

# 浅谈异位热强化气相抽提土壤修复技术的应用

侯明<sup>1</sup>, 付文怡<sup>2</sup>

<sup>1</sup>上海新球环境工程咨询有限公司, 上海

<sup>2</sup>上海格林曼环境技术有限公司, 上海

Email: [houming1989@xinqiush.com](mailto:houming1989@xinqiush.com), [wenyi.fu@greenment.net](mailto:wenyi.fu@greenment.net)

收稿日期: 2021年5月7日; 录用日期: 2021年6月8日; 发布日期: 2021年6月15日

---

## 摘要

阐述了异位热强化气相抽提土壤修复技术的应用模式, 并简要介绍了该技术的应用技术参数及能耗情况; 比较了该技术与一般土壤热脱附技术以及土壤气相抽提技术的优缺点, 并分析了该技术的应用趋势。

## 关键词

异位修复, 热强化气相抽提, 参数设定, 对比分析

---

# Elementary Introduction of the Application of *Ex-Situ* Thermally Enhanced Soil Vapor Extraction Soil Remediation Technology

Ming Hou<sup>1</sup>, Wenyi Fu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Shanghai Xinqiu Environmental Engineering Consulting Co., Ltd., Shanghai

<sup>2</sup>Shanghai Greenment Environmental Technology Co., Ltd., Shanghai

Email: [houming1989@xinqiush.com](mailto:houming1989@xinqiush.com), [wenyi.fu@greenment.net](mailto:wenyi.fu@greenment.net)

Received: May 7<sup>th</sup>, 2021; accepted: Jun. 8<sup>th</sup>, 2021; published: Jun. 15<sup>th</sup>, 2021

---

## Abstract

This article explains the application mode of *ex-situ* thermal enhanced soil vapor extraction re-mediation technology (T-SVE), and briefly introduces the application technical parameters and the energy consumption of this technology. It also discusses the advantages and disadvantages of

## T-SVE when it is compared with general soil vapor extraction technology, and the future application of the technology.

### Keywords

**Ex-Situ Remediation Technology, Thermally Enhanced Soil Vapor Extraction, Parameter Setting, Comparison**

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

传统气相抽提土壤处理技术(SVE)一般用于去除土壤中有机污染物以及石油烃污染物。这项技术能达到从总量上去除污染物的目的,但对于土壤中沸点较高、较难挥发的SVOCs、石油烃等污染物的去除效果较差[1]。近几年,热强化气相抽提(T-SVE)得到越来越多的应用,该技术结合了传统气相抽提以及热脱附的技术原理,弥补了传统气相抽提在处理高沸点难挥发的SVOCs以及石油烃上的不足。

### 2. 热强化气相抽提土壤修复技术基本原理

热强化气相抽提土壤处理技术(T-SVE)是一种结合了传统土壤气相抽提技术与土壤热脱附处理技术的新型土壤修复治理技术,该技术一般多应用于土壤原位修复,主要用于处理土壤中石油类、挥发性有机物和半挥发性有机物污染物质,一般不应用于重金属的处理(金属汞除外)。热强化气相抽提土壤处理技术的主要原理是通过热交换,将土壤中的有机污染物加热到一定温度,从而使有机污染物从污染介质上得以挥发(即使污染物发生物理形态上的改变,从而达到污染物与土壤颗粒分离的目的)进入气体处理系统的过程。

热强化气相抽提的加热模式大致为3种:电阻加热(ERH)、热传导加热(TCH)以及蒸汽加热(SEE) [2]。电阻加热是以一个核心电极为中心,在电极周围建立电极阵,使其与核心电极形成正负极产生电流,并依靠土壤作为电阻发热的过程;热传导加热方式是采用电或者燃气作为加热井热源,通过热传导使土壤升温的过程;蒸汽加热是将蒸汽注射到井中加热土壤的过程。通过上述加热模式,土壤中污染物达到目标温度形成气体,并经由抽提井抽离土壤。

### 3. 异位热强化气相抽提土壤修复

异位热强化气相抽提土壤修复是原位热强化气相抽提的一种衍生应用方式。它是将清挖土壤按照设计规格堆放在指定区域,并利用热风进气管和气相抽提管按照一定位置要求插入到待修复土堆,从而对土壤进行加热以及土壤气相抽提的一种异位修复模式(见图1~3)。

异位热强化气相抽提技术对土壤的最高加热温度一般控制在200°C~350°C范围内[3],对于绝大部分有机污染物以及石油烃,在短时间内均具有良好的修复效果。目前异位热强化气相抽提多应用热传导加热(TCH)形式对土壤进行升温加热。

由于该设备的加热设备形式简单,其保温效果欠佳,对土壤的加热效果很难达到325°C以上的温度。对于部分沸点较高的SVOC,如PAH(沸点在400°C~500°C)、PCB(沸点多在300°C~400°C),以及石油烃中沸点在300°C以上的组成部分等,去除效果较差[3][4]。



Figure 1. Moving the stainless steel panels into position [5]

图 1. 钢管在堆体中布设[5]



Figure 2. Fitting the burners [5]

图 2. 与燃烧器链接[5]

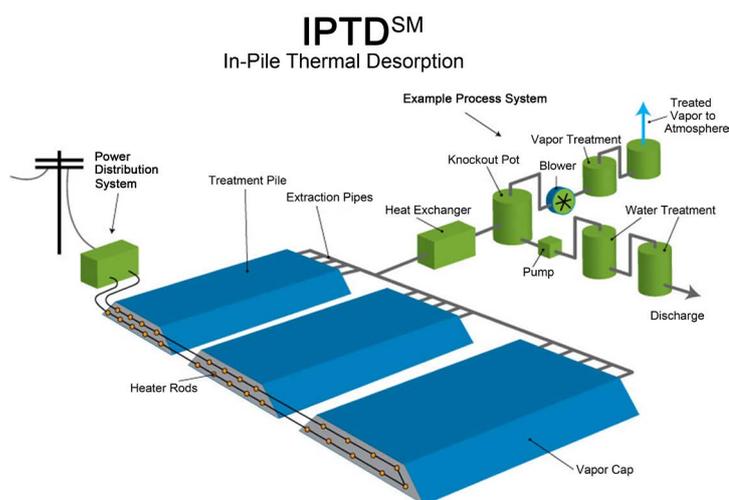


Figure 3. IPTD soil thermal desorption repair system of American TERRATHERM Company

图 3. 美国 TERRATHERM 公司的 IPTD 土壤热脱附修复系

### 3.1. 异位热强化气相抽提技术系统组成单元

异位热强化气相抽提大致由 4 个单元组成, 分别为加热单元、尾气处理单元、水处理单元以及辅助整个运行系统的自控单元。其中尾气处理单元、水处理单元、自控单元的单员组成以及作用与原位热强化气相抽提相同: 尾气处理单元一般由喷淋塔、气液分离、除尘系统、活性炭吸附系统和烟囱组成, 用

于处理经由抽提井输送过来的气态污染物；水处理单元主要用于处理尾气处理单元所产生的废水；自动控制单元则主要用于以上单元的系统控制。

异位热强化气相抽提与原位热强化气相抽提的最大不同在于其加热单元(土壤堆体)。加热单元由燃烧器、加热井和土堆组成。通过工期和异位修复场地面积设计堆体的尺寸，通过物料衡算以及以往经验设计抽提系统[4]，一般以相对距离 1~3 m 在堆体侧面水平插入加热井管。加热井之间以三角形或正方形的方式排列[6]。每个三角形中心设置抽提井(或在堆体中心高度设置一排)，用于收集土壤的热脱附气体。

该加热模式下，土壤堆体的升温过程一般分为三个阶段：第一阶段中，土壤含水率较高(约 20%~30%)，需使土壤升温至 100℃ (约需要 20~30 天)；第二阶段中，堆体温度上升至 100℃后，根据土壤含水率，该温度将维持 10~60 天的时间直到堆体中绝大部分土壤水分蒸发；第三阶段中，当土壤中大部分水分蒸发后，土壤开始迅速升温至指定温度。为保证土壤堆体温度减少散热，土壤堆体表面铺设保温层。

考虑到热传导效率及施工条件：土壤堆体一般宽度不超过 20 m，高度一般在 2 m 左右。堆体长度则可根据处理方量及施工现场条件而定。在土壤建堆和热脱附运行初期，土堆会产生一部分渗水，故对土壤堆体下方设置垫层，且该垫层需设计一定的水力坡度，并设计集水坑收集渗水。集水坑内的渗水将被收集到水处理系统进行处理。土壤堆体达到目标温度后，为有效利用高温烟气，可将 1.5~2 个加热套管串联，即 2 个加热管的尾气烟气作为第三个加热管的进气烟气，或一个加热管的尾气烟气作为第二个加热管的进气烟气。

对于控制异位热强化气相抽提系统处理污染土壤的修复终点，可以通过对土壤堆体和系统运行参数的监测判断来实现。监测参数包括：堆体表面温度、堆体中心温度、热脱附气污染物浓度、能源消耗程度、阶段性土壤检测结果等。在工程应用中，根据土壤含水率测定、烟气污染物测定来判断修复终点，调节土壤加热温度。当抽提气烟气中目标污染物浓度下降到一定值时，即可停止加热土壤。

### 3.2. 相关技术参数及能耗分析

异位热强化气相抽提的修复效果以及能耗情况与所需修复的土壤性质紧密相关，土壤的有机质含量、含水量、渗透性、以及环境温度都是直接影响该技术能耗以及修复效果的参数。土壤的高有机质含量、高含水率、低渗透性、低环境温度都将降低土壤修复效果，从而增加能耗[7]。故在进行异位热强化气相抽提前需要对土壤的相关理化性质做一定调查，并以此作为系统其它参数(加热温度、建堆宽度及高度、加热预估时间等)设定依据(表 1、表 2)。

**Table 1.** General parameters of *ex-situ* heat-enhanced gas-phase extraction heating unit

**表 1.** 异位热强化气相抽提加热单元一般参数

项目	一般要求参数
土壤含水率	<20%~30%
土壤渗透率	>10 <sup>-6</sup> cm/s
土壤加热温度	150℃~300℃
建堆高度	约 2 m
建堆宽度	<20 m
加热运行总时长	40~150 d
水分蒸发(升温并维持 100℃)	根据土壤含水率，约 5~60 d
高温维持时间	根据污染浓度确定
堆体表面密封	使用耐高温防渗膜或水泥

**Table 2.** Energy consumption analysis of *ex-situ* thermally enhanced gas phase extraction operation  
**表 2.** 异位热强化气相抽提运行能耗分析

项目	单位	价格(元)	每吨土用量	备注
天然气	m <sup>3</sup>	3.67	38~55	价格按照天然气使用量在 120~500 万 m <sup>3</sup> 区间计算
电	Kw/h	0.274~1.168	20~32	具体单位价格需根据总用电量区间、用电季节、用电时段确定
水	吨	5	0.5~1	循环用水

注: 每吨土材料用量借鉴于上海某热脱附项目施工方案; 各材料具体价格需根据施工时当地实时市场价判断。

### 3.3. 相关案例分析

现阶段具有代表性的异位热强化气相抽提的应用案例较少, 下表介绍了几个较有代表性的案例。下列几个应用异位热强化气相抽提进行土壤修复的案例均达到预期修复效果(表 3)。

**Table 3.** Application cases of *ex-situ* thermally enhanced gas-phase extraction soil remediation technology [5] [8] [9]  
**表 3.** 异位热强化气相抽提土壤修复技术应用案例[5] [8] [9]

修复公司/项目地点	修复目标污染物	修复放量(m <sup>3</sup> )	目标温度	修复效果	费用
江苏大地益源/某化工厂 (现场中试)	甲苯、二甲苯	200	120℃	达标	-
上海市某动力机厂	石油烃、汞	2739	250℃	达标	约 80 万元
上海格林曼环境技术有限公司/华东某搬迁化工厂	2,4-二氯苯酚	-	160℃~200℃	达标, 由最高本底值 120.6 mg/kg 下降至最高检测浓度 2.6 mg/kg。	-
East Midlands Development Agency/Chesterfield, Derbyshire (英国, 德比郡)	PAHs、石油烃	900	250℃~350℃	PAHs 平均去除率达到 70.8%, 最高去除率达到 99%; 石油烃平均去除率达到 73.7%, 最高去除率达到 99.5%。	中试规格约 £100/m <sup>3</sup> , 大型修复项目约 £63~£68/m <sup>3</sup>

## 4. 与原位热强化气相抽提修复技术的比较

**可有效避免原位修复模式下所产生的二次污染:** 传统意义上的热强化气相抽提一般是指土壤原位修复技术。原位热强化气相抽提土壤修复技术在土壤加热过程中必须要考虑到场地地下水的情况。针对场地地下水不同污染程度及水位, 需考虑采用不同的加热形式以及该加热形式可能对周边土壤及地下水造成的二次污染, 必要时可能需要建设止水帷幕以防止污染物扩散。异位热强化气相抽提修复所采用的修复形式使污染土壤与未受污土壤完全分离, 从根本上杜绝了对相应区域土壤和地下水的二次污染。

**受地下水含量影响小:** 异位在地下水水量丰富的地区, 原位热强化气相抽提的实施需考虑到污染物的目标温度、能够达到该温度的加热形式以及该加热信息的能耗量。电阻加热(ERH)、以及蒸汽加热(SEE)对土壤的加热温度区间较为有限。现阶段蒸汽加热的最大加热温度为 170℃, 且该加热方式多应用于土壤包气带; 在含水情况下, 电阻加热能够使土壤快速升温到 100℃, 但之后土壤的最高温度基本维持在 120℃左右不再升高[10], 因此在地下水量较为丰富的区域, 上述两种加热方式不太适用于沸点较高的污染物质的治理。热传导加热(TCH)可以将土壤加热较高温度, 但前期温度升至 100℃的时间受地下水影响较大, 大量地下水会使该升温时间延长, 从而加重能耗。异位热强化气相抽提直接避免了地下水及其补给过程对土壤升温的影响。此外, 在能够有效控制污染物挥发的前提下, 可以通过通风晾晒等方式减少土壤初期含水量, 从而达到减少升温能耗的目的。

**土壤修复过程需注意大气二次污染防治:** 热强化气相抽提多应用于处理挥发及半挥发性有机污染物, 而对此类土壤进行修复作业时易发生有机污染物挥发, 从而造成二次污染。异位热强化气相抽提在清挖、建堆、升温加热的过程中需特别注意有机污染气体的挥发, 必要时可能借助密闭大棚等设施防治大气二次污染。

## 5. 结论

异位热强化气相抽提较适用于小方量污染土壤, 对于处理沸点低于 300℃的有机污染物可达到较好的修复效果。该修复技术设备简单, 易于操作, 相较于原位修复模式, 本技术受环境因素影响较小, 对于土壤和地下水造成二次污染的风险较小, 具有较好的应用前景。

## 参考文献

- [1] 刘少卿, 姜林, 黄喆, 李艳霞, 林春野. 挥发及半挥发有机污染物场地蒸汽抽提修复技术原理与影响因素[J]. 环境科学, 2011, 32(3): 825-833.
- [2] 刘惠. 污染土壤热脱附技术的应用于发展趋势[J]. 环境与可持续发展, 2019, 44(4): 144-148.
- [3] Naval Facilities Engineering Service Center (1998) Overview of Thermal Desorption Technology. An Investigation Conducted by Foster Wheeler Environmental Corporation and Battelle Corporation, June 1998, Contract Report CR 98.008-ENV. Naval Facilities Engineering Service Center, Port Hueneme, California.
- [4] Naval Facilities Engineering Service Center (1998) Application Guide for Thermal Desorption Systems. Technical Report TR-2090-ENV, April 1998. Naval Facilities Engineering Service Center. Port Hueneme, California.
- [5] Remediation Trial at the Avenue Using Thermal Treatment. CL: AIRE (Contaminated Land: Applications in Real Environments), Case Study Bulletin, November 2006, 1-4.
- [6] 杨乐巍, 张晓斌, 郭丽莉, 李书鹏. 异位土壤气相抽提修复技术在北京某地铁修复工程中的应用实例[J]. 环境工程, 2016, 34(5): 170-172+142.
- [7] 张学良, 廖朋辉, 李群, 周艳, 万金忠, 龙涛, 林玉锁, 徐建. 复杂有机物污染地块原位热脱附修复技术的研究[J]. 土壤通报, 2018, 49(4): 993-998.
- [8] 冯凯. 电热脱附在某有机污染土壤修复的应用实例[J]. 环境科技, 2017, 30(2): 39-42+46.
- [9] 梅志华, 赵申. 热强化气相抽提法在某有机污染场地的中试应用[J]. 化工管理, 2015(11): 167-168.
- [10] 王宜庆. 基于原位电热的粉质黏土高温处理应用研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连海事大学, 2020.