



文章栏目：土壤污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.202110147 中图分类号 X53 文献标识码 A

刘立朋, 徐梦奔, 顾海林, 等. 回填材料对土壤原位热传导修复的影响及数值模拟[J]. 环境工程学报, 2022, 16(2): 555-564. [LIU Lipeng, XU Mengben, GU Hailin, et al. Effects of backfill materials on in-situ thermal conduction heating remediation of soil and numerical simulation[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(2): 555-564.]

回填材料对土壤原位热传导修复的影响及数值模拟

刘立朋¹, 徐梦奔¹, 顾海林^{1,✉}, 詹明秀^{1,2}, 徐旭¹, 焦文涛², 籍龙杰^{2,3}, 田汪洋⁴, 张涛⁵, 吕韬⁵, 池作和¹

1. 中国计量大学计量测试工程学院, 杭州 310018; 2. 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域国家重点实验室, 北京 100085; 3. 北京建工环境修复股份有限公司, 污染场地安全修复技术国家工程实验室, 北京 100015; 4. 浙江宜可环保科技有限公司, 湖州 313000; 5. 广西金投环境科技有限公司, 南宁 530022

摘要 原位热传导修复技术是一种有机污染土壤高效修复手段。由于施工过程中加热井与土壤间会存在一定空隙, 关于是否使用回填材料以及回填材料的选取原则, 尚未有明确的指导意见。利用实验和数值模拟方法, 对原位热传导修复过程中回填材料的影响进行了研究, 分析了不同加热温度 (200、400、600、800 °C)、回填材料 (空气、原土)、回填厚度 (40、100、150 mm) 对传热的影响。结果表明, 基于实验数据所建立的原位热传导数值预测模型是可靠的, 模拟计算值与实测值最小平均相对误差为 6.69%; 当加热温度高于 450 °C 时, 无回填料时传热效果更好; 当加热温度小于 300 °C 时, 用土壤回填较好; 在 300~450 °C 时, 有无回填料传热效果相差不明显; 原位热传导修复技术工程在应用过程中, 回填材料厚度 100 mm 时传热效果最佳。本研究结果可为污染土壤原位热传导修复的工程实践提供参考。

关键词 有机污染土壤; 原位热传导修复; 回填料; 热量传递; 数值模拟

原位热传导修复技术具有适用范围广、修复周期短、无二次污染等优点^[1], 是一种高效去除土壤污染物的原位修复技术^[2]。原位热传导修复技术修复污染地块的主要作用机理是通过燃气加热或电加热的方式将土壤加热到目标温度, 同时, 经过蒸发、蒸馏、沸腾、水解、氧化、热解等过程将污染物去除^[3]; 针对不同污染物, 其具体作用机理可能不同^[4-6], 但影响污染物迁移的关键因素是热驱动力^[7]。

原位热传导修复的加热区间为 200~900 °C, 在加热器附近主要传热方式为辐射和传导传热, 在修复地块较远处大部分加热是由热传导引起的^[8-10]。在原位热传导修复施工过程中, 加热井与周边土壤往往会存在一定的空隙, 即回填区。回填区的存在会大大增强加热器附近的辐射效果, 甚至达到节能降耗的目的^[11-12]。原位热传导修复的主要研究方向为污染物去除效率、能耗控制策略、多技术融合等^[1-13], 但对回填区传热效果的研究还不够深入, 目前, 对回填区传热效果的研究主要

收稿日期: 2021-10-29; 录用日期: 2021-12-01

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2018YFC1802100); 重庆市科技局技术创新与应用示范 (社会民生类重点研发) 项目 (cstc2018jscx-mszdX0064)

第一作者: 刘立朋 (1995—), 男, 硕士研究生, lgreedy@126.com; ✉通信作者: 顾海林 (1990—), 男, 博士, 讲师, hlg@cjlu.edu.cn

集中于埋地电缆、地源热泵等领域。

在埋地电缆研究领域中,电缆产生的热量必须通过周围的土壤散失,以达到防止绝缘材料融化、电缆稳定工作的目的。当热量由内向外传导时,电缆附近的湿气发生迁移,从而使得电缆周围土壤含水率下降,导热性能下降,最终会导致电缆温度的升高^[14-15]。AHMAD等^[16]对地下电力电缆周围填充材料的热性能进行分析发现,通过加强热桥和填充平滑颗粒内缺陷的方法,能够增强干燥颗粒的热传导能力。贺永智等^[17]建立了水平排列电缆数值计算模型,经研究发现,直埋电缆覆土层材质中,石英砂传热效果显著高于土壤,更有助于电缆的安全运行。

地源热泵(GSHP)是一种充分利用低品位热能的高效节能装置^[18]。回填材料作为地下可利用的浅层地热能和换热器的传热介质,对埋地管换热器与土壤之间的换热能力有直接的影响^[19]。LIU等^[20]对石英砂-膨润土-碳纤维混合物作为地源热泵中钻孔回填材料的热机械性能进行评估发现,砂粒尺寸越大,石英砂-膨润土-碳纤维混合物的导热系数越高。刘湘云等^[21]对不同回填材料下换热器性能进行了分析,结果表明,在相同含水率条件下,混凝土的导热效果最好。雷彦鹏^[22]的研究结果表明,在推进地源热泵技术的发展和提升能源利用率过程中,回填材料起着至关重要的作用。

大多数回填区对传热影响的研究是在低温下(小于100℃)进行,部分在高温下进行的实验证明了回填区的存在会显著增强附近土壤的换热效果^[23],但回填区在原位热传导高温修复下对传热的影响研究还不够充分,这包括加热温度、回填材料、回填厚度。因此,本研究将对原位热传导修复过程中回填材料对传热效果的影响进行全方面的评估,包括回填材料种类、回填材料厚度以及加热温度。通过实验和数值模拟的方法,探究回填材料在不同情况下对传热效果的影响,以为原位热传导修复技术工程实践提供参考。

1 研究方法

1.1 实验方法

1) 实验装置。实验装置由加热棒、加热套管、土壤容器、电控箱和测温装置5部分组成,实验装置主体如图1所示。土壤容器为内径820 mm、高600 mm的亚克力圆柱体,其中,圆心位置布置电加热棒和加热套管。电加热棒直径为40 mm,垂直放置于土壤容器中心,有效加热距离930 mm。加热套管圆心与土壤容器圆心重合,完全放置在容器中,加热套管直径140 mm,高600 mm。加热套管外壁到同心圆柱(直径220 mm)所属区域为回填材料填充区域,同心圆柱到土壤容器内壁填充污染场地土壤。

土壤容器内共分为3层,第一层为加热层,由加热棒外壁到加热套管内壁所属区域组成;第二层为回填层,由加热套管外壁到同心圆柱所属区域组成;第三层为土壤层,由同心圆柱到土壤容器内壁组成。电加热棒与380 V电控箱相连,在回填层外壁,距土壤容器底端300 mm处均匀分布6个K型热电偶,所成夹角均为60°。

2) 实验材料。选取土壤、空气分别作为有无回填的代表性材料,回填层厚度为40 mm。为了保证实验初始土样的一致性,利用18目筛子对回填材料进行筛分;为了保证初始含水率一致,利

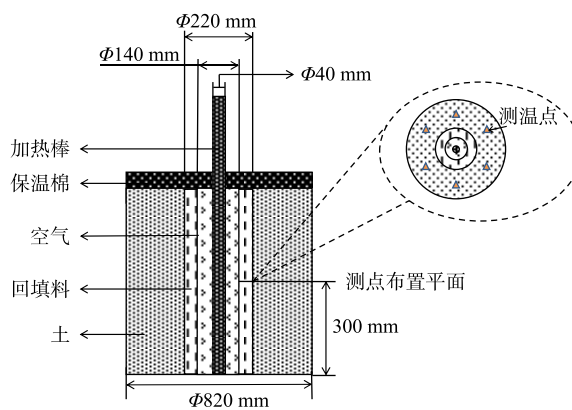


图1 实验装置结构图

Fig. 1 Structure diagram of the experimental device

用烘箱提供 105 ℃ 高温对筛分后的土壤烘干 12 h，冷却备用。利用 Hot-Disk 热分析仪对回填材料的导热系数、比热容进行多次测量，以获得准确的物性参数。

3) 实验工况。通过 2 组实验，研究了回填材料种类和加热温度对原位热传导修复的传热影响。实验在表 1 所示的 2 组实验 8 种工况下进行，每组实验回填材料相同，加热温度不同，各组间回填材料存在差异。

1.2 数值模拟方法

1) 控制方程和假设。原位热传导修复传热过程涉及热传导和热辐射，本研究利用 COMSOL

传热模块下的固体和流体传热模块和参与介质中的辐射模块，构建原位热传导修复传热模型。对此模型作以下假设：土壤是均匀的、刚性的且各向同性的材料；温度变化对土壤热物性的影响忽略不计；加热层为不流动空气，无对流传热；有回填材料土壤时只存在热传导传热，因为回填层热辐射通量远小于热传导通量；回填材料为空气时，空气受热不流动，无对流传热。

在这些假设中，控制固体和流体运动的稳态能量方程见式 (1) 和式 (2)。

$$\rho C_p u \nabla T + \nabla(q + q_r) = Q \quad (1)$$

$$q = -k \nabla T \quad (2)$$

式中： ρ 为材料密度， $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ； C_p 为恒压比热容， $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ ； u 是平移运动的速度矢量， $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ； q 是传导热通量， $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ； Q 为热源， $\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$ ； k 为材料导热系数， $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ； q_r 是辐射热通量， $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

辐射射线与介质相互作用且发生在不完全透明的介质时，利用参与介质中的辐射模块计算 q_r 辐射热通量。该模块用于计算射线传播引起的热量、考虑了吸收、发射和散射的辐射。辐射热源项计算见式 (3)。

$$Q = \kappa(G - 4\pi I_b(T)) \quad (3)$$

式中： κ 为吸收系数， m^{-1} ； G 是入射辐射， $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ； $I_b(T)$ 是黑体辐射强度， $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ ，分别由式 (4)、式 (5) 和式 (6) 定义。

$$I_b(T) = \frac{n_r^2 \sigma T^4}{\pi} \quad (4)$$

$$G = \sum_{i=1}^N \omega_i I_i \quad (5)$$

$$S_i \nabla I_i = k I_b(T) - \beta I_i + \frac{\sigma_s}{4\pi} \sum_{j=1}^N \omega_j I_j \phi(S_i S_j) \quad (6)$$

式中： n_r 是折射率，无量纲常数； σ 为 Stefan-Boltzmann 常数， $\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)^{-1}$ ； β 是消光系数， m^{-1} ； σ_s 是散射系数， m^{-1} ，由于空气的散射辐射能的能力很弱，在计算中 σ_s 取 0； S_i 是第 i 个离散坐标； I_i 是辐射强度的第 i 个分量； ω_i 是第 i 个正交权重。

2) 边界条件和参数设置。原位热传导修复数值模拟过程中，固体和流体传热模块下土壤层外表面与室内环境的热交换采用对流换热边界，见式 (7)~式 (9)。

$$-nq = q_0 \quad (7)$$

表 1 实验工况表

Table 1 Experimental condition table

工况编号	回填材料种类	加热温度/℃
Ex-1	空气	200
Ex-2	空气	400
Ex-3	空气	600
Ex-4	空气	800
Ex-5	土壤	200
Ex-6	土壤	400
Ex-7	土壤	600
Ex-8	土壤	800

$$q_0 = h(T_{ext} - T) \quad (8)$$

$$h = \frac{k}{H} \left(\frac{4}{3} \left(\frac{7R_{aH} Pr}{5(20 + 21 Pr)} \right)^{1/4} + \frac{4(272 + 315 Pr)H}{35(64 + 63 Pr)D} \right) \quad (9)$$

式中: q_0 为向内热通量, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$; h 为对流传热系数, $\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$, T_{ext} 为外部环境温度, K; T 为土壤温度, K。

参与介质中的辐射模块下, 当无回填材料时, 回填层表面和加热层表面均采用不透明表面边界条件; 土壤回填时, 只有加热层表面采用不透明表面边界条件, 不透明表面边界条件见式(10)~式(13)。

$$q_{r,net} = q_{r,in} - q_{r,out} \quad (10)$$

$$q_{r,in} = - \sum_{\vec{n} \cdot \vec{S}_j \leq 0} \omega_j I_j \vec{n} \cdot \vec{S}_j \quad (11)$$

$$q_{r,out} = - \sum_{\vec{n} \cdot \vec{S}_j > 0} \omega_j I_j \vec{n} \cdot \vec{S}_j \quad (12)$$

$$I_i = \varepsilon I_b(T) + \frac{1 - \varepsilon}{\pi} q_{r,out}, \quad \vec{n} \cdot \vec{S}_i < 0 \quad (13)$$

式中: $q_{r,net}$ 为净辐射热通量, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$; $q_{r,in}$ 为传入辐射热通量, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$; $q_{r,out}$ 为传出辐射热通量, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$; $\vec{n}$ 为法向矢量; ε 为表面发射率, 无量纲常数。

3) 数值模拟工况及参数。选择不同的回填材料(空气、土壤)、不同加热温度(200、400、600、800 °C)、不同的回填厚度(40、100、150 mm)作为模拟变量, 探究3种变量对原位热传导修复传热的影响, 回填厚度150 mm为原位热传导修复工程中最大回填厚度, 具体数值模拟工况见表2。同时, 表3列出了用于数值模拟过程中用到的传热相关参数。

4) 网格无关性验证。基于实验工况建立数值几何模型, 对其进行网格划分。网格划分采用局部加密的方法, 将各区域交界面加密, 边界层数为8, 远离交界面处适当降低网格划分精度, 以达到节省计算资源、加快计算进度的目的。在工况 Sim-15 下进行网格无关性验证, 如图2所示。经过验证, 本研究计算采用组4的网格数量, 即采用细化单元尺寸网格, 最小单元尺寸为0.20, 平均

表2 数值模拟工况表

Table 2 Numerical simulation condition table

工况编号	回填材料种类	回填厚度/mm	加热温度/°C	工况编号	回填材料种类	回填厚度/mm	加热温度/°C
Sim-1	空气	40	200	Sim-13	土壤	40	200
Sim-2	空气	40	400	Sim-14	土壤	40	400
Sim-3	空气	40	600	Sim-15	土壤	40	600
Sim-4	空气	40	800	Sim-16	土壤	40	800
Sim-5	空气	100	200	Sim-17	土壤	100	200
Sim-6	空气	100	400	Sim-18	土壤	100	400
Sim-7	空气	100	600	Sim-19	土壤	100	600
Sim-8	空气	100	800	Sim-20	土壤	100	800
Sim-9	空气	150	200	Sim-21	土壤	150	200
Sim-10	空气	150	400	Sim-22	土壤	150	400
Sim-11	空气	150	600	Sim-23	土壤	150	600
Sim-12	空气	150	800	Sim-24	土壤	150	800

表 3 数值模拟参数表

Table 3 Numerical simulation parameter table

供试参数	设定值	供试参数	设定值
土壤导热系数 k_s	$0.41\text{ W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	不锈钢表面发射率 ε	0.1
土壤恒压热容 C_s	$0.84\text{ kJ}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$	空气吸收系数 κ	15 m^{-1}
土壤密度 ρ_s	$1\,850\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$	土壤容器直径 D	0.82 m
空气导热系数 k_a	$0.07\text{ W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	土壤容器高度 h	0.60 m
空气恒压热容 C_a	$1.12\text{ kJ}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$	加热棒直径 d	0.04 m
空气密度 ρ_a	$1.29\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$	环境温度 T_{ext}	293.15 K

单元质量 0.66，网格单元数 33 354，计算时间 288 s。

2 结果与讨论

2.1 实验结果及数值模拟验证

为了验证本研究所建立的原位热传导传热模型的准确性，将原位热传导传热模型回填层厚度设置为 40 mm，并设置数值对比工况 Sim-1~Sim-4、Sim-13~Sim-16 验证温度测点处所得数值模拟结果，温度测点位于土壤层内，径向距土壤层最外侧 0.11 m，轴向距上侧 0.3 m。数值模拟验证结果如图 3 所示，利用平均绝对误差 MAE 和平均相对误差 MRE 来评价数值模拟准确度，计算公式见式 (14)~式 (15)。

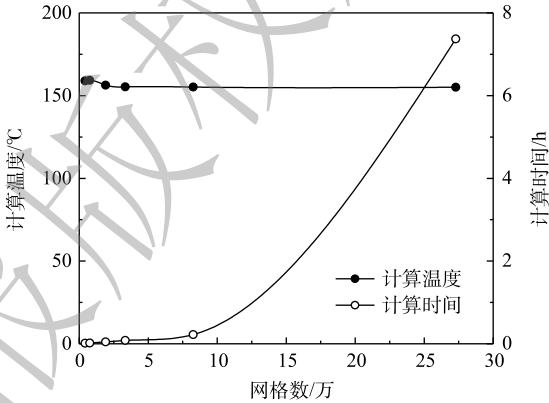


图 2 网格无关性验证图

Fig. 2 Diagram of grid independence verification

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |M_i - S_i| \tag{14}$$

$$MRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{M_i - S_i}{M_i} \right| \times 100 \tag{15}$$

式中： M_i 为第 i 个实验测得平均值，该平均值是相同实验工况下 3 次重复实验结果的平均； S_i 为第 i 个模拟计算值； n 为实验测得值总数。

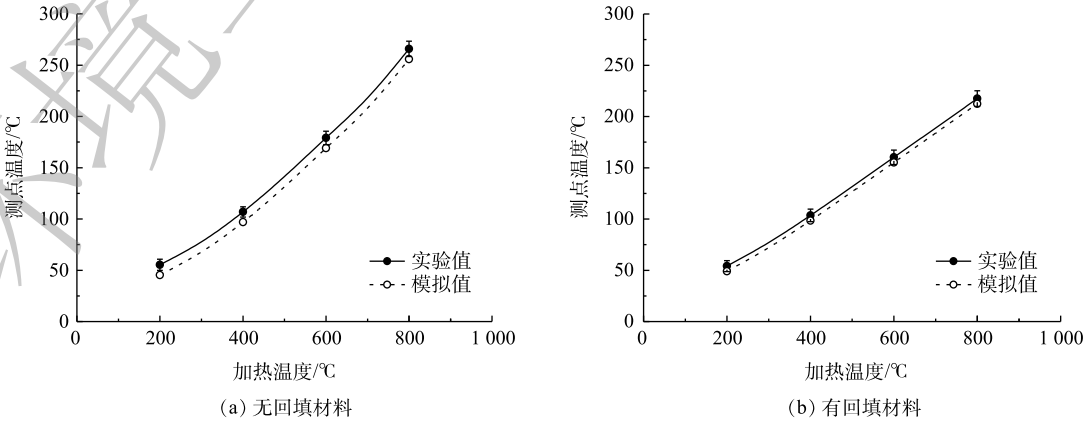


图 3 数值模拟验证图

Fig. 3 Diagram of numerical simulation verification

经计算, 无回填材料时, MAE 值为 10, MRE 值为 8.75%; 有回填材料时, MAE 值为 5, MRE 值为 4.63%, 数值模拟结果合理可靠, 原位热传导传热模型可用于传热分析。

2.2 回填材料对传热效果的影响

回填材料的传热性能在很大程度上决定了原位热传导修复的换热性能, 然而, 目前对于回填材料的研究局限于地源热泵、地理管换热器方向的传导传热分析^[24-25]。本节结合传导和辐射传热, 分析无回填材料(空气)和有回填材料(土壤)2种情况下原位热传导传热上的差异。如图 4(a)所示, 当回填厚度为 40 mm 时, 可以看出, 空气温度曲线和土壤温度曲线明显相交于点 (425, 106)。加热温度小于 425 °C 时, 土壤温度响应高于空气温度响应; 加热温度大于 425 °C 时, 土壤温度响应小于空气温度响应。这说明, 425 °C 为回填厚度为 40 mm 的原位热传导修复热传导作用和热辐射作用临界点。小于该温度时, 热传导传热大于热辐射传热, 反之, 热传导小于热辐射。同理, 如图 4(b)、4(c)所示, 当回填厚度为 100 mm 时, 临界点为 327 °C, 回填材料厚度为 150 mm 时, 临界点为 314 °C。综上所述, 当原位热传导修复加热温度大于 425 °C 时, 回填材料为空气时最佳, 此时换热性能最好。

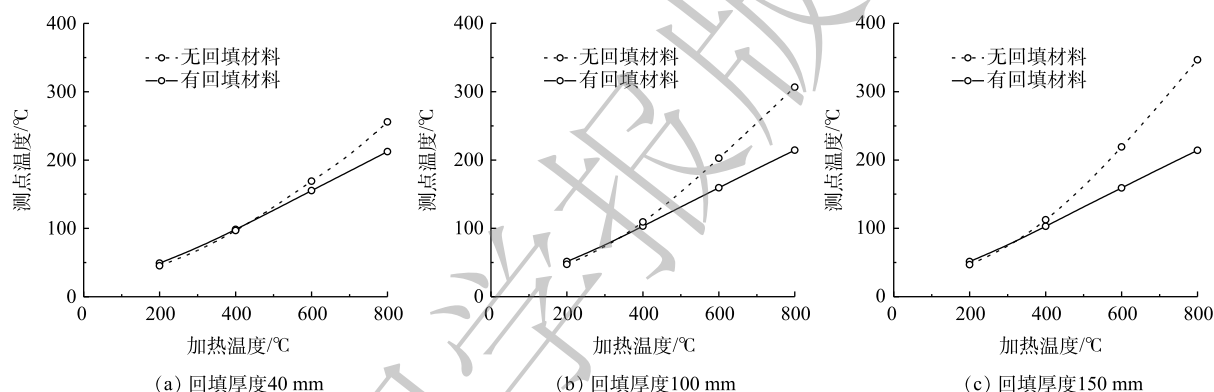


图 4 不同回填材料下测点温度随加热温度变化图

Fig. 4 The temperature of the measuring point varies with the heating temperature under different backfill materials

2.3 加热温度对传热效果的影响

加热温度是影响原位热传导修复效果的重要因子。加热温度对传热效果的影响直接体现在温度的分布上。在相同回填厚度(40 mm)下及不同加热温度下, 有无回填材料对原位热传导三维切面温度的影响如图 5、图 6 所示。综合分析, 当加热温度小于 600 °C 时, 提高加热温度的主要作用在于提高温度影响范围, 即加热温度越高, 温度的影响范围越广。200 °C 的加热温度, 其影响范围主要作用在加热层, 影响半径约为 0.07 m; 400 °C 的加热温度, 其影响范围主要作用于回填层, 影响半径约为 0.11 m; 而 600 °C 及以上的加热温度, 其影响范围可作用于全区域。

当加热温度大于 600 °C 时, 原位热传导平均温度得到显著增强。由图 5 可看出, 当无回填材料且加热温度高于 600 °C 时, 回填层温度高于 600 °C(图 5(c)、图 5(d)); 而加热温度低于 600 °C 时, 回填层温度则不足 500 °C(图 5(a)、图 5(b)), 这使得前者土壤层温度远高于后者。同理, 由图 6 可看出, 当回填土壤加热温度高于 600 °C 时, 回填层温度高于 400 °C(图 6(c)、图 6(d)), 土壤层所获能量高于加热温度低于 600 °C 时对其的影响(图 6(a)、图 6(b))。此外, 当加热温度大于 600 °C 时, 可以明显判断出无回填材料所带来的传热效果好于以土壤为回填料的情况; 而当加热温度小于 600 °C 时, 两种情况的传热效果区分程度不大。

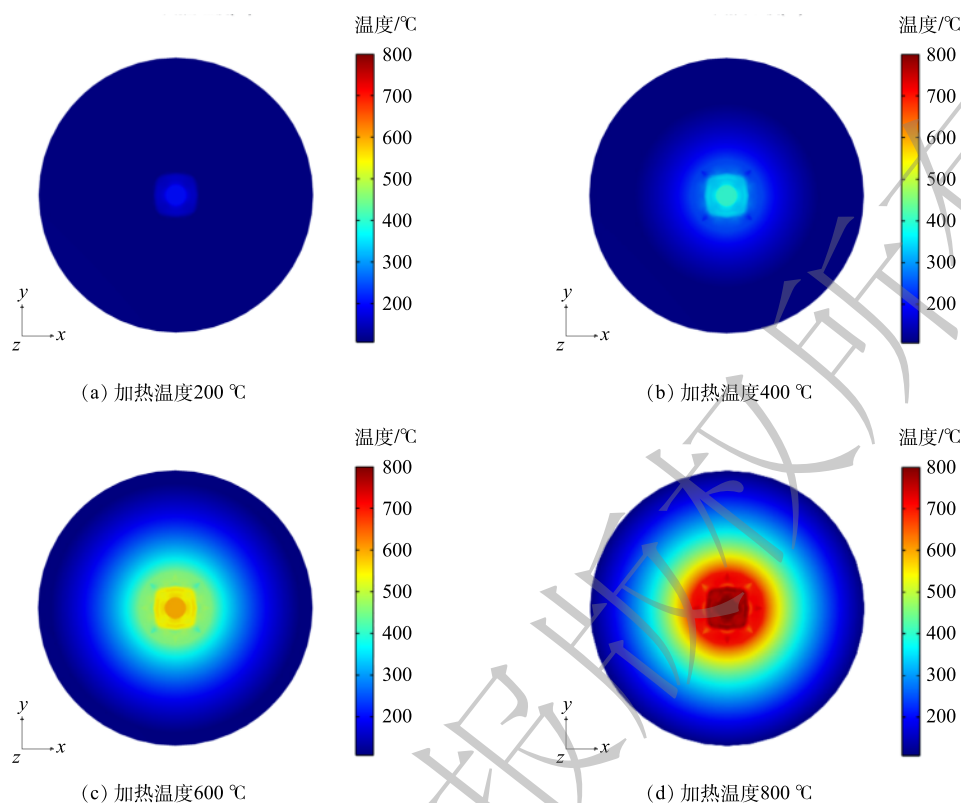


图 5 无回填材料不同加热温度下温度三维切面图

Fig. 5 Three-dimensional cross-sectional diagrams of temperature without backfill material at different heating temperatures

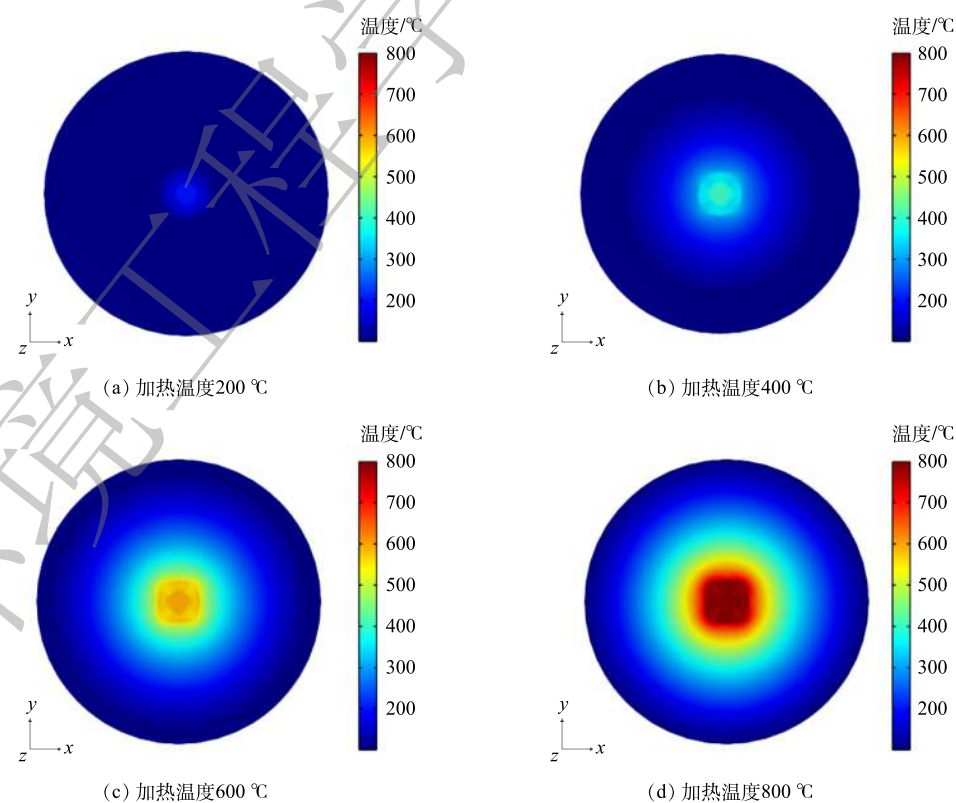


图 6 土壤回填不同加热温度下温度三维切面图

Fig. 6 Three-dimensional cross-section diagrams of temperature with soil backfill at different heating temperatures

2.4 回填厚度对传热效果的影响

目前,关于回填料对强化传热影响的研究,主要集中在低温条件下的影响效果,而对于原位热传导修复(高温)过程中是否添加回填料以及回填料厚度的影响尚不清晰。本节研究了200和800℃两种加热温度对不同回填厚度两种回填材料传热过程的影响。当加热温度为800℃且无回填材料时,不同回填厚度三维切面温度分布如图7所示。将温度分布划分为3层,第1层为温度高于600℃区域,第2层温度高于400℃但小于600℃,第3层温度低于400℃。由图7(a)可知,第1层温度主要集中于加热层和回填层,第2、3层温度集中于土壤层。与图7(b)、7(c)温度分布进行对比发现,第1层温度分布直径按大小排序为回填厚度100 mm>40 mm>150 mm,温度越高,与土壤接触面积越大,原位热传导传热效果越好,修复效果越好。

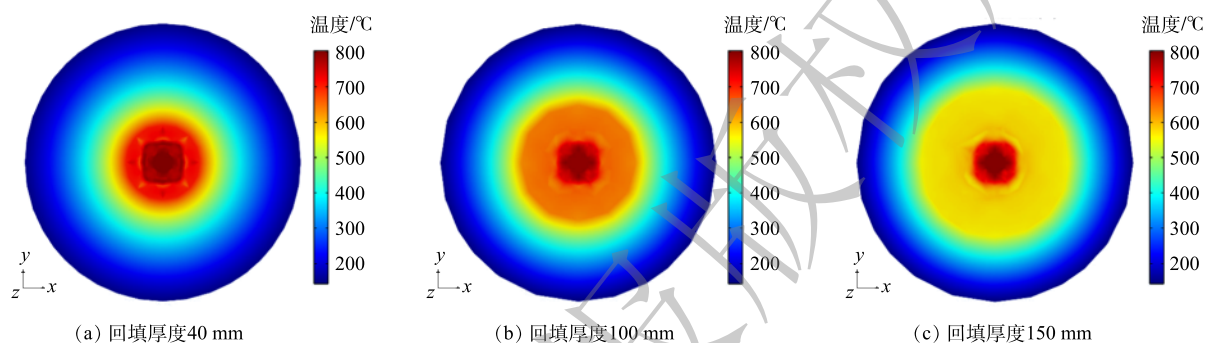


图7 无回填材料加热温度800℃时温度三维切面图

Fig. 7 Three-dimensional cross-sectional diagrams of temperature without backfill material and heating temperature at 800 °C

当加热温度为200℃,回填厚度为100 mm时的传热效果好于回填厚度40、150 mm时的传热效果。表现在温度分布大于100℃区域的直径上,40 mm回填厚度最小(图8(a)),100 mm回填厚度最大(图8(b))。原位热传导修复的最终目的是利用高温将土壤内污染物与土壤颗粒分离,温度越高则污染物越容易挥发、降解,故回填厚度100 mm时,可使土壤获得能量更高,更有利于热修复。

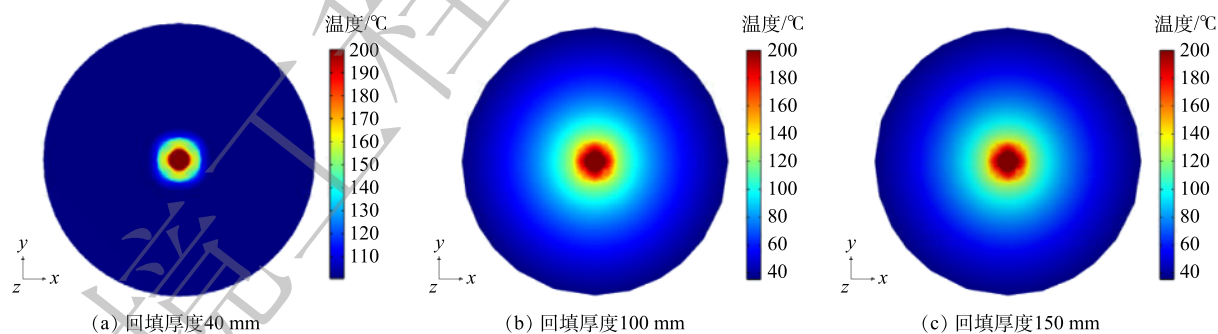


图8 土壤回填加热温度200℃时温度三维切面图

Fig. 8 Three-dimensional cross-section diagrams of temperature with soil backfill and heating temperature at 200 °C

3 结论

1) 所建立的数值预测模型的计算结果与实验数据吻合度较好,两者最小平均绝对误差为7.50℃,最小平均相对误差为6.69%。因此,该原位热传导数值模型可靠。

2) 在高温(800℃)下,无回填材料(仅空气存在)的传热效果显著优于原土回填情况下传热效果;而低温(200℃)情况下,无回填材料的传热效果较原土回填情况下的传热效果差。回填材料的选取原则为:加热温度小于300℃时,可选择原土壤进行回填;而加热温度大于450℃时,则不

应回填。

3) 在加热温度高于 450 ℃、无回填材料且间隙 100 mm 时的传热效果优于回填厚度 40 和 150 mm 时的传热效果。在原位热传导工程实践中, 高温加热下 (大于 450 ℃) 空气回填 (即无回填料) 厚度推荐为 100 mm; 同理, 低温加热下 (小于 300 ℃) 原土回填厚度同样推荐 100 mm。

参考文献

- [1] XU H J, LI Y Z, GAO L J, et al. Planned heating control strategy and thermodynamic modeling of a natural gas thermal desorption system for contaminated soil[J]. *Energies*, 2020, 13(3): 642.
- [2] 李书鹏, 焦文涛, 李鸿炫, 等. 热脱附技术修复有机污染场地研究与应用进展[J]. *环境工程学报*, 2019, 13(9): 2037-2048.
- [3] LACHANCE J, COM J T, BAKER R S, et al. Application of 'thermal conductive heating/in-situ thermal desorption (ISTD)' to the remediation of chlorinated volatile organic compounds in saturated and unsaturated settings[C]//Proceedings of Battelle's Conference on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds, Columbus, 2004: 1-8.
- [4] HERON G, PARKER K, GALLIGAN J, et al. Thermal treatment of eight CVOC source zones to near nondetect concentrations[J]. *Ground Water Monitoring and Remediation*, 2009, 29(3): 56-65.
- [5] BAKER R S, HERON G, LACHANCE J. 2-D physical models of thermal conduction heating for remediation of DNAPL source zones in aquitards[C]//Consoil 2008. 2008: 1-10.
- [6] XIE Q, MUMFORD K G, KUEPER B H. Modelling gas-phase recovery of volatile organic compounds during in situ thermal treatment[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2020, 234: 103698.
- [7] YU Y, LIU L, YANG C, et al. Removal kinetics of petroleum hydrocarbons from low-permeable soil by sand mixing and thermal enhancement of soil vapor extraction[J]. *Chemosphere*, 2019, 236: 124319.
- [8] DAVIS R J, LILJESTRAND H M, KATZ L E. Evidence for multiple removal pathways in low-temperature (200-400 ℃) thermal treatment of pentachlorophenol-laden soils[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 400: 122870.
- [9] STEGEMEIER G L, VINEGAR H J. Thermal Conduction Heating Conduction Heating for In-Situ Thermal Desorption of Soils[M]. Florida: CRC Press, 2001: 1-37.
- [10] DING D, SONG X, WEI C, et al. A review on the sustainability of thermal treatment for contaminated soils[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 253: 449-463.
- [11] 洪顺军, 杜卫, 刘永红, 等. 地源热泵埋地管换热器传热特性影响因素分析[J]. *制冷与空调*, 2016, 30(4): 441-445.
- [12] 杜红普, 李敏, 王恩宇. 高温下饱和回填材料的换热特性研究[J]. *太阳能学报*, 2017, 38(1): 172-179.
- [13] XU J, WANG F, SUN C, et al. Gas thermal remediation of an organic contaminated site: field trial[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(6): 6038-6047.
- [14] JIN H, GUO Y, DENG H, et al. A simulation model for coupled heat transfer and moisture transport under the action of heat source in unsaturated soils[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 7750.
- [15] JIAO Q W, ZHANG Y T. Modeling and simulation of heat and moisture transfer of the geothermal borehole[J]. //26th Chinese Control and Decision Conference (2014 CCDC), 2014: 3347-3351.
- [16] AHMAD S, RIZVI Z, ARSALAN K M, et al. Experimental study of thermal performance of the backfill material around underground power cable under steady and cyclic thermal loading[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2019, 17: 85-95.
- [17] 贺永智, 徐旭, 吕玲, 等. 覆土层含水率对直埋式电缆散热特性的影响研究[J]. *中国计量大学学报*, 2019, 30(4): 427-433.
- [18] LI Z, WANG W W. Main existing problems and respective countermeasures of ground-source heat pump technique applications[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 433-435: 2327-2330.
- [19] 王恩琦, 黄体士, 张方方, 等. 回填材料对地源热泵系统换热效率的影响分析[J]. *制冷与空调*, 2019, 33(3): 240-244.
- [20] LIU L, CAI G, LIU X, et al. Evaluation of thermal-mechanical properties of quartz sand-bentonite-carbon fiber mixtures as the borehole backfilling material in ground source heat pump[J]. *Energy and Buildings*, 2019, 202: 109407.
- [21] 刘湘云, 陈颖, 赖康平, 等. 地源热泵埋地换热器回填土的实验研究[J]. *流体机械*, 2007(8): 60-62.
- [22] 雷彦鹏. 地源热泵工程固废基回填材料的研发与应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
- [23] MCWATTERS R S, ROWE R K, WILKINS D, et al. Modelling of vapour intrusion into a building impacted by a fuel spill in Antarctica[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 231: 467-482.
- [24] 赵小丽. 土壤源热泵竖埋管换热特性管内外耦合的三维动态编程数值研究[D]. 西安: 长安大学, 2016.
- [25] 吴珣, 梁思源, 郑明杰, 等. 套管式埋地管换热器传热特性数值模拟[J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2020, 34(12): 226-236.

Effects of backfill materials on in-situ thermal conduction heating remediation of soil and numerical simulation

LIU Lipeng¹, XU Mengben¹, GU Hailin^{1,*}, ZHAN Mingxiu^{1,2}, XU Xu¹, JIAO Wentao², JI Longjie^{2,3},
TIAN Wangyang⁴, ZHANG Tao⁵, LV Tao⁵, CHI Zuohe¹

1. College of Metrology and Testing Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China; 2. State Key Laboratory of Cities and Regions, Research Center for Eco-Environmental, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. Environmental Rehabilitation of Beijing Construction Engineering Co., Ltd, National Engineering Laboratory for Contaminated Site Safety Remediation Technology, Beijing 100015, China; 4. Environmental Protection of Zhejiang Yikeou Co., Ltd, Huzhou 313000, China; 5. Environmental Technology of Guangxi Jintou Co., Ltd, Nanning 530022, China

*Corresponding author, E-mail: hlgu@cjl.u.edu.cn

Abstract In-situ thermal conduction remediation technology is an efficient remediation method for organic contaminated soil. As there will be a certain gap between the heating well and the soil during the construction process, there is no clear guidance on whether to use backfill materials and the selection principle of backfill materials. Using experimental and numerical simulation methods, the influence of backfill materials in the in-situ thermal conduction heating remediation process was studied, and different heating temperatures (200, 400, 600, 800 °C), backfill materials (air, original soil), and backfill thickness (40, 100, 150 mm) on heat transfer. The results showed that the in-situ thermal conduction heating numerical prediction model based on experimental data was reliable, and the minimum average relative error between the simulated calculated value and the measured value was 6.69%; when the heating temperature was higher than 450 °C, the heat transfer effect was better without backfill; when the heating temperature was less than 300 °C, it was better to backfill with soil; at 300~450 °C, the heat transfer effect with or without filler was not obvious; in the application process of the in-situ thermal conduction heating remediation technology engineering, the heat transfer effect was best when the thickness of the backfill material was 100 mm. The results of this study can provide a reference for the engineering practice of in-situ thermal conduction heating remediation of contaminated soil.

Keywords organic contaminated soil; in-situ thermal conduction heating remediation; backfill materials; heat transfer; numerical simulation