

考虑水盐含量的土体雷电冲击响应多场耦合数值模拟研究

李 威

上海理工大学环境与建筑学院, 上海

收稿日期: 2025年4月16日; 录用日期: 2025年5月9日; 发布日期: 2025年5月16日

摘 要

雷击产生的强大电流会使土体击穿, 在含水量和含盐量较高的土体中, 这种效应尤为显著。文章针对土体在不同含水量和含盐量下的雷电冲击响应特性开展研究。结合COMSOL Multiphysics软件建立土体雷电冲击数值模型, 并开展室内试验对数值模型的有效性进行验证, 在此基础上对不同含水量和含盐量的土体雷电冲击规律进行分析。结果表明, 土体冲击电压峰值会随着含水量与含盐量的增加而增大, 在相同含水量条件下, 含盐量的增加进一步提高了冲击电压峰值。然而, 当含水量或含盐量达到一定饱和状态后, 冲击电压的变化趋于平缓。此外, 含水量和含盐量对电场强度也具有直接影响, 较高的含水量和含盐量不仅增加了土体的电场强度, 还扩大了其影响范围。热效应分析表明, 在本研究的参数条件下, 较高含水量(20%)土体温度传导影响范围达0.12 m, 而低含水量(5%)时热效应范围缩小至0.09 m, 含盐量的变化对热效应影响较弱。含水量和含盐量的变化对土体响应特性有显著影响, 本研究为雷电防护工程的设计提供了重要的理论支持, 具有显著的工程应用价值。

关键词

雷电流, 冲击特性, 土体, 含水量与含盐量, 多场耦合

Multi-Field Coupled Numerical Simulation of Lightning Impact Response of Soil Considering Water and Salt Content

Wei Li

School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Apr. 16th, 2025; accepted: May 9th, 2025; published: May 16th, 2025

文章引用: 李威. 考虑水盐含量的土体雷电冲击响应多场耦合数值模拟研究[J]. 建模与仿真, 2025, 14(5): 431-447.
DOI: 10.12677/mos.2025.145405

Abstract

Soil breakdown can be induced by the intense current generated during lightning strikes, with this effect being particularly significant in soils with high water and salt content. This study examines the response characteristics of soil to lightning impulse under varying water and salt content conditions. A numerical model of soil lightning impulse was established using COMSOL Multiphysics software, and the model's validity was verified through laboratory experiments. Based on the validated model, systematic analyses were performed on the patterns of lightning impulse in soils with different water and salt content. The results demonstrate that the peak impulse voltage in the soil is elevated by increased water and salt content. Under constant water content conditions, the peak impulse voltage was found to be further enhanced by increased salt content. However, the impulse voltage variation is observed to stabilize when certain saturation levels of water content or salt content are reached. Additionally, the electric field intensity is directly influenced by water and salt content, whereby the soil's electric field intensity is not only enhanced, but its area of influence is also expanded by higher levels of these parameters. The analysis of thermal effect shows that the range of influence of temperature conduction of soil body reaches 0.12 m under the parameter conditions of this paper for higher water content (20%), while the range of thermal effect narrows to 0.09 m for low water content (5%), and the change of salt content has a weaker influence on the thermal effect. Soil response characteristics are significantly influenced by variations in water and salt content. This research provides essential theoretical support for lightning protection engineering design, and significant practical engineering value is demonstrated.

Keywords

Lightning Current, Impulse Characteristic, Soil, Water and Salt Content, Multi-Field Coupling

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

雷电是一种自然的静电放电现象,是由云(或空气团)和地球表面(或另一个遥远的空气团)之间的差异电荷积累引起的[1]。雷电产生的电流非常大,范围为 10 至 300 kA [2],并伴随着剧烈的电、热和机械效应[3],对土体产生严重的损伤,并造成建筑物上部结构或地下结构破坏。部分学者针对接地装置的雷电冲击特性进行了研究[4]-[6]。雷击效应与土体电性参数存在显著关联,现有的防雷工程设计亟需土体雷电冲击特性的数据支撑。然而,岩土与电气工程的交叉研究仍显不足,尤其缺乏以土体自身为对象的雷电响应多场耦合机制研究。探究雷电冲击作用下土体的响应特性,可为建筑工程,尤其是地下建筑结构的防雷减灾提供参考,具有较大的研究价值。

多年来,发生在两相介质(气-液或气-固)中的雷电放电现象一直是人们不断研究的主题。国内外学者针对雷电冲击土体造成的直接影响研究较少,20 世纪 80 年代,Flanagan 等人[7][8]对土体的雷电冲击特性展开了探索,揭示了击穿起始过程的电学机制:当土体颗粒间气隙的电场强度超过空气击穿场强时,便会触发火花放电过程。Mousa [9]分析了土体在冲击电流作用下的电离现象,并提出土体的临界击穿场强为 300 kV/m。在土体电学特性研究方面,Fuller 和 Ward [10]探究了不同含水量条件下土体电学参数(电容率和电导率)的变化规律。Scott [11]和 Longmire [12]深入研究了大地电导率和相对电容率的频率响应特

性,并分析了土体湿度对这些特性的影响。He 等人[13]则重点研究了冲击击穿作用下土体的时延特性。国内研究方面,清华大学高延庆[14]以沙土和一般粘土为研究对象,利用 X 射线胶片拍摄得到较清晰的土体击穿放电图像,进一步揭示其放电特性及击穿机理。明确提出了土体起始放电场强和临界击穿场强的概念、区别及联系。司马文霞等人[15]将离散土体单元的电阻率设置为对应时刻该单元电场强度的函数,由时变的电场控制土体电阻率,但未考虑土体在不同水盐含量下电阻率与击穿场强不同。Chen [16]通过数值模拟和野外观测,对雷电流在岩石表面激励的热效应和冲击波效应进行研究,但其所给出的计算公式较为粗略,并未深入考虑岩土体的电性参数和雷电冲击特性。此外,张军辉[17]通过透水纤维膜测量建立了土水特征曲线;许戈韦等人[18]则构建了基质吸力-介电常数关系曲线用于土体含水量预测。

可以看出,国内外学者研究成果主要集中于不同土体的起始击穿场强以及接地装置的雷电冲击特性,而以土体本身为对象,分析不同含水量和含盐量在雷击作用下土体冲击响应特性研究成果鲜见报道。本文通过 COMSOL Multiphysics 软件建立土体雷电冲击数值模型,并开展室内试验进行验证,该模型通过嵌入不同含水量和含盐量的经验方程,实现对不同含水量与含盐量下土体的冲击电压响应结果分析,从而探究土体的雷电响应规律,为揭示土体雷电冲击机理和开展防雷设计提供参考。

2. 雷击土体机理分析

土体的击穿特性与气体相似。当雷电产生的冲击电流进入土体后,会在周围形成瞬态电场。土体的击穿取决于电场强度:当电场强度低于临界击穿值时,土体保持稳定,不会发生击穿现象;而当周围电场强度超过土体的临界击穿强度阈值时,土体便会发生击穿现象。

2.1. 电场数学模型

雷电流冲击地面时,会在土体周围产生强度极大的时变电磁场,由于雷电流频率高,冲击土体产生的位移电流不可忽略,因此,雷电流流入土体后产生的电流既包括传导电流又包括位移电流。根据电磁场的相关知识,传导电流与位移电流关系为:

$$|J_c|/|J_d|=1/\omega\epsilon\rho$$

式中 ω 为电流的角频率, ϵ 和 ρ 分别为土体的介电常数和电阻率。

利用准静态麦克斯韦微分方程,雷电流流入土体所产生的动态电磁场可表示为:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_c + \mathbf{J}_d$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$$

式中 $\mathbf{H}$ 是磁场强度; $\mathbf{D}$ 为电通量密度; $\mathbf{E}$ 为电场强度; $\mathbf{J}$ 为总电流密度,包括传导电流密度 $\mathbf{J}_c$ 和位移电流密度 $\mathbf{J}_d = \partial \mathbf{D} / \partial t$ 。

由 $\mathbf{E} = -\nabla \varphi$, $\mathbf{J}_c = \mathbf{E} / \rho$, $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$, 总电流密度 $\mathbf{J}$ 也可表示为:

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_c + \mathbf{J}_d = (1/\rho + \epsilon \partial / \partial t)(-\nabla \varphi)$$

代入方程式可以得到标量势表示的电场控制方程:

$$\mathbf{D} = \epsilon \frac{\partial}{\partial t} (\nabla^2 \varphi) + \nabla \cdot \left(\frac{\nabla \varphi}{\rho} \right) = 0$$

在雷击的整个过程中,无穷远处的电位为 0,即满足第一类边界条件;上表面法向电流密度为 0,即满足第二类边界条件:

$$\begin{cases} \varphi = 0, r \rightarrow \infty \\ \left(\frac{1}{\rho} + \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} \right) [\mathbf{n} \cdot (\nabla \varphi)] = 0 \end{cases}$$

式中， r 为距雷电流击中点的距离； $\mathbf{n}$ 表示单元表面的单位法向量。

此外，电流注入点满足边界条件：

$$I = \int_s J ds = \int_s \left(\frac{1}{\rho} + \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} \right) \nabla \varphi \cdot \mathbf{n} ds$$

式中， I 表示冲击电流瞬时值。

2.2. 电阻率等效

含水量是影响电阻率变化的重要因素，电阻率随含水量增加而变化的规律符合幂函数衰减。根据试验得出电阻率变化曲线，对土体电阻率随含水量的变化进行了曲线拟合[19]，得出拟合公式为：

$$\rho = 6.2235w^{-0.966}$$

式中： w 为含水量， ρ 为电阻率。

土体电阻率与含水量的关系如图 1 所示。

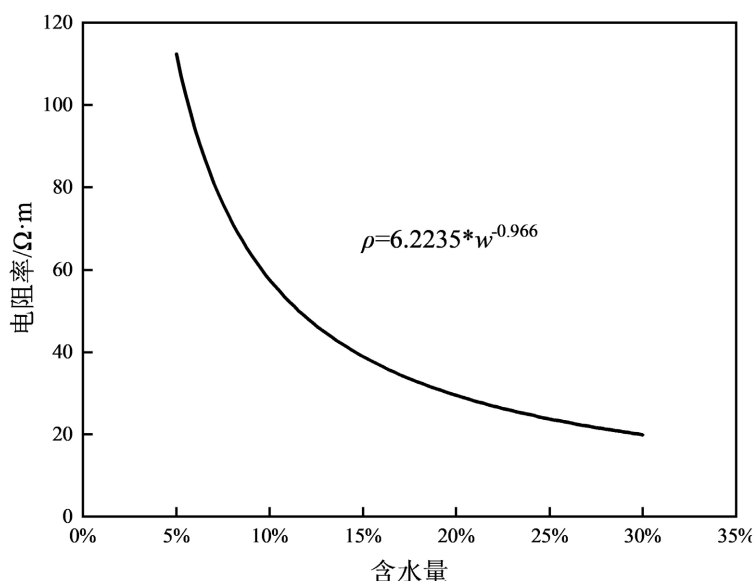


Figure 1. Resistivity versus water content curve

图 1. 电阻率随含水量变化曲线

土体导电性主要由孔隙水中的自由离子迁移主导。含水量增加时，孔隙水形成连续相，促进 Na^+ 、 Cl^- 等离子的水合与迁移，降低土体电阻率。当含水量接近饱和(>15%)，孔隙水连通性达到阈值，离子迁移路径趋于稳定，电阻率变化趋缓，符合幂函数拟合规律，如图 1 所示。

为了研究土体电阻率特性，应用电阻率反算土体含盐量[20]，得出拟合公式为：

$$\rho = 0.18697 + 2.84714e^{-\eta}$$

式中： η 为含盐量。

含盐量增加直接提升了溶液中的离子浓度，根据 Nernst-Einstein 方程，电导率与离子浓度及迁移率

成正比。低盐阶段(<2%), 盐分电离产生大量自由离子, 电导率显著上升; 高盐阶段(>2%), 离子间屏蔽效应增强, 活度系数降低, 且部分离子可能形成离子对, 导致电导率增幅减缓。

2.3. 温度场数学模型

雷电流经土体时由于其电阻率较高, 将产生大量焦耳热, 从而使其温度迅速升高。根据电磁学与传热学知识, 位移电流密度 J_d 仅表示电场的变化率, 不产生热效应, 因此雷电产生的热源为:

$$Q = J_c \cdot E = \rho J_c^2$$

式中: Q 为热源密度, 单位为 W/m^3 。

考虑到电流场和温度场的动态耦合过程, 雷电是瞬态变化的, 因此热传递也必须是瞬态变化过程。根据传热原理, 基于笛卡尔坐标系的瞬态热传导方程可表示为:

$$\rho C_v \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q$$

式中: ρ 、 C_v 和 k 分别为土体的密度、比热容和热导率; 另外, 还应满足一定的初始条件和边界条件。在雷击前, 假设土体中初始温度等于环境温度, 即

$$T(x, y, z) = T_0, \quad t = 0$$

式中: T_0 为环境温度。

土体表面与周围环境之间传热形式主要分为两种形式: 热传导与热辐射。在土体表面, 温度升高使得与周围环境温度相差较大, 由于雷电流持续时间很短, 忽略表面与空气间的对流换热, 主要以热辐射的方式与环境进行热传递, 采用热传递第三类边界条件, 即热辐射边界条件:

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = \sigma_{SB} \varepsilon' \cdot (T_0^4 - T^4)$$

式中: $\sigma_{SB} = 5.6697 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$, 是斯特藩-波耳兹曼常数; ε' 为表面发射率, 本文取 $\varepsilon' = 0.9$ 。

3. 数值模型

本文运用 COMSOL 软件进行仿真模拟, 同时开展模型试验对数值模型进行验证。

3.1. 冲击电压设置

雷电冲击波形采用双指数波形, 其公式为:

$$U(t) = U_m (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) k$$

根据参数 α 、 β 的值确定 U_m 、 T_1 、 T_2 , 其中 U_m 为电压峰值, T_1 为电压从开始到峰值的时间, T_2 为电压随时间衰减到峰值 50% 的时间。1.2/50 μs 对应的雷电冲击波形表达式为:

$$U(t) = 1.03725 U_m (e^{-0.014658t} - e^{-2.4687t})$$

3.2. 网格和容差设置

在 COMSOL 数值模拟中, 网格划分的精细程度决定计算精度、收敛性能及计算效率。为获得理想的网格划分效果, 需要对电极和土体区域进行差异化处理。土体网格划分采用由内向外逐渐减小密度的策略, 由于靠近电极的区域计算量较大, 该部分的网格较为密集, 而远离电极的区域则采用较为稀疏的网格划分, 如图 2 所示。这样的处理方式可以有效提高计算效率, 同时保证结果的准确性。

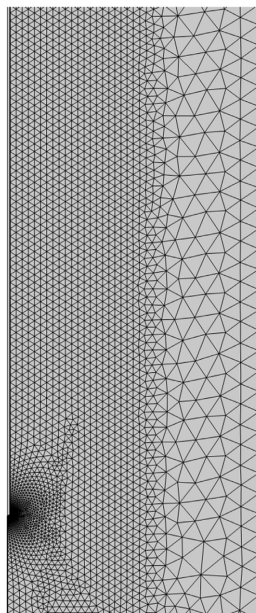


Figure 2. Meshing of numerical simulation

图 2. 数值模拟的网络划分

本研究使用的求解器类型是隐式求解器。模型预设的初始时间步长为 $0.1 \mu\text{s}$ ，容差为 0.01，保证数值收敛性和稳定性。

根据数学计算模型，数值模型边界应满足如下条件：

- 1) 在长方体外表面满足标量电位为零，即无穷远处标量电位为零的条件：

$$\varphi = 0$$

- 2) 在电极电流注入面处满足悬浮电位的边界条件：

$$\int_{\alpha\Omega} -\mathbf{n} \cdot \mathbf{J} \text{d}s = I_0$$

- 3) 在长方体上表面满足电绝缘边界条件：

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{J} = 0$$

- 4) 在长方体外表面满足法向电流密度为零的边界条件：

$$J_n = 0$$

- 5) 在电极与土体的分界面处满足连续的边界条件：

$$\mathbf{n} \times \mathbf{J}_1 - \mathbf{n} \times \mathbf{J}_2 = 0$$

4. 模型验证

4.1. 模型试验

利用雷电冲击电压电流发生器建立雷电冲击电压试验平台，将冲击电压发生器在短时间内产生的高电压注入到试验配置的土样中，通过改变土样的含水量和含盐量，以及冲击电压的大小，分析土体在不同条件下的雷电响应特性，以此揭示土体电学特性与雷电压之间的响应规律。

图 3 所示为试验所用的冲击电压发生器装置，可实现较高冲击电压输出，本试验采用 $1.2/50 \mu\text{s}$ 标准的冲击电压波形。



Figure 3. Lightning impulse voltage and current generator test device
图 3. 雷电冲击电压电流发生器试验装置



Figure 4. Test soil sample model box
图 4. 试验土样模型盒

试验装置采用一个尺寸为 30 cm × 20 cm × 20 cm (长 × 宽 × 高)的试验箱，如图 4 所示。在试验箱的一侧沿中轴线安装电极作为电压输入端，另一侧安装铜板作为电压输出端。当电压通过土体传输时，电压信号经由电压传感器输入至数字示波器进行记录。数据采集系统采用 HRHG-DIMS 数字冲击试验测量系统，所获取的实验数据使用 Origin 等分析软件进行处理与分析。

4.2. 试验与数值模型对比验证

为了验证本文建立的土体雷电冲击特性数值模型的有效性，对土体雷电冲击特性模拟试验建立了相应的数值模型，基本计算参数见表 1。为了简化计算，根据对称性建立轴对称模型，计算模型如图 5 所示。

Table 1. Model calculation parameters
表 1. 模型计算参数

冲击电压波形	冲击电压峰值 U_m (kV)	含水量(%)	介电常数	电极长度(cm)
1.2/50 μ s	8, 10, 15	10	8	25
密度(kg·m ⁻³)	比热容(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	热导率(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	环境温度(K)	斯特藩 - 波耳兹曼常数(W·m ⁻² ·K ⁻⁴)
2600	790	1.9	293	5.6697×10^{-8}

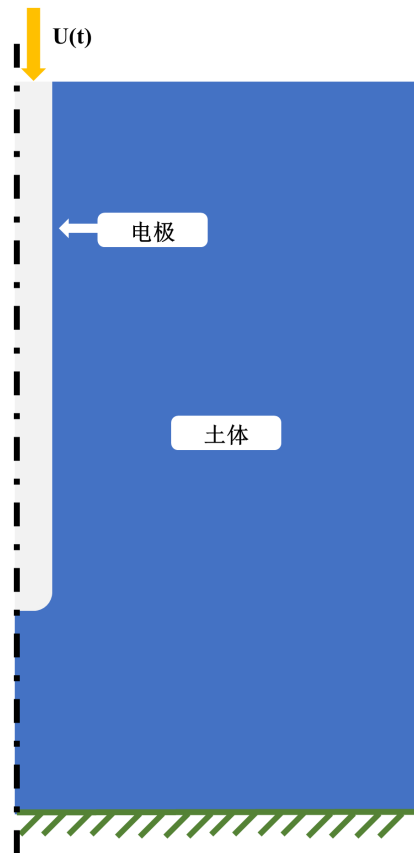


Figure 5. Soil lightning response model
图 5. 土体雷电响应数值模型

本文数值模拟计算结果与试验结果对比如图 6 所示,不同输入电压下试验与模拟的峰值数据见表 2,可以发现土体响应电压的峰值与试验结果吻合,施加电压为 8 kV 时误差最大为 2.8%。在冲击电压消散阶段,数值模拟结果略小于试验实测结果,这主要是因为冲击电压作用于土体时会产生大量电磁热,热量的增加使得土体中的水分蒸发,水分蒸发后留下的空气是一种良好的绝缘体,而本文模型仅考虑电场影响,未包含温度场热效应对电场的影响。

Table 2. Peak curve data
表 2. 峰值曲线数据

输入电压(kV)	试验峰值(kV)	模拟峰值(kV)	绝对误差(kV)	相对误差(%)
8	4.630	4.760	0.13	2.81
10	5.887	5.950	0.063	1.07
15	8.928	8.925	0.003	0.03

如图 7 所示,电场强度在 0.2 μs 时首先在电极端部发生击穿,随着时间的推移,电场强度逐渐向外扩展,直到 1 μs 时土体完全击穿,击穿过程是瞬时完成的,这表明在冲击电压达到峰值的早期阶段,电场起主导作用,也印证了本文模型模拟的电压峰值与试验测得的峰值高度相吻合,数值模型可用于雷电冲击土体特性的分析。

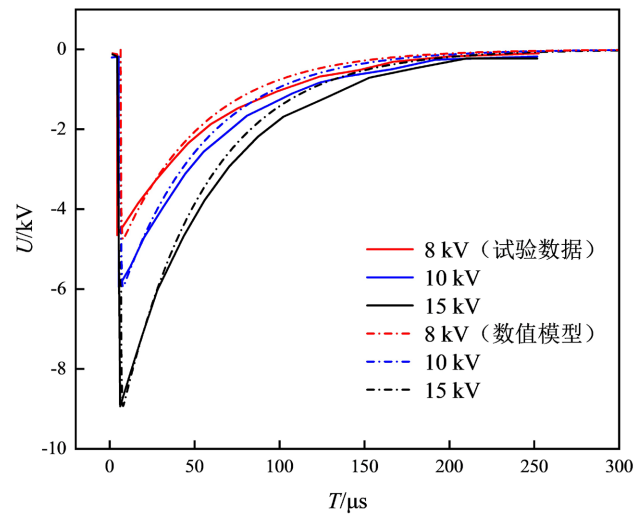


Figure 6. Comparison of impulse voltage results between the proposed model and the experimental results
图 6. 本文模型与试验结果的冲击电压结果对比

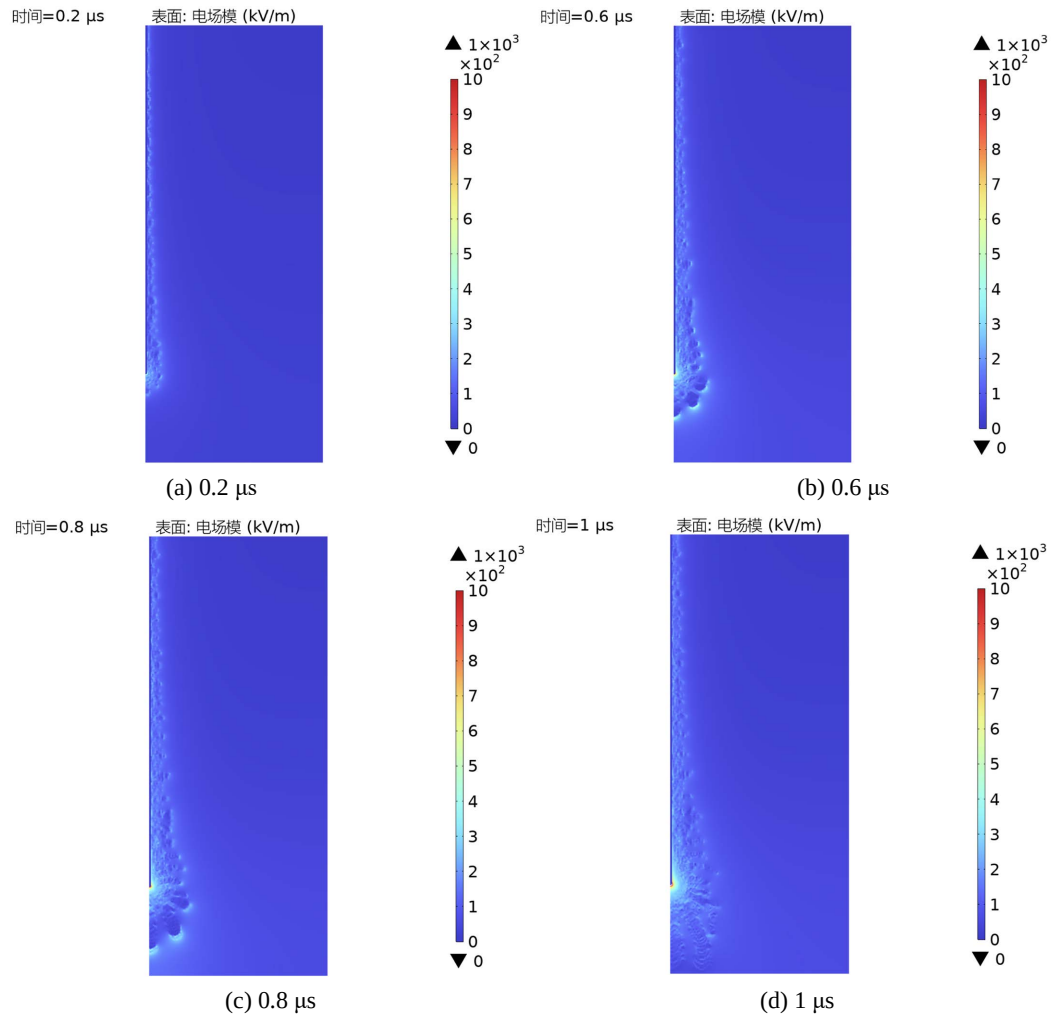


Figure 7. Changes in electric field strength at different times
图 7. 不同时刻的电场强度变化

5. 结果与讨论

5.1. 含水量对冲击电压的影响

为研究不同含水量对土体冲击响应的影响规律，在其他参数保持不变的条件下，分别选取含水量为 5%、10%、15%和 20%的土体模型，模拟其在标准雷电冲击波($T_1/T_2 = 1.2/50 \mu s$)作用下的响应特性。

图 8 显示了在峰值冲击电压为 15 kV 的条件下，不同含水量土体的冲击电压变化情况。数值模拟结果表明，在 15 kV 峰值冲击电压作用下，土体冲击电压峰值随含水量的增加而升高。此现象可归因于土体的离子传导机制：土体导电性的主要来源是离子传导，而离子传导的发生依赖于土体中的水分。在含水量较高的土体中，自由离子的浓度增加，离子在土体孔隙水中迁移的自由度增大。因此，含水量越高，土体的离子传导性越强，导电性也随之增强，得到的冲击电压峰值也增加。

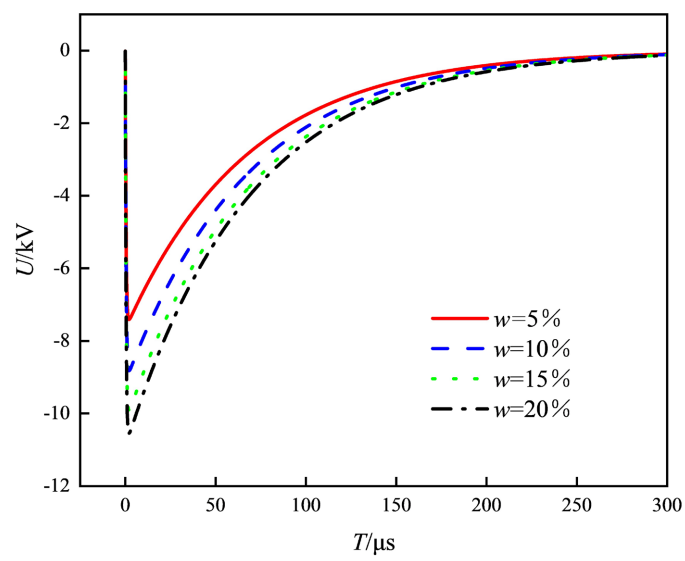


Figure 8. Impact voltage curves of different water contents at voltage peak value of 15 kV
图 8. 电压峰值 15 kV 下不同含水量冲击电压的曲线

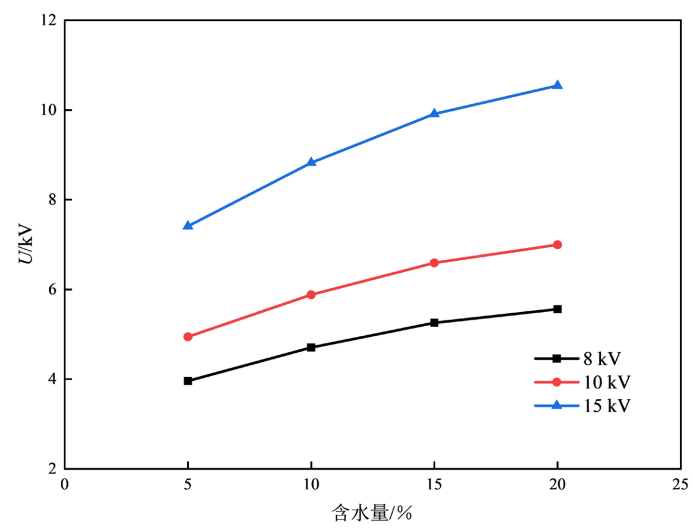


Figure 9. Peak variation curves of soils with different water contents under different voltages
图 9. 不同含水量土体在不同电压下的峰值变化曲线

图 9 为不同含水量的土体在不同电压下的冲击电压峰值变化曲线。当土体含水量在 5%~20% 时, 8 kV、10 kV 和 15 kV 电压下土体的冲击电压峰值分别为 3.959 kV~5.558 kV、4.943 kV~6.995 kV 和 7.409 kV~10.543 kV, 这表明, 土体的含水量对冲击电压峰值具有显著影响。相同电压下, 随着含水量的增加, 冲击电压的峰值不断增加, 但峰值的变化幅度有所下降。这主要是因为适当地增加含水量显著增强了土体的导电能力, 但土体含水量继续增大, 土体中孔隙水将接近饱和, 使得大部分电流沿连续的孔隙水通道传导, 含水量的变化不会使冲击电压产生大幅度的变化, 逐渐趋于平稳。

土体在不同含水量的情况下, 电场强度随着含水量的增加而增加, 当含水量增加时, 电场强度更容易向两边延伸, 击穿的范围更广。如图 10 所示, 电极附近土体中的电场强度均随着与电极距离的增加而逐渐减小, 越靠近电极, 土体中电场强度越大, 端点处的电场强度明显高于其他地方。

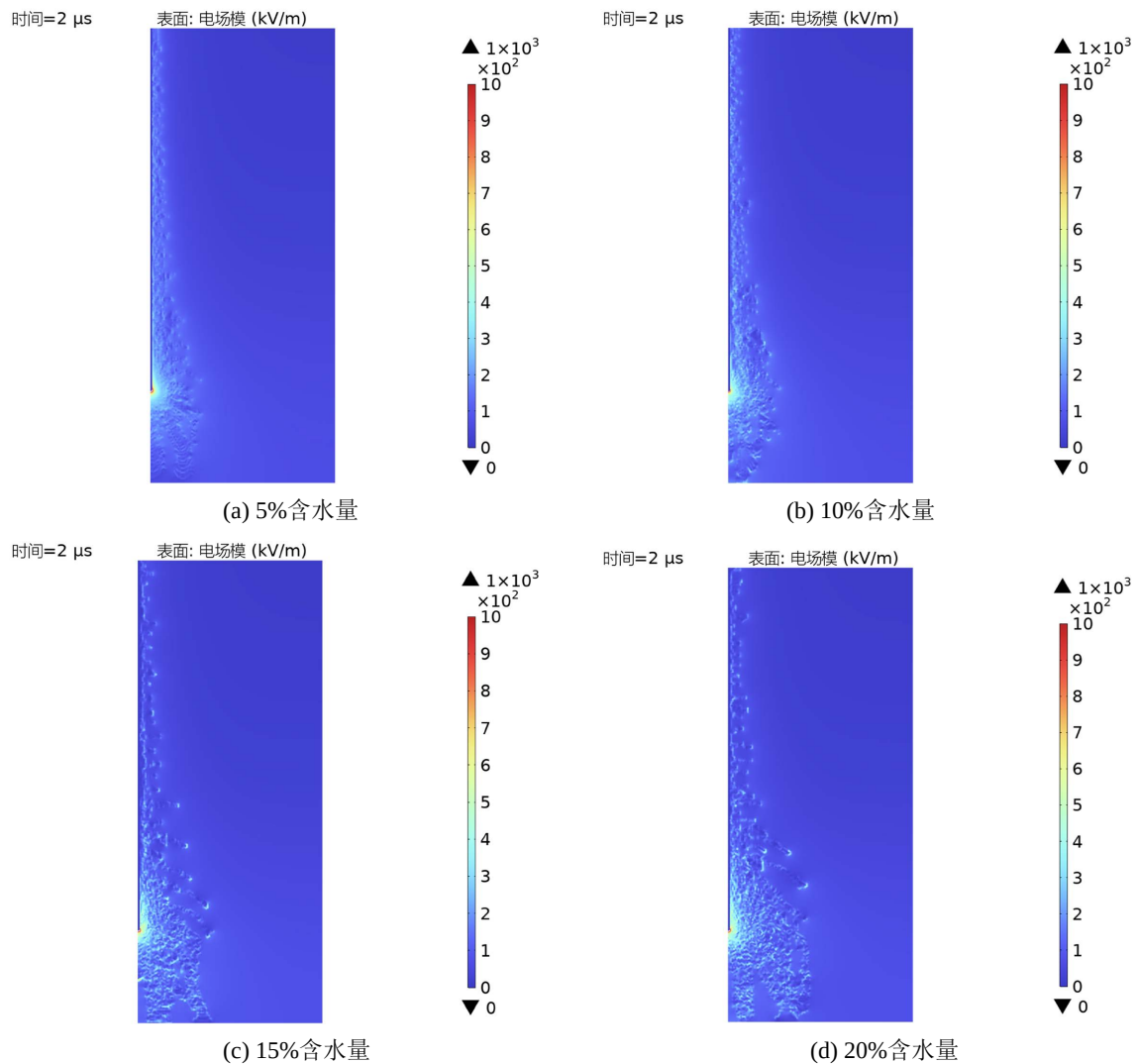


Figure 10. Changes in electric field strength at different water contents

图 10. 不同含水量的电场强度变化

5.2. 含盐量对冲击电压的影响

含盐量是土体特性参数的重要部分, 它直接影响土体对雷电冲击响应的结果, 本节通过控制其他参

数不变, 在只改变土体含盐量的条件下, 分析土体冲击电压的特性。

由图 11 所示, 不同含盐量土体冲击电压的变化具有时间依赖性, 响应曲线同样具有陡上升和缓下降的特征。

此外, 图 12 展示了不同含盐量下的电场强度变化规律。结果表明, 电场强度随着含盐量的增加而逐渐增强, 但含盐量的增加对电场强度影响幅度很小, 尽管如此, 相较于无盐土体, 含盐土体的电场影响范围更广, 但当含盐量达到一定水平后, 电场强度的增幅逐渐减小, 最终趋于稳定。

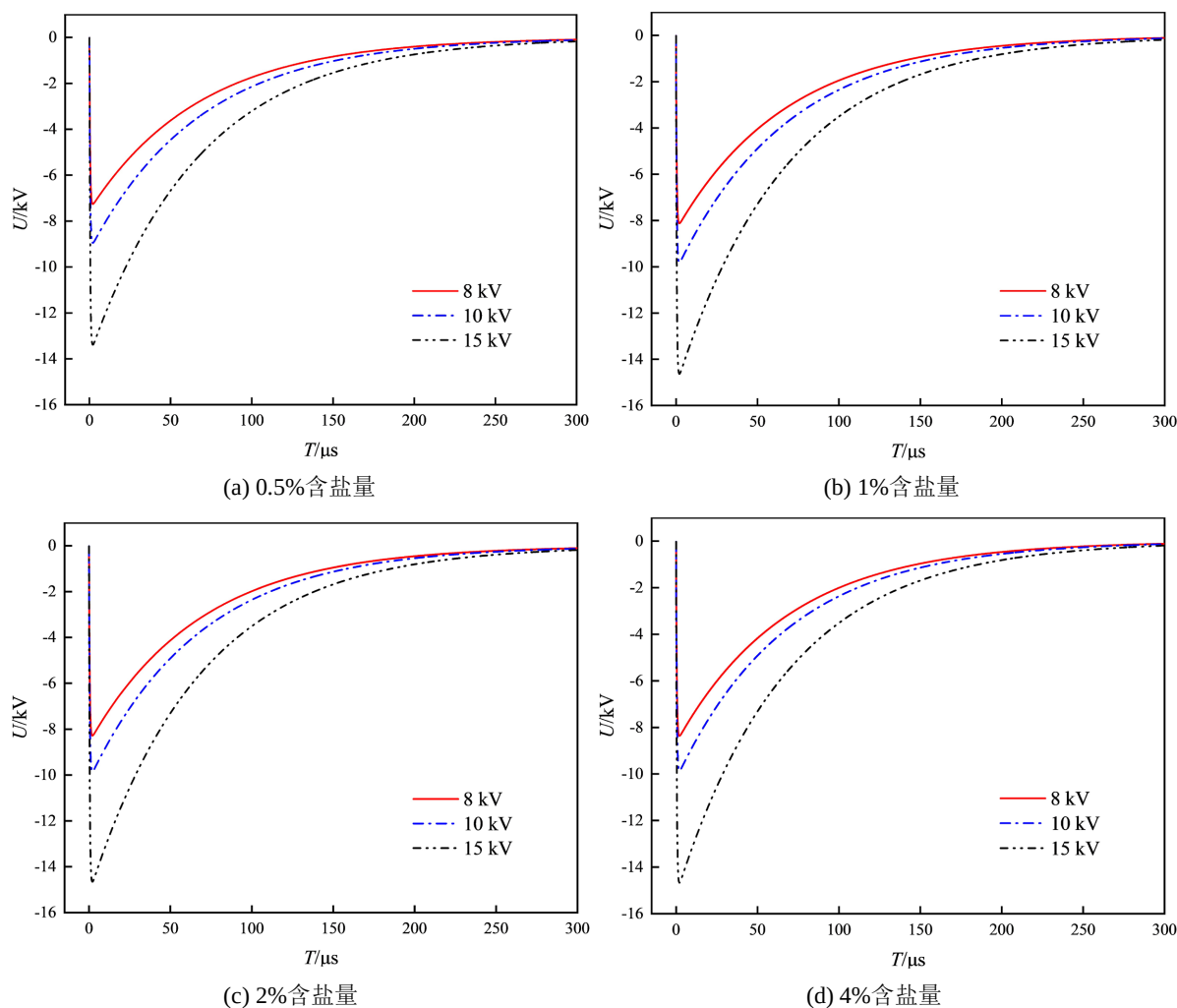


Figure 11. Lightning impulse voltage response curve of soil with different salt content

图 11. 不同含盐量的土体雷电冲击电压响应曲线

图 13 展示了相同含水量、不同含盐量土体的冲击电压峰值变化特征。模拟结果显示, 土体冲击电压峰值与输入电压之间存在显著的线性相关关系。当施加 8 kV 的输入电压时, 在无盐土样(含盐量 0%)中得到的峰值电压为 4.705 kV, 而在含盐量为 0.5%的土样中得到的峰值电压达到 7.258 kV。当输入电压升至 10 kV 时, 相应的峰值电压变为 5.881 kV 和 8.953 kV; 当输入电压达到 15 kV 时, 峰值电压进一步提升至 8.821 kV 和 13.386 kV。

值得注意的是, 同等条件下, 含盐土体的冲击电压峰值显著高于无盐土体, 这表明盐分对土体雷电冲击特性具有显著影响。其机理可从电解质溶液的电学特性解释: 土体中的盐分(如氯化钠、硫酸镁)溶解

后电离,产生 Na^+ 、 Mg^{2+} 等阳离子和 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等阴离子。这些自由离子在电场作用下能够迅速移动,成为电流的主要载体。含盐量的增加导致自由离子浓度提高,从而增强土体的导电性,最终引起冲击电压峰值的显著提升。

图 14 展示了不同含盐量土体在变化冲击电压下的电压峰值变化规律,呈现出两个关键特征,首先,在恒定含盐量条件下,输入电压值与电压波形峰值呈现正相关关系。其次,在相同输入电压下,土体的电压峰值随含盐量的变化呈现非线性特征:1) 低含盐量阶段(0%~2%),峰值电压随含盐量的增加表现出显著的快速上升趋势。这一阶段,离子生成速率快速增长,土体导电性迅速提高;2) 高含盐量阶段(>2%),峰值电压的变化趋于平缓,增长速率明显减缓。

这一现象可归因于电解质溶液的 electrodynamic 特性,在低盐分浓度时,溶解的盐分电离产生大量自由移动的离子,显著提升土体的导电性。随着盐分浓度继续增加,溶液中离子浓度逐渐达到饱和,新增盐分的电离和离子迁移能力受到限制。此外,高浓度离子溶液中还可能出现离子间的电荷屏蔽效应,进一步抑制了电荷传导的效率。

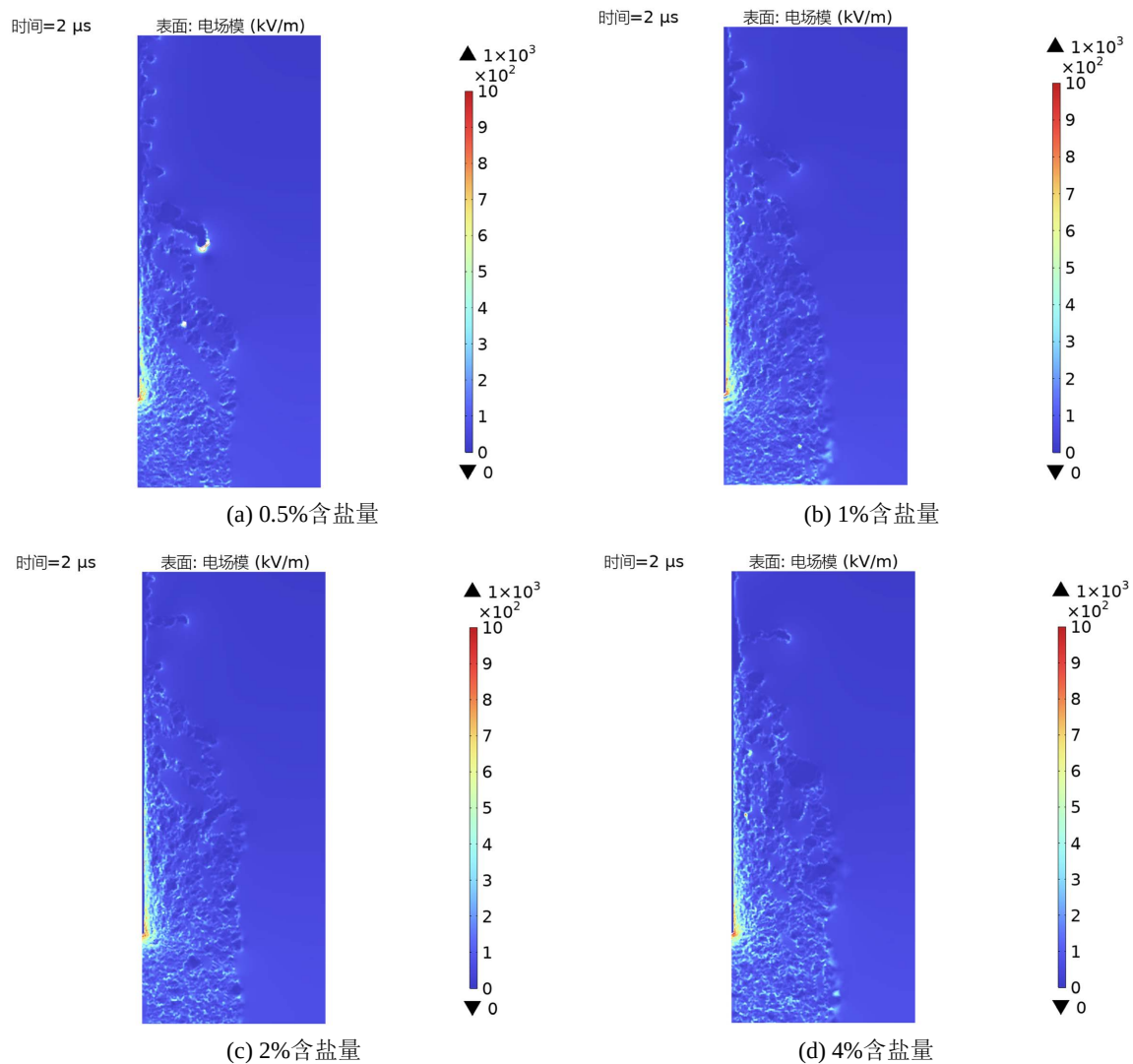


Figure 12. Changes in electric field strength at different salt contents
图 12. 不同含盐量的电场强度变化

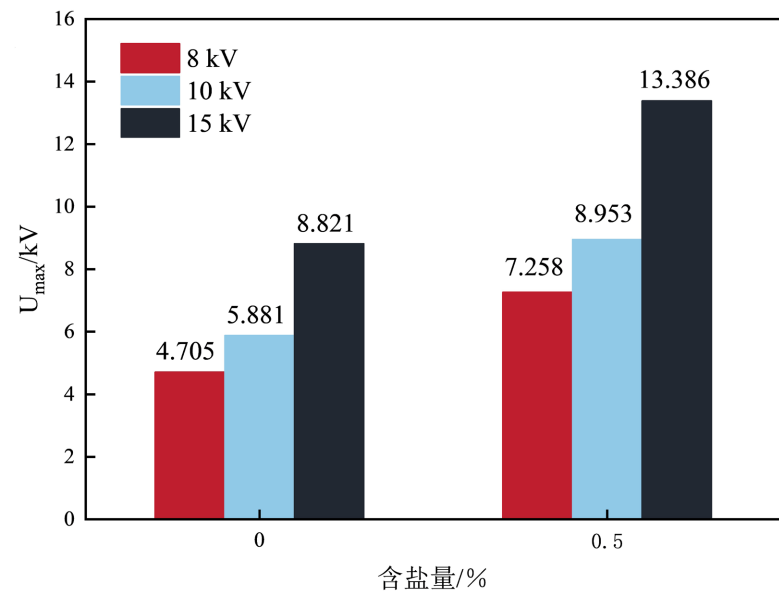


Figure 13. Peak impulse voltage of soil with different salt contents at the same water content
图 13. 相同含水量下, 不同含盐量土体的冲击电压峰值

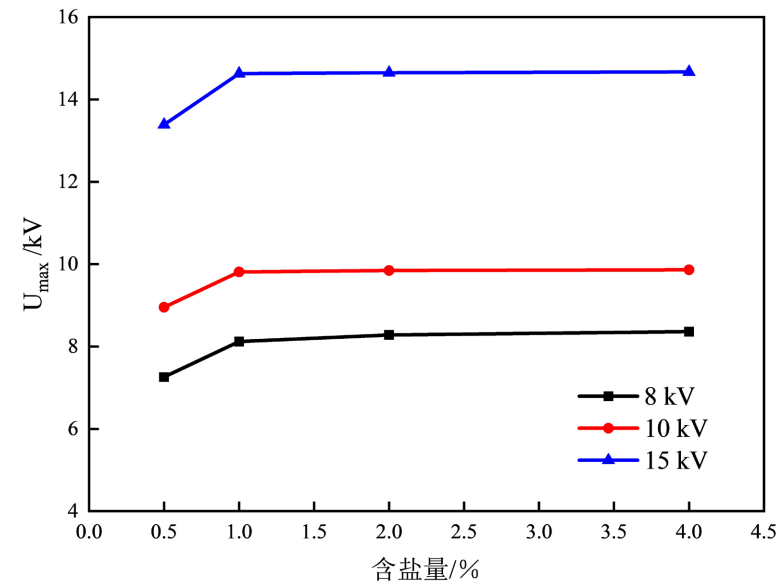


Figure 14. Peak voltage variation curves of soils with different salt content levels under different voltages
图 14. 不同含盐量土体在不同电压下的峰值变化曲线

5.3. 不同水盐含量下土体的雷击热效应

为探究不同的土体含水量下雷电引起的热效应变化, 本文使用 $T_1/T_2 = 1.2/50 \mu\text{s}$ 的波形参数, 分别对含水量为 5%、10%、15%、20% 的土体进行模拟, 其结果如图 15 所示, 图中土体含水量增加时, 水分中的离子导电性提高, 导致电阻率降低, 电阻减小会使电流增大, 土体温度瞬间上升, 并使得较大的范围内产生高热量。当含水量为 20% 时, 影响范围最大为 0.12 m, 当含水量减少到 5% 时, 热量传导范围缩小到 0.9m, 表明含水量与热效应强度呈显著正相关。

当参数控制在相同含水量下时, 不同含盐量的变化对热效应的影响较不明显, 如图 16 所示, 该现象

符合 Debye-Hückel 理论：在同等含水量条件下，离子迁移率受双电层效应限制，致使电阻率对盐分浓度敏感性降低，温度没有太大差别。Debye-Hückel 理论适用于稀溶液(离子强度 $< 0.1 \text{ mol/L}$)，假设离子为点电荷且独立运动。本研究中，含盐量 0%~4%对应的离子强度范围为 $0.05\sim 0.3 \text{ mol/L}$ 。低盐条件下($< 2\%$)，理论预测与仿真结果吻合，热效应随含盐量变化不显著；而高盐条件下($> 2\%$)，离子间相互作用增强，双电层重叠导致迁移率下降，理论偏离仿真数据，高盐土体的热效应需结合修正的 Poisson-Boltzmann 方程或分子动力学模拟进一步分析。

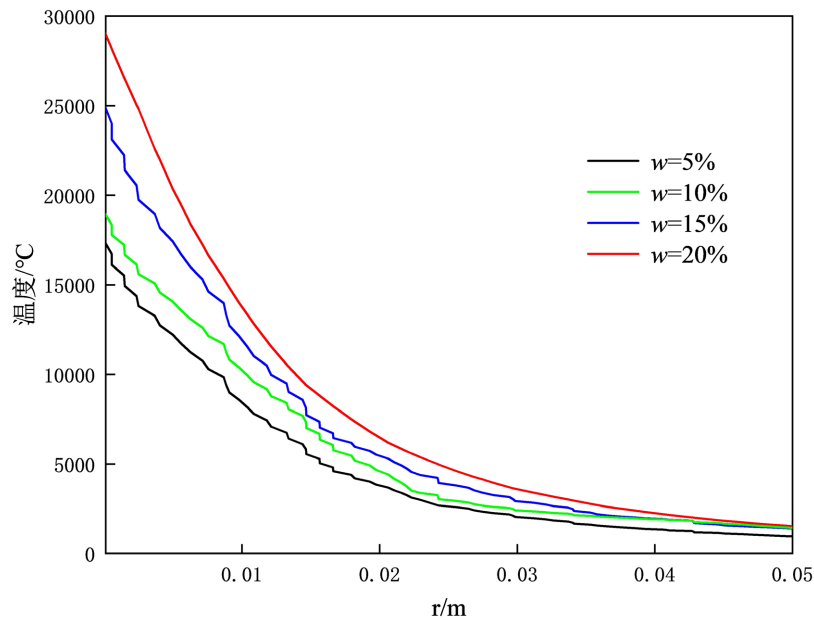


Figure 15. Temperature distribution in soil under different water contents

图 15. 不同含水量下土体温度分布

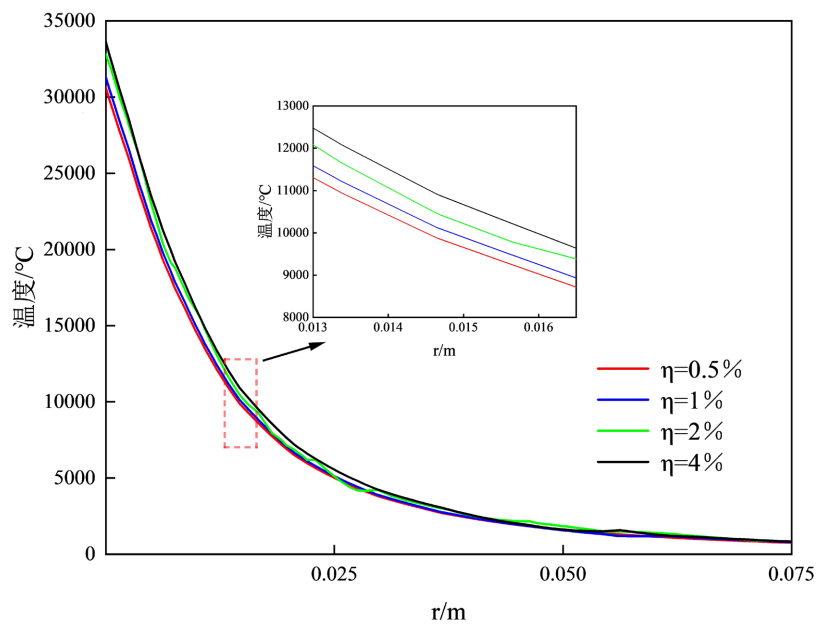


Figure 16. Temperature distribution in soil under different salt contents

图 16. 不同含盐量土体温度分布

6. 结论

针对雷击产生较大电流会对土体影响的现象, 本文分析了土体在不同含水量和含盐量下的雷电响应特性。通过建立数值模型模拟和试验得出以下结论:

- 1) 土体冲击电压的变化表现出明显的时间依赖性, 响应曲线呈现陡上升与缓下降的特征。土体击穿过程极为迅速, 较短时间内实现完全击穿。
- 2) 水盐含量对冲击电压峰值呈现显著的非线性影响: 在 15 kV 输入条件下, 含水量由 5% 增至 20% 时, 峰值电压增幅为 42.2%; 含盐量由 0% 增至 4% 时, 峰值电压增幅为 51.8%。结果表明, 含盐量对峰值电压的提升作用较含水量更为显著。
- 3) 冲击电压增长速率随水盐含量趋近饱和而降低: 含水量从 15% 增至 20% 时, 峰值电压增幅由 19.1% 降至 6.4%; 含盐量超过 2% 后, 峰值电压增幅由 66.1% 骤降至 0.1% (2%~4%), 表明高盐环境下离子迁移趋于极限。
- 4) 土体的水盐含量参数直接影响雷击热量的产生与传导, 较高含水量下雷击热效应较为明显, 由于土体的矿物质成分熔点在 1200℃ 左右, 在实际雷击条件下高含水量土体会产生较大范围的热损伤; 含盐量变化对热效应影响微弱。

参考文献

- [1] Murphy, A. (2020) Lightning Strike Direct Effects. In: Irving, P. and Soutis, C., Eds., *Polymer Composites in the Aerospace Industry*, Elsevier, 561-591. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102679-3.00018-6>
- [2] Uman, M.A. and Krider, E.P. (1989) Natural and Artificially Initiated Lightning. *Science*, **246**, 457-464. <https://doi.org/10.1126/science.246.4929.457>
- [3] Raizer, Y.P. (2004) Lightning: Physics and Effects. *Physics Today*, **57**, 63-64. <https://doi.org/10.1063/1.1878338>
- [4] Sun, Q., Zhong, X., Liu, J., Wang, F., Chen, S., Zhong, L., et al. (2021) Three-Dimensional Modeling on Lightning Induced Overvoltage for Photovoltaic Arrays Installed on Mountain. *Journal of Cleaner Production*, **288**, Article ID: 125084. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125084>
- [5] 罗东辉, 袁涛, 司马文霞, 等. 连续冲击电流作用下土壤放电通道体积特征参数提取方法及机理分析[J]. 高电压技术, 2020, 46(5): 1791-1799.
- [6] Luo, D., Cao, Y., Zhang, Y., Xie, S., Zhang, C. and Cao, S. (2021) Study on Structural Parameters and Analysis Method of Soil Successive Impulse Discharge Channel. *Energies*, **14**, Article 877. <https://doi.org/10.3390/en14040877>
- [7] Flanagan, T.M., Mallon, C.E., Denson, R. and Leadon, R.E. (1981) Electrical Breakdown Properties of Soil. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, **28**, 4432-4439. <https://doi.org/10.1109/tns.1981.4335743>
- [8] Flanagan, T.M., Mallon, C.E., Denson, R. and Smith, I. (1982) Electrical Breakdown Characteristics of Soil. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, **29**, 1887-1890. <https://doi.org/10.1109/tns.1982.4336465>
- [9] Mousa, A.M. (1994) The Soil Ionization Gradient Associated with Discharge of High Currents into Concentrated Electrodes. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **9**, 1669-1677. <https://doi.org/10.1109/61.311195>
- [10] Fuller, B.D. and Ward, S.H. (1970) Linear System Description of the Electrical Parameters of Rocks. *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, **8**, 7-18. <https://doi.org/10.1109/tge.1970.271447>
- [11] Scott, J.H. (1983) Electrical and Magnetic Properties of Rock and Soil. US Geological Survey.
- [12] Longmire, C.L. and Smith, K.S. (1975) A Universal Impedance for Soils. Defense Nuclear Agency.
- [13] He, J., Zhang, B., Zeng, R. and Zhang, B. (2011) Experimental Studies of Impulse Breakdown Delay Characteristics of Soil. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **26**, 1600-1607. <https://doi.org/10.1109/tpwr.2011.2140403>
- [14] 高延庆. 土壤冲击击穿机理及接地系统暂态特性研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 清华大学, 2004.
- [15] 袁涛, 李景丽, 司马文霞, 等. 土壤电离动态过程对接地装置冲击散流的影响分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(7): 1606-1613.
- [16] Chen, J., Elmi, C., Goldsby, D. and Gieré, R. (2017) Generation of Shock Lamellae and Melting in Rocks by Lightning-induced Shock Waves and Electrical Heating. *Geophysical Research Letters*, **44**, 8757-8768. <https://doi.org/10.1002/2017gl073843>

-
- [17] 张军辉, 张银银, 彭俊辉. 快速测量重塑土土水特征曲线的试验方法研究[J]. 中外公路, 2021, 41(6): 255-259.
- [18] 许戈韦, 顾凡, 张军辉, 等. 粗粒土基质吸力与介电常数特征曲线研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2023, 20(1): 24-31.
- [19] 刘洋. 土体雷电冲击特性模拟试验研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海理工大学, 2016.
- [20] 王乐凡, 余承华, 顾强康, 等. 不同含盐量饱和盐渍土电阻率试验[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2014, 15(4): 25-28.