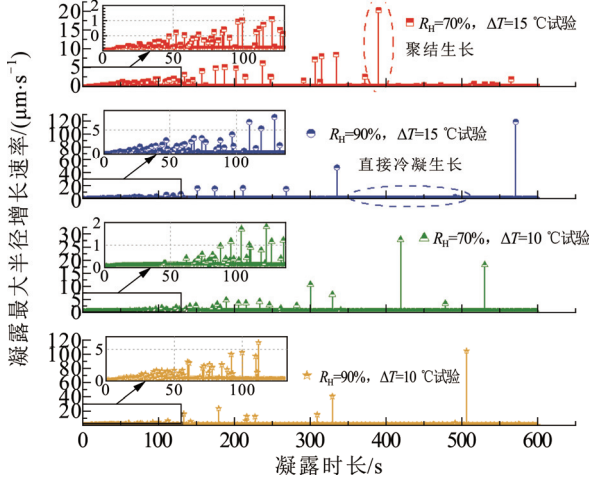


图 14 凝露最大半径增长速率

Fig.14 Maximum radius growth rate of condensation

表 3 不同影响因素对应组别的模拟参数设置

Table 3 Simulation parameter Settings corresponding to different factors

组别	环境温 度/℃	箱内温 度/℃	相对湿 度/%	温差 ΔT /℃	接触角 θ (°)	材料厚度 δ /mm	
1	25	25	70	15	91	2	
			80				
			90				
2			90	10	15	91	2
				20			
3			90	15	74	91	2
					160		
4	90	15		91	2		
					4		
					6		

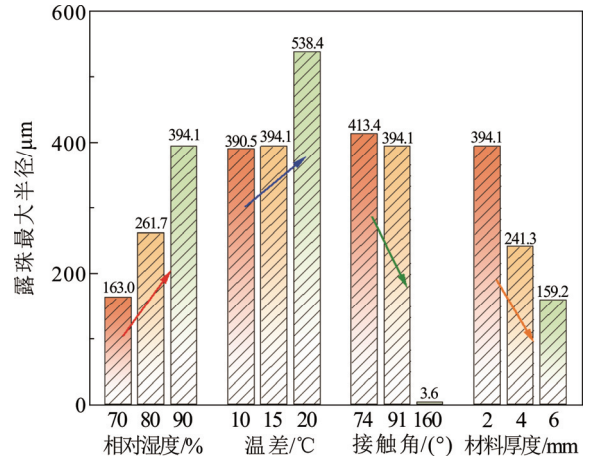


图 15 不同因素影响下的最大凝露半径

Fig.15 Maximum condensation radius under different factors

料, 接触角 71°)、硅橡胶(疏水材料, 接触角 91°)以及超疏水纳米绝缘涂料 HCS-1B(接触角 160°)3 种润湿性能不同的材料进行模拟, 可以得出表面静态

接触角越小凝露尺寸变化越快的结论。其中,超疏水材料因其表面的微结构而使得固液接触面呈现 Cassie-Baxter 状态,超疏水材料表面液滴的生长速率与聚结频率相较于其他材料更小,所以当冷凝时长为 600 s 时超疏水材料表面最大液滴半径仅为 $3.6\ \mu\text{m}$ 。

3.2.2 冷凝与聚结生长方式贡献比例

本文统计了不同影响因素条件下冷凝时长为 600 s 时液滴冷凝生长与聚结生长对最大凝露尺寸的贡献比例,如图 16 所示。从图 16 中可以看出,由于湿度与温差的增加都会驱动冷凝速率增长,推动冷凝演化进程,因此随着冷凝进程发展聚结生长的主导作用会不断增强。对于不同材料厚度,也可以从传热的角度解释,材料厚度增加使得冷凝进程变慢,所以聚结生长对最大液滴半径的贡献比例会随之降低。对比 3 种不同润湿性材料,环氧树脂与硅橡胶两者差别不大,但超疏水材料的聚结生长贡献占比高达 99%。这是因为聚结行为对于液滴尺寸生长的作用与液滴尺寸有关,超疏水材料表面液滴冷凝生长与聚结频率较慢,表面以小尺寸液滴为主,因此最大尺寸液滴只能通过液滴间的合并形成。

3.2.3 冷凝面积覆盖率与凝露总数

图 17 与图 18 分别展示了不同影响因素作用下冷凝面积覆盖率(表面固液接触面积与冷凝基底面积之比)与凝露总数随冷凝时长的变化规律。可以发现,随着冷凝时长增加,冷凝面积覆盖率不断增长而凝露总数不断减少,二者的变化呈现相反趋势。在滴状冷凝开始时,液滴主要通过直接冷凝的方式生长,冷凝面积覆盖率呈线性增加,凝露总数也大致呈线性下降。当较大尺寸液滴的出现使得聚结生长开始占据主导地位时,冷凝面积覆盖率和凝露总数出现周期性波动,但整体变化趋势没有改变。对比图 17 与图 18 不难发现,冷凝面积覆盖率与凝露总数变化曲线的波峰、波谷相互对应,冷凝面积覆盖率曲线的波峰代表大规模聚结事件的发生,表面被大尺寸液滴覆盖,凝露数量减少,因此凝露总数曲线下降至波谷。而冷凝面积覆盖率曲线的波谷则表示大规模聚结事件发生后液滴在表面张力作用下逐渐恢复至稳定,在此过程中会有冷凝表面重新裸露,成核位点被再次激活,因此凝露总数曲线上升至波峰。

从上文对传热过程影响滴状冷凝演化进程缓慢的分析,可以很好地理解冷凝生长速率与相对湿度、温差呈现正相关关系,而与材料厚度呈现负相

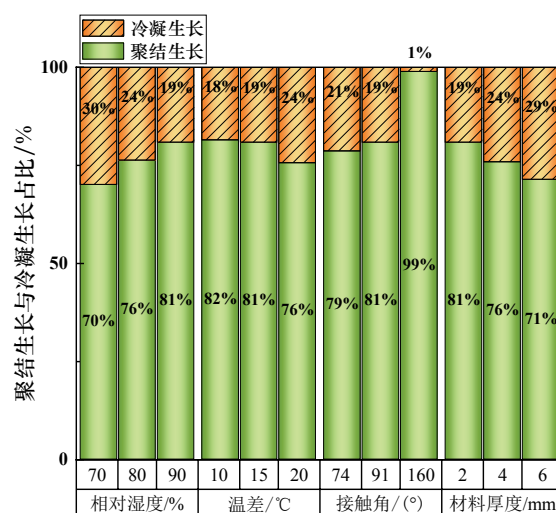


图 16 不同因素影响下冷凝与聚结生长贡献占比

Fig.16 Contribution proportion of condensation and coalescence growth under different factors

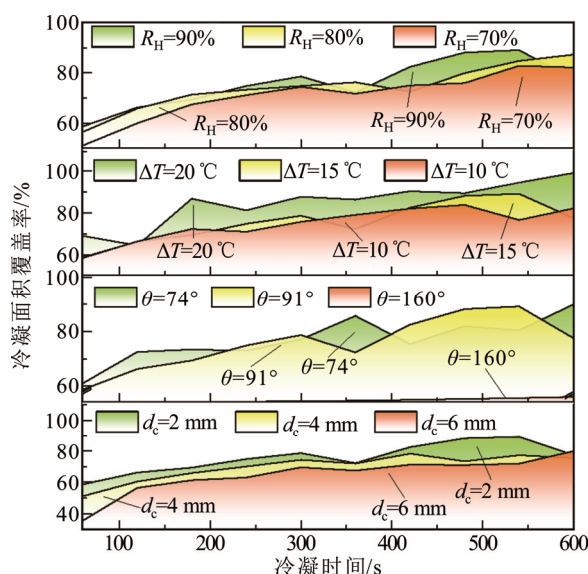


图 17 不同因素影响下的冷凝面积覆盖率

Fig.17 Coverage of condensation area under different factors

关关系的变化规律,也能够相应解释冷凝面积覆盖率和凝露总数的变化规律。对比 3 种不同润湿性材料可以发现,环氧树脂材料因其具有较小的接触角,冷凝面积覆盖率较硅橡胶材料稍大一些,凝露总数变化则与硅橡胶材料近似。然而,超疏水涂料的冷凝面积覆盖率在整个冷凝过程中始终保持在 60% 以下,并且凝露总数维持在成核数量上下,说明超疏水材料能够很好地抑制凝露的生长。从以上分析可知,静态接触角越大,材料疏水性能越好,抗凝露性能也更加显著。

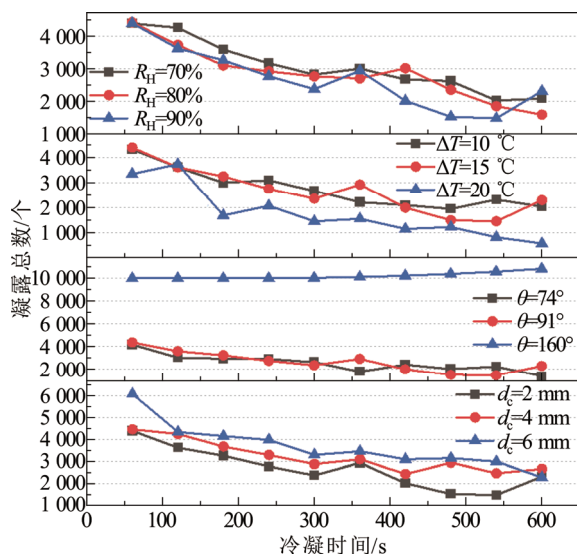


图 18 不同因素影响下的凝露总数

Fig.18 Total condensation under the influence of different factors

4 结论

1) 不同冷凝条件下露珠最大半径和凝露总数模拟结果的变化趋势与试验结果较相符, 最大凝露半径的平均绝对百分比误差仅为 15.41%。

2) 冷凝进程中, 单液滴半径增长率会经历先急剧增加, 达到最大值($10^{-8} \sim 10^{-6}$ m/s)后在很大液滴尺寸范围内保持恒定, 最后逐渐减小至 0 的变化过程。最大凝露半径在冷凝发展过程中则是呈现出前期线性增长、后期阶梯性增长的趋势。

3) 冷凝前期, 液滴尺寸增加源于直接冷凝生长, 随着冷凝过程不断发展, 聚结生长方式对于推进冷凝演化进程的主导作用逐渐增强, 冷凝后期聚结生长对最大液滴半径的贡献占比已超过 70%。

4) 液滴冷凝生长速率增加的驱动力是露点温度 T_d 与冷凝表面温度 T_b 的差值, 冷凝生长速率与相对湿度与温差呈正相关关系; 材料厚度的增加会限制热流传导, 冷凝生长速率与材料厚度呈负相关关系; 相较于环氧树脂与硅橡胶, 超疏水材料表面冷凝过程发展更加缓慢, 抗凝露性能更加优越。

参考文献 References

- [1] 赵浩然, 孟铃涵, 江艺宝, 等. 面向新型电力系统的实时仿真平台综述与展望[J]. 高电压技术, 2024, 50(10): 4611-4626.
ZHAO Haoran, MENG Linghan, JIANG Yibao, et al. Overview and prospect of real time simulation platforms for new-type power system[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(10): 4611-4626.
- [2] 周远翔, 陈健宁, 张 灵, 等. “双碳”与“新基建”背景下特高压输电技术的发展机遇[J]. 高电压技术, 2021, 47(7): 2396-2408.

- ZHOU Yuanxiang, CHEN Jianning, ZHANG Ling, et al. Opportunity for developing ultra high voltage transmission technology under the emission peak, carbon neutrality and new infrastructure[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(7): 2396-2408.
- [3] 李 晖, 刘 栋, 姚丹阳. 面向碳达峰碳中和目标的我国电力系统发展研判[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(18): 6245-6258.
LI Hui, LIU Dong, YAO Danyang. Analysis and reflection on the development of power system towards the goal of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(18): 6245-6258.
- [4] 刘轩东, 胡钰骁, 李亚伟, 等. 凝露状态对硅橡胶绝缘表面闪络特性影响的实验研究[J]. 电网技术, 2019, 43(8): 3047-3054.
LIU Xuandong, HU Yuxiao, LI Yawei, et al. Experimental research of influence of condensation on flashover characteristics of silicone rubber surface[J]. Power System Technology, 2019, 43(8): 3047-3054.
- [5] 夏云峰, 宋新明, 何建宗, 等. 复合绝缘子用硅橡胶老化状态评估方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(增刊 1): 440-448.
XIA Yunfeng, SONG Xinming, HE Jianzong, et al. Evaluation method of aging for silicone rubber of composite insulator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(Supplement 1): 440-448.
- [6] 梁曦东, 高岩峰, 王家福, 等. 中国硅橡胶复合绝缘子快速发展历程[J]. 高电压技术, 2016, 42(9): 2888-2896.
LIANG Xidong, GAO Yanfeng, WANG Jiafu, et al. Rapid development of silicone rubber composite insulator in China[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(9): 2888-2896.
- [7] BAGHEL V, SIKARWAR B S, MURALIDHAR K. Dropwise condensation from moist air over a hydrophobic metallic substrate[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 181: 115733.
- [8] ZHENG S F, WU Z Y, GAO Y Y, et al. Transient multiphysics coupled model for multiscale droplet condensation out of moist air[J]. Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 2023, 84(1): 16-34.
- [9] 舒胜文, 占兆璇, 许俊伟, 等. 湿污绝缘材料表面冷凝相变与局部电弧耦合机理和放电模型研究综述及展望[J]. 高电压技术, 2023, 49(7): 2875-2890.
SHU Shengwen, ZHAN Zhaoxuan, XU Junwei, et al. Review and prospect of research on coupling mechanism between condensation phase transition and local arc and discharge model on the surface of wet-polluted insulation materials[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 2875-2890.
- [10] 舒胜文, 许俊伟, 占兆璇, 等. 高湿环境下 40.5 kV 开关柜凝露发展特性与加热器布置方法[J]. 高电压技术, 2023, 49(2): 493-504.
SHU Shengwen, XU Junwei, ZHAN Zhaoxuan, et al. Condensation development characteristics and heater arrangement method of 40.5 kV switchgear under high-humidity environment[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(2): 493-504.
- [11] 司马文霞, 刘贞瑶, 蒋兴良, 等. 硅橡胶表面分离水珠的局部放电对表面特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(6): 113-118.
SIMA Wenxia, LIU Zhenyao, JIANG Xingliang, et al. Effects on surface performance of partial discharges due to discrete water droplets on the silicone rubber[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(6): 113-118.
- [12] ROSE J W. Dropwise condensation theory and experiment: a review[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2002, 216(2): 115-128.
- [13] ROSE J W. Further aspects of dropwise condensation theory[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1976, 19(12): 1363-1370.
- [14] KIM S, KIM K J. Dropwise condensation modeling suitable for superhydrophobic surfaces[J]. Journal of Heat Transfer, 2011, 133(8): 081502.

- [15] LIU X L, CHENG P. Dropwise condensation theory revisited: part I. Droplet nucleation radius[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 83: 833-841.
- [16] LIU X L, CHENG P. Dropwise condensation theory revisited Part II. Droplet nucleation density and condensation heat flux[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 83: 842-849.
- [17] ZHENG S F, EIMANN F, PHILIPP C, et al. Modeling of heat and mass transfer for dropwise condensation of moist air and the experimental validation[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 120: 879-894.
- [18] 李立涅, 饶 宏, 董旭柱, 等. 计算高电压工程学的思考与展望[J]. 高电压技术, 2018, 44(11): 3441-3453.
LI Licheng, RAO Hong, DONG Xuzhu, et al. Prospect of computational high voltage engineering[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(11): 3441-3453.
- [19] XU W, LAN Z, LIU Q C, et al. Droplet size distributions in dropwise condensation heat transfer: consideration of droplet overlapping and multiple re-nucleation[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 127: 44-54.
- [20] CASTILLO J E, WEIBEL J A. A point sink superposition method for predicting droplet interaction effects during vapor-diffusion-driven dropwise condensation in humid air[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 118: 708-719.
- [21] 赵崇岩, 颜 笑, 黄志勇, 等. 滴状凝结全过程液滴尺寸分布数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2020, 41(6): 1485-1490.
ZHAO Chongyan, YAN Xiao, HUANG Zhiyong, et al. Numerical simulation of droplet size distribution in the whole process of dropwise condensation[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2020, 41(6): 1485-1490.
- [22] 张志富, 希 爽. 关于露点温度计算的探讨[J]. 干旱区研究, 2011, 28(2): 275-281.
ZHANG Zhifu, XI Shuang. Study on calculation of dew-point temperature[J]. Arid Zone Research, 2011, 28(2): 275-281.
- [23] BOLTON D. The computation of equivalent potential temperature[J]. Monthly Weather Review, 1980, 108(7): 1046-1053.
- [24] TAMMANN G, BOEHME W. Die zahl der wassertröpfchen bei der kondensation auf verschiedenen festen stoffen[J]. Annalen der Physik, 1935, 414(1): 77-80.
- [25] MILJKOVIC N, ENRIGHT R, WANG E N. Modeling and optimization of superhydrophobic condensation[J]. Journal of Heat Transfer, 2013, 135(11): 111004.
- [26] SIKARWAR B S, KHANDEKAR S, MURALIDHAR K. Mathematical modelling of dropwise condensation on textured surfaces[J]. Sadhana, 2013, 38(6): 1135-1171.



SHU Shengwen

Post-doctorate

Professor

Corresponding author

舒胜文(通信作者)

1987—, 男, 博士(后), 教授(校聘)

主要从事恶劣环境绝缘失效机理与故障诊断、智能传感与检测、防灾减灾方面的研究工作

E-mail: shushengwen@fzu.edu.cn



ZHAN Zhaoxuan

占兆璇

2000—, 女, 硕士生

主要从事高压设备绝缘老化机理方面的研究工作

E-mail: 1186893062@qq.com



HUANG Wenhua

黄雯桦

2001—, 女, 硕士生

主要从事高电压与绝缘技术方面的研究工作

E-mail: 562816109@qq.com

收稿日期 2024-06-04 修回日期 2024-10-09 编辑 曹昭君