

DOI:10.11918/202407022

考虑非线性电热特征的雷击土体热响应机理分析

饶平平¹, 陈熠杰¹, 金 潇¹, 崔纪飞¹, 冯伟康², 项远兵¹

(1. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 同济大学 上海自主智能无人系统科学中心, 上海 200092)

摘要: 为分析雷电作用下土体的热效应, 研究土体中雷击引起的热扩散过程, 采用电热耦合理论, 考虑土体非线性电热特征, 建立一种能够反映热效应的雷击土体模型。通过瞬态计算探究雷电流特性和土体电热特征参数对热效应的影响, 并比较非线性电热特征模型与传统模型在模拟雷击土体响应方面的差异, 采用前人现场观测数据对模型的合理性进行验证。结果表明: 当雷电击中地面时, 瞬间释放的能量导致接触点附近的温度急剧升高, 雷击后 30 μs 左右土体热效应达到峰值, 温度影响半径小于 40 cm; 雷电流与土体特性参数对雷击土体热效应影响显著, 雷电流峰值影响雷击点附近的熔化区域半径, 不同雷电波形决定电流的变化速度, 从而影响热量在土体中的传播速度和影响范围; 较高的土体初始电阻率将增加雷击产生的热效应, 较大的比热容会提高土体的热稳定性。研究结果对于理解和预测雷击土体的热响应具有重要的理论和实际意义, 可用于指导防雷和接地系统的设计, 提高基础设施的安全性。

关键词: 雷击土体; 非线性电热特征; 热效应; 电热耦合; 热响应机理

中图分类号: TM862

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2025)09-0065-11

Analysis of thermal response mechanism of lightning-struck soil considering nonlinear electro-thermal characteristics

RAO Pingping¹, CHEN Yijie¹, JIN Xiao¹, CUI Jifei¹, FENG Weikang², XIANG Yuanbing¹

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Shanghai Research Institute for Intelligent Autonomous Systems, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to analyze the thermal effects of soil under lightning strikes and describe the thermal diffusion process caused by lightning strikes in soil, a lightning strike soil model is established based on the electro-thermal coupling theory in this work. The model, by considering the nonlinear electric-thermal characteristics of the soil, can reflect the thermal effect. The transient computation was performed to investigate the characteristics of lightning current and the influence of soil characteristic parameters on thermal effects. In addition, the difference between the nonlinear electrothermal characteristics model and the traditional model in simulating the response of the lightning strike soil was compared. Finally, the rationality of the model was validated by the field observation data from previous researchers. The results show that: the energy released instantaneously causes a sharp increase in temperature near the contact point when lightning strikes the ground. The thermal effect of the soil reaches a peak at around 30 μs after a lightning strike, and the temperature influence radius is less than 40 cm. Besides, the lightning current and soil characteristic parameters have a significant impact on the thermal effect of lightning strikes on soil. The peak value of a lightning current can affect the radius of the area near the lightning strike point that reaches the melting temperature. Different lightning waveforms can determine the speed of current change, thereby affecting the speed of dissemination and range of heat in the soil. Higher initial resistivity of the soil will increase the thermal effects caused by lightning strikes, and a larger specific heat capacity will increase the thermal stability of the soil. The results of the current work are expected to have important theoretical and practical significance for understanding and predicting the thermal response of lightning-struck soil, which can further be applied to guide the design of lightning protection and grounding systems to improve the safety of infrastructures.

Keywords: lightning-struck soil; nonlinear electro-thermal characteristics; thermal effects; electro-thermal coupling; thermal response mechanism

收稿日期: 2024-07-06; 录用日期: 2024-08-13; 网络首发日期: 2025-05-21

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20250520.1614.002>

基金项目: 国家自然科学基金(42077435, 42377171)

作者简介: 饶平平(1984—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 陈熠杰, 222271933@st.usst.edu.cn

雷击土体是大气电磁学和地球科学领域备受关注的焦点,涵盖了电气现象与地表地壳相互作用的重要领域^[1]。云地闪电电流可以达到 10^5 A,瞬间释放巨大能量,闪电内部通道温度更是高达 3×10^4 °C,远高于太阳表面温度^[2],部分能量以声能、光能、电磁能的形式在空气传导过程中耗散^[3],但在传导至雷击点时仍有约 10^8 J 的能量,巨大的能量使土体发生物理、化学过程^[4]。

目前,国内外大部分学者从雷电通过接地极进而影响土体的角度分析雷击土体机理。例如,为研究接地电极在输配电系统中的重要作用,Salarieh 等^[5]通过试验分析了土体相对介电常数对接地电极中感应瞬态电压的影响;Li 等^[6]采用空间域有限元法和时域有限差分法,考虑土体电离现象,计算分析了接地系统在瞬态脉冲条件下的响应。部分学者分析了雷击对埋地工程的影响,如 Ghosh 等^[7]探究雷击对地下电缆的影响,若电缆表面产生的磁场强度超过其绝缘层耐受极限,电流通过该通道流动时将导致电缆受损;Rao 等^[8]通过构建数值模拟分析了雷击导致的管道损坏现象,揭示了电力灾难导致的地下管道故障的发生机理及其过程。雷击对土体的破坏不可忽略,如 Jin 等^[9]指出在雷电作用下,土体将发生电穿透并引起热损伤。在力学响应方面,饶平等^[10]建立了考虑雷电冲击压力和电磁力影响的土体动态响应有限元模型;在此基础上,结合圆孔扩张理论计算出了土体塑性区半径^[11];随后又提出了雷击引起土体机械损伤模型^[12]。

然而,上述研究工作均未考虑土体非线性电热特征,无法真实反映雷击土体的热效应。Luo 等^[13]

通过模拟试验研究了土体介质因子对土体电阻率的影响,指出水分、空气含量与孔隙率显著影响土体残余电阻率;Liu 等^[14]通过分析冲击特性试验数据,认为电离区残余土体电阻率的几何平均值约为原始土体电阻率的 7%;Sekioka 等^[15]认为电离区域的电阻率随电流密度呈指数函数关系变化。在热导率方面,陆森等^[16]综合考虑了土体的湿度、结构、温度等多种因素,提出了用于预测不同温度下土体热导率的模型;Wang 等^[17]通过转换土体参数,提出了多元概率分布模型,并构建了新型土体热导率预测模型;Rao 等^[18]对印度的 5 种类型土体进行了室内热导率测试,提出了考虑水分含量变化的热导率预测模型;Tong 等^[19]提出了多孔介质的数学模型,该模型考虑了温度、压力及其他对导热性的影响因素。

为揭示雷击事件中电流在土体中产生的热效应,本文采用电热耦合的多物理场模拟方法,结合土体电阻率与热导率非线性函数,开展雷电流及土体特性参数对雷击土体温度变化的影响研究,模拟由雷击引发的土体温度动态变化和分布特征。研究结果可为工程设计人员进行防雷减灾工作提供一定的参考。

1 雷击土体机理分析

雷击发生后,电流在土体中传导形成电场,进而产生电热效应,土体温度发生变化从而实现电热耦合。本文引入土体电阻率和热导率模型,考虑电阻率和热导率非线性变化。雷击土体概念模型及电热场耦合关系如图 1 所示。

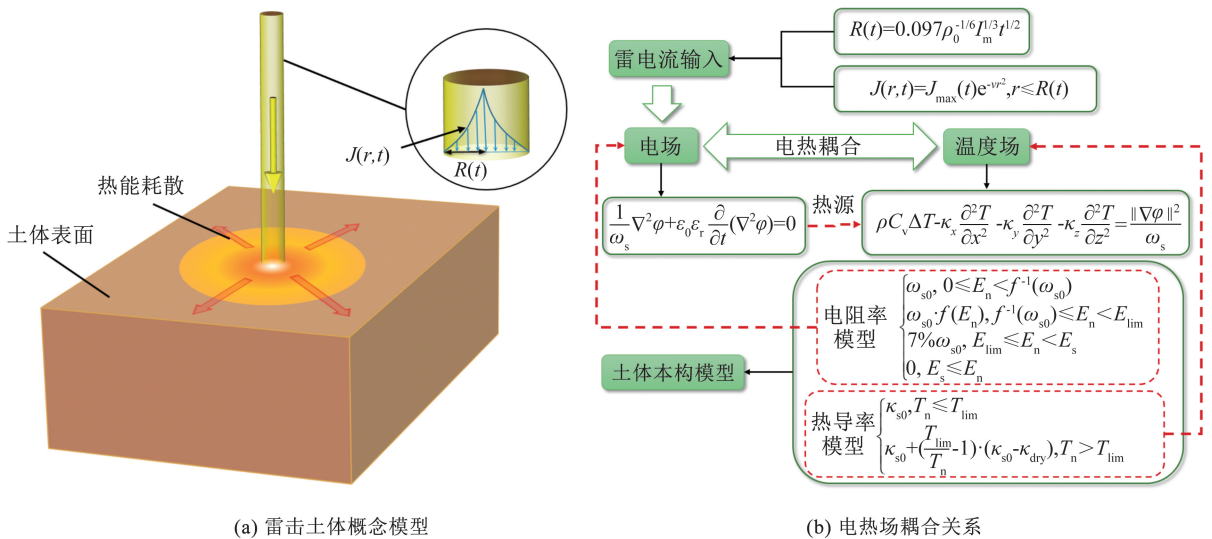


图 1 雷击土体概念模型及电热场耦合关系

Fig. 1 Conceptual model of lightning-struck soil and electro-thermal field coupling relationship

1.1 雷电流密度函数

双指数波形是 IEC 62305—2010《国际雷电防护标准》和 GB 50057—2010《建筑物防雷设计规范》规定的雷电流标准波形^[20],且其形式简单,便于计算,故本文采取地闪回击电流双指数模型模拟雷电流。

$$i(t) = \lambda I_m (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (1)$$

式中: t 为时间, $i(t)$ 为雷电流瞬时值, λ 为波峰修正系数, I_m 为雷电流峰值, α β 分别为波前、波尾系数。

同时,波形曲线需满足时间间隔关系^[21]:

$$\begin{cases} t_1 = 1.25(t_{90} - t_{10}) \\ t_2 = t_{50} - 1.25(9t_{10} - t_{90}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: t_1 、 t_2 分别为波前时间和半峰值时间, t_{10} 、 t_{90} 分别为上升阶段雷电流达到 I_m 的10%、90%对应时刻, t_{50} 为下降阶段雷电流降为50% I_m 对应时刻。

根据自行编写的 MATLAB 代码,通过 I_m 、 t_1 和 t_2 ,求出 α 、 β 和 λ ,进而得到雷电流双指数函数表达式。图2为不同波形雷电流双指数函数曲线。

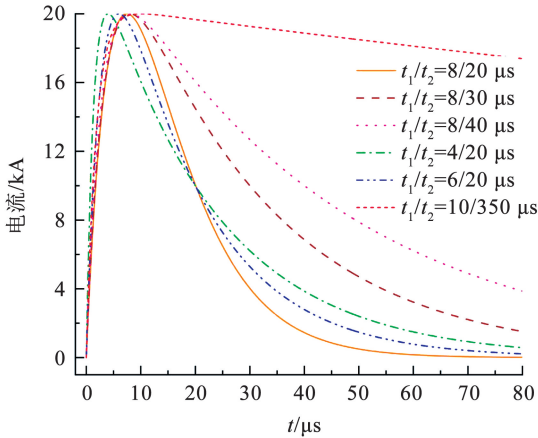


图2 不同波形雷电流双指数函数曲线

Fig.2 Biexponential function curves of lightning current with different waveforms

采用 Wang 等^[22]提出的雷电通道半径确定击中区域的实际电流密度分布,其计算式为

$$R(t) = 0.097\rho_0^{-1/6} I_m^{1/3} t^{1/2} \quad (3)$$

式中: $R(t)$ 为雷电通道瞬时半径, ρ_0 为大气压密度。

Perera 等^[23]的室内试验表明,雷电径向通道内部的电流密度变化遵循相关系数大于0.95高斯分布。

$$J(r,t) = J_{\max}(t) e^{-vr^2}, r \leq R(t) \quad (4)$$

式中: r 为径向坐标; $J(r,t)$ 为电流密度; $J_{\max}(t)$ 为中心点处最大电流密度; v 为衰减常数,由试验数据确定,在 $r = 0.55R(t)$ 处, $J(r,t) = 10\% J_{\max}(t)$,则

$$v = -\frac{\ln 0.1}{(0.55R(t))^2} \quad (5)$$

由于雷电流函数 $i(t)$ 等于电流密度 $J(r,t)$ 对通道圆形截面面积的积分^[24],即

$$i(t) = \int_0^{2\pi} \int_0^{R(t)} r J(r,t) dr d\theta \quad (6)$$

式中 θ 为极坐标系中的点与原点的连线和极轴之间的夹角。

联立式(4)~(6),可得通道内部电流密度表达式为

$$J(r,t) = \frac{i(t)}{\int_0^{2\pi} \int_0^{R(t)} r e^{-\frac{\ln 0.1}{(0.55R(t))^2} r^2} dr d\theta} e^{-\frac{\ln 0.1}{(0.55R(t))^2} r^2}, r \leq R(t) \quad (7)$$

1.2 电场模型

雷击作用下,土体会产生复杂时变电场,在此过程中会产生两种电流:传导电流和位移电流。传导电流是自由电荷在电场驱动下通过土体移动时所生成的电流;位移电流由时变电场所激励,因电位随时间变化而产生。雷电作用后,土体电磁场可由准静态麦克斯韦微分方程表示:

$$\begin{cases} \nabla \times H = J = J_c + J_d \\ \nabla \times E = 0 \\ \nabla \cdot J = 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$J_c = \sigma \cdot E \quad (9)$$

$$J_d = \frac{\partial D}{\partial t} \quad (10)$$

$$D = \varepsilon_0 \varepsilon_r E \quad (11)$$

$$E = -\nabla \cdot \varphi \quad (12)$$

式中: ∇ 为梯度算子(Nabla algorithm), H 为磁场强度, E 为电场强度, J 为总电流, J_c 为传导电流, J_d 为位移电流, D 为电位移, σ 为土体电导率, φ 为电势, ε_0 为电磁常数, ε_r 为相对介电常数。

将式(9)、(10)代入式(8)得

$$\nabla \cdot \left(\frac{\partial D}{\partial t} + \sigma \cdot E \right) = 0 \quad (13)$$

将 $\sigma = 1/\omega_s$ 和式(11)代入式(13)得

$$\varepsilon_0 \varepsilon_r \nabla \cdot \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{1}{\omega_s} \nabla \cdot E = 0 \quad (14)$$

式中 ω_s 为土体电阻率。

将式(12)代入式(14)得到电场控制方程:

$$\frac{1}{\omega_s} \nabla^2 \varphi + \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial}{\partial t} (\nabla^2 \varphi) = 0 \quad (15)$$

1.3 温度场模型

根据能量守恒定律,雷击作用下,土体满足特定形式的热平衡方程^[25]:

$$\frac{\partial u_T}{\partial t} = Q_J - \nabla \cdot J_T \quad (16)$$

式中: u_T 为单位体积的热能(焓), Q_J 为焦耳热,

J_T 为热流密度。其中, $\partial u_T / \partial t$ 项代表热能储存的变化率; 焦耳热 Q_J 代表源项; $\nabla \cdot J_T$ 代表导热项, 即热量在物体内部传递部分。

土体单位体积的热能为

$$u_T = \rho C_V \Delta T \quad (17)$$

式中: ρ 为土体密度, C_V 为比热容, ΔT 为瞬时温度与初始温度差值。

热流密度 J_T 与温度梯度有关, 可定义为

$$J_T = -\kappa_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \kappa_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} - \kappa_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (18)$$

式中: T 为温度; κ_x 、 κ_y 、 κ_z 分别为 x 、 y 、 z 三维方向上的土体热导率, 本文假设土体为各向同性材料, 即 $\kappa_x = \kappa_y = \kappa_z$ 。

根据焦耳定律, 源项热量仅由传导电流产生, 因此焦耳热的表达式为

$$Q_J = J_c E \quad (19)$$

将式(12)和 $J_c = E / \omega_s$ 代入式(19)得到源项表达式:

$$Q_J = \frac{\|\nabla \varphi\|^2}{\omega_s} \quad (20)$$

式中 $\|\cdot\|$ 为范数算子。

联立式(16) ~ (18)、(20) 得到温度场控制方程:

$$\rho C_V \frac{\partial T}{\partial t} - \kappa_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \kappa_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} - \kappa_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{\|\nabla \varphi\|^2}{\omega_s} \quad (21)$$

1.4 土体电阻率模型

在雷电作用下, 电流在土体中散流, 雷击点周围土体发生非线性电离现象。本节的土体本构模型提供了土体材料在雷电作用下关于土体物理性质响应的数学描述。

传统的土体电阻率模型往往基于静态条件, 忽略了雷电流导致土体非线性电离和升温时电热特征的非线性变化。本文将电阻率表示为随节点电场强度变化的分段函数, 公式为

$$\omega_s = \begin{cases} \omega_{s0}, & 0 \leq E_n < f^{-1}(\omega_{s0}) \\ \omega_{s0} \cdot f(E_n), & f^{-1}(\omega_{s0}) \leq E_n < E_{lim} \\ 7\% \omega_{s0}, & E_{lim} \leq E_n < E_s \\ 0, & E_s \leq E_n \end{cases} \quad (22)$$

式中: ω_{s0} 为土体初始电阻率; E_n 为土体节点瞬时场强; E_{lim} 为初始击穿场强; E_s 为完全击穿场强; $f(E_n)$ 为电阻率非线性变化拟合函数^[26], 且不同初始电阻率对应不同的拟合函数。

土体电阻率本构关系如图 3 所示。

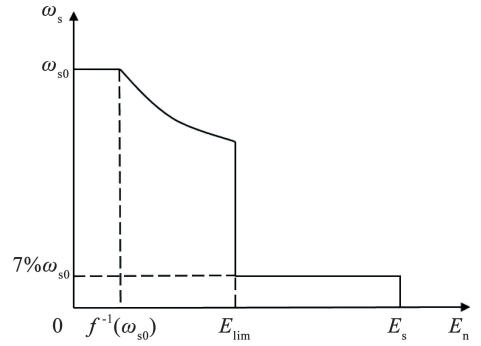


图 3 土体电阻率本构模型

Fig. 3 Constitutive model of soil resistivity

1.5 土体热导率模型

在电热耦合现象研究中, 土体的热导率是一个核心参数, 决定了雷击后土体温度分布的动态变化。土体作为一种多相介质, 其导热性能会受到含水量、密度以及土体矿物组成等多种因素的影响, 特别是在受到高温作用时, 土体的热导率会发生显著的非线性变化。

水分对土体的热导率有着重要影响^[27]。当土体中存在水分时, 由于水的热导率通常高于干土, 导致土体的整体热导率较高。水分蒸发后, 留下的是空气填充的孔隙。故温度达到某一阈值后, 热导率下降至干燥状态的热导率并维持在这一较低水平。

$$\kappa_s = \begin{cases} \kappa_{s0}, & T_n \leq T_{lim} \\ \kappa_{s0} + \left(\frac{T_{lim}}{T_n} - 1\right) \cdot (\kappa_{s0} - \kappa_{dry}), & T_n > T_{lim} \end{cases} \quad (23)$$

式中: κ_s 为土体热导率; κ_{s0} 为土体初始热导率, 由于雷雨天土体多饱和, 故假定土体初始热导率为饱和状态热导率; κ_{dry} 为干燥状态热导率; T_n 为土体节点截至某时刻的峰值温度; T_{lim} 为热导率衰减临界温度。

土体热导率本构关系如图 4 所示。饱和、干燥土体热导率采用 Côté-Konrad 模型^[28]:

$$\kappa_{s0} = \kappa_b^{1-\eta} \kappa_w^\eta \quad (24)$$

$$\kappa_{dry} = \chi \cdot 10^{-\eta\psi} \quad (25)$$

式中: η 为孔隙度; κ_b 为固体组分平均热导率; κ_w 为常温下水的热导率; χ 和 ψ 为受颗粒影响的参数, 对于矿物质土, 分别取 0.75 和 1.20。

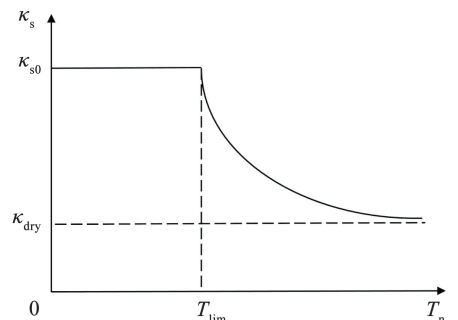


图 4 土体热导率本构模型

Fig. 4 Constitutive model of soil thermal conductivity

2 有限元模型

2.1 几何和材料属性设置

本文通过多物理场有限元模型对雷击土体进行模拟。模型采用半球体几何形状,雷击点为半球体上表面中心。为了减少计算量,同时避免截断误差,采用空间几何变换方法引入无限元域。该模型分为两个区域:中心区域(半径为 850 mm)和外层无限元区域(层厚为 150 mm),几何模型如图 5 所示。雷击模型采用二维轴对称组件,通过减少模型复杂度来提高收敛性。相较于全三维模型,二维轴对称组件的优势在于能够在求解时采用更密集的网格布局,该布局可以进一步提升解算过程的准确性。

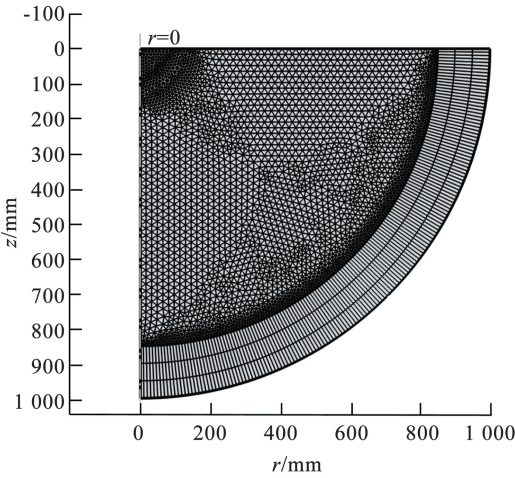


图 5 几何模型

Fig. 5 Geometric model

应用有限元软件模拟时,土体材料在雷击过程中会因电热特性产生突变,进而可能导致收敛性问题。为提升模型的收敛性,电导率和热导率变化前后需采用至少具有一阶连续偏导数的平滑函数进行参数过渡。根据 1.4 节,在有限元软件中输入土体材料的电阻率函数:

$$\omega_s = 0.07\omega_{s0}S_{2hs}(E_s - E_n, 1) + S_{2hs}(E_{lim} - E_n, 1) \times [\omega_{s0}f(E_n) - 0.07\omega_{s0}] + S_{2hs}[f^{-1}(\omega_{s0}) - E_n, 1] \times [\omega_{s0} - \omega_{s0}f(E_n)] \quad (26)$$

式中 S_{2hs} 为具有二阶连续偏导数的平滑阶跃函数。

根据 1.5 节,模型中土体材料的热导率设置为

$$\kappa_s = \kappa_{s0} + \left(\frac{T_{lim}}{T_n} - 1 \right) \cdot (\kappa_{s0} - \kappa_{dry}) S_{2hs}(T_n - T_{lim}, 1) \quad (27)$$

2.2 网格和容差设置

为精确模拟雷电击中区域,本模型在中心区域实施了四面体网格划分,并利用网格控制功能对该区域进行了专门的细化处理。对于外层的无限元

域,设置了扫掠划分的六面体网格。整体而言,这种网格布局策略使得模型的网格密度从中心区域到外层逐渐由紧密转变为疏松,以优化计算效率并保证模拟的准确性。完整网格包含 6 162 个域单元和 428 个边界单元。

本文采用隐式求解器处理模型的计算。为确保数值求解稳定性,设定初始时间步长为 $10^{-6} \mu s$,容差为 0.01。在进行时域计算时,采用自适应时间步长策略,其中预定的最大时间步长设置为 $0.1 \mu s$ 。为了确定时间步长,采用后向微分公式作为计算方法。考虑到模型涉及电热耦合,采取全耦合的自动高度非线性(牛顿)法对多物理场进行联合处理。

2.3 模型求解方法

根据几何设置,假定土体表面的边界为 Γ ,则在边界 Γ 上满足狄利克雷边界条件:

$$\begin{cases} \varphi = \bar{\varphi}_0, \text{在 } \Gamma_{el} \text{ 上} \\ T = \bar{T}_0, \text{在 } \Gamma_{te} \text{ 上} \end{cases} \quad (28)$$

式中: $\bar{\varphi}_0$ 、 \bar{T}_0 分别为边界初始电位、初始温度, Γ_{el} 、 Γ_{te} 分别为零电位边界、给定温度的热边界。

同时,在边界 Γ 上也满足诺依曼边界条件:

$$\begin{cases} -\mathbf{m} \cdot \mathbf{J} = J(r, t), \text{在 } \Gamma_{el}^* \text{ 上} \\ -\mathbf{m} \cdot \kappa \nabla T = k\zeta \cdot (\bar{T}_0^4 - T^4), \text{在 } \Gamma_{te}^* \text{ 上} \end{cases} \quad (29)$$

式中: \mathbf{m} 为法向量; k 为斯特藩-玻尔兹曼常数,取 $5.6697 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; ζ 为表面发射率,取 0.9; Γ_{el}^* 、 Γ_{te}^* 分别为闪电边界、散热边界。

在模型设置中,关于 φ 和 T 的方程式是基于独立变量的节点值和用于节点间插值的形状函数矩阵构建的。

$$\begin{cases} \varphi = N_\varphi \bar{\varphi} \\ T = N_T \bar{T} \end{cases} \quad (30)$$

式中: N_φ 和 N_T 分别为关于电势和温度的函数矩阵, $\bar{\varphi}$ 、 \bar{T} 为节点值向量。

将式(15)、(18)、(28)和式(30)通过伽辽金法得到弱形式控制方程:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_\varphi & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_T \end{bmatrix} \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} \bar{\varphi} \\ \bar{T} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_\varphi & \mathbf{0} \\ \mathbf{K}_{T\varphi} & \mathbf{K}_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\varphi} \\ \bar{T} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_\varphi \\ \mathbf{F}_T \end{bmatrix} \quad (31)$$

$$\mathbf{M}_\varphi = \int_\Omega (\nabla N_\varphi)^T \varepsilon_0 \varepsilon_r (\nabla N_\varphi) d\Omega \quad (32)$$

$$\mathbf{K}_\varphi = \int_\Omega (\nabla N_\varphi)^T \sigma (\nabla N_\varphi) d\Omega \quad (33)$$

$$\mathbf{F}_\varphi = \int_\Gamma (\nabla N_\varphi)^T J(r, t) (\nabla N_\varphi) d\Gamma \quad (34)$$

$$\mathbf{M}_T = - \int_\Omega (\nabla N_T)^T C_V (\nabla N_T) d\Omega \quad (35)$$

$$\mathbf{K}_T = \int_{\Omega} (\nabla N_T)^T \kappa_s (\nabla N_T) d\Omega \quad (36)$$

$$\mathbf{K}_{T\varphi} = \int_{\Omega} (\nabla N_T)^T \sigma (\nabla \varphi)^2 (\nabla N_{\varphi}) d\Omega \quad (37)$$

$$\mathbf{F}_T = \int_{\Gamma} (N_T)^T k\zeta (T^4 - \bar{T}_0^4) d\Gamma \quad (38)$$

式中: \mathbf{M}_{φ} 、 \mathbf{M}_T 、 \mathbf{K}_{φ} 、 \mathbf{K}_T 、 $\mathbf{K}_{T\varphi}$ 、 \mathbf{F}_{φ} 和 \mathbf{F}_T 为系数矩阵, Ω 为空间域。

模型采用有限差分法, 迭代操作在单个步长中进行, 误差小于进行下一个时间步长的最大容差, 时间步进迭代计算式为

$$\dot{\mathbf{X}} = \frac{\mathbf{X}^{j+1} - \mathbf{X}^j}{\Delta t} = \mathbf{C}\mathbf{X}^{j+1} + (1 - \mathbf{C})\mathbf{X}^j \quad (39)$$

式中: \mathbf{X} 为 $[\bar{\varphi}, \bar{T}]$; j 为时间步, Δt 为 $j \rightarrow j+1$ 的时间步长; \mathbf{C} 为积分常数, 为使计算稳定, 选择 $\mathbf{C} \geq 0.5$ 。

本文利用上述求解方法通过多物理场仿真软件实现电热耦合过程的数值模拟。

2.4 模型验证

土体颗粒主要由 Al_2O_3 、 SiO_2 及其他矿物组成, 花岗岩的成分与土体具有相似性。文献[29-30]对闪电熔岩进行了现场观测和理论研究, 最终得到花岗岩表面温度曲线。本文选用文献[29]相同的计算参数, 将模拟结果以及线性电热特征模型模拟结果与非线性电热特征模型模拟结果进行对比, 以验证本文有限元模型的正确性。基本计算参数如下: 密度 $\rho = 2\,670 \text{ kg/m}^3$, 介电常数 $\varepsilon = 8$, 初始电阻率 $\omega_0 = 1\,000 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$, 比热容 $C_v = 790 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$, 熔点为 $1\,200 \text{ } ^\circ\text{C}$, 初始热导率 $\kappa_0 = 3.9 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$, 孔隙度为 4%, 雷电流峰值 $I_m = 20 \text{ kA}$, 雷电波形 $t_1/t_2 = 1/15 \text{ } \mu\text{s}$ 。雷击后表面温度随半径变化结果对比如图 6 所示。

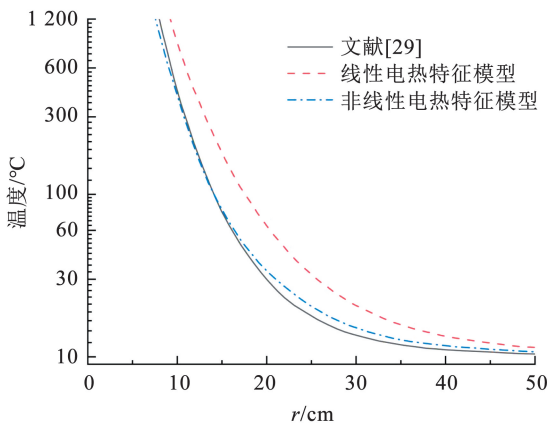


图 6 本文模型与文献[29]的热效应结果对比

Fig. 6 Comparison of thermal effect results between the model in this paper and reference[29]

的关系, 其平均电阻率小于线性电热特征模型的平均电阻率。将本文模型中的电阻率 ω_s 、热导率 κ_s 退化为恒定值 ω_0 、 κ_0 , 即得到土体线性电热特征模型。由图 6 可知, 本文模型在热效应方面比线性电热特征模型更接近实际情况。这主要是由于在电流较强的区域, 线性电热特征模型平均电阻率更高, 进而导致更多的电能转换为热能。此外, 本文还考虑热导率随温度增加而减少的非线性电热特征, 在温度较高的区域, 土体热导率下降, 导致热量更倾向于在较小的空间范围内累积。

此外, 文献[30]在文献[29]研究的基础上, 对野外遭遇雷击事件后的岩石进行观测、计算, 根据石英的退火温度 ($1\,200 \text{ } ^\circ\text{C}$) 得到岩石结构和物理性质皆发生改变的区域半径。表 1 为退火区域半径对比, 其中的数据进一步验证了本文模型的适用性。

表 1 与文献[30]退火半径对比

Tab. 1 Comparison with the results of reference[30]

数据来源	退火半径/mm	结果偏差/%
文献[30]	80.0	
非线性电热特征模型	75.7	5.38
线性电热特征模型	92.2	15.25

3 模型结果分析

3.1 土体中雷击引起的热扩散过程分析

土体的电阻率较高, 雷电流转化为热能的效率也较高, 故热效应是雷击土体的重要响应, 因此本节将探讨热力学现象, 重点是热量在土体中的分布。本节采用雷电流峰值 $I_m = 30 \text{ kA}$; 波形 $t_1/t_2 = 8/20 \text{ } \mu\text{s}$; 由于土体的矿物质成分熔点在 $1\,200 \text{ } ^\circ\text{C}$ 左右, 故取熔点为 $1\,200 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。雷电流双指数函数表达式为

$$i(t) = 9.128 \times I_m \times (e^{-11\,522t} - e^{-15\,538t}) \quad (40)$$

图 7 为雷击土体作用后热量分布的等温线。等值线温度分别取 $40, 100, 200, 300, 600, 900, 1\,200 \text{ } ^\circ\text{C}$, $t = 30 \text{ } \mu\text{s}$ 。随着离雷击点距离的增加, 温度逐渐降低。等温线间距反映温度变化的快慢, 靠近中心点的等温线密集, 表示在雷击点附近土体温度梯度大。这是因为在雷击中心区域, 能量集中释放, 大量电荷通过接触点进入土体产生焦耳热, 进而导致局部温度急剧上升。随着距离的增加, 温度下降变缓, 在较远的距离上, 热量分布相对均匀, 图 7 中 $40 \text{ } ^\circ\text{C}$ 等值线距离雷击中心 228 mm , 认为在此以外的区域几乎没有受到雷电流的热效应影响。

本文的非线性电热特征模型考虑电阻率与场强

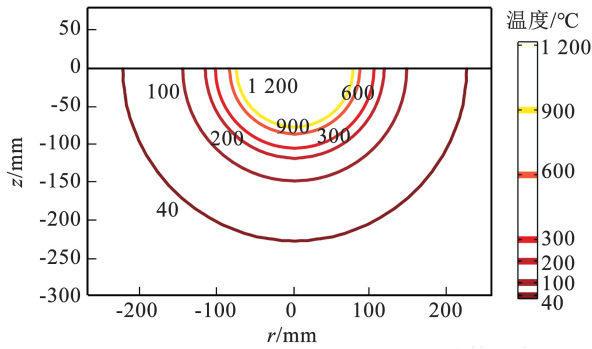


图7 雷击作用过后雷击点竖向截面土体等温线

Fig. 7 Soil isotherms of the vertical section passing through the lightning point after the lightning strike

随着时间的推移,高温区域逐渐向外扩散。图8为不同时刻土体径向温度分布,时刻取2、5、9、14、20、30 μs 。由图8可以看出:随着时间间隔的增大,热扩散的过程却逐渐减慢; $t \leq 14 \mu\text{s}$ 时,温度分布变化较为明显; $t > 14 \mu\text{s}$,温度变化趋于平缓;雷击后30 μs 左右土体热效应达到峰值。这表明随着时间的增加,温度梯度逐渐减小,土体热响应趋于稳态。原因是土体的热容量限制了温度升高的速率,同时由于土体具有一定的导热性,热量会传递至更广泛的区域。

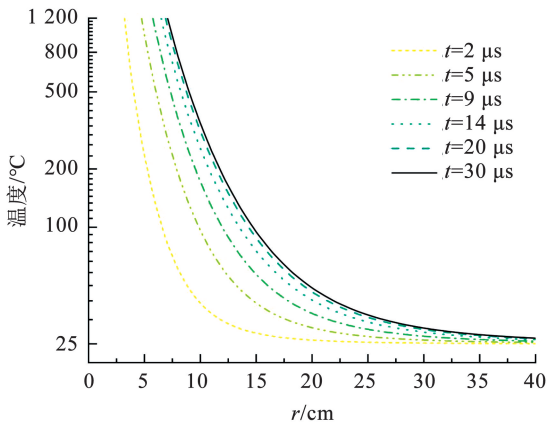


图8 不同时刻土体径向温度分布

Fig. 8 Soil radial temperature distribution at different moments

3.2 雷电流特性参数对热效应的影响

雷电流特性参数影响雷击土体的途径有两种:1)雷电流会影响土体对雷击的电学响应,包括土体在雷击过程中的场强以及受场强控制的土体电阻率;2)雷电影响土体内传导电流,进而影响温度场源项及受温度控制的土体电导率。

为研究峰值电流对雷击土体热效应的影响规律,保持其他参数不变,分别采用10、20、30、40、50、60 kA 峰值电流的雷电进行模拟,土体径向温度分

布如图9所示。由图9可以看出,随着雷电流峰值的增加,土体熔化区域逐渐扩大,即使在最小峰值电流10 kA 雷电作用下,土体中心的温度也迅速上升至熔化点,最大峰值电流60 kA 雷电雷击土体后,熔化半径达10.2 cm。说明雷击所释放的能量与雷电流峰值呈正相关,在雷击点处该能量大部分以电能的形式进入土体,由于土体的电阻率较高,局部温度急剧上升;另一方面,土体具有一定的热导率,热量向四周传递,其影响范围远超接触点雷击通道半径。雷电流峰值越大意味着通过雷击点进入土体的能量越多,产生的热效应越显著,影响范围越大。

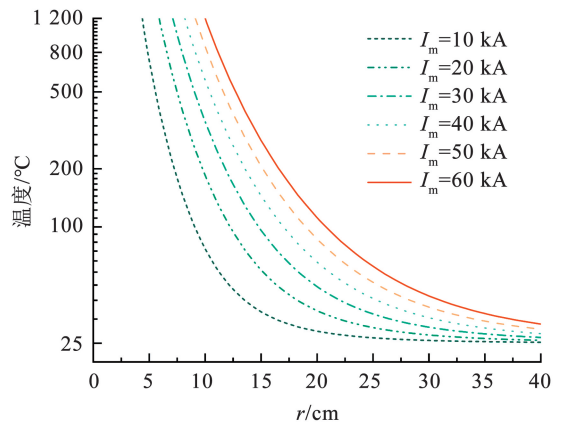


图9 不同峰值电流下土体径向温度分布

Fig. 9 Radial temperature distribution of soil at different peak currents

研究雷电流波形对雷击土体的影响具有实际应用意义,雷电流波形决定了电流上升至峰值和下降至零点的时间,进而影响热量在土体中传播的速度和范围。8/20、10/350 μs 的波形是两种常用的标准雷电流波形^[31],其他波形(8/30、8/40、4/20、6/20 μs)是在标准波形基础上改变了波前或半峰值时间。

图10为不同雷电流波形作用下土体径向温度分布。波前时间 t_1 越短,意味着雷电流前期上升越快(见图2),在初始阶段能量输入更为集中,因此导致雷击点附近土体快速升温,但因热量在短时间内快速释放,其在土体中的传播范围较小。相反,半峰值时间 t_2 越长,意味着雷电流的后程衰减越慢,能量以较平缓的速率向土体传递,导致同一半径的土体温度随 t_2 增加而上升。雷电波形反映了能量释放的快慢和持续时间的长短,直接影响土体加热的程度和范围。其中, t_1 主要影响能量释放的快慢,而 t_2 则影响能量输入的持续时间。图10结果显示后者对热效应影响更显著。

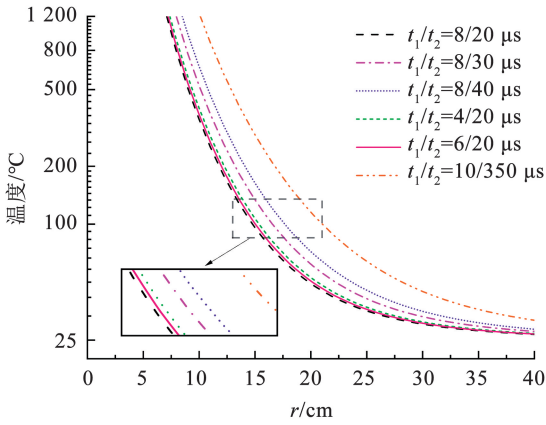


图 10 不同雷电流波形作用下土体径向温度分布

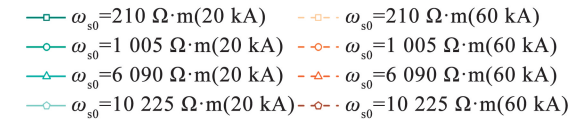
Fig. 10 Radial temperature distribution of soil under different lightning current waveforms

3.3 土体特性参数对热效应的影响

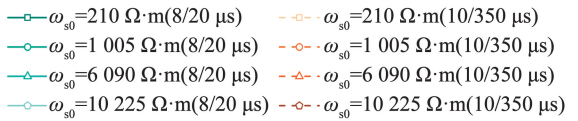
土体特性参数直接决定土体吸收和传递雷电能

量的能力,进一步影响雷击后的热效应。在建筑工程中,合理评估土体的电阻率和比热容可以帮助设计更有效的接地系统和防雷设施。

图 11 为不同初始电阻率(210、1 005、6 090 和 10 255 $\Omega \cdot m$)下雷击作用后土体径向温度分布。其中,图 11(a)的电流峰值 I_m 分别为 20、60 kA,图 11(b)的波形 t_1/t_2 分别为 8/20、10/350 μs 。由图 11 可以看出,初始电阻率对雷击后土体温度分布影响显著。在初始电阻率较低的情况下,土体温度分布表现出相对较高的温度梯度,表明电荷更容易通过土体,电能转化为热能的效率更低,产生的热效应更弱;而在初始电阻率较高的情况下,土体温度迅速上升,且在较大半径范围内保持高温,表明转化为热能的比例增加,产生的热效应更加明显,即在温度控制方程中,初始电阻率增加,源项 Q_j 增大。同时,从峰值电流和波形角度看,图 11 也表明了 3.2 节中对雷电流特性参数分析的正确性。



(a) $I_m=20$ kA和 $I_m=60$ kA



(b) $t_1/t_2=8/20 \mu s$ 和 $t_1/t_2=10/350 \mu s$

图 11 不同初始电阻率下雷击作用后土体径向温度分布

Fig. 11 Radial temperature distribution of soil after lightning strikes with different initial resistivities

土体的比热容较高时,提高单位温度需要吸收的热量更多,进而导致高比热容土体温度升幅较小,这反映了高比热容土体具有更好的热稳定性。图 12显示了不同比热容(800、1 000、1 200、1 400、1 600 $J/(kg \cdot K)$)下雷击作用后土体径向温度分布。其中,图 12(a)的电流峰值 I_m 分别为 20、60 kA,图 12(b)的波形 t_1/t_2 分别为 8/20、10/350 μs 。雷

击过程中,土体单位体积的热能为 $u_T = \rho C_V \Delta T$,可知土体比热容 C_V 与雷击全过程的温升 ΔT 成反比。比热容较高的土体在吸收雷击释放的能量时,其温度上升更为平缓,雷击对高比热容土体造成的破坏较小;比热容较低的土体在吸收同等能量后,其温度变化较大,导致近雷击点的土体更快达到熔化点,从而破坏土体的结构完整性。

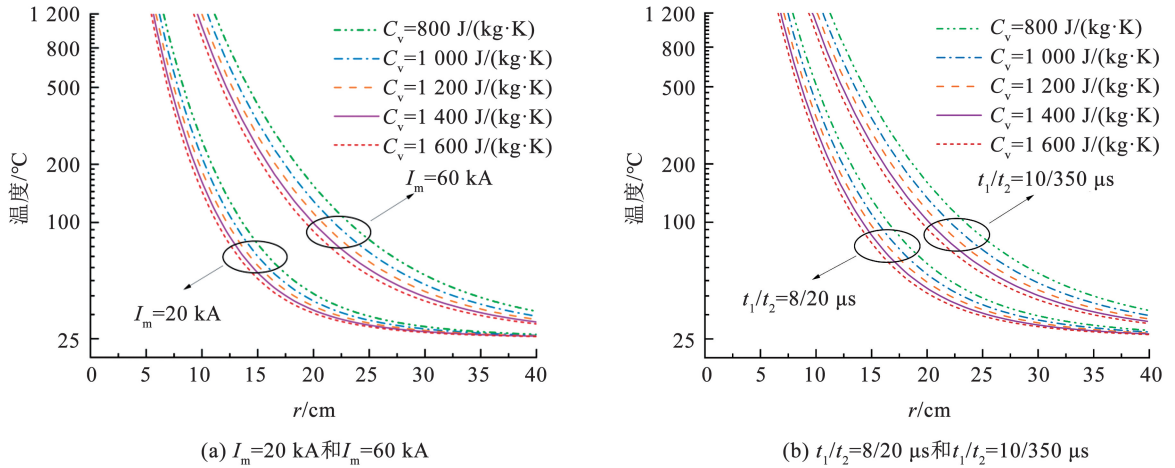


图 12 不同比热容下雷击作用后土体径向温度分布

Fig. 12 Radial temperature distribution of soil after lightning strike under different specific heat capacities

3.4 土体线性和非线性电热特征模型对比

传统的线性电热特征模型假设电阻率和热导率是恒定的,无法准确反映雷击后高温、高电场的外界条件下土体热效应的实际情况。经 2.4 节验证,非线性电热特征模型能更真实地模拟土体在雷击条件下的响应。为了进一步说明非线性因素不可忽略,本节将两者模拟结果进行对比,并结合雷击土体机理分析其原因。

图 13 为线性和非线性电热特征模型的土体熔化半径对比。

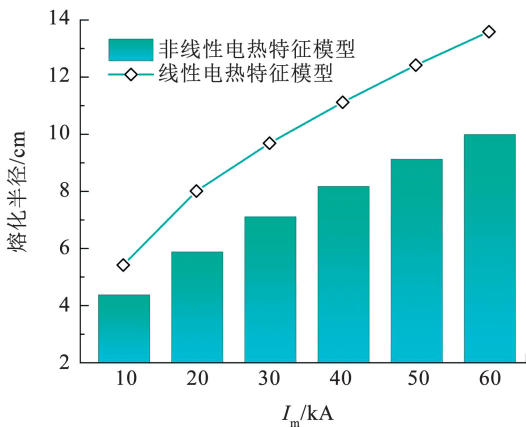


图 13 线性和非线性电热特征模型的土体熔化半径对比

Fig. 13 Comparison of soil melting radius for linear and nonlinear electro-thermal characteristics models

由图 13 可以看出:在非线性电热特征模型中,熔化半径随峰值电流增加的幅度变小;在不同强度的雷电流作用下,熔化半径较线性电热特征模型分别减小 18.92%、26.42%、26.43%、26.32%、25.40%、25.36%,两者熔化半径相差 25% 左右,说明非线性特征因素对热传播的影响不可忽略。具体

来说,土体的电阻率非线性电热特征模型中随电场强度的增加而改变,电阻率的大幅降低使得雷击过程中的平均电阻率小于线性电热特征模型的电阻率,故线性电热特征模型的源项 Q1 偏大。同时,热导率随温度升高而降低的非线性电热特征意味着在高温区域,热量扩散效率下降,从而使得热量在更小的区域内集中,限制了熔化半径的扩展。

图 14 为线性和非线性电热特征模型的土体径向温度分布对比。电阻率的非线性变化意味着随着电场的增强,土体内部的电流通路会改变。在较高的电场强度下,土体的电阻率较低,导致雷电能量转化成热能的部分减少。另一方面,雷击土体产生的高温环境使得土体中的水分蒸发,导致土体从饱和状态向干燥状态转变。水分的蒸发改变了土体的热传递特性,使得热量更难从中心区域向周围扩散。

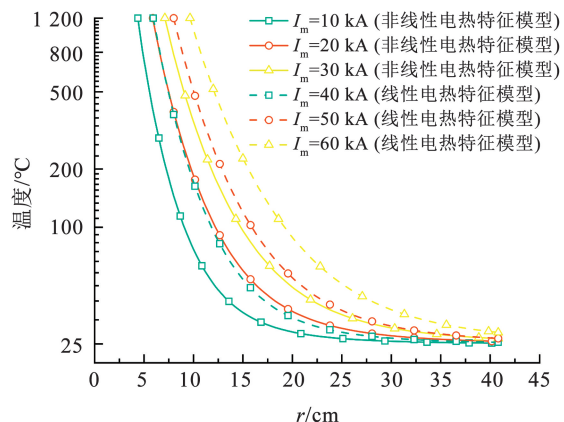


图 14 线性和非线性电热特征模型的土体径向温度分布对比

Fig. 14 Comparison of radial temperature distribution of soil for linear and nonlinear electro-thermal characteristics models

4 结 论

本文基于电热耦合理论,根据土体非线性电热特征,建立了能够反映热效应的雷击土体模型,通过多物理场耦合,模拟由雷击引发的土体温度动态变化和分布特征,并进行了雷电流及土体特性参数对雷击土体温度变化的影响研究。主要结论如下:

1) 雷电特性参数对土体的热效应具有重要影响。随着雷电流峰值的增加,土体在雷击点附近熔化区域扩大。不同的雷电波形决定了电流上升/下降的速度,进而影响热量在土体中的传播速度和深度。短波前时间导致能量在初始阶段集中释放;长半峰值时间使热量以更平缓的速率扩散至更大区域。在本文的参数条件下,雷击后 $30 \mu\text{s}$ 左右土体热效应达到峰值,温度影响半径小于 40 cm 。

2) 土体特性参数直接影响其对雷电能量的吸收和传递能力。较高的电阻率导致源项 Q_1 增大,进而使得热效应更显著;土体比热容与雷击全过程的温升 ΔT 成反比,故较高的比热容使土体在吸收相同能量时温度升幅较小,表现出更好的热稳定性。

3) 与传统的线性电热特征模型相比,本文提出的非线性电热特征模型在考虑土体的电阻率随电场强度和热导率随温度的变化后,能更真实地模拟土体在雷击条件下的响应。与实测数据对比验证表明,非线性电热特征模型在熔化半径和土体径向温度分布方面预测更精确。

参 考 文 献

- [1] CASTRO J M, KELLER F, FEISEL Y, et al. Lightning-induced weathering of Cascadian volcanic peaks [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2020, 552: 116595. DOI:10.1016/j.epsl.2020.116595
- [2] 袁萍, 常轩, 王雪娟, 等. 闪电先导传输过程中通道温度的变化 [J]. *西北师范大学学报(自然科学版)*, 2017, 53(3): 44
YUAN Ping, CHANG Xuan, WANG Xuejuan, et al. Variation of the channel temperature in the transmission of lightning leader [J]. *Journal of Northwest Normal University (Natural Science)*, 2017, 53(3): 44. DOI:10.16783/j.cnki.nwnuz.2017.03.009
- [3] SAIKIA B J, PARTHASARATHY G, SARMAH N C, et al. Fourier-transform infrared spectroscopic characterization of naturally occurring glassy fulgurites [J]. *Bulletin of Materials Science*, 2008, 31(2): 155. DOI:10.1007/s12034-008-0027-z
- [4] RAKOV V A, UMAN M A. *Lightning: physics and effects* [M]. 3rd ed. New York: Cambridge University Press, 2005: 1
- [5] SALARIEH B, DE SILAVA J, KORDI B. High frequency response of grounding electrodes: effect of soil dielectric constant [J]. *IET Generation, Transmission and Distribution*, 2020, 14(15): 2915. DOI:10.1049/iet-gtd.2019.1554
- [6] LI Jingli, YUAN Tao, YANG Qing, et al. Numerical and experimental investigation of grounding electrode impulse-current dispersal regularity considering the transient ionization phenomenon [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2011, 26(4): 2647. DOI:10.1109/TPWRD.2011.2158860
- [7] GHOSH S, DAS S. Effect of lightning on soil characteristics with and without underground cable [C]//2nd International Conference on Control, Instrumentation, Energy and Communication. Kolkata: IEEE, 2016: 264. DOI:10.1109/CIEC.2016.7513765
- [8] RAO Pingping, FENG Weikang, OUYANG Peihao, et al. Numerical simulation of pipeline failure mechanisms under lightning strikes, capturing electric disruption and thermal damage [J]. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2023, 23(5): 2065. DOI:10.1007/s11668-023-01754-0
- [9] JIN Xiao, RAO Pingping, GUAN Wencan. Coupled electric-thermal damage modeling and machine learning for lightning strikes on soil [C]//Proceedings of the 10th International Conference on Big Data and Information Analytics. Chiang Mai: IEEE, 2024: 455. DOI:10.1109/BigDIA63733.2024.10808826
- [10] 饶平平, 项远兵, 崔纪飞, 等. 雷电冲击作用下土体的变形特性分析 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2023, 55(2): 125
RAO Pingping, XIANG Yuanbing, CUI Jifei, et al. Analysis of deformation characteristics of soil subjected to lightning impulse [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2023, 55(2): 125. DOI:10.11918/202203095
- [11] WU Zhilin, RAO Pingping, NIMBALKAR S, et al. A semi-analytical solution for shock wave pressure and radius of soil plastic zone induced by lightning strikes [J]. *Materials*, 2022, 15(6): 2239. DOI:10.3390/ma15062239
- [12] RAO Pingping, OUYANG Peihao, NIMBALKAR S, et al. Analytical modelling of the mechanical damage of soil induced by lightning strikes capturing electro-thermal, thermo-osmotic, and electro-osmotic effects [J]. *Journal of Mountain Science*, 2022, 19(7): 2027. DOI:10.1007/s11629-021-7235-z
- [13] LUO Donghui, LI Jialun, CAO Yongxing, et al. Research on the influence of typical soil parameters on critical breakdown field strength and residual resistivity based on discharge topography [J]. *Energies*, 2021, 14(16): 4810. DOI:10.3390/en14164810
- [14] LIU Yaqing, THEETHAYI N, GONZALEZ R M, et al. The residual resistivity in soil ionization region around grounding system for different experimental results [C]//2003 IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility. Boston: IEEE, 2003: 794. DOI:10.1109/IEMC.2003.1236709
- [15] SEKIOKA S, LORENTZOU M I, PHILIPPAKOU M P, et al. Current-dependent grounding resistance model based on energy balance of soil ionization [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2006, 21(1): 194. DOI:10.1109/TPWRD.2005.852337
- [16] 陆森, 任图生. 不同温度下的土壤热导率模拟 [J]. *农业工程学报*, 2009, 25(7): 13
LU Sen, REN Tusheng. Model for predicting soil thermal conductivity at various temperatures [J]. *Transactions of the CSAE*,

- 2009, 25(7): 13. DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2009.07.003
- [17] WANG Caijin, YANG Yuling, CAI Guojun, et al. Improvement of normalized prediction model of soil thermal conductivity [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2024, 157: 107792. DOI:10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107792
- [18] RAO M M, SINGH D N. A generalized relationship to estimate thermal resistivity of soils [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36(4): 767. DOI:10.1139/t99-037
- [19] TONG Fuguo, JING Lanru, ZIMMERMAN R W. An effective thermal conductivity model of geological porous media for coupled thermo-hydro-mechanical systems with multiphase flow [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(8): 1358. DOI:10.1016/j.ijrmms.2009.04.010
- [20] 张岩, 刘福贵, 汪友华, 等. 改进的双指数函数雷电流波形及其辐射电磁场的计算[J]. 电工技术学报, 2013, 28(增刊2): 133
- ZHANG Yan, LIU Fugui, WANG Youhua, et al. A modify double exponential base-current and its application in evaluating the lightning EM fields [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(Sup.2): 133. DOI:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.2013.s2.025
- [21] 陈渭民. 雷电学原理[M]. 2版. 北京: 气象出版社, 2006: 173
- CHEN Weimin. Principles of lightning science [M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 2006: 173
- [22] WANG Y, ZHUPANSKA O I. Lightning strike thermal damage model for glass fiber reinforced polymer matrix composites and its application to wind turbine blades [J]. Composite Structures, 2015, 132: 1182. DOI:10.1016/j.compstruct.2015.07.027
- [23] PERERA C, RAHMAN M, FERNANDO M, et al. The relationship between current and channel diameter of 30 cm long laboratory sparks [J]. Journal of Electrostatics, 2012, 70(6): 512. DOI:10.1016/j.elstat.2012.08.003
- [24] DONG Qi, WAN Guoshun, GUO Yunli, et al. Damage analysis of carbon fiber composites exposed to combined lightning current components D and C [J]. Composites Science and Technology, 2019, 179: 1. DOI:10.1016/j.compscitech.2019.04.030
- [25] 谭羽非. 工程热力学[M]. 6版. 北京: 化学工业出版社, 2010: 29
- TAN Yufei. Engineering thermodynamics [M]. 6th ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2010: 29
- [26] 朱彬. 土壤电参数变化特性及其对接地装置性能的影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016
- ZHU Bin. Study on the variation characteristics of soil electrical parameters and the influence on grounding device's performance [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016
- [27] 杜宜臻, 李韧, 吴通华, 等. 土壤热导率的研究现状及其进展[J]. 冰川冻土, 2015, 37(4): 1067
- DU Yizhen, LI Ren, WU Tonghua, et al. Study of soil thermal conductivity: research status and advances [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(4): 1067. DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2015.0119
- [28] CÔTÉ J, KONRAD J M. A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, 42(2): 443. DOI:10.1139/t04-106
- [29] ELM I C, CHEN J, GOLDSBY D, et al. Mineralogical and compositional features of rock fulgurites: a record of lightning effects on granite [J]. American Mineralogist, 2017, 102(7): 1470. DOI:10.2138/am-2017-5971
- [30] CHEN J, ELM I C, GOLDSBY D, et al. Generation of shock lamellae and melting in rocks by lightning-induced shock waves and electrical heating [J]. Geophysical Research Letters, 2017, 44(17): 8757. DOI:10.1002/2017GL073843
- [31] Protection against lightning Part 1—General principles: IEC 62305-1: 2010 [S]. Geneva: International Electrotechnical Commission (IEC), 2010