

燃气热脱附中抽提管对于土壤温度的影响

袁高洋^{*#}, 戴秀辉, 狄昌伟, 刘耀, 杨咸睿

江苏大地益源环境修复有限公司, 江苏 南京

收稿日期: 2021年9月6日; 录用日期: 2021年10月7日; 发布日期: 2021年10月14日

摘要

燃气热脱附技术是一种修复场地有机物污染的非常有效的土壤修复技术。国内有许多成功案例, 但对于燃气热脱附技术的温度研究还不多。本文以某华北地块为例, 旨在研究燃气热脱附技术中抽提管对于土壤温度变化的影响。研究表明: 抽提管的布设位置、布设方式以及抽提效果都会对土壤升温造成影响, 抽提管对于浅层、中层土壤温度升温是有益, 而对于深层土壤升温影响效果较弱。

关键词

燃气热脱附, 温度, 抽提管

Effects of Extraction Tube on the Temperature of the Soil during the Gas Thermal Remediation

Gaoyang Yuan^{*#}, Xiuhui Dai, Cangwei Di, Yao Liu, Xianrui Yang

Jiangsu DaDi Bensource Environmental Restoration Co., LTD by VEOLIA, Nanjing Jiangsu

Received: Sep. 6th, 2021; accepted: Oct. 7th, 2021; published: Oct. 14th, 2021

Abstract

Gas thermal remediation technology is a kind of soil remediation technology, which has a good effect on organic pollutants in soil. There are many successful cases in China, but there are few researches on the mechanism of gas thermal remediation technology. This paper, taking a soil in North China as an example, aims to study the effect of extraction well with the process of soil tem-

^{*}通讯作者。

[#]第一作者。

perature change in gas thermal remediation. The results show that the location and the design pattern of the extraction tube have an effect on the soil temperature rise, and the extraction tube is beneficial to the rising temperature of the shallow and the middle soil, but weak in the rising temperature of the deep soil.

Keywords

Gas Thermal Remediation, Temperature, Extraction Tube

Copyright © 2021 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

国务院自 2016 年 5 月 31 日发布《土壤污染防治行动计划》后,国内对于土壤修复越发重视。其内容规定了国内重污染企业需要降低当前的土地污染,还需要将土壤已经污染的土地进行修复,防止进一步的二次污染。这些重污染物企业严重制约了城市的发展和建设[1] [2] [3]。

对于国内污染土壤目前存在污染种类复杂、治理周期紧等特点,针对于此,土壤原位燃气热脱附技术应运而生,原位燃气热脱附技术具有处理范围宽、处理速率快,修复后的土壤的再利用率高等特点[4] [5] [6]。适用于重度有机物污染场地[7] [8] [9],尤其对于苯类、石油烃类污染物有很好的修复效果[10]。关于燃气热脱附的工程案例较多,可以从中发现燃气热脱附技术的修复周期和修复效果取决于场地的污染物浓度、抽提效率以及目标温度等[11] [12] [13] [14],研究燃气热脱附过程中抽提效率与土壤温度之间的关系可以更好将该技术应用于污染土壤修复领域。

2. 试验介绍

本试验地块位于中国华北地区,地下水位较深,钻井过程中,土质较为均匀,试验采用原位燃气热脱附技术,其技术工艺可以分为两部分:热脱附和多相抽提。热脱附是将燃气燃烧后的高温烟气通过加热井向土壤导热,从而提高土壤温度,加快污染物从土壤脱附的速率;多相抽提则是通过后端的动力设备将污染物从各抽提井中收集,后续通过尾端处理设备进一步处理合格后进行排放。

试验井布设位置如图 1 所示,试验区为图中圆形区域,以 7 根 8 米加热井作为热源,横向加热井间距为 2 m,纵向每排加热井距离也为 2 m,整个温度场区呈蜂巢形状。在试验加热井周围再设置一圈加热井,外围加热井间距跟试验区域相同。试验区域设置两种不同类型抽提井,一种是布设在表层平行于地面的水平抽提井,水平抽提井长度为 3 m,布设位置位于试验区下方,抽提出口则位于温度井 4 正下方,埋深为原地表下 0.3 m 处;另一种则是垂直于地面的竖直抽提井;竖直抽提井长度为 8 m,布设位置位于试验区域的右上角。为保证试验数据的可靠性和对比性,在试验区外围加热井中心位置布置温度井,分别为温度井 1~6。每个温度井内共设置 8 个温度点,温度点按照离地表深度每隔 1 m 布置,编号分别为 X02~X09。具体位置如图 1 所示。

所有井管布设完毕后,在地表上部铺设 300 mm 厚水泥层,用于保温隔热。试验区内所有加热井共用一套风机负压系统,抽提井用同一台真空泵进行抽吸处理。试验区内加热井燃气进口均设有热式流量计进行实时监测确保试验区域内的加热井燃气量控制在 $2.3 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 。采用风速仪控制试验区域内加热井进风量稳定在 $100 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 。

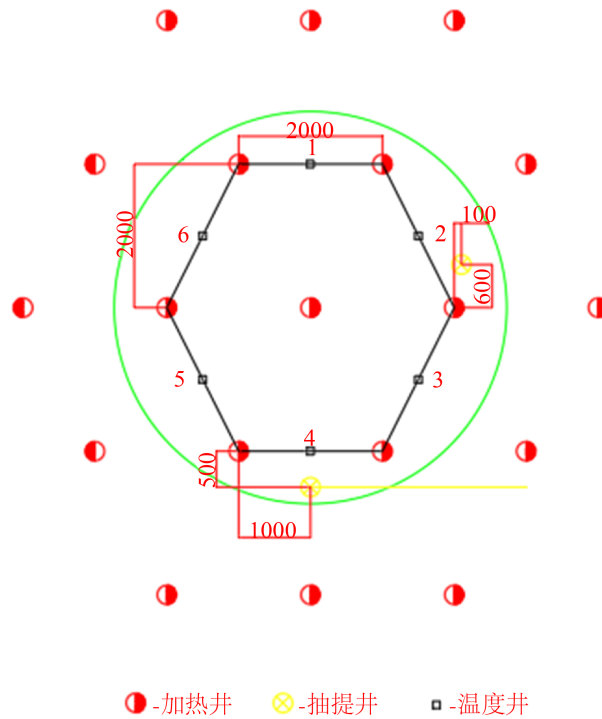


Figure 1. Wells spacing figure of the trade zones
图 1. 试验区布井图

3. 数据整合及分析

整个实验期间，加热井对土壤传热的过程均属于非稳态状态，从传热形式上分析共有三种传热方式存在，但由于本身作为热源的加热井温度并不高，可以忽略掉热辐射的影响，从各个温度井数据初步分析，可以确定土壤中所含水分是制约土壤升温的主要因素之一，那么土壤各温度点的热流密度可以用以下公式[15]表示：

$$q = -\lambda_s \frac{\partial t}{\partial n} - \lambda_w \frac{\partial t}{\partial n} + q_w - q_c - q_l \quad (1)$$

$$\frac{\partial t}{\partial n} = \frac{\partial t}{\partial x} i + \frac{\partial t}{\partial y} j + \frac{\partial t}{\partial z} k \quad (2)$$

Q : 热流密度；

λ_s : 土壤导热系数；

λ_w : 水导热系数；

t : 温度；

q_w : 气、液热对流密度；

q_c : 因抽提过程导致传质热流；

q_l : 因相变引起的热流密度。

因采集数据过程中采集模块问题，导致温度井 3 出现数据紊乱，按照温度测点深度划分为 1、2 米为浅层、4、5、6、7 米为中层、8、9 米为深层，以下为各层温度点对比分析：

从图 2 中 1 米温度点各井温度对比可以发现温度趋势变化基本一致，随着时间的推移，都会长时间停留在 100℃，但不同的是温度井 2 和温度井 4 更早脱离 100℃。这种现象在 2 米温度点各井温度对比图

中更加明显, 离垂直抽提井最近的温度井 2 浅层的温度随着时间推移更快跨越 100℃, 从结果以及上述公式分析, 浅层土壤温度取决于热流密度, 而土壤导热、水导热系数在同一深度点基本相同, 对于抽提管附近的各温度井而言, 抽提管加强了水热对流密度, 但也带走了一部分的传质热流, 同时在抽提过程中带走了浅层大量液相物质, 减少了相变引起的大量热量损失。对于接近水平抽提管的温度井 4 而言, 1 米深度的温度变化与温度井 2 类似, 但在 2 米深度随着抽提效果的减弱, 可以明显看出温度井 4 温度脱离 100℃ 时间要迟于温度井 2。

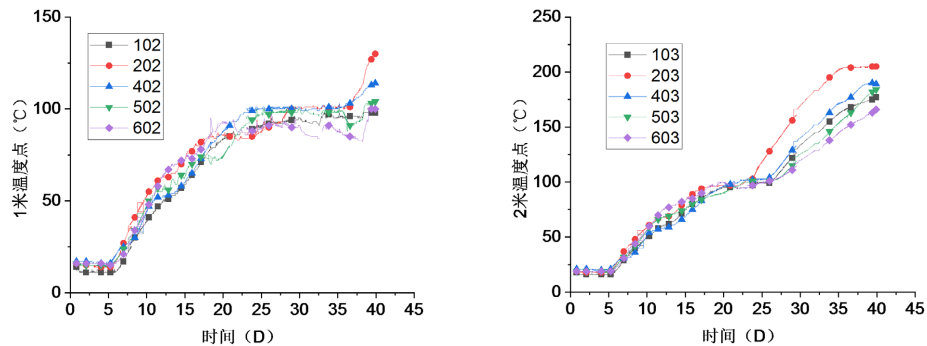


Figure 2. Temperature comparison of shallow temperature wells
图 2. 浅层各温度井温度对比

从图 3 各中层温度井温度变化发现, 温度井 2 都在实验天数 20 天左右时间脱离 100℃ 后, 升温速率随着时间增加逐渐降低, 对于这种现象主要是由于随着深度增加, 抽提管抽力逐渐减弱, 导致气相对流密度减弱, 从而影响温度升温。同样对于温度井 4 而言, 同样由于水平抽提管的影响范围的问题, 导致温度井 4 在中层各温度变化与温度井 1、5、6 的差异性较小。

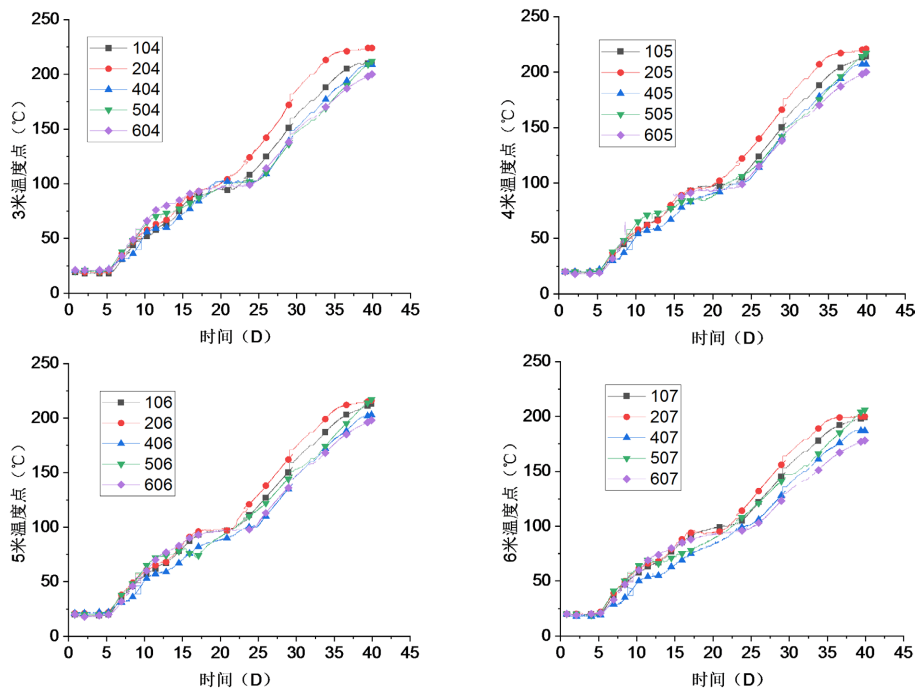


Figure 3. Temperature comparison of middle temperature wells
图 3. 中层各温度井温度对比

图 4 为深层各温度井温度对比, 从图中可以发现, 对于深层温度井温度而言, 温度井 4 在深层温度相较其余温度井更低, 造成这种原因是由于上下层液相冷热的传质热量交换, 对于温度井 4 由于上层的抽提作用, 造成浅层空隙, 形成上下气压差, 导致液相传质热量交替的效果要强于其余各井; 而对于温度井 2 而言, 由于垂直抽提管带走了两相热流, 但也加强了气、液热对流密度, 所以从图 4 中观察并没有形成如图 2、图 3 一样的温度趋势。

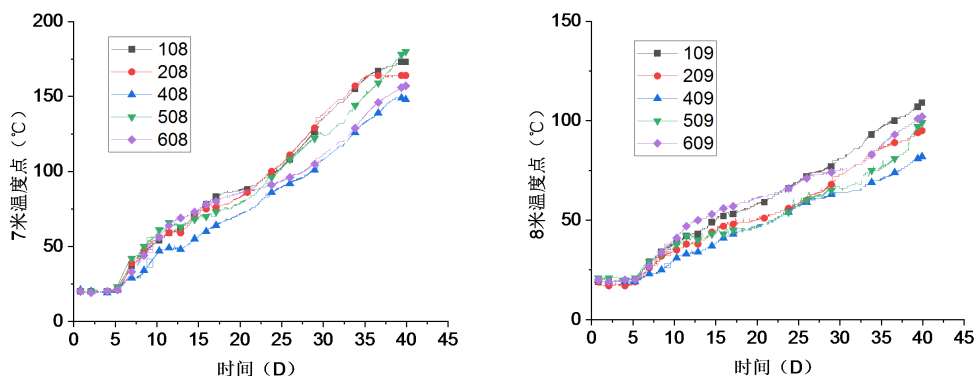


Figure 4. Temperature comparison of deep temperature wells

图 4. 深层各温度井温度对比

4. 结语

1、对于土壤温度而言, 不同形式的抽提管均会对土壤升温曲线造成影响, 这种影响程度跟抽提管抽力有很大关系。

2、抽提管抽力越强, 越对土壤升温有利, 对于抽力强的区域, 抽提管可以有效去除土壤中的水分进而缩短土壤升温过程中 100℃的停留时间, 而对于抽力影响较弱的区域, 由于上层抽提管的作用导致抽提管对于土壤升温的作用越发不明显, 有时反而抑制了土壤温度的提升。

参考文献

- [1] 吴嘉茵, 方战强, 薛成杰, 王旷. 我国有机物污染场地土壤修复技术的专利计量分析[J]. 环境工程学报, 2019, 13(8): 2015-2024.
- [2] 杨勇, 黄海, 陈美平, 李鹏, 牛静, 张文, 等. 异位热解吸技术在有机污染土壤修复中的应用和发展[J]. 环境工程技术学报, 2016, 6(6): 559-570.
- [3] Han, L., Qian, L.B., Yan, J.C., Liu, R.Q., Du, Y.H. and Chen, M.F. (2016) A Comparison of Risk Modeling Tools and a Case Study for Human Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds in Contaminated Groundwater. *Environmental Science and Pollution Research*, **23**, 1234-1245. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5335-4>
- [4] 骆永明. 污染土壤修复技术研究现状与趋势[J]. 化学进展, 2009, 21(2): 558-565.
- [5] 周际海, 黄荣霞, 樊后保, 田胜尼, 李宗勋, 姜伟, 等. 污染土壤修复技术研究进展[J]. 水土保持研究, 2016, 23(3): 366-372.
- [6] 李佳, 曹兴涛, 隋红, 何林, 李鑫钢. 石油污染土壤修复技术研究现状与展望[J]. 石油学报(石油加工), 2017, 33(5): 811-833.
- [7] 梅志华, 刘志阳, 王从利, 臧常娟. 燃气热脱附技术在某有机污染场地的中试应用[J]. 资源节约与环保, 2015(1): 34-35.
- [8] Truex, M.J., Gillie, J.M., Powers, J.G., et al. (2008) *In-Situ Thermal Treatment in Urban Polluted Areas: Application of Thermopile*. *ConSoil*, **1**, 123-132.
- [9] 张学良, 李群, 周艳, 廖朋辉, 辜晓平, 占新华, 等. 某退役溶剂厂有机物污染场地燃气热脱附原位修复效果试

- 验[J]. 环境科学学报, 2018, 38(7): 2868-2875.
- [10] US Army Corps of Engineers (2009) Design: *In Situ* Thermal Remediation. Department of the Army, Washington DC.
- [11] Zhao, C., Mumford, K.G. and Kupper, B.H. (2014) Laboratory Study of Non-Aqueous Phase Liquid and Water Co-Boiling during Thermal Treatment. *Journal of Contaminant Hydrology*, **164**, 49-58.
<https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2014.05.008>
- [12] 白四红, 陈彤, 祁志福, 刘洁, 陆胜勇, 薄拯, 等. 载气流量及升温速率对污染土壤中多氯联苯热脱附的影响[J]. 化工学报, 2014, 65(6): 2256-2263.
- [13] Heron, G., Van Zutphen, M., Christensen, T.H. and Enfield, C.G. (1998) Soil Heating for Enhanced Remediation of Chlorinated Solvents: A Laboratory Study on Resistive Heating and Vapor Extraction in a Silty, Low-Permeable Soil Contaminated with Trichloroethylene. *Environmental Science & Technology*, **32**, 1474-1481.
<https://doi.org/10.1021/es970563j>
- [14] 王瑛, 李扬, 黄启飞, 张增强. 污染物浓度与土壤粒径对热脱附修复 DDTs 污染土壤的影响[J]. 环境科学研究, 2011, 24(9): 1016-1022.
- [15] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 第4版. 北京: 高等教育出版社, 2006(6): 76-82, 301-302, 540-545.