

原位热脱附小试模拟装置土壤温度研究

海 巨^{1,2}, 孙袭明³, 吴晓霞^{1,2}, 梁贤伟^{1,2}

¹国环危险废物处置工程技术(天津)有限公司, 天津

²国家环境保护危险废物处置工程技术(天津)中心, 天津

³天津大学环境科学与工程学院, 天津

收稿日期: 2023年5月22日; 录用日期: 2023年6月23日; 发布日期: 2023年6月30日

摘 要

原位热脱附技术主要用于修复有机污染场地, 具有无需挖掘运输、适用性广、修复效率高等特点, 已在国内外众多场地应用。目前国内对于原位热脱附修复技术的装置设备研究较为缺乏, 大多工程技术参数以经验为主。本文通过原位热脱附小试模拟装置研究加热棒程序升温 and 土壤温度曲线, 以及最高可达温度等关键参数; 加热稳定后通过更改抽提风机功率探究抽提压力对土壤温度分布的影响。结果表明, 加热棒程序升温即每加热200℃保温2 h方式保护加热棒可避免其高温熔断; 加热棒程序升温稳定在600℃, 距离加热棒5 cm、10 cm、15 cm处土壤温度最高可达440℃、330℃、290℃; 调节抽提压力可影响土壤温度场分布, 抽提压力过大会增大热量损失, 增大设备运行负荷。

关键词

原位热脱附, 小试装置, 温度场

Study on Soil Temperature Using *In-Situ* Thermal Desorption Small-Scale Simulation Device

Ju Hai^{1,2}, Ximing Sun³, Xiaoxia Wu^{1,2}, Xianwei Liang^{1,2}

¹Guohuan Hazardous Waste Disposal Engineering Technology (Tianjin) Co., Ltd., Tianjin

²State Environmental Protection Engineering Center (Tianjin) for Hazardous Waste Disposal, Tianjin

³School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin

Received: May 22nd, 2023; accepted: Jun. 23rd, 2023; published: Jun. 30th, 2023

Abstract

In-situ thermal desorption is mainly used for the remediation of organic contaminated sites, with the characteristics of no need for excavation and transportation, wide applicability, and high remediation efficiency. It has been applied in many sites both domestically and internationally. There is a lack of research on the equipment for *in-situ* thermal desorption, and most parameters are mainly based on experience. This work studied heating rod programmed temperature and soil temperature, as well as the maximum achievable temperature, using a small-scale simulation device. The influence of extraction pressure on soil temperature distribution was investigated by changing the power of extraction after heating stabilization. The results indicate that the heating rod can be protected from high-temperature melting by heating it up in a programmed manner. The heating rod was stable at 600°C, and the maximum soil temperature could reach 440°C, 330°C, and 290°C at distances of 5 cm, 10 cm, and 15 cm from the heating rod, respectively. Adjusting the extraction pressure can affect the distribution of soil temperature field. Excessive extraction pressure can increase heat loss and increase equipment operating load.

Keywords

In-Situ Thermal Desorption, Small-Scale Test Device, Temperature Field

Copyright © 2023 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. 概述

随社会经济发展, 土壤污染问题日益严重, 众多石油、化工、农药等老厂区改建搬迁, 急需进行修复。目前, 土壤热脱附修复技术是处置有机污染物最有效的办法之一[1]。该技术利用间接或直接的加热方法, 将污染土壤加热至特定温度, 通过控制系统温度和加热时间使土壤中的挥发性、半挥发性污染物挥发、分解或与其他物质发生共沸等反应, 使其与土壤颗粒分离进入气相, 通过抽提管道抽出去除[2] [3] [4] [5]。同时会对热脱附过程产生的废水和尾气进行收集和处理, 避免排放到大气中产生二次污染[6]。

温度是影响原位热脱附修复效率的最主要因素, 温度越高越有利于污染物的去除。例如硝基苯在热脱附温度 165°C 时去除效率仅有 15.07%, 温度提升至 215°C 其去除效率达到 86.32% [7]。萘在热脱附温度 165°C 时去除效率仅有 28.62%, 当温度提升至 220°C 其去除效率可提升至 88.28% [8]。有学者通过建立原位热传导修复耦合模型探究热源温度对原位热修复的影响[9] [10]; 也有学者利用仿真模拟软件对原位热脱附技术处理土壤升温过程进行模拟, 得到土壤温度场分布, 并结合现场修复试验验证模拟结果[11] [12]。

目前国内对于原位热脱附修复技术的装置设备研究较为缺乏, 工程技术参数多以项目经验为主。国外有学者通过二维小试实验装置研究饱和和多孔介质中有机污染物去除机制[13], 并进一步拓展到规模更大周期更长实验更复杂的三维中试装置[14]。国内也有学者利用原位电阻热脱附小试设备, 研究电阻加热、加热方式、补水和负压等对土壤升温 and 能耗的影响, 探究土壤升温机制和关键影响因素[15]。本实验通过自研设备原位热传导小试装置模拟场地土壤升温过程, 探究影响土壤温度场分布的因素, 可为原位热脱附过程热力学研究提供技术手段, 也可为日后实际工程项目提供有效依据。

2. 材料与方法

2.1. 实验设备

本实验使用自制小试装置模拟原位热脱附技术在实际污染场地应用时土壤温度场变化过程，装置如图 1 所示，包括装填土壤箱体、加热井、测温井、抽提井、保温层、温度及压力传感器等。本装置外部尺寸长 810 mm、宽 360 mm、高 600 mm，内部填土区域长 416 mm、宽 300 mm、高 250 mm，有效容积 0.03 m³，可填约 40 kg 土量。土壤箱体四周填充保温棉，一侧安装防尘网并通过管子连接真空泵，实现对加热土壤中水蒸气的抽提。

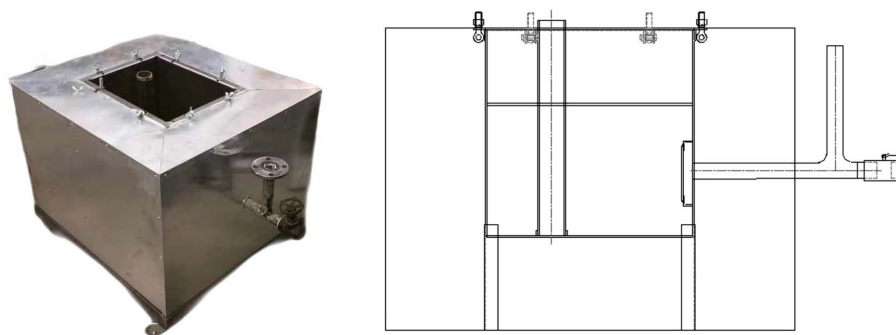


Figure 1. Experimental setup for small-scale experiments
图 1. 小试实验装置

2.2. 实验土壤

本实验供试土壤采自天津某场地，土壤性质见表 1。土壤采集后自然风干，去除碎石及植物根茎等，粉碎研磨过 10 目筛后存储黑暗阴凉处备用。将供试土壤分层填入土壤箱体内，分层洒水按压，保持箱体内土水分布均匀并控制土壤含水率在 10% 左右。填土完成后加盖密封做好保温措施即可开始原位热脱附土壤温度研究。

Table 1. Properties of the test soil
表 1. 供试土壤性质

项目	土壤质地	pH	含水率/%	CEC /cmol(+)\kg	土粒比重	容重	有机质	液限/%	塑限/%
参数值	砂质土壤	8.08	2.0	7.0	2.69	1.21	4.6	25.0	17.7

2.3. 实验方法

在小试装置填土后将测温热电偶插入指定位置，并做好保温措施。先设置抽提压力为 -10 Pa，然后通过智能温度控制 PLC 系统设置加热棒升温程序稳定在 600℃，过程中记录实验加热周期和土壤温度曲线，以及最高可达温度等关键参数；在加热稳定后更改抽提风机功率，探究抽提压力对土壤温度分布的影响。

本实验使用加热设备为电加热棒，材质不锈钢，直径 30 mm，功率 350 W。温度控制使用智能温度控制 PLC 系统，主要作用为启停控制、程序调温、高温保护。温度采集使用 K 型热电偶，测温范围在 0℃~800℃。小试装置内测温点的布设情况如图 2 所示，测温井距离加热棒分别为 5 cm、10 cm、15 cm，热电偶插入土壤深度为 12.5 cm，保持热电偶位于土壤箱体中间位置。抽提系统使用风机连接冷凝设备后

连接抽提管道，产生负压可将土壤内气体抽出，通过调节抽提风机的功率可研究抽提负压对土壤传热传质过程的影响。

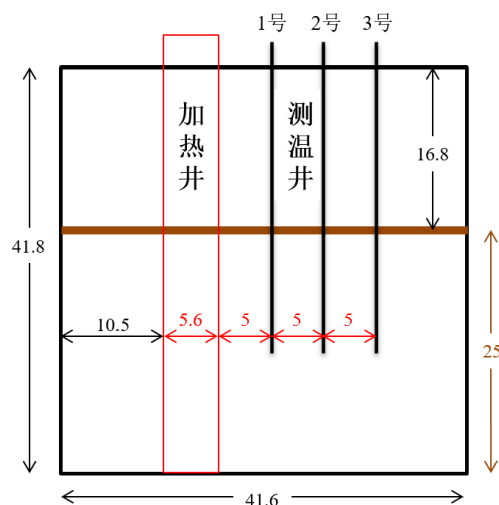


Figure 2. Layout of temperature measurement
图 2. 测温点位布置图

3. 结果与讨论

采用电加热棒进行原位模拟加热研究时，通过设置程序升温的方式可有效避免加热棒升温速率过快而熔断。因为加热棒外套管内除了有起发热作用的电阻丝外，还有起保护作用的支撑件和填料以及少量空气。若骤然升至过高的温度，势必会造成电阻丝应力改变，严重会导致加热元件损坏。因此，为确保系统稳定运行，防止升温过快对加热元件造成损坏，升温阶段需采用保护性的升温程序。实验结束后的降温阶段同理，需避免加热棒骤冷。如图 3(a)所示，在实验第一阶段设置加热棒升温程序为 200℃~300℃ 加热时间 50 min，升温至 400℃~500℃ 加热 30 min，然后稳定在 600℃，但加热棒在 4 min 后仍被烧断。原因可能为不同加热棒所需升温程序根据材料性质等差异有所不同，此次加热棒设置升温速率偏快，需要进一步延长加热棒程序升温时间。

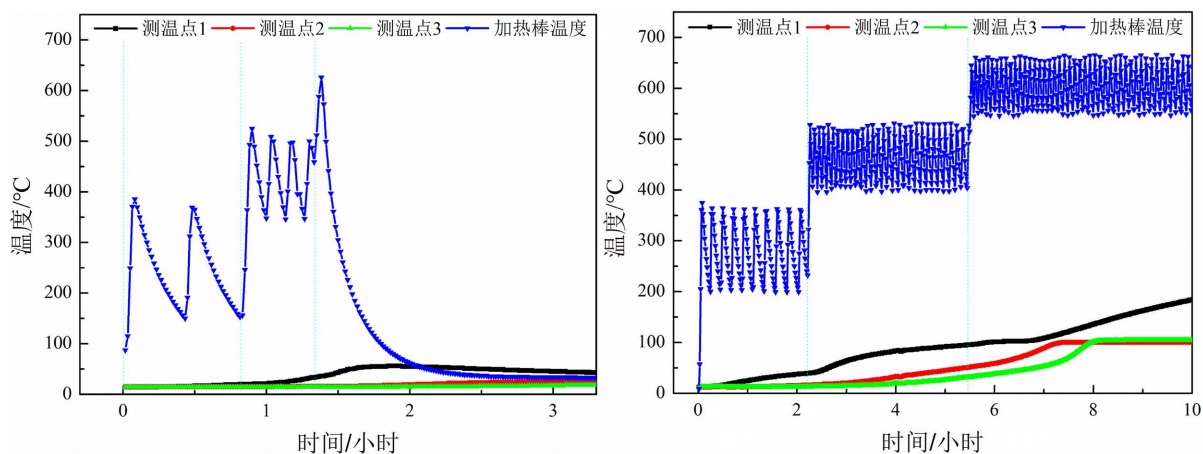


Figure 3. Heating rod temperature program
图 3. 加热棒程序升温图

更换加热棒, 设置第二阶段升温程序为 200℃~300℃, 加热时间 2 h, 升温至 400℃~500℃加热 3 h, 然后稳定在 600℃。由图 3(b)可知, 加热棒正常工作, 土壤温度逐渐升高。整个实验过程中, 加热棒并非一直处于加热状态, 否则其温度会一直上升直至烧坏。实际加热时是依靠 PLC 自控系统的启停操作将加热棒温度控制在一定区间内。设置加热棒温度为 500℃, 该区间的上下限温度则分别为 450℃和 550℃, 即当加热棒升至 550℃时会自动停止加热, 降至 450℃时自动开始加热。本实验中, 由于加热棒与外部套管之间是空气, 传热性能不佳, 加热棒上的温度难以迅速传导到外部; 因此在第二次实验中向套管内填充了导热材料石墨粉以期增强传热性能, 缩短启停时间, 进而缩短实验周期, 但实际效果有限且增加了工作量, 不适合现场工程应用。

加热棒程序升温稳定在 600℃, 土壤温度呈快速升温、稳定蒸发、过热段三个阶段(图 4)。距离加热棒 5、10、15 cm 处土壤温度在快速升温阶段经 7 h 左右可到达 100℃, 并在稳定蒸发阶段分别持续 0.1 h、30.7 h、77 h, 测温点 1 处再经过约 90 h 达到最高温度 440℃, 此时 2、3 号处温度分别为 280℃、150℃。

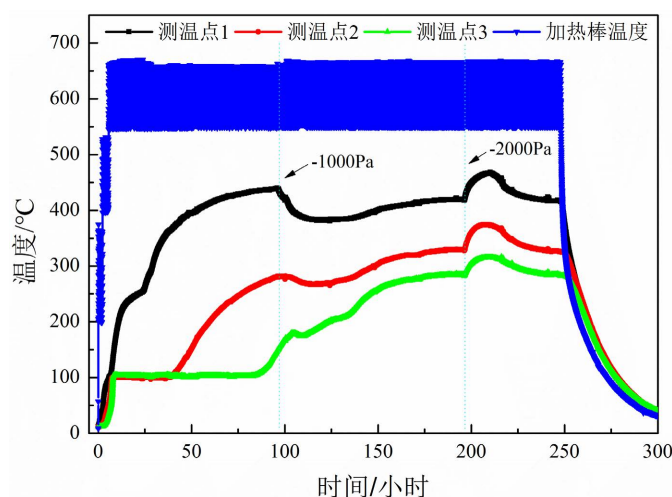


Figure 4. Soil temperature curve under different conditions

图 4. 不同条件下土壤温度变化曲线图

在加热 24 h 后 1 号测温点升温速率快速升高, 原因可能为实验过程中在小试装置外部上方又铺设了一层保温棉。由此可见, 装置气密性和保温效果极大地影响了土壤升温速率和传热效果。在后续实验中, 小试装置内铺设土壤完毕后, 再铺一层较细的石英粉以降低透气性; 盖上内盖后, 在缝隙处用耐火胶泥涂好以保证气密性。内盖和外盖之间由保温垫和保温棉填好压实, 外盖四周也用保温棉填堵, 最后在实验装置上方铺设一层 5~10 cm 厚保温棉, 做好装置保温工作。

在测温点 1 处温度趋于稳定时, 调节抽提压力从 -10 Pa 到 -1000 Pa, 结果如图 4 所示, 测温点 1 处温度迅速下降, 随加热时间逐渐趋于稳定; 测温点 2 处由于距离加热棒稍远, 温度传递相对于 1 号有滞后, 2 号处温度先短暂维持 280℃后开始降低, 但在 10 小时后开始逐渐升温到 330℃; 测温点 3 号处土壤持续升温到 290℃, 但调节抽提压力后加热速率稍有降低。当土壤温度在抽提压力 -1000 Pa 条件下稳定时, 将调节抽提压力从 -1000 Pa 调整到 -2000 Pa, 三个土壤测温点处规律保持一致, 先快速升温再逐渐降温, 然后三点温度都趋于稳定在调整前状态分别为 420℃、330℃、290℃。由此可见, 增加抽提压力热量随抽提方向移动, 使得土壤温度场分布均匀, 避免加热棒周围区域出现过热而冷点及周边区域过冷的现象, 但抽提压力增加使得热量损失增加。综上, 调节抽提压力可影响土壤温度场分布, 抽提压力过大对土壤温度没有明显促进作用, 且造成大量热量损失, 增加能耗, 增大设备运行负荷。

4. 结论

通过原位热脱附小试模拟装置获得了加热棒程序控温、实验加热周期和土壤温度曲线，以及最高可达温度等关键参数；在加热稳定后，又通过更改抽提风机功率，验证了抽提压力对土壤温度分布的影响。为进一步研究原位热脱附过程中土壤内水-气-污染物传热传质过程及机制奠定基础。

1) 通过程序性升温保护加热棒，避免由于骤热骤冷导致加热棒烧断的情况。

2) 加热棒稳定在 600℃，距离加热棒 5、10、15 cm 处土壤温度最高可达 440℃、330℃、290℃。做好装置气密性及保温工作可有效提高热脱附过程热量利用，提高土壤升温速率。

3) 适当调节抽提压力可促进场地温度均匀分布；负压过大增加热量损失，增大设备运行负荷。

参考文献

- [1] 焦文涛, 韩自玉, 吕正勇, 等. 土壤电阻加热技术原位修复有机污染土壤的关键问题与展望[J]. 环境工程学报, 2019, 13(9): 2027-2036.
- [2] Kingston, J.L.T., Johnson, P.C., Kueper, B.H., *et al.* (2014) *In Situ Thermal Treatment of Chlorinated Solvent Source Zones*. Springer, New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6922-3_14
- [3] Ma, F., Peng, C., Hou, D., *et al.* (2015) Citric Acid Facilitated Thermal Treatment: An Innovative Method for the Remediation of Mercury Contaminated Soil. *Journal of Hazardous Materials*, **300**, 546-552. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.07.055>
- [4] Cao, H., Cai, F., Jiao, W., *et al.* (2018) Microwave-Induced Decontamination of Mercury Polluted Soils at Low Temperature Assisted with Granular Activated Carbon. *Chemical Engineering Journal*, **351**, 1067-1075. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.06.168>
- [5] Kingston, J.L.T., Dahlen, P.R. and Johnson, P.C. (2010) State-of-the-Practice Review of *in Situ* Thermal Technologies. *Groundwater Monitoring & Remediation*, **30**, 64-72. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6592.2010.01305.x>
- [6] 孟祥帅, 庞然, 吴萌萌, 等. 某废弃焦化场地原位燃气热脱附污染排放及控制[J]. 环境工程, 2019, 37(11): 177-183.
- [7] 孙袭明. 有机污染土壤热脱附技术的影响因素研究及模拟系统开发[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2018.
- [8] 梁贤伟, 孙袭明, 吴晓霞. 原位热脱附土壤修复技术的关键影响因素研究[J]. 广州化工, 2020, 48(10): 79-82.
- [9] 刘立朋, 顾海林, 詹明秀, 等. 原位热传导修复过程中热量传递的数值模拟[J]. 环境工程学报, 2021, 15(11): 3606-3615.
- [10] Zhai, Z.Z., *et al.* (2019) Fuzzy Coordination Control Strategy and Thermohydraulic Dynamics Modeling of a Natural Gas Heating System for *in Situ* Soil Thermal Remediation. *Entropy*, **21**, Article No. 971. <https://doi.org/10.3390/e21100971>
- [11] 付建英, 徐化, 余权, 等. 原位热脱附修复污染土壤加热效果模拟和试验研究[J]. 能源工程, 2021(1): 70-73.
- [12] Wang, W., Li, C., Li, Y.Z., *et al.* (2019) Numerical Analysis of Heat Transfer Performance of *in Situ* Thermal Remediation of Large Polluted Soil Areas. *Energies*, **12**, Article No. 4622. <https://doi.org/10.3390/en12244622>
- [13] Baker, R.S., Heron, G., Lachance, J., *et al.* (2008) 2-D Physical Models of Thermal Conduction Heating for Remediation of DNAPL Source Zones in AQUITARDS. *ConSoil 2008*, Milano, 3-6 June 2008. <https://doi.org/10.21236/ADA520587>
- [14] Hiester, U., Müller, M., Trtschler, O., *et al.* (2008) Dominating Processes during DNAPL Removal from the Saturated Zone Using Thermal Wells. *ConSoil 2008*, Milano, 3-6 June 2008.
- [15] 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.