



文章栏目：土壤污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.202208134 中图分类号 X53 文献标识码 A

吕静, 李静文, 孙于茹, 等. 水平井原位蒸汽加热土壤过程中的温度变化规律[J]. 环境工程学报, 2022, 16(12): 4085-4094. [LYU Jing, LI Jingwen, SUN Yuru, et al. Temperature variation in soil during in-situ steam heating with horizontal wells[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(12): 4085-4094.]

水平井原位蒸汽加热土壤过程中的温度变化规律

吕静^{1,2}, 李静文^{1,2}, 孙于茹^{1,2}, 赵高强^{1,2}, 刘鹏^{1,2}, 李书鹏^{1,2}

1. 北京建工环境修复股份有限公司, 北京 100015; 2. 污染场地安全修复技术国家工程实验室, 北京 100015

摘要 应用水平井对场地内有机污染进行蒸汽强化抽提具有良好应用前景, 但国内对加热半径、升温和冷却速率等关键参数的研究仍处于起步阶段。通过示范工程验证实施非开挖式水平井施工方法, 研究应用水平井原位蒸汽加热土壤过程中的温度变化规律及加热影响半径。结果表明, 蒸汽在注入水平井过程中, 筛缝出汽量由注射井跟端到趾端逐渐减少, 导致跟端土壤升温速率较趾端快。测温点距离蒸汽注射井越近, 温度峰值越高; 反之, 温度峰值越低。假设目标加热温度为 50 ℃, 当加热至 19.5 h 时, 水平井蒸汽加热半径达到 1.8 m。停止加热后, 注射井跟端土壤较趾端土壤降温幅度大。土壤初始温度越高的区域, 土壤降温速率越大。经过 113 h 的自然冷却后, 加热半径范围内土壤温度均保持在 50 ℃ 以上, 土壤保温效果良好。本研究结果可为应用水平井蒸汽加热修复土壤工程设计提供参考。

关键词 蒸汽加热; 水平井; 非开挖; 加热半径

随着我国城市化进程的加速, 大量工业企业根据政策需求停产或搬迁, 从而遗留了大量污染地块亟待修复^[1]。2020 年, 我国 261 个工业污染场地修复工程中, 约有 63.2% 为有机污染场地^[2], 污染物种类分布主要为多环芳烃类、总石油烃和苯系物等挥发性和半挥发性有机污染物^[3-4], 污染物种类多, 毒性大, 因此有机污染场地修复是土壤环境治理工作的重点之一。

原位热脱附技术因其具有修复周期短、可靠性高、适用性强、二次污染可控等优点, 在有机污染场地修复中被快速推广应用^[5-6]。根据加热方式的不同, 原位热脱附技术可分为热传导加热 (Thermal Conduction Heating, TCH)、电阻加热 (Electrical Resistive Heating, ERH)、蒸汽强化抽提 (Steam-Enhanced Extraction, SEE)^[7-8] 以及阴燃加热^[9]、射频加热^[10] 等。由于各工艺加热机制不同, 所适用的污染场地类型也各不相同。SEE 技术是将高温水蒸汽注入污染区域, 提高土壤温度, 促进污染物的挥发, 然后利用气流将污染物带出, 达到去除污染物的目的^[11]。该技术易与其他技术联用, 针对污染物沸点低、地层渗透性和均质性都较好的污染场地具有良好的适用性, 尤其在针对包气带非水相液体 (NAPLs) 污染修复方面具有较好应用前景^[12-15]。

国内外关于 SEE 技术的应用研究中, 蒸汽注射井和抽提井通常采用垂直井形式。垂直井设计、施工简便, 单位延米建井及安装成本较低, 针对污染垂向分布复杂的场地具有较强的适用性, 但针对污染呈水平带式分布或存在地表障碍物的污染地块, 垂直井的劣势开始凸显。相较于

收稿日期: 2022-08-24; 录用日期: 2022-11-09

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2018YFC1803003)

第一作者: 吕静 (1990—), 女, 硕士, 中级工程师, lvjing@bceer.com; 通信作者: 李静文 (1988—), 女, 硕士, 高级工程师, lijingwen@bceer.com

垂直井, 水平井具有与污染物接触面积大、可直接进入地表障碍物下方修复、地面设施少、占地面积小^[16]等优点。针对水平方向扩散范围较广的污染羽及存在于不可移动/拆除构筑物(比如建筑物、道路等)下方的污染修复或风险管控, 水平井具有明显的技术优势。随着场地修复工程对非开挖技术的需求越来越多, 有关水平井的研究和应用开始增多。2001年, The Interagency DNAPL Consortium (IDC)^[17]在美国卡纳维拉尔角34号发射场组合应用水平井和垂直井验证蒸汽注入/抽提(SI/E, steam injection/extraction)对地块中TCE-DNAPL的去除效果, 实验结果表明, 应用SI/E后, 污染地块内的总TCE质量减少了85%, DNAPL质量减少了约89%。2015年, 美国加利福尼亚州北岛海军航空站^[18]应用水平井对场地内有机污染进行蒸汽加热强化NAPL回收, 经过处理后, 场地建筑内空气中的三氯乙烯水平下降到可接受水平, 而蒸汽注入系统的运行, 促进了TPH回收率的大幅提高, 同时VOCs的回收率也略有提高。国内有关水平井用于土壤修复的研究起步较晚, 目前尚无应用水平井实施SEE技术的工程案例报道。目前, 针对水平井蒸汽加热土壤过程中的加热影响半径、土壤升温 and 冷却速率等关键参数的研究极少, 而这些参数对于水平井式原位蒸汽加热工程设计至关重要。本研究通过示范工程验证实施了一种非开挖式水平井施工方法, 并通过中试实验观察水平井原位蒸汽加热土壤过程中的温度变化规律, 分析热量扩散方向, 确定应用水平井蒸汽加热土壤的影响半径, 以期同类工程设计提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验地块概况

中试实验场地位于山西某煤气化企业遗留污染地块内, 实验场地面积约1000 m², 污染埋深为-3~0 m, 主要污染物有PAHs等。地块地质勘察结果表明, 场地地层可划分为7个土层及其亚层, 地层岩性分布如表1所示。在实验地块内距离地表不同深度采集3个土工样品测定土工参数, 结果如表2所示。实验地块内地下水位较深, 无需考虑地下水的影响。

表1 地块地层岩性分布
Table 1 Stratigraphic lithologic distribution of site

| 土层分类 | 土层特性及分布 |
|--|--|
| 人工填土层 (Q ₄ ^{2ml}) | 人工堆积层, 杂色, 松散, 稍湿, 物质组成主要以粉土、粘性土为主, 夹有灰渣、煤屑、砖块及碎石等; 钻孔揭露厚度为0.4~9.0 m, 平均厚度3.07 m |
| 中粗砂 (Q ₄ ^{al+pl}) | 黄褐色、灰色, 稍密~中密, 稍湿, 矿物成分主要以石英、长石为主, 颗粒主要以中粗砂组成, 局部含有少量的粉细砂颗粒, 分选性较差, 局部含有少量的粉砂颗粒, 分选性较差; 钻孔揭露厚度0.3~10.5 m, 平均厚度2.9 m |
| 粉土层 (Q ₄ ^{al+pl}) | 灰褐色、黄褐色, 密实, 稍湿~湿, 个别孔有刺鼻气味及油渍侵染现象, 无光泽反应, 韧性及干强度较低, 摇震反应中等, 局部含有少量的砂质颗粒及氧化物, 厚薄不均; 钻孔揭露厚度为0.5~12.3 m, 平均厚度5.51 m |
| 中粗砂 (Q ₄ ^{al+pl}) | 灰褐色、黄褐色, 中密~密实, 稍湿~湿, 矿物成分主要以石英、长石为主, 颗粒主要以中粗砂组成, 包含有粉土、粉细砂颗粒, 个别钻孔夹有砾石, 分选性较差; 钻孔揭露厚度0.40~10.6 m, 平均揭露厚度2.79 m |
| 粉土层 (Q ₄ ^{al+pl}) | 褐黄色, 密实, 稍湿~湿, 无光泽反应, 韧性及干强度较低, 无摇震反应中等, 局部含有少量的砂质颗粒及氧化物, 厚薄不均; 钻孔揭露厚度为0.5~10.4 m, 平均揭露厚度为3.49 m |
| 粉质黏土层 (Q ₄ ^{al+pl}) | 稍湿~湿, 呈可塑~软塑状态, 刀切面光滑, 稍有光泽反应, 干强度及韧性中等, 无摇震反应, 包含有氧化物; 最大揭露厚度13.3 m, 该层在焦油加工车间G区揭露较多 |
| 卵石 (Q ₄ ^{al+pl}) | 灰褐色、黄褐色, 中密~密实, 稍湿~湿, 矿物成分主要以石英、长石为主, 颗粒成分以石英砂岩为主, 物质组成主要以卵石为主, 充填有中粗砂、粉土, 呈胶结状态, 分选性较差; 该层在调查区域内有4个采样点穿透卵石层; 揭露厚度分别为7.0、3.3、3.3、5.5 m |
| 粉质黏土层 (Q ₃ ^{al+pl}) | 稍湿~湿, 可塑~硬塑状态, 刀切面光滑, 干强度及韧性中等, 无摇震反应, 包含有白色钙质结核; 在调查区域内仅个别孔揭露 |

表 2 地块内土壤土工参数
Table 2 Soil geotechnical parameters of site

| 取样点 | 取土深度/m | 岩土分类 | 含水率/% | 湿密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) | 干密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) | 孔隙比 | 孔隙率/% | 垂直渗透系数/ ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$) | 水平渗透系数/ ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$) |
|------|--------|------|-------|---|---|-------|-------|--|--|
| DS01 | 1 | 人工填土 | 11.5 | 1.54 | 1.38 | 0.955 | 48.8 | 5.58×10^{-5} | 2.96×10^{-5} |
| DS02 | 2 | 粉土 | 16.8 | 1.96 | 1.68 | 0.635 | 38.8 | 1.44×10^{-6} | 2.125×10^{-6} |
| DS03 | 3.5 | 粉质粘土 | 14.6 | 1.98 | 1.73 | 0.574 | 36.5 | 7.98×10^{-7} | 3.75×10^{-7} |

1.2 实验系统和实验井位布设

本实验系统由蒸汽发生单元、水平井注射单元、温度监测系统、地面保温层等 4 部分构成。其中，蒸汽发生单元由蒸汽发生器组成，额定蒸汽产生量为 $0.5\text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$ 、额定蒸汽压力为 0.7 MPa 、饱和蒸汽温度为 $171\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；水平井注射单元由地上蒸汽输送管道和地下水平蒸汽注射井组成，水平井井管为耐高温、耐腐蚀的预制滤料水平井管(图 1)；温度监测系统由 K 型热电偶(量程 $0\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$)组成；地面保温层由“土工布+HDPE 膜+土工布+ 10 cm 混凝土”自下而上顺序铺垫而成。

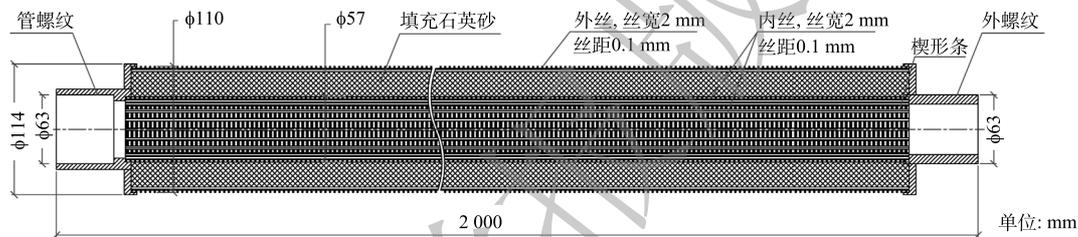


图 1 预制滤料水平井管构造

Fig. 1 Design of prefabricated filter material horizontal well pipe

本实验于 2.5 m 深度布设 1 口水平蒸汽注射井，并沿其轴向和径向不同距离布设数口垂直测温井(图 2)，用于监测注射井周边土壤温度，探索蒸汽在土壤中的扩散情况。设字母“T”代表井类型为温度监测井，第一位数字代表监测井编号，第二位数字代表不同深度监测点。其中，“1”代表 0.5 m 深度监测点，“2”代表 1.5 m 深度监测点，“3”代表 3.2 m 深度监测点。

水平蒸汽注射井施工采用非开挖式水平定向钻进工艺，施工水平段总长约为 10 m ，由 5 段单根长度为 2 m 的预制滤料水平井管顺次连接形成，井管间采用不锈钢波纹软管做软连接，以减小水平井曲率半径，减少施工造斜段长度，减少耗材，降低施工成本。利用水平定向钻进技术进行水平井施工的示意图如图 3 所示，施工步骤如下。

1) 钻孔曲线设计。根据管道材质、铺设要求、钻孔地质条件、施工设备等条件进行钻孔曲线设计，确定造斜点、曲线段曲率半径、钻具入土角、出土角等钻孔轨迹参数，绘制施工图。

2) 测量定位放线。依据施工图要求测量放线，测定管道入土点、出土点，放出钻机安装位置线、管道两端具体轴线位置及标高。

3) 水平定向钻机就位与调试。根据施工图，将钻机及附属配套设备锚固在预定位置，经检查确认后，设备进行试运转，检查各部位运行情况；调、校控向系统，将测量数据存储于计算机内；调试泥浆系统。

4) 导向孔施工。按预先与地面放出的管道平面中心线，沿设计要求的管中高程进行钻孔。导向施工期间，控制好每根钻杆的斜度和深度值，每 3 m 记录 1 次导向数据，并与设计曲线对比，减小偏差，确保工程施工准确性。

5) 回拉扩孔。钻孔导向完成后，将传感器拆卸下来，更换为钻头，根据穿越管径实际情况进

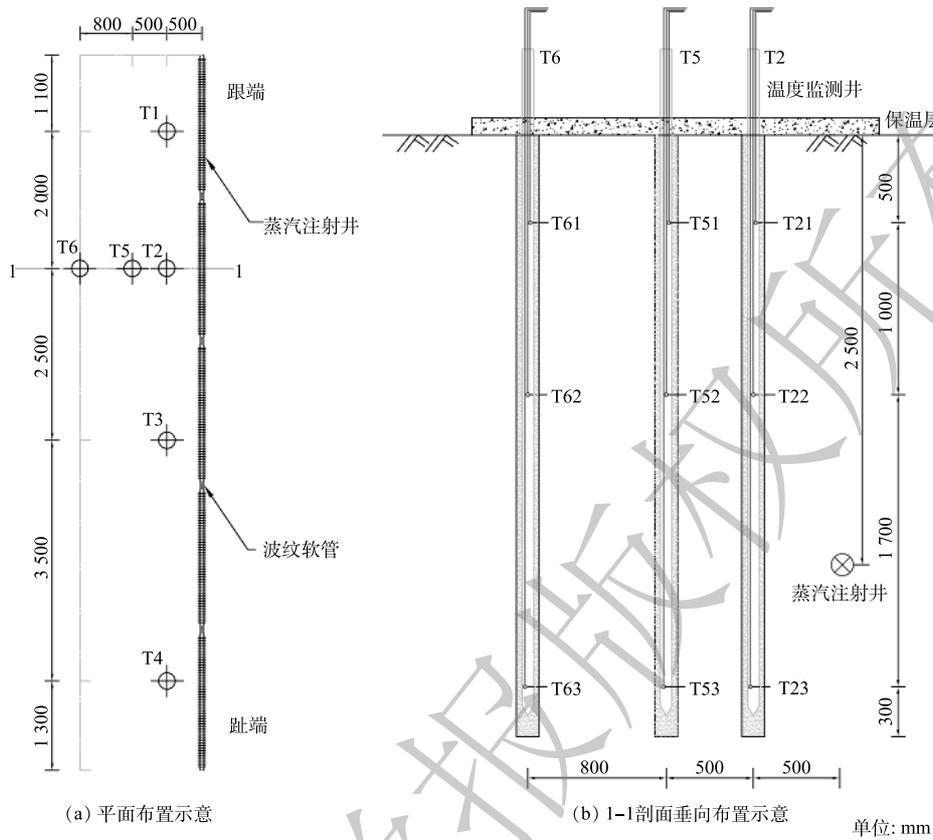


图2 蒸汽注射井和测温井布置

Fig. 2 Design of steam injection wells and temperature measuring wells

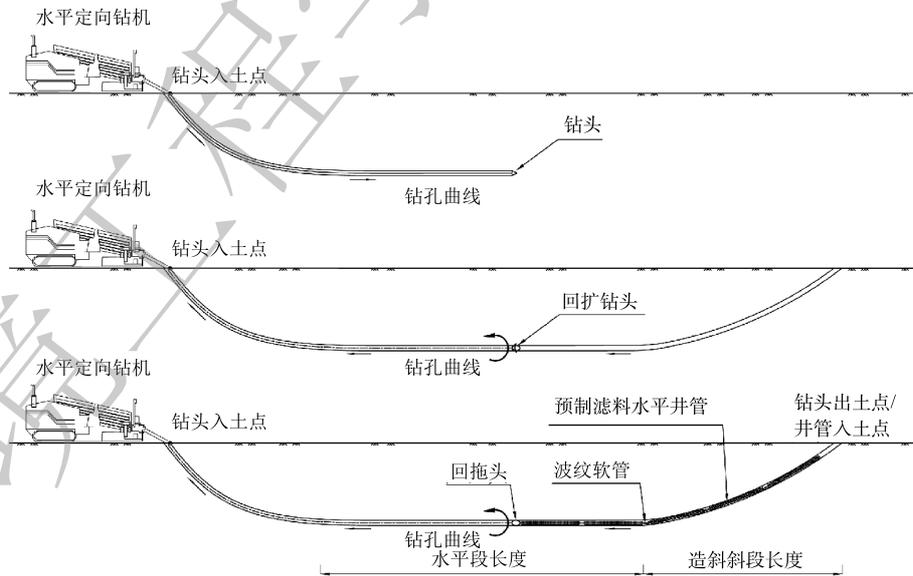


图3 水平定向钻井施工流程示意图

Fig. 3 Flow diagram of horizontal directional drilling construction

行回拉扩孔，扩孔孔径一般为管径的1.2~1.5倍。

6) 管道回拖。将管道与回拖头连接，开始回拖，管道两端做好封堵，避免泥浆进入管道。拉管施工过程中需匀速回拖，直至成品管线在钻机侧出土为止。回拖过程中严格控制泥浆流量、回

拖速度, 记录钻机的扭矩、回拖力, 出现异常立即报告。

待实验系统组装完成后, 打开蒸汽注入管道阀门, 同时启动电源, 蒸汽注射连续运行 43 h 后, 停止注射。再持续降温 113 h, 观察实验全过程中蒸汽注射井周边土壤的温度变化。

2 结果与分析

2.1 升温阶段土壤温度变化规律及加热半径分析

1) 沿水平井轴向土壤温度变化。为研究蒸汽加热过程中沿水平井轴向方向的土壤升温情况, 在距离蒸汽注射井一侧 0.5 m 处沿轴向分布 T1、T2、T3、T4 等 4 口测温井, 加热过程中监测沿轴向同一深度不同测点温度变化 (以 1.5 m 深度监测点为例)。由图 4 可知, 加热 5.5 h 后监测点 T12 升至峰值温度 95.8 °C, 加热 17 h 后 T22 升至峰值温度 96.8 °C, 加热 27 h 后 T32 升至峰值温度 96.4 °C, 加热 36 h 后 T42 升至峰值温度 88.6 °C。由此可知, 蒸汽注射过程中, 高温蒸汽在注射井跟端筛缝流出较多, 至趾端出汽量逐渐减少, 导致蒸汽注射井跟端土壤升温速率较快, 温度上升幅度较大; 注射井趾端土壤升温速率较慢, 温度上升幅度也较小。这与王增林等^[19]在模拟不同类型注汽井水平段配汽效果的研究中得出的结果类似。因此, 为避免高温蒸汽在水平蒸汽注射井跟端和趾端配汽不均, 导致跟端和趾端周边温场分布不均匀, 工程设计时可通过调整开筛率, 在水平井跟端减少开筛或趾端加密开筛, 使得蒸汽注射井跟端和趾端配汽量较为均匀、周边温场轴向分布较为均衡。

另外, 根据 T1 监测井中不同深度测点的温度变化可知 (图 5), T11 在蒸汽加热运行 5.5 h 后升至峰值温度 96 °C, T12 在蒸汽加热运行 5.5 h 后升至峰值温度 94 °C, T13 在蒸汽加热运行 19.5 h 后升至峰值温度 96.8 °C。监测点 T11 距离蒸汽注射井较 T12、T13 远, 却和 T12 同时达到峰值温度, 且比 T13 更早达到峰值温度, 产生这种现象的原因是实验区域地层为非均质土层, 由上至下分布有人工填土层、粉土层和粉质粘土层, 土壤渗透性差异较大。因注射井至监测点 T11 间可能局部存在渗透性较强土壤, 具有较强的蒸汽导流能力, 在注射井至监测点 T11 间形成蒸汽扩散优势通道, 高温蒸汽通过优势通道率先达到地层上部, 导致距离注射井较远的土壤优先升温。

2) 沿水平井径向土壤温度变化规律。为研究蒸汽加热过程中沿水平井径向方向上土壤的温度变化, 沿蒸汽注射井径向 0.5、1.0、1.8 m 处分别设置测温井, 对周边土壤温度进行监测, 测温井

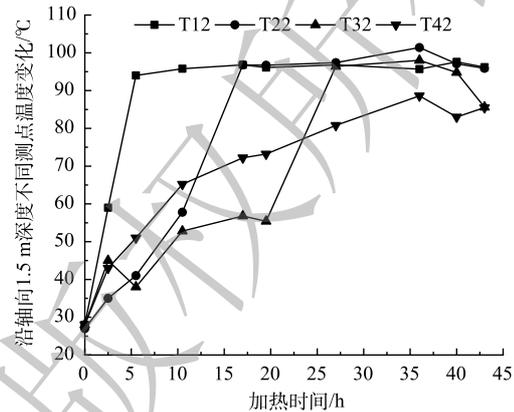


图 4 加热时沿水平井轴向同一深度不同测点土壤温度变化

Fig. 4 Variation of soil temperature at different measuring points at the same depth along the horizontal well axis during heating

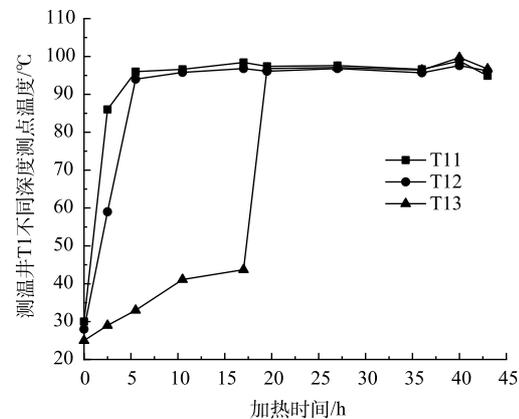


图 5 加热时测温井 T1 中不同深度测点温度变化

Fig. 5 Temperature variation of measuring points at different depths in temperature measuring well T1 during heating

记为 T2、T5、T6，加热过程中沿蒸汽注射井径向不同距离监测点温度变化如图 6 所示。由图 6 可知，沿蒸汽注射井径向分布的各监测点温度随加热时间的增长呈逐步上升趋势，待升至峰值温度后，温度涨势趋于平缓。监测点距离蒸汽注射井越近，温度峰值越高；距离蒸汽注射井越远，温度峰值越低。这与陈俊华等^[20]研究垂直加热井周边土壤的温度变化得到的结果相似。当监测点温度达到峰值后，继续加热，监测点温度变化不大，加热运行由升温阶段进入保温阶段。

3) 蒸汽加热影响半径分析。不同加热时间沿蒸汽注射井径向分布的温场如图 7 所示。有文献表明^[21]，随着蒸汽注入点周围地下温度的升高，蒸汽冷凝前锋沿径向向外移动。随着持续的蒸汽注入，冷凝前锋最终与系统抽提井相交，以抽提回收蒸汽和污染物。蒸汽注射井至抽提井的间距即蒸汽加热影响半径。由图 7 可知，目标加热温度不同，加热相同时间蒸汽扩散影响半径不同。假设目标加热温度为 50℃，则加热至 19.5 h

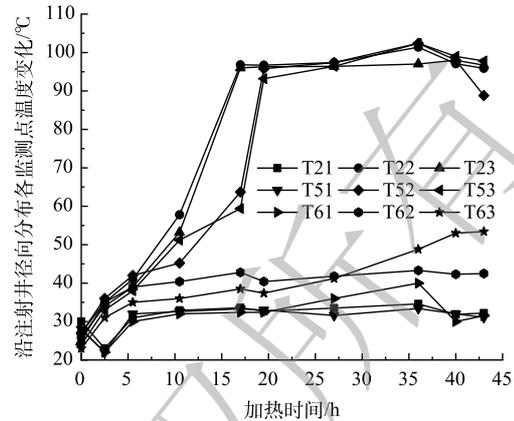


图 6 加热时沿注射井径向不同距离监测点温度变化
Fig. 6 Temperature variation of monitoring points at different distances along the radial direction of injection well during heating

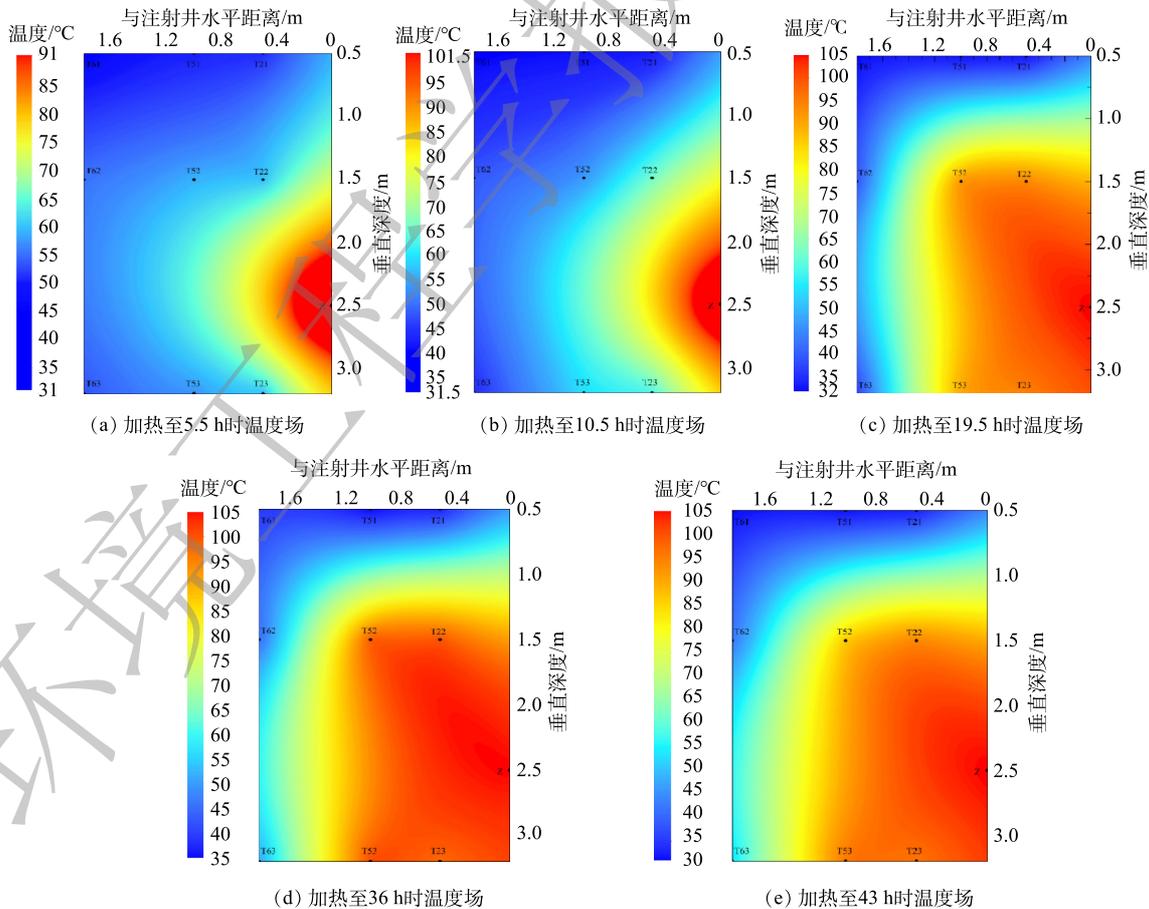


图 7 不同加热时间沿蒸汽注射井径向分布的温度场

Fig. 7 Temperature field distribution along the radial direction of steam injection well at different heating times

时, 高温蒸汽沿水平井径向加热影响半径达到 1.8 m。加热半径是水平加热井间距设计的关键影响因素, 本实验结果可为工程设计提供参考。

2.2 冷却阶段土壤温度变化规律

根据加热过程中土壤的温度变化, 可将原位蒸汽加热修复土壤的全过程分为 3 个阶段, 分别是升温阶段、保温阶段及降温阶段。为研究蒸汽加热修复土壤全过程中周边土壤的温度变化规律, 进一步探究了停止高温蒸汽注射后, 周边土壤自然冷却过程中的温度变化情况。

1) 沿水平井轴向土壤温度变化规律。在蒸汽加热连续运行 43 h 后, 停止高温蒸汽注射, 继续观察沿水平井轴向分布的测温井 T1、T2、T3、T4 中各测点的温度变化。以停止加热的时点为起始时间, 持续观察 113 h, 得到沿水平井轴向同一深度土壤在自然冷却状态下的温度变化规律, 如图 8 所示 (以 1.5 m 深度监测点为例)。停止加热后, 各监测点温度开始下降, 到停止监测时, T12 下降 20.1 °C、T22 下降 20 °C、T32 下降 10.6 °C、T42 下降 10.2 °C。这说明, 蒸汽注射井跟端附近土壤降温幅度较趾端附近的土壤降温幅度大, 土壤初始温度越高的区域, 土壤降温速率越大。根据 T1 监测井中不同深度测点的温度变化可知 (图 9), 因存在优势通道而迅速升温的监测点 T11 在停止加热后, 温度迅速下降, 由 94.9 °C 降至 58.2 °C。这说明, 优势通道的存在同时加速了测温点 T11 的降温; 监测点 T13 在降温过程中温度出现短时上升后急速下降。出现这样现象的原因是, 停止加热后, 上部高温蒸汽冷凝受重力影响向下扩散, 造成土壤短时升温, 随后继续降温。

2) 沿水平井径向土壤温度变化规律。停止高温蒸汽注射后, 继续观察沿水平井径向分布的测温井 T2、T5、T6 中各测点的温度变化。以停止加热的时点为零点, 持续观察 113 h, 得到沿水平井径向各监测点在自然冷却状态下的温度变化规律 (图 10), 同时绘制降温过程中

不同时段沿注射井径向分布的温场 (图 11)。根据图 10 可以看出, 距离蒸汽注射井较近的 T22、T23、T52、T53 等监测点降温速率较快, 距离蒸汽注射井远的 T51、T62、T63 等监测点温度并未下降反而有所上升。根据图 11 可以看出, 停止加热后, 土壤保温效果良好。如目标加热温度为 50 °C, 经过持续 113 h 的降温后, 初始温度高的区域热量将向周边扩散, 使得加热影响半径范围内土壤温度均保持在 50 °C 以上, 加热影响半径有向四周扩散增大的趋势。

3) 降温过程中影响半径变化。根据图 11 可以看出, 停止加热后, 土壤保温效果良好。如目标

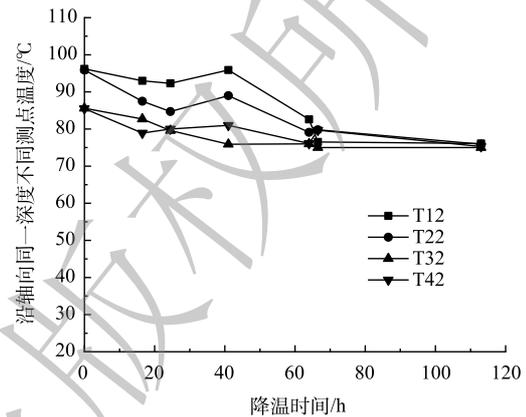


图 8 降温时沿水平井轴向同一深度不同测点土壤温度变化情况

Fig. 8 Variation of soil temperature at different measuring points at the same depth along the horizontal well axis during cooling

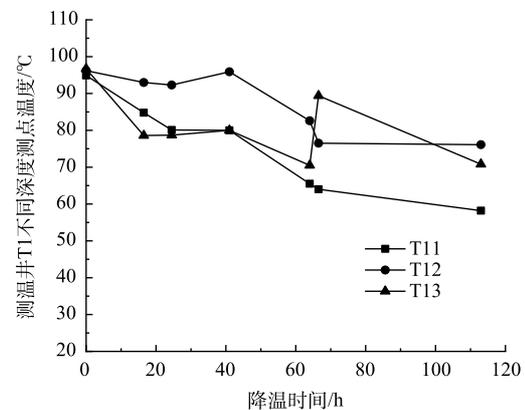


图 9 降温时测温井 T1 中不同深度测点温度变化

Fig. 9 Temperature variation of measuring points at different depths in T1 well during cooling

加热温度为 50 °C，经过 113 h 的持续降温后，初始温度高的区域热量将向周边扩散，使得加热影响半径范围内土壤温度均保持在 50 °C 以上，加热影响半径有向四周扩散增大的趋势。

3 结论

1) 蒸汽注射井可采用预制滤料水平井管+不锈钢波纹管组合，以减小水平井施工曲率半径，减少耗材，降低施工成本。

2) 距离蒸汽注射井越近的土壤升温峰值越高。目标加热温度不同，加热相同时间获得的蒸汽加热影响半径不同。在包气带土壤中，设置目标加热温度为 50 °C，加热 19.5 h 后，沿水平井径向加热影响半径达到 1.8 m，可为工程

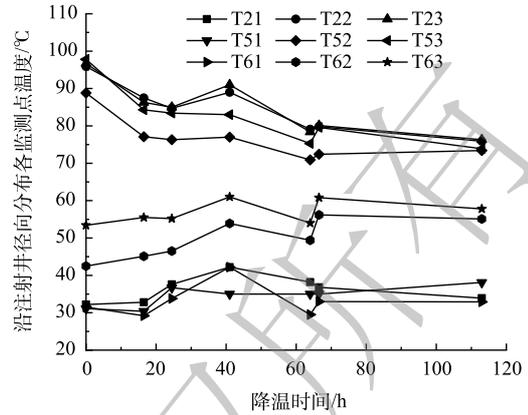


图 10 降温时沿注射井径向不同距离监测点温度变化
Fig. 10 Temperature changes of monitoring points at different distances along the radial direction of injection well during cooling

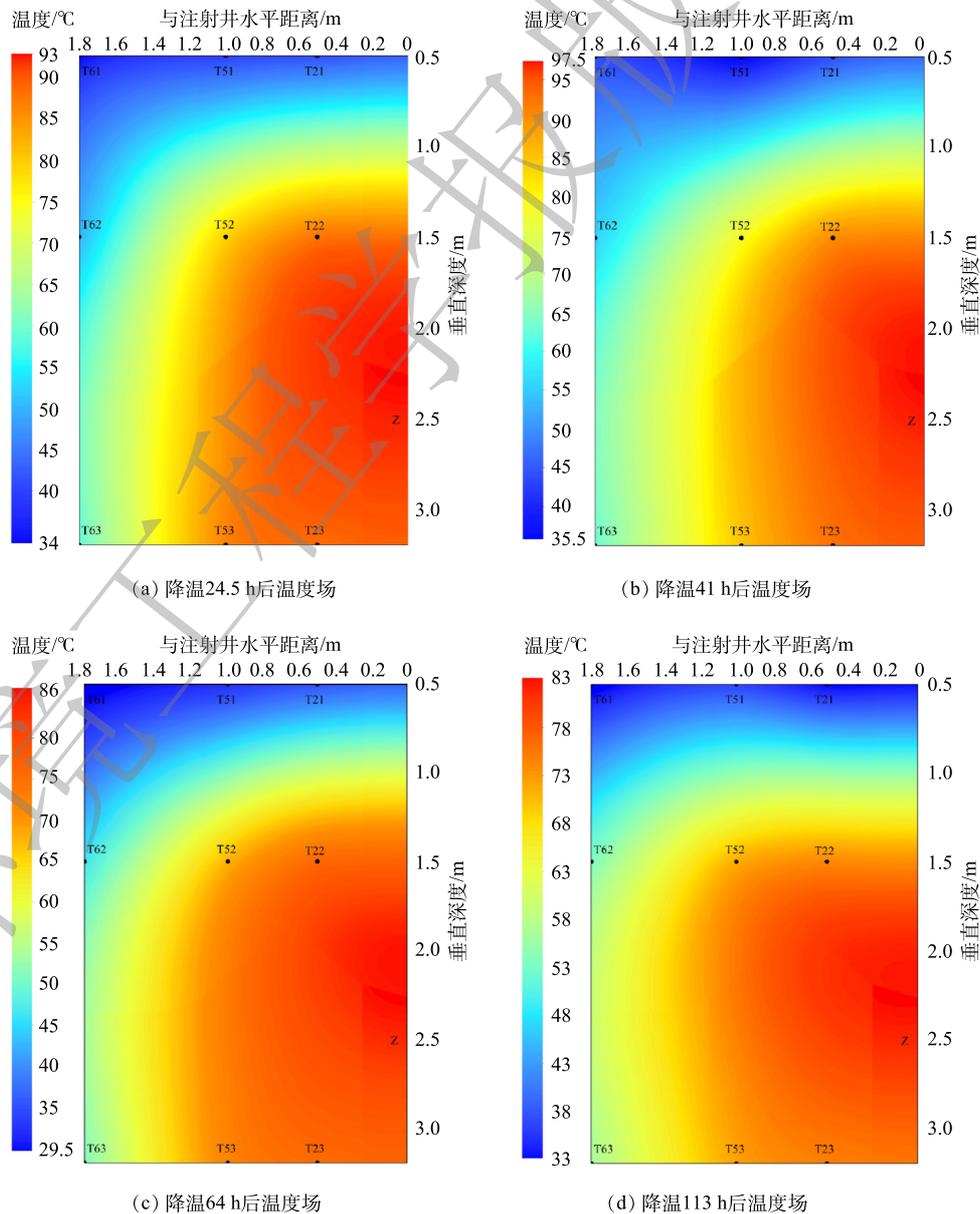


图 11 降温过程中不同时段沿注射井径向分布的温度场

Fig. 11 Temperature fields along the injection well radial distribution at different time periods during the cooling process

设计中水平加热井间距和蒸汽加热周期设计提供参考。

3) 经过 113 h 的持续降温, 初始温度高的区域热量向周边扩散, 加热影响半径范围内土壤温度均保持在目标加热温度以上。停止加热后, 土壤保温效果良好。

4) 应用均匀开筛水平井原位蒸汽加热土壤, 跟端土壤较趾端土壤升温速率快, 水平井周边温场分布不均匀, 工程设计时可通过减少跟端开筛或加密趾端开筛, 使注射井跟端和趾端配汽量较为均匀, 周边温场轴向分布较为均衡。

参 考 文 献

- [1] 梁增强, 杨菁, 毛安琪. 典型行业污染场地重点关注污染物浅析[J]. *广东化工*, 2018, 45(14): 201-202.
- [2] 土壤与地下水修复行业2020年发展报告[R]. 北京: 中国环境保护产业协会, 2021: 219-242.
- [3] 葛锋, 张转霞, 扶恒, 等. 我国有机污染场地现状分析及展望[J]. *土壤*, 2021, 53(6): 1132-1141.
- [4] 于靖靖, 梁田, 罗会龙, 等. 近10年来我国污染场地再利用的案例分析与环境管理意义[J]. *环境科学研究*, 2022, 35(5): 1110-1119.
- [5] 张小刚, 张芳, 李书鹏, 等. 污染场地原位热修复技术与能效分析[J]. *地学前缘*, 2022, 29(3): 200-206.
- [6] 籍龙杰, 沈宗泽, 刘鹏, 等. 有机污染场地原位热脱附工程尾水尾气的处理技术进展[J]. *环境工程学报*, 2022, 16(5): 1407-1415.
- [7] TRINE L S D, DAVIS E L, ROPER C, et al. Formation of PAH derivatives and increased developmental toxicity during steam enhanced extraction remediation of creosote contaminated superfund Soil[J]. *Environmental science & technology*, 2019, 53(8): 4460-4469.
- [8] 生态环境部. 污染土壤修复工程技术规范 原位热脱附(发布稿): HJ 1165-2021[S]. 2021. <https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/other/hjbhgc/202106/W020210616367210958844.pdf>.
- [9] JULIA E Vidonish, KYRIACOS Zygourakis, CAROLINE A Masiello et al. Thermal Treatment of Hydrocarbon-Impacted Soils: A Review of Technology Innovation for Sustainable Remediation[J]. *Engineering*, 2016, 2(4): 426-437.
- [10] 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]. *Groundwater Monitoring and Remediation*, 2021, 41(1): 17-31.
- [11] AZIZAN N A, KAMARUDDIN S A, CHELLIAPAN S. Steam-enhanced extraction experiments, imulations and field studies for dense non-aqueous phase liquid removal: a review[J]. *MATEC Web of Conferences*, 2016, 47: 05012.
- [12] TRINE L S D, DAVIS E L, ROPER C, et al. Formation of PAH derivatives and increased developmental toxicity during steam enhanced extraction remediation of creosote contaminated superfund soil[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(8): 4460-4469.
- [13] WEBB S W, PHELAN J M. Effect of soil layering on NAPL removal behavior in soil-heated vapor extraction[J]. *Journal of contaminant hydrology*, 1997, 27(3): 285-308.
- [14] 刘昊, 张峰, 马烈. 有机污染场地原位热修复: 技术与应用[J]. *工程建设与设计*, 2017(16): 93-98.
- [15] 赵勇胜, 杨元元, 高鹏龙, 等. 多孔介质中热蒸汽的迁移特性及其修复氯苯污染土壤的效果[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2019, 49(5): 1431-1437.
- [16] EPA. How To Evaluate Alternative Cleanup Technologies For Underground Storage Tank Sites [EB/OL]. (2017-10)[2022-6-30]. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P100T6KK.PDF?Dockey=P100T6KK.PDF>
- [17] EPA. Demonstration of steam injection/extraction treatment of a DNAPL source zone at launch complex 34 in cape canaveral Air Force Station Final Innovative Technology Evaluation Report [EB/OL]. (2003-9-30)[2022-6-30]. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P100E920.PDF?Dockey=P100E920.PDF>
- [18] EPA. Application of horizontal wells to enhance site remediation. [EB/OL]. (2020-11-13)[2022-6-30]. https://clu-in.org/download/techfocus/horizontal-wells/Horizontal-Well-Case-Studies-11_13_20_Final.pdf
- [19] 王增林, 张岩, 张全胜, 等. 热采水平井注蒸汽过程中温度场扩展规律[J]. *石油与天然气化工*, 2021, 50(3): 79-84.
- [20] 陈俊华, 李绍华, 刘晋恺, 等. 燃气热脱附技术土壤修复效果及影响因素[J]. *环境工程学报*, 2022, 16(5): 1610-1619.
- [21] EPA. In Situ Thermal Treatment Technologies: Lessons Learned. [EB/OL]. (2015-06)[2022-7-28]. https://www.epa.gov/si-tes/default/files/2015-06/documents/istt_ll_issue_paper.pdf

(责任编辑: 金曙光)

Temperature variation in soil during in-situ steam heating with horizontal wells

LYU Jing^{1,2}, LI Jingwen^{1,2,*}, SUN Yuru^{1,2}, ZHAO Gaoqiang^{1,2}, LIU Peng^{1,2}, LI Shupeng^{1,2}

1. Beijing Construction Engineering Group Environmental Remediation Co., Ltd., Beijing 100015, China; 2. National Engineering Laboratory for Site Remediation Technologies, Beijing 100015, China

*Corresponding author, E-mail:lijingwen@bceer.com

Abstract Steam enhanced extraction with horizontal well has a good application prospect in remediation of organic pollution in site, however, the study of key parameters, such as heating diameter, heating and cooling rate are still in its infancy. Through the demonstration project, a trenchless horizontal well construction method was verified, and researched temperature variation and heating radius in soil during in-situ steam heating with horizontal wells. The results showed that, the steam output of sieve seam decreased gradually from the heel end to the toe end of injection well during the process of steam injection into the horizontal well, resulting in the soil heating rate at the heel end was faster than that at the toe end. The peak temperature was inversely correlated to the distance from the steam injection well. Assuming that the target heating temperature was 50 °C, after 19.5 h of heating process, the steam heating radius of horizontal well reached 1.8 m. After the heating was stopped, the temperature of soil at the heel of injection well decreased more than that at the toe of injection well. The higher the initial soil temperature, the higher the soil cooling rate. After 113 h of natural cooling, the soil temperature within the heating radius was kept above 50 °C, and the soil insulation effect was good. This study can provide reference for the engineering design of soil remediation by steam heating with horizontal well.

Keywords steam heating; horizontal well; trenchless; heating radius