



文章栏目：土壤污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.202203157 中图分类号 X53 文献标识码 A

陈智康, 岳瑞, 刘柳君, 等. 原位电阻加热修复热传递模型构建及数值模拟[J]. 环境工程学报, 2022, 16(8): 2653-2662. [CHEN Zhikang, YUE Rui, LIU LiuJun, et al. Modeling of the heat transfer of in-situ electrical resistance heating remediation and numerical simulation[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(8): 2653-2662.]

原位电阻加热修复热传递模型构建及数值模拟

陈智康¹, 岳瑞¹, 刘柳君¹, 尹立普², 毛旭辉^{1,✉}

1. 武汉大学资源与环境科学学院, 武汉 430079; 2. 中科鼎实环境工程有限公司, 北京 100101

摘要 原位电阻加热 (Electrical resistance heating, ERH) 技术在场地修复中工艺参数的选取较多依赖于工程经验, ERH 热量传递的数值模型能够模拟不同工艺参数下土壤加热的温度场, 从而为 ERH 工艺参数的选取提供理论指导。利用电阻加热土柱装置实验验证了建立的数值模型的准确性, 并应用在场址尺度下探讨了电场强度、电极间距和地下水流动对原位三相电阻加热的影响。结果表明, 模型具有较好的准确性, 实测值和模拟值均方误差为 0.05~12.29, 平均相对误差为 0.42%~5.32%。随着电场强度越大, 土壤升温速率显著加快; 电场强度 $90 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ 时, 综合考虑电极井建设数量、加热时长及能耗, 最适宜的电极间距为 6 m; 对电极附近补水可以显著缩短加热时长。较快的地下水流动会降低场地升温速率, 不利于场地的修复; 对于地下水流速过快的场地应采取适当的工程措施缓解热量流失。本研究结果可为原位电阻加热工程的设计和运行提供参考。

关键词 土壤修复; 原位电阻加热; 数值模拟; 热量传递; 电场强度; 电极间距; 地下水

随着产业升级和城市扩张, 大量工厂搬迁或废弃后遗留的场地存在土壤污染问题, 需要进行土壤修复才能再次开发^[1]。电阻加热技术具有对环境扰动小, 受土壤异质性影响小, 处理深度大等优点, 尤其适合修复含有挥发性、半挥发性有机污染物的污染场地^[2-5]。但在实际修复工程中, ERH 技术的工程参数设计, 例如电极间距、电场强度等, 都会显著地影响场地电阻加热的实际效果^[6], 导致修复周期和成本控制的不确定性。修复场地的污染物分布、地下水流场和土壤特性等往往差异较大, 但工程师只能根据已有工程经验和有限的取样勘探结果, 进行原位加热工程的参数设计。若能够采用建模的方法, 对场地条件下的加热过程进行预测, 将有利于减少设计的盲目性, 帮助缩短工程周期和控制修复成本。

目前, 对于 ERH 技术的数值模型已经有了一定的探索和应用。HIEBERT 等^[7-8]开发了用于模拟单相电阻加热过程的二维有限差分模型, 并研究了不同的横卧电极设置方式对非均质含油地层的加热效果的影响。CARRIGAN 等^[9]将改进的欧姆加热模型与非等温多孔流动和传输模型进行了耦合, 研究了电极阵列的电相位如何影响电阻加热的均匀性。MCGEE 等^[10]进一步简化了模拟多相电阻加热的欧姆方程, 并模拟了电阻加热从非均质油砂中回收沥青的过程。KROL 等^[11]考虑温度对密度、粘度、扩散系数的影响, 建立了二维有限差分模型, 模拟了电阻加热到 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 的情况下对地下水流动的影响, 发现地下水流动方向和流速发生显著变化。许丹芸等^[12]使用有限元方法模拟了电阻加热土壤过程。

收稿日期: 2022-03-23; 录用日期: 2022-05-27

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2019YFC1805700)

第一作者: 陈智康 (1998—), 男, 硕士研究生, 872248471@qq.com; ✉通信作者: 毛旭辉 (1976—), 男, 博士, 教授, clab@whu.edu.cn

尽管关于 ERH 技术的数值模型研究已有一定的开展,但一方面,以往的模型对电阻加热土壤过程中的水分蒸发缺乏关注和进一步的验证;另一方面,大部分模型是针对实际场地的验证评估,对如何运用模型指导 ERH 工艺参数的选取探讨不足。本研究使用 COMSOL 多物理场耦合软件,基于有限元计算方法开展原位电阻加热温度场模拟研究,建立了考虑土壤水分蒸发的模拟原位电阻加热温度场的数值模型。通过对比土柱装置小试实验和数值模拟的结果,验证了数值模型的准确性,并利用数值模型分析了场地尺度下电场强度、电极间距和地下水流动对电阻加热温度场的影响。本研究结果有助于预测修复周期和优化电极井布设,从而达到节约能源和降低修复成本的目的。

1 数值模型与实验方法

1.1 控制方程及条件假设

本研究利用 COMSOL 的传热模块、电流模块、PDE 模块以及电流和传热耦合的电磁热模块,构建土壤电阻加热模型。为简化模型概念,在模拟时做如下假设:1)忽略土壤和水在加热过程中密度、热容随温度的变化;2)将土体视为均质且各向同性的多孔介质,土壤初始温度均匀一致;3)忽略土体在加热过程中的热变形;4)忽略电极和土壤之间的接触电阻;5)由于实验土柱较短,需要考虑水分在低于沸点时的挥发^[13],但在模拟大尺度的场地加热中,忽略水分的挥发;6)忽略水蒸气对热量传递的影响。

电阻加热土壤过程中能量的控制方程如式(1)所示。

$$\rho_{\text{eff}} C_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \sigma E \cdot E^T + m_{\text{LG}} \Delta H_{\text{vap}} + \rho_f C_f u_f \cdot \nabla T \quad (1)$$

式中: ρ_{eff} 为单元的有效密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; C_{eff} 为单元的有效热容, $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$; T 为温度, K ; t 为时间, s ; λ 为导热系数, $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$; σ 为土壤电导率, $\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$; E 为电势梯度, $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$; m_{LG} 为水的气化速率, $\text{kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{s})^{-1}$; ΔH_{vap} 为水的潜热, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$; ρ_f 为流体密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; C_f 为流体热容, $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$; u_f 为流体流速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

土壤单元的有效密度 ρ_{eff} 和有效热容 C_{eff} 由土壤中固,液,气三相的体积分数决定,如式(2)~式(3)所示。

$$\rho_{\text{eff}} = \theta_L \rho_L + \theta_S \rho_S + \theta_G \rho_G \quad (2)$$

$$C_{\text{eff}} = (\theta_L \rho_L C_L + \theta_S \rho_S C_S + \theta_G \rho_G C_G) / \rho_{\text{eff}} \quad (3)$$

式中: θ 表示各相的体积分数; ρ 为各相的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; C 为各相的热容, $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$; 下标 S, L, G 表示固,液,气三相。

土壤含水量的控制方程如式(5)所示。

$$D_L = \alpha (\theta_L - \theta_L^*) \quad (4)$$

$$\frac{\partial \theta_L}{\partial t} = \nabla \cdot (D_L \nabla \theta_L) - \frac{m_{\text{LG}}}{\rho_L} \quad (5)$$

式中: D_L 为导水系数, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; α 为比例常数, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; θ_L^* 为残余饱和度。

液态水变为气态水的情况可分为2种,一种是低于水的沸点时的挥发,一种是到达沸点时的沸腾,用式(6)可以得到水的气化速率。需要注意,只有水的饱和蒸气压(p^*)大于等于外部气压(p_G)且含水量大于0时,沸腾才会发生。可以通过安托因方程^[14](式(7))计算不同温度下水的饱和蒸气压,进而判断温度是否到达沸点。

$$m_{\text{LG}} = m_{\text{vap}} + k_{\text{vap}} \rho_L (p^* - p_G) / p_G \quad (6)$$

$$p^* = 10^{A - B/(C+T)} \quad (7)$$

式中： A 、 B 、 C 为经验常数； m_{vap} 为挥发速率， $\text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{s})^{-1}$ ； k_{vap} 为蒸发速率常数， s^{-1} 。

土壤单元的热导率会随着温度和含水量的变化发生极大的变化，在此使用 TARNAWSKI 等^[15] 推导出的经验公式，如式 (8)~式 (9) 所示。

$$\lambda = \lambda_{\text{dry}} + K_e(\lambda_{\text{sat}} - \lambda_{\text{dry}}) \quad (8)$$

$$K_e = (a + bT + cS_w + dS_w^2) / (1 + eT + fS_w + gS_w^2) \quad (9)$$

式中：下标 sat 和 dry 分别表示饱和和干燥状态的土壤； a ~ g 为经验常数； S_w 为水饱和度。

电阻加热一般使用低频率电压 (50~60 Hz)，产生的电磁波长远大于系统的物理尺寸，位移电流可以忽略，因此可以假设电阻加热产生的电场为准静态电场，可以通过将欧姆定律代入电流连续性方程中来求解电势分布，电流连续性方程如公式 (10) 所示。

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \psi) = 0 \quad (10)$$

土壤电导率则使用 Archie 定律进行计算^[16-17]，考虑温度对电导率的影响^[18]，如式 (11) 所示。

$$\sigma = \sigma_L \cdot S_w^n \cdot \varphi^m \cdot (1 + \beta(T - 298.15)) \quad (11)$$

式中： ψ 为电势，V； φ 为孔隙度； m 、 n 和 β 为经验常数 (m 为胶结系数， n 为饱和度系数， β 为温度系数)； σ_L 为土壤溶液电导率， $\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$ 。

模拟单相交流电加热时，其电势分布与直流电基本一致，可以设置 2 个电极分别为接地和施加的电压。但模拟三相交流电时，电极电势与直流电则完全不同，三相交流电的电极电势可以视为由虚部和实部组成^[19]，如式 (12) 所示。

$$E = E_0 \cdot e^{j(\omega t + \theta)} \quad (12)$$

式中： ω 为角频率， $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ ； t 为时间，s； θ 为相角，° (三相交流电分别为 0°、120° 和 240°)； j 为虚部； E_0 为正弦交流电振幅的绝对值，一般为电压的 $2^{1/2}$ 倍，V。

1.2 几何模型和网格划分

电阻加热土柱装置模型如图 1(a) 所示，装置高 16 cm，内径 4.5 cm。装置的罐体用不导电的聚四氟乙烯制成，内部装填细砂。装置 2 边为对称分布的用螺丝与螺母固定的不锈钢片电极，螺丝作为导电连接，电线连接到螺丝上以引入电压，热电偶从装置底部插入，用于监测土柱中心点的

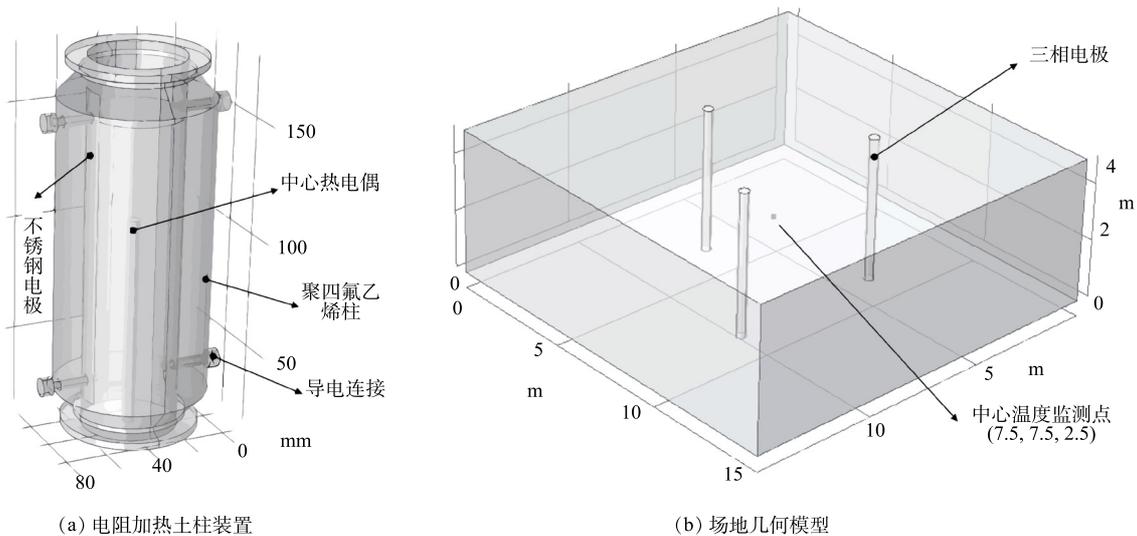


图 1 实验装置与场地模型

Fig. 1 (a) Electrical resistance heating soil column device and (b) site geometric model

温度。使用 Solidworks 对电阻加热土柱装置进行建模, 得到电阻加热土柱装置的几何模型, 再导入到 COMSOL 中用于模拟, 几何模型的网格划分均采用三角单元网格, 单元大小选择细化。

为了模拟实际场地中电阻加热的过程, 构建了图 1(b) 所示的三相电阻加热场地模型。场地模型为长宽 15 m、高 5 m 的长方体, 在场地中部按等边三角形放置 3 根半径 20 cm、高 5 m 的电极, 电极间距为 6 m, 并在 3 个电极构成的等边三角形中心点设置了温度监测点。

1.3 边界条件和参数设置

电阻加热土柱装置数值模拟的边界条件为: 1) 流动边界条件, 所有边界均设置为 0 通量边界条件, 这是因为已在方程中添加了描述水蒸发的汇项; 2) 温度边界条件, 所有边界均设置为自然对流热通量边界; 3) 电势边界条件, 2 个电极分别设置为接地和电势, 其他边界设置为电绝缘边界。土壤的初始温度、含水量、水的电导率和电极电压根据实测得到的初始值设置。对于各项参数的取值如表 1 所示。

电阻加热场地模拟的边界条件为: 1) 流动边界条件, 模拟地下水位上涨时, 底部边界设置为通量边界条件, 其他边界设置为 0 通量边界条件; 2) 温度边界条件, 地下水流入的边界设置为流入边界, 流入温度 10 °C, 其他边界设置为热绝缘边界; 3) 电势边界条件, 3 个电极分别设置为三相电势中的 1 相, 其他边界设置为电绝缘边界。各项参数的设置与土柱装置实验相同。

1.4 实验条件

为验证模型在不同的土壤含水量和土壤溶液电导率时的准确性, 使用电阻加热土柱装置进行了验证实验。由于装置较小, 电场强度较大, 故使用电导率较小的细砂充当模拟土壤。分别向 300 g 细砂中加入 40、50、60、70 mL 的去离子水, 质量分数为 0.3% 的 NaCl 溶液和质量分数为 0.5% 的 NaCl 溶液, 充分搅拌, 并装填进装置中。为了保持砂的孔隙度一致, 在装填时保证装填高度为 15 cm。加入去离子水的砂在 100 V 的条件下进行电阻加热, 加入 NaCl 溶液的砂在 50 V 的条件下进行电阻加热。由于模拟只探究电阻加热的升温过程, 所以实验只进行到温度到达 100 °C 就停止, 未加热到 100 °C 时则在加热 2 h 后停止。

为模拟实际工程环境下土壤内热量传递规律, 用实际场地模型探究了地下水流动、电场强度和电极间距的变化对土壤温度变化的影响。模拟的工况如表 2 所示, 其他参数与表 1 一致, 土壤溶液电导率设为 0.1 dS·m⁻¹。

表 1 数值模拟参数

Table 1 Numerical simulation parameters

模拟参数	取值	模拟参数	取值
液体密度, ρ_L	1 000 kg·m ⁻³	温度系数, β	0.02
固体密度, ρ_S	2 650 kg·m ⁻³	比例常数, a	5×10 ⁻⁶ m ² ·s ⁻¹
气体密度, ρ_G	1.9 kg·m ⁻³	经验常数, A	8.071 31
液体热容, C_L	4 200 J·(kg·K) ⁻¹	经验常数, B	1 730.63
固体热容, C_S	920 J·(kg·K) ⁻¹	经验常数, C	233.426
气体热容, C_G	1 000 J·(kg·K) ⁻¹	胶结系数, m	1.44
湿导热系数, λ_{sat}	1.87 W·(m·K) ⁻¹	饱和度系数, n	2
干导热系数, λ_{dry}	0.23 W·(m·K) ⁻¹	水的潜热, ΔH_{vap}	2 257.2 kJ·kg ⁻¹
孔隙度, ϕ	0.5	蒸发速率系数, k_{vap}	1×10 ⁻⁶ s ⁻¹

表 2 数值模拟工况

Table 2 Numerical simulation conditions

工况	电场强度/ (V·m ⁻¹)	初始水 饱和度	地下水流速/ (m·s ⁻¹)	电极 间距/m	地下水涨速/ (m·d ⁻¹)
A-1	30	0.6	0	6	0
A-2	60	0.6	0	6	0
A-3	90	0.6	0	6	0
B-1	90/60	0.6	0	3	0
B-2	90/60	0.6	0	6	0
B-3	90/60	0.6	0	9	0
C-1	90	1	0.1	6	0
C-2	90	1	0.2	6	0
C-3	90	1	0.3	6	0
D-1	90	0.6	0	6	0.05
D-2	90	0.6	0	6	0.1
D-3	90	0.6	0	6	0.2

2 结果与讨论

2.1 电阻加热土柱装置实验及模型验证

图 2 给出了不同含水率和电导率的情况下，土柱中心热电偶监测的温度变化。可以看出，随着含水量和土壤溶液电导率的增加，中心点加热到 100 °C 所需要的时间不断减小。而当含水量较小或者土壤溶液电导率较小时，升温速率较小，甚至出现温度平台的情况。升温速率较小是由于此时土壤电导率较小^[20]，电流产生的焦耳热较小。升温速率减小则是因为，土柱中挥发掉的水份随着加热时间的增长逐渐变多^[21]，进一步降低了土壤电导率，使电流产生的焦耳热进一步减少。此外，由图 2(a) 可以看到，加入不同体积的去离子水后的细砂依然可以被加热，而去离子水的电导率几乎可以忽略不计。这说明，细砂中的离子溶解进入了去离子水中，提高了去离子水的电导率。

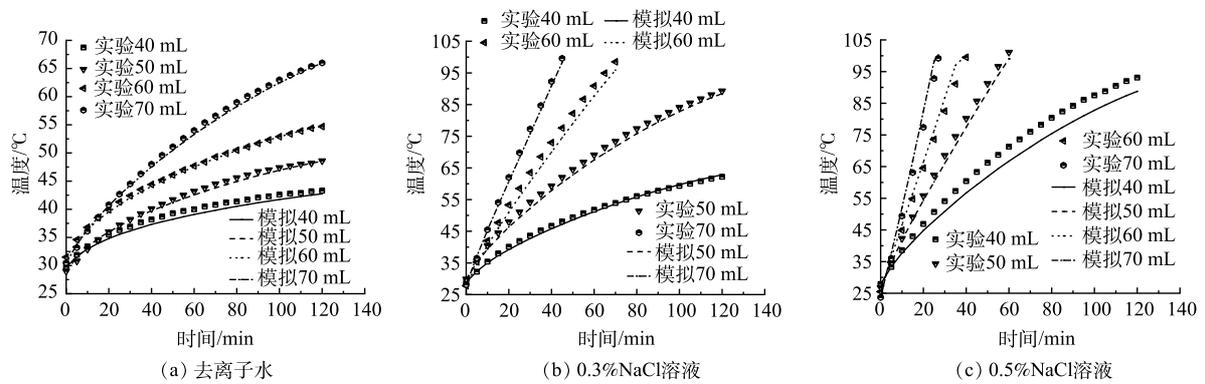


图 2 土柱加入不同体积不同溶液中心点温度实测值与模拟值

Fig. 2 Measured and simulated values of the center point temperature of the soil column, added with different volumes of different solutions

为验证模型的可靠性，将不同含水量和土壤溶液电导率的电阻加热实测值和模拟值进行了对比。利用均方误差 MSE 和平均相对误差 MRE 评价模拟值和实测值的差异 (式 (12)~式 (13))。

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_i - S_i)^2 \quad (13)$$

$$MRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{M_i - S_i}{M_i} \right| \times 100 \quad (14)$$

式中： n 为实测数据个数； M_i 、 S_i 分别为第 i 个实测和模拟得到的数据。

图 2(a) 中给出的模拟值趋势线与实测值差异较小，实测值和模拟值均方误差为 0.05~0.66，平均相对误差为 0.42%~1.97%。较小的均方误差和平均相对误差表明，实测数据与模拟数据之间的偏差较小，模型具有较好的准确性。加入不同体积的 0.3%NaCl(图 2(b)) 和 0.5%NaCl(图 2(c)) 溶液，土壤溶液电导率随着 NaCl 溶液的体积和质量分数的增加而增大。对比实测和模拟预测结果，均方误差为 0.38~12.29，平均相对误差为 1.15%~5.32%。这表明，在较宽的土壤电导率范围内 (加入 70 mL 的 0.5%NaCl 溶液时，土壤的电导率为 $1.1 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$)，实测数据与模拟数据之间的偏差也较小，模型用于预测不同电导率的土壤加热过程是可靠的。误差产生的原因可能是，对土壤原有的电导率，实验过程中空气热对流导致的热量散失以及水分挥发速率的估值存在一定的偏差。

2.2 场地条件下电场强度和电极间距对电阻加热的影响

电场强度是影响电阻加热升温速率的重要因素，由电极电压和电极间距共同决定，为了考察

场地尺度下的温度场以及各条件对温度场的影响,建立了图1(b)的场地模型。图3和图4分别展示了电极间距6 m时,30、60、90 $\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$ 电场强度下加热70 d后,温度场的横截面以及位于3个电极中心点(见图1(b))温度的变化。从图3可以看出,电场强度越大,土壤升温速率越快,电极附近的升温更快,温度更高。这与MCGEE等^[10]和HAN等^[22]的研究结果是一致的。电流产生的焦耳热随电场强度的增大而增大,电场强度越大,土壤升温速率越快;电极附近的电流密度最高,产生的焦耳热最多,所以土壤升温速率更快。

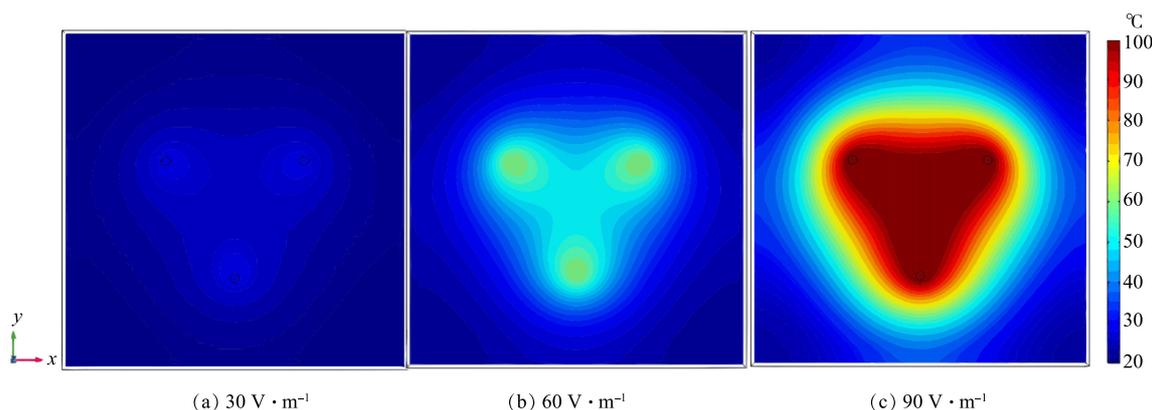


图3 不同电场强度下加热70 d模拟场地横截面温度场

Fig. 3 Cross-sectional temperature field of the site heated for 70 days under different electric field intensities

从图4可以看到,场地在加热90 d后,30、60和90 $\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$ 电场强度获得的中心温度分别为25.5、49.1和100.0 $^{\circ}\text{C}$,中心点的平均升温速率分别为0.079, 0.420和1.210 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}^{-1}$ 。由式(1)可知,焦耳热与电场强度的平方成正比,电场强度为30、60、90 $\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$ 时中心点升温速率之比应为1:4:9,小于模拟得到的比值,即1:5.3:15.5。这说明,中心点的温度可能是电流焦耳热和外部热传导叠加共同决定。此外,电场强度为90 $\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$ 时,当中心点温度达到97 $^{\circ}\text{C}$ 后,升温速率明显放缓。这是因为,此时的电极温度已经达到水的沸点,电极土壤水分蒸发带走了大量热量,导致土壤热导率和土壤电导率下降,从而使升温速率下降。

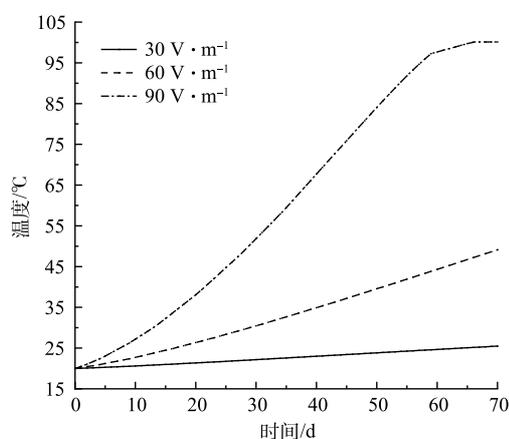


图4 电场强度对模拟场地中心点温度变化的影响

Fig. 4 Effect of electric field intensity on central point temperature of simulated site

电极间距的设置决定了电极井的数量,会极大地影响修复场地的成本和热传导过程。为探究电极间距这一单因素对电阻加热过程的影响,在保持电场强度90 $\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$ 不变的条件下,模拟电极间距3、6和9 m时中心温度的变化,结果如图5所示。从图5(a)可以看出,在电场强度为90 $\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$,电极间距为3、6和9 m时,中心点的温度达到100 $^{\circ}\text{C}$ 的时间分别为84、62和75 d,达到100 $^{\circ}\text{C}$ 的能耗分别为10 418、23 375和51 311 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。综上可知,6 m为最适宜的电极间距,此时中心点的升温速率最快,且相较于电极间距为3 m时场地修复需要布设的电极井数量更少,相较于电极间距为9 m时需要的能耗更少。从图5(a)还可以看出,随着电极间距的增大,中心点升温速率先增大后减小。这是因为,为了保证电场强度一定,电压随电极间距增大而增大,导致电极处的升温速

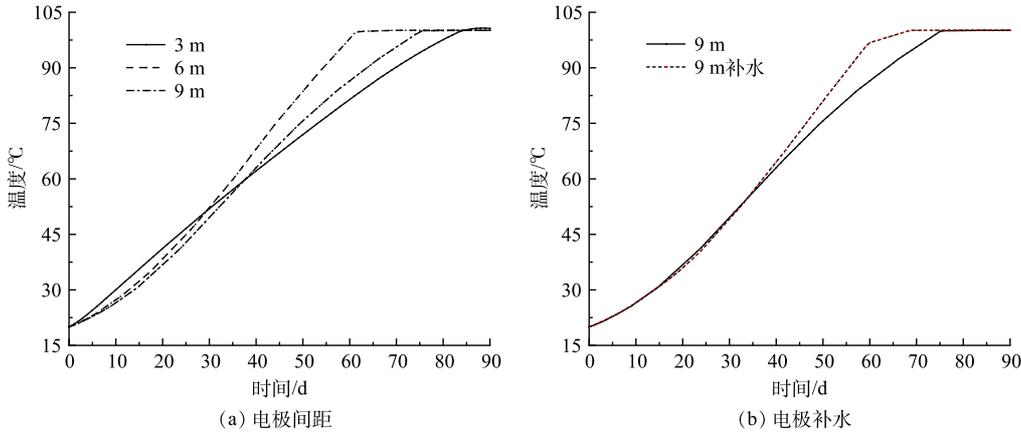


图 5 $90 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ 电场强度下电极间距变化和电极补水对模拟场地中心点温度的影响

Fig. 5 Effect of electrode spacing and replenishment of water near the electrode on central point temperature of simulated site under the electric field intensity of $90 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$

率也随之增大，这一定程度上弥补了间距增大导致的中心点热传导距离增大的不足。但是，9 m 间距下的电压增加，造成电极附近温度过早达到水的沸点，导致电极周围土壤水分过早蒸发，土壤热导率和电导率下降，升温速率略为下降。

为了考察电极附近土壤水分蒸发对中心点升温速率的影响，模拟了电场强度 $90 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ 、电极间距为 9 m 时，对电极附近补水的情况下，中心点温度的变化。从图 5(b) 可以看到，在加热 40 d 后，补水的情况下中心点温度明显高于不补水的情况，补水的情况下中心点的温度达到 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 的时间为 68 d，比不补水的情况下早 8 d。此结果表明，电极周围土壤水分过早蒸发是造成升温速率下降的原因之一，补水可以使土壤含水率增大，增加土壤的电导率和热导率，提高了升温速率。这与葛松等^[3]的研究结果一致。监测电极的电流变化，并及时对电极附近进行补水，对于更快加热到目标温度至关重要。

2.3 场地条件下地下水流动对电阻加热的影响

使用原位电阻加热的场地一般修复深度都较大，有必要考虑地下水流动和地下水位变化对温度场的影响。为进行预测，分别设定了 0 、 0.1 、 0.2 、 $0.3 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ 的地下水流速下加热 30 d 和 0 、 0.05 、 0.10 、 $0.20 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ 的地下水上涨速度下加热 30 d 的条件进行模拟，流入的地下水出的温度假定为 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ ，温度场的变化结果如图 6 和图 7 所示。从图 6 可以看到，随着地下水流速的增加，场地左侧的温度逐渐降低到 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ ，温度场右移的趋势越明显，中心点的最高温度从 $100.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 降低到 $38.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。这说明，较高的地下水流速会将场地中的热量带向下游，对场地升温速率造成不利影响，与 MUNHOLLAND 等^[23]在二维沙箱中得到的结果一致。实际工程中应尽量减小地下水流速，必要时可增加侧向的物理屏障来形成止水帷幕，或通过蒸汽注入等手段来增加流入地下水的温度。

从图 7 可以看到，随着地下水水位上涨速度提升至 $0.1 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ ，场地下部和两侧的温度逐渐降低到 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ ，但由不饱和区域变为饱和区域的土壤升温速率上升，中心点最高温度从 $51 \text{ }^\circ\text{C}$ 升高到 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 。随着地下水水位上涨速度达到 $0.2 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ ，相较于 $0.1 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ 时，温度场明显向上移动，中心点最高温度从 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 降低到 $54 \text{ }^\circ\text{C}$ 。这是因为，地下水水位上涨可以起到一定的补水作用，提高不饱和区域土壤的电导率，从而提高土壤升温速率，但地下水上涨速度过快还是会导致流失的热量多于通过补水增加的焦耳热，使得场地温度从底部开始下降，不利于场地的修复。应当指出，由于实际场地地层的复杂性，地下水的流速和流向并不是均匀的。因此，对于非均质地层，可以建立相应的多模块的空间耦合模型，通过改变各地层模块的物理参数，从而实现数值模拟目标。

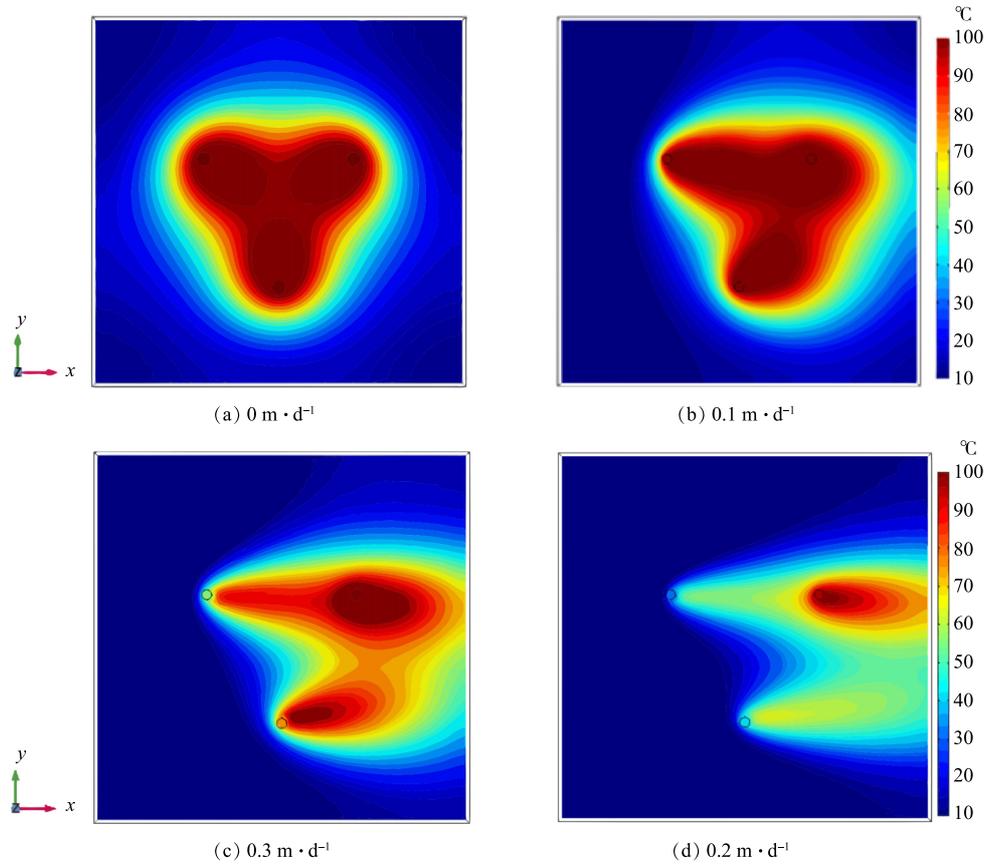


图6 地下水流速对场地横截面温度场的影响

Fig. 6 Influence of groundwater velocity on temperature field of site

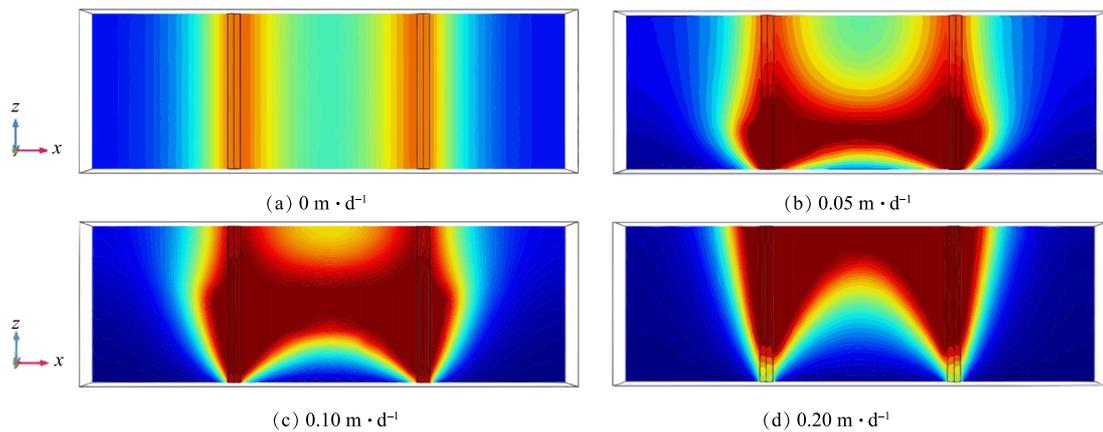


图7 地下水上涨速度对场地纵截面温度场的影响

Fig. 7 Influence of groundwater rising speed on temperature field of site

3 结论

1) 电阻加热温度场数值模型与土柱装置实验数据吻合度较好, 模拟值和实测值均方误差为0.05~12.29, 平均相对误差为0.42%~5.32%, 数值模型具有较好的预测准确性。

2) 场地模型研究发现, 升温速率与电场强度成正比, 电极处升温速率最快; 电场强度为

90 V·m⁻¹时6 m为最适宜的电极间距, 此时中心点升温速率最快, 能耗相对较低, 需要的电极井较少; 模型考虑水分蒸发的情况下, 电极周围土壤水分会更早蒸发, 导致土壤升温速率下降, 此时对电极附近补水可以显著增加土壤升温速率, 故在实际工程中应监测电流和功率, 并及时对电极附近进行补水。

3) 场地地下水流动会带走热量, 不利于场地的热修复。但对于不饱和场地, 地下水位上涨速度小于等于0.1 m·d⁻¹时可以起到补水作用, 提高场地升温速率。故对于地下水流速过高的场地应采取水力平衡或设置止水帷幕等工程措施以缓解热量流失。

参 考 文 献

- [1] 苗竹, 任贝, 吕正勇, 等. 工业污染场地修复现状[J]. *资源节约与环保*, 2020(3): 21-22.
- [2] BEYKE G, FLEMING D. In situ thermal remediation of DNAPL and LNAPL using electrical resistance heating[J]. *Remediation Journal*, 2005, 15(3): 5-22.
- [3] 葛松, 孟宪荣, 许伟, 等. 原位电阻热脱附土壤升温机制及影响因素[J]. *环境科学*, 2020, 41(8): 3822-3828.
- [4] SLEEP B E, MA Y F. Thermal variation of organic fluid properties and impact on thermal remediation feasibility[J]. *Journal of Soil Contamination*, 2008, 6(3): 281-306.
- [5] HORST J, MUNHOLLAND J, HEGELE P, et al. In situ thermal remediation for source areas: technology advances and a review of the market from 1988–2020[J]. *Ground Water Monitoring & Remediation*, 2021, 41(1): 17-31.
- [6] 田焱, 杨永刚, 韩自玉, 等. 电阻加热条件优化及其对污染土壤中苯并(a)芘的去除[J]. *环境工程学报*, 2019, 13(10): 2336-2346.
- [7] HIEBERT A D, VERMEULEN F E, CHUTE F S, et al. Numerical simulation results for the electrical heating of athabasca oil-sand formations[J]. *Spe Reservoir Engineering*, 1986, 1(1): 76-84.
- [8] HIEBERT A D, CAPJACK C E, CHUTE F S, et al. A simulation code for investigating 2D heating of material bodies by low frequency electric fields[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 1983, 7(5): 366-371.
- [9] CARRIGAN C R, NITAO J J. Predictive and diagnostic simulation of in situ electrical heating in contaminated, low-permeability soils[J]. *Environmental Science & Technology*, 2000, 34(22): 4835-4841.
- [10] MCGEE B C W, VERMEULEN F E. The mechanisms of electrical heating for the recovery of bitumen from oil sands[J]. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 2007, 46(1): 28-34.
- [11] KROL M M, SLEEP B E, JOHNSON R L. Impact of low-temperature electrical resistance heating on subsurface flow and transport[J]. *Water Resources Research*, 2011, 47(5): W05546.
- [12] 许丹芸, 张亚宁, 朱玲, 等. 基于COMSOL模拟的有机污染土壤ERH修复工艺优化[J]. *环境工程学报*, 2021, 15(11): 3642-3650.
- [13] TAO G L, LEI D, LIU L S, et al. Prediction of soil water characteristic curve based on soil water evaporation[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 2021: 1-14.
- [14] YAWS C L, YANG H C. To estimate vapor pressure easily[J]. *Hydrocarbon Processing*, 1989, 68(10): 65-70.
- [15] TARNAWSKI V R, LEONG W H, BRISTOW K L. Developing a temperature-dependent Kersten function for soil thermal conductivity[J]. *International Journal of Energy Research*, 2000, 24(15): 1335-1350.
- [16] ARCHIE G E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics[J]. *Transactions of the AIME*, 1942, 146(1): 54-62.
- [17] 陈仁朋, 陈伟, 王进学, 等. 饱和砂性土孔隙水电导率特性及测试技术[J]. *岩土工程学报*, 2010, 32(5): 780-783.
- [18] MA R J, MCBRATNEY A, WHELAN B, et al. Comparing temperature correction models for soil electrical conductivity measurement[J]. *Precision Agriculture*, 2011, 12(1): 55-66.
- [19] HEGELE P R, MCGEE B C W. Managing the negative impacts of groundwater flow on electrothermal remediation[J]. *Remediation Journal*, 2017, 27(3): 29-38.
- [20] FU Y W, HORTON R, REN T S, et al. A general form of Archie's model for estimating bulk soil electrical conductivity[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 59(7): 126160.
- [21] 唐朝生, 施斌, 顾凯. 土中水分的蒸发过程实验研究[J]. *工程地质学报*, 2011, 19(6): 875-881.
- [22] HAN Z Y, JIAO W T, TIAN Y, et al. Lab-scale removal of PAHs in contaminated soil using electrical resistance heating: Removal efficiency and alteration of soil properties[J]. *Chemosphere*, 2020, 23(9): 124496.
- [23] MUNHOLLAND J L, MUMFORD K G, KUEPER B H. Factors affecting gas migration and contaminant redistribution in heterogeneous porous media subject to electrical resistance heating[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2016, 18(4): 14-24.

(责任编辑: 金曙光)

Modeling of the heat transfer of in-situ electrical resistance heating remediation and numerical simulation

CHEN Zhikang¹, YUE Rui¹, LIU Liujun¹, YIN Lipu², MAO Xuhui^{1,*}

1. School of Resources and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 2. China State Science Dingshi Environmental Engineering Corporation Limited, Beijing 100101, China

*Corresponding author, E-mail: clab@whu.edu.cn

Abstract The selection of process parameters of in-situ electrical resistance heating (ERH) technology in site restoration is still lack of scientific theoretical guidance. A numerical model of ERH heat transfer was established to simulate the soil temperature field with different operation parameters, so as to provide theoretical guidance for the selection of operation parameters. The accuracy of the model was verified by the ERH experiment using a soil column device, and the effects of electric field intensity, electrode spacing and groundwater flow on the soil temperature field during in-situ three-phase resistance heating were discussed at a site scale. The results showed that the mean square error between measured and simulated values was in the range of 0.05~12.29, and the average relative error ranged from 0.42% to 5.32%, indicating that the model was of good accuracy. With the increase of electric field intensity, the soil heating rate increased significantly. When the electric field strength was $90 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$, considering the number of electrode wells, heating time and energy consumption, the suitable electrode spacing was 6 m. Replenishing water to the heating electrode could significantly shorten the heating time. Rapid groundwater flow reduced the temperature rising rate of the site, which was not conducive to the remediation of the site. Appropriate engineering measures should be taken to alleviate the heat loss in the site with fast groundwater flow rate. This study provides a reference for the design and running of in-situ ERH remediation engineering.

Keywords soil remediation; in-situ electrical resistance heating; numerical simulation; heat transfer; electric field strength; electrode spacing; groundwater