

团 体 标 准

T/ACEF ×××—20××

重金属—有机物复合污染土壤修复技术规范 稳定化—堆体式热脱附

Technical specifications for remediation of heavy metal—organic co—contaminated
sites——Stabilization—in pile thermal desorption

（征求意见稿）

20××—×—×发布

20××—×—×实施

中华环保联合会 发布



目 次

前言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 总体要求 2

5 工艺设计 2

6 检测与过程控制 7

7 施工与调试 8

8 运行与管理 8

附录 A（资料性）工艺设计基础资料 10

附录 B（资料性）堆体式热脱附系统结构示意图（热传导加热） 11

参考文献 13



前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由浙江卓锦环保科技股份有限公司提出。

本文件由中华环保联合会归口。

本文件起草单位：浙江卓锦环保科技股份有限公司、中国科学院南京土壤研究所、浙江大学、中节能大地（杭州）环境修复有限公司。



重金属—有机物复合污染土壤修复技术规范

稳定化—堆体式热脱附

1 范围

本文件规定了重金属—有机物复合污染地块土壤稳定化—堆体式热脱附组合修复的总体要求、工艺设计、检测与过程控制、施工与调试、运行与管理等。

本文件适用于受到重金属和挥发性有机物、半挥发性有机物复合污染的土壤，采用稳定化—堆体式热脱附组合工艺进行修复。其中，重金属主要包括：铅、铜、镉、镍、铬（六价）、汞、砷等；挥发性有机物主要包括：苯系物、短链石油烃、挥发性卤代烃等；半挥发性有机物主要包括：多环芳烃、多氯联苯、多溴联苯等。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB 18599 一般工业固体废物贮存和填埋污染控制标准

GB/T 20801 压力管道规范 工业管道

GB 50028 城镇燃气设计规范

GB 50187 工业企业总平面设计规范

GB 50275 风机、压缩机、泵安装工程施工及验收规范

GB 50494 城镇燃气技术规范

HJ 1165—2021 污染土壤修复工程技术规范 原位热脱附

HJ 25.5—2018 污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术导则（试行）

3 术语和定义

下列术语适用于本标准。

3.1

稳定化 stabilization

通过稳定化药剂与污染物间的化学反应将污染物转化成难于溶解和浸出形态的过程。

[来源 污染土壤修复工程技术规范 固化/稳定化(HJ 1282-2023)]

3.2

堆体式热脱附 in pile thermal desorption

将开挖后的污染土壤按照一定要求堆积于防渗区域并进行密闭隔热,通过间接加热的方式使目标污染物从土壤中挥发并抽提去除的处理过程,包括热传导加热及蒸汽加热。

4 总体要求

4.1 一般要求

4.1.1 稳定化—堆体热脱附修复工程实施前,前应收集以下资料:

- a) 污染物种类及污染物浓度,重点关注易挥发、恶臭类污染物;待修复土方量;
- b) 污染土壤理化性质,包括土壤质地、土壤重量含水率、土壤渗透性、导热性、土壤密度、土壤比热容、土壤 pH 等;
- c) 区域气候条件,包括气温、降水量、主导风向等;
- d) 地块用途(目前及未来规划);
- e) 能源供应条件,包括临水、临电、燃气、蒸汽供应等;
- f) 土壤修复目标值和修复后土壤的去向。

4.1.2 稳定化—堆体式热脱附的工艺运行参数需开展中小试进行验证,确定修复工艺方案。

4.1.3 污染土壤处理,采用二次污染少、环境风险低、自动化程度高、安全可靠的处理设备及其辅助设施。土壤中含有腐蚀性污染物时,应选择具有耐腐蚀性、耐磨损性和较高机械强度的处理设备。

4.1.4 修复工程应配套防渗漏、防逸散、废水废气收集及处理、噪声控制等污染防治相关设施及措施,防止修复过程对生态环境产生二次污染,污染防治设施必须与主体工程同时设计、同时施工、同时运行。

4.1.5 修复单元应配备监测设备,对污染物排放进行监测;应符合国家和地方污染物排放标准、排污许可、环境影响评价文件及其审批意见的要求。

4.1.6 处理后的土壤在保证人体健康风险和环境风险可以控制的前提下,最终处置宜优先考虑资源化利用;作生活垃圾卫生填埋覆土使用,应符合 GB 18599 的要求。

4.2 场地要求

4.2.1 施工作业场地选择与布置应参照 GB 50187 的规定执行;修复单元宜选在污染地块内,在污染地块外,应根据自然条件、地理位置条件、交通运输条件、周边敏感区域等要求进行选择,远离居民区等敏感点;考虑稳定化—堆体式热脱附施工机械运行、土壤堆放的地基承载力要求。

4.2.2 堆体式热脱附作业场地严禁存放易燃易爆危险化学品,安全距离应符合 GB 50494 等国家或相关行业标准规定。

4.2.3 燃气管道设计及安装应符合 GB 50028、GB 50494 的要求;蒸汽注入管道、输送泵的设计安装需满足 GB/T 20801。加热设备和管道应设置保温绝热层,地面管道、装置外表面温度宜不高于 60℃,同时在现场高温区域设置警示标志。

5 工艺设计

5.1 一般要求

5.1.1 修复工程设计、施工、运行除符合本标准外，还应符合国家现行的法律、法规、标准、项目修复设计与实施方案的相关规定。

5.1.2 工艺设计应因地制宜、科学合理，具备针对性和有效性。修复工艺顺序应根据污染地块特征进行优化，充分考虑加热过程对稳定化药剂及污染物的影响。

5.1.3 工艺设计方案主要包括组合工艺实施顺序，土壤预处理，稳定化药剂筛选与施用，热脱附堆体及其配套加热、抽提、废水废气系统建设与运行，过程二次污染防治等设计。

5.2 修复工艺组合原则

a) 若热脱附条件能促进稳定化药剂（如生石灰、氧化镁、黏土矿物等）对重金属的稳定，宜先加入稳定化药剂，完成热脱附后再进行养护；

b) 若热脱附条件会导致稳定化药剂（如亚铁、硫化物等还原性物质）丧失其对重金属的稳定化作用，应先进行热脱附，再稳定化；

c) 若热脱附条件对重金属（如铬、锌、砷）产生浸出浓度升高等活化作用，可先进行热脱附，保证后续稳定化效果；或先进行稳定化修复，选择不受加热影响的稳定化药剂；

d) 若热脱附条件对重金属（如镉）产生固化作用，宜先进行热脱附，可减少稳定化药剂用量；

e) 当污染土壤存在异味或挥发性有机污染物时，宜先进行热脱附。

5.3 土壤预处理

5.3.1 土壤预处理包括筛分、破碎与混合搅拌等工序。

5.3.2 土壤中含有石块、建筑垃圾等非土壤物质，可使用筛分设备去除；土壤中砂砾含量较多时，可采用多级筛分去除 2 mm 以上砂砾进行减量。

5.3.3 堆体式热脱附处理土壤应满足含水率低于 20%、粒径小于 50mm 的条件。

5.3.4 稳定化处理后土壤进行建堆，也需要满足含水率和粒径的要求；热脱附处理后土壤应重新测定土壤的理化性质和污染物特征，根据新的结果确定稳定化实施相关参数。

5.4 稳定化

稳定化工艺流程为：稳定化药剂比选及配方确定，在污染土壤中按比例添加药剂，对土壤、药剂进行充分搅拌混合，处理完成后土壤制成规则堆体，调节水分并进行养护。工艺流程见图 1。

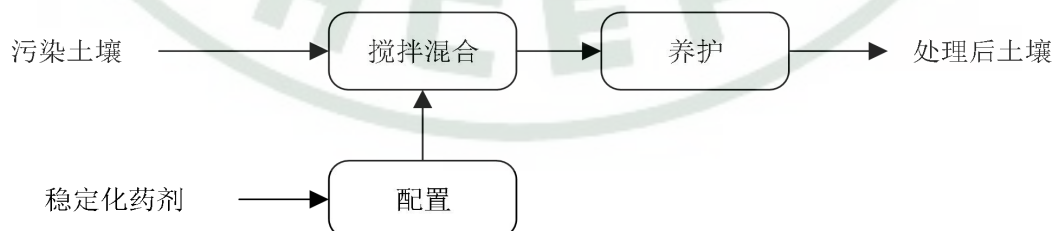


图 1 稳定化工艺流程图

5.4.1 稳定化药剂选择原则参照《污染土壤修复工程技术规范 固化/稳定化（征求意见稿）》6.3.1，药剂选择应考虑污染土壤处理工艺顺序，先稳定化后热脱附处理，不宜使用有机类及还原性稳定剂。

5.4.2 可根据污染物种类、污染程度、土壤理化性质、药剂热稳定性等指标，选择多种稳定化备选药剂；开展小试、中试研究，综合评估药剂用量、成本、水土比、混合搅拌方式、混合时间、养护时间等参数，确定稳定化药剂种类和施用方式。

5.4.3 加入稳定化药剂后进行建堆热脱附的土壤，药剂配比和水土比应根据热脱附条件进行调整。

5.4.4 搅拌完成或热脱附完成后将土壤堆成条垛状，调节土壤含水率，保持水分养护。

5.5 堆体式热脱附

5.5.1 堆体式热脱附工艺流程

堆体式热脱附具体工艺流程见图 2。

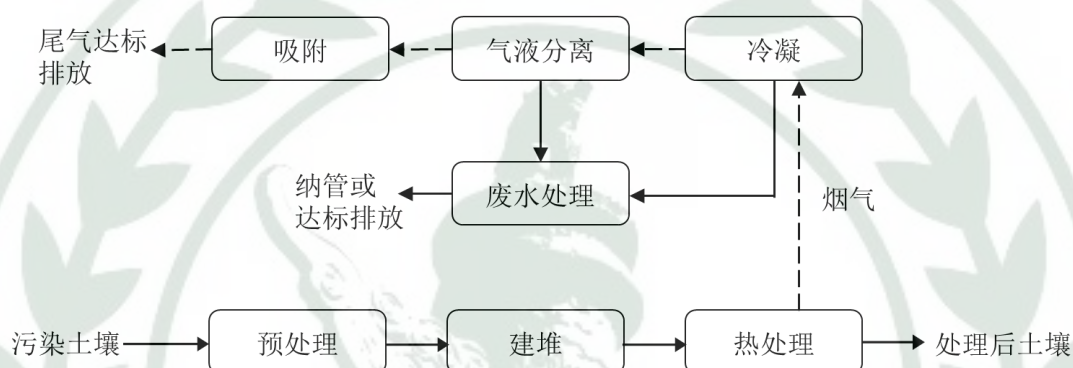


图 2 堆体式热脱附工艺流程图

5.5.2 堆体建设

5.5.2.1 建堆地面应铺设防渗层或隔污层，防止污染物迁移扩散。

5.5.2.2 堆体底部应铺设隔热地坪，堆体四壁与顶部应覆盖隔热层或铺设硬化绝热层，减少热量散失。

5.5.2.3 单个堆体尺寸与建设规模应根据污染土方量、项目施工周期、处置场面积和能源供给等因素确定。通常单个堆体宽度不超过 10m，高度不超过 6m，多采用 2~3m。堆体侧面坡度一般控制在 1:1~1:5，以保证堆体的稳定性。示意图见附录 B。

5.5.3 加热系统

5.5.3.1 加热系统主要由供热单元和加热管组成，蒸汽加热系统为蒸汽生成单元和蒸汽注入管。供热方式的选取应根据污染物种类、土质特征、场地能源供应条件、修复时间和成本要求等条件确定。供热方式的适用条件分析可参照 HJ 1165—2021 附录 A。

5.5.3.2 采用热传导加热方式，应选择清洁燃料产生热烟气，如天然气。

5.5.3.3 堆体式热脱附能耗可通过公式①进行估算：

$$Q_T = (Q_s + Q_w + L_w + L_p) / \eta \dots\dots\dots (1)$$

式中：

Q_T ——总能量，kJ；

Q_s ——土壤加热所需能量, kJ;

Q_w ——土壤水加热所需能量, kJ;

L_w ——土壤水相变所需能量, kJ;

L_p ——堆体表面热量损失, kJ;

η ——热传导效率。

a) 土壤加热所需能量可由公式②计算:

$$Q_s = V \rho_s * (1 - \varphi) * (T_e - T_o) * C_s \dots \dots \dots (2)$$

式中:

V ——土方量, m^3 ;

ρ_s ——土壤密度, kg/m^3 ;

φ ——土壤含水率;

T_e ——土壤加热目标温度, K;

T_o ——土壤初始温度, K;

C_s ——土壤比热容, $kJ/(kg \cdot K)$ 。

b) 土壤水加热所需能量可由公式③计算:

$$Q_w = V * \rho_w * \varphi * (100 - T_o) * C_w + V * \rho_w * \varphi * (T_e - 100) * C_w' \dots \dots \dots (3)$$

式中:

ρ_w ——水密度, kg/m^3 ;

C_w ——水比热容, $kJ/(kg \cdot K)$;

C_w' ——水蒸气比热容, $kJ/(kg \cdot K)$ 。

c) 土壤水蒸发带走热量可由公式④计算:

$$L_w = V * \rho_w * \varphi * l_w \dots \dots \dots (4)$$

式中:

l_w ——水蒸发潜热 (25℃时, 水的蒸发潜热是 44kJ/mol)。

d) 堆体表面热量损失根据堆体表面铺设隔热材料导热系数、隔热面积、隔热厚度、温差等参数计算。

e) 电热导管热传导效率可达 99%, 燃气热导管热传导效率为 30%—60%。

f) 总能量由燃料提供, 当燃料为天然气时, 所需天然气总量可由公式⑤计算:

$$V_N = Q_T / 35588 \text{ kJ/Nm}^3 \dots \dots \dots (5)$$

式中:

V_N ——天然气体积, m^3 。

h) 当能量由蒸汽提供, 蒸汽量可由公式⑥计算:

$$V_G = Q_T / H_G \dots\dots\dots (6)$$

式中:

V_G ——所需蒸汽量, kg;

H_G ——蒸汽热焓值, kJ/kg。

5.5.3.4 加热管数量可根据计算出的能量需求、单根加热管的功率、堆体的体积、修复目标等因素确定, 单根加热管功率由厂家提供。

5.5.3.5 加热管排布方式一般采用正三角形或正六边形, 加热管间距一般为 1.5~4m, 根据堆体形状、体积以及加热管数量进行调整。

5.5.3.6 蒸汽注入管宜水平铺设在堆体底部, 为管壁开筛的不锈钢管, 堆体示意图见附录 B 图 B.3。

5.5.3.7 加热系统相关工艺设备和材料选择参照 HJ 1165—2021 7。

5.5.4 抽提系统

5.5.4.1 抽提系统主要由抽提管和真空泵构成。抽提管连接真空泵, 将挥发出的气体抽出, 进入气液分离装置。

5.5.4.2 抽提管一般排布在加热管形成的正三角或正六边形中心, 或与加热管分层交替排布(附录 B 图 B.2)。

5.5.4.3 抽提管与加热管数量比宜在 1:5~2:3 之间, 有效抽提方位应在水平及垂直方向上覆盖整个堆体, 污染物浓度较高的土壤, 抽提管数量可适当增加。

5.5.4.4 蒸汽加热抽提管可水平铺设在距离堆体顶部 0.5m 内。堆体底部增加集水管, 收集蒸汽冷凝后产生的废水输送至废水处理系统。

5.5.4.5 抽提管应采用耐高温、耐腐蚀的材质, 如碳钢或 304 不锈钢。抽提管与污染土壤间应填充滤料, 并用金属滤网包裹。抽提管的设计安装需满足 GB/T 20801。

5.5.4.6 抽提系统应提供足够的负压, 负压应根据污染物浓度、堆体体积、污染土壤性质确定。真空泵的设计安装应满足 GB 50275 要求。

5.5.5 废水废气处理系统

5.5.5.1 通过抽提系统收集的气体经过冷凝后气液分离, 产生的废水、废气分别进行处理。

5.5.5.2 废水、废气处理单元工艺选择及设计要求参考 HJ 1165—2021 6.3.8 和 6.3.9。

5.5.5.3 抽提气冷凝阶段可采用适宜的措施回收系统余热, 将回收热量应用于工艺内部。

5.6 二次污染防治措施

5.6.1 预处理和稳定化施工应在车间或有覆盖堆场内进行, 车间配备废气收集处理装置, 施工产生的扬尘应采取洒水等抑尘措施。

5.6.2 药剂、干粉材料等不应露天堆放, 料仓应设置除尘装置。

5.6.3 堆体式热脱附修复后土壤可采用水喷淋方式使土壤的含水率增至 10%~25%, 实现抑尘。

5.6.4 应对施工和运行过程产生的废水进行收集、处理和回用，废水处理系统宜采用密闭结构，避免水体中的挥发性物质无组织逸散。

5.6.5 预处理筛分出的石块和建筑垃圾，清洗后可进行资源化利用。

5.6.6 堆体式热脱附使用的隔热地坪、隔热膜等可回收利用，如有破损，则作为一般固体废物收集处理。

5.6.7 堆体式热脱附废气处理产生的废活性炭属于危险废物，应按危险废物相关标准处理处置。

5.6.8 尽量选用低噪声或备有消声降噪设备的施工机械，加强机械设备的维修保养，降低施工噪声对周边环境的影响。

6 检测与过程控制

6.1 检测

6.1.1 土壤修复效果检测分为重金属稳定化效果检测和有机物去除效果检测，重金属检测宜在修复过程完全结束后采样，有机物检测可在堆体式热脱附结束后采样。

6.1.2 重金属稳定化效果检测应每批采样，布点数量和位置遵循 HJ 25.5—2018，原则上每个采样单元（每个样品代表的土方量）不应超过 500m³。

6.1.3 重金属稳定化效果一般采用浸出测试进行评估，选择合适的浸出方法和评估标准，重金属浸出浓度需达到土壤修复目标并满足土壤后续利用相关要求。

6.1.4 有机物去除效果检测宜在堆体拆除前采样，取样点应设置在热脱附堆体顶部、边界、底部以及相邻加热管距离中心等修复薄弱区域，推荐采样数量参见表 1。

6.1.5 堆体土壤取样宜采用钻孔方式进行，可根据土壤性质和钻探作业条件选择合适的钻探设备。

表 1 堆体式热脱附修复后推荐采样数量

堆体体积/m ³	采样单元数量/个
<100	1
100~300	2
300~500	3
500~1000	4
每增加 500	增加 1 个

6.2 过程监测与控制

6.2.1 若采用专用设备混合污染土壤和稳定化药剂，需监测的指标包括：污染土壤的给料速率、药剂入料速率、土壤在搅拌机中的停留时间、加水速率、搅拌速度等。若采用普通搅拌设备，需对单位土壤加药量、加水量、搅拌时间等进行记录。

6.2.2 稳定化养护过程中，需对土壤含水率进行监测，保持水分。对六价铬稳定化土壤，还需监测土壤 pH 和氧化还原电位，保持还原环境。

6.2.3 堆体式热脱附运行时，应对堆体内压力、温度等指标进行监控。土壤堆体监测点的布设根据加热管排布方式确定，一般在加热管所围成形状的中心位置布置一个监测点。在加热温度相对较低、距离加热管较远等修复薄弱区域，可增加监测点数量。

6.2.4 蒸汽加热堆体应对蒸汽注入量、注入压力、注入温度进行监测。通常情况下，注入速率为抽提速率的 20%~80%，堆体内温度宜保持在 70℃ 以上。

6.2.5 堆体式热脱附运行时，应对真空泵的工作情况、抽提管管口压力和温度进行监控。

6.2.6 堆体式热脱附废水废气排放口应设有采样点和在线监测装置，对处理过的废水废气进行检测，达标后排放。

6.2.7 根据监测结果及时调整优化工况，保证修复工艺稳定运行。堆体式热脱附装置应配有安全联动装置，在发生突发情况时，可以关闭热脱附加热系统。

7 施工与调试

7.1 施工

7.1.1 修复工程实施前，应制定详细的施工方案，包括工作计划、人员组成、工艺设计、设备运行维护、安全措施、应急预案等内容，并通过专家论证。

7.1.2 应按施工方案要求进行车间、大棚等的基础施工，满足建设安装要求，土壤预处理、稳定化—堆体式热脱附、药剂储存和配制等区域的地面防渗、隔热、承重等应满足设计要求。

7.1.3 土壤堆体应满足设计要求，根据实际情况对堆体进行整形和边坡处理，保证堆体稳定。

7.1.4 若需要在堆体上钻孔，钻孔位置应避开水平铺设的管道，选择堆体承载压力范围内的钻探设备，避免对堆体产生破坏。

7.2 调试

7.2.1 工程安装、施工完成后应首先对相关仪器仪表进行校验，后根据工艺流程进行分项调试和整体调试。

7.2.2 整体调试要求：各项系统运转正常，技术指标达到设计要求，加热管、抽提管气密性良好。

7.2.3 调试期间应对工程运行进行性能试验，主要包括以下内容：

- a) 土壤稳定化药剂混合效果；
- b) 加热系统对土堆加热效果；
- c) 抽提系统最大抽提量；
- d) 废水系统处理效率；
- e) 废气系统处理效率；
- f) 能源和药剂消耗；
- g) 运行稳定性。

8 运行与管理

8.1 一般规定

8.1.1 稳定化—堆体式热脱附修复工程的运行、维护和安全管理的除执行本标准外，还应符合国家现行标准的有关规定。

8.1.2 应在满足设计工况的条件下运行，并根据工艺要求，定期对设备、电气、仪器仪表进行检查维护，确保系统稳定可靠运行。

8.1.3 应建立健全与污染土壤修复工程相关的各项规章制度，以及运行、维护和操作规程，建立主要设备运行状况的台账制度。

8.1.4 工程运行效果未达到设计要求时，应及时排查问题并采取相应措施，必要时可调整设计方案。

8.2 热脱附系统启动与停止

8.2.1 堆体式热脱附运行应在系统通过整体调试、各环节运转正常、技术指标达到设计要求后启动。启动顺序为废气处理单元—抽提单元—废水处理单元—供热单元—加热单元。

8.2.2 运行和维护人员可根据现场的数据，包括，判断系统的停止时间。停机顺序为加热单元—供热单元—抽提单元—废气处理单元—废水处理单元。

8.3 人员与运行管理

8.3.1 稳定化—堆体式热脱附整个系统应设专人管理和运行，对管理和运行人员进行定期培训并考核，考核合格后上岗。

8.3.2 管理和运行人员应严格按照操作规程作业，并对系统启动、运行、维护、停止等各项详实记录并妥善保存。

附 录 A
(资料性)
工艺设计基础资料

表 A 给出了工艺设计所需要的基础资料

表 A 工艺设计资料表

基础资料	稳定化	堆体式热脱附
场地和土壤特征		
污染地块特征	场地布置与堆体建设	
待修复土方量	/	堆体大小与处理批次
土壤质地组成	确定预处理工艺、混合搅拌方式等	
土壤重量含水率	确定预处理工艺、水分控制和药剂配 方	确定预处理工艺、供热方式和堆体水分控 制
土壤渗透性	工艺设计	供热方式
土壤密度	/	热脱附能耗估算
土壤比热容	/	热脱附能耗估算
土壤 pH 值	判断药剂反应环境及其对浸出特性 的影响	判断土壤对管道、机械的潜在腐蚀性
能源供给	/	供热方式
修复目标值	修复目标确定与土壤最终处置	
污染物特征		
污染物种类	用于药剂比选与配方确定	确定热脱附温度与时长，组合工艺顺序
污染程度	判断药剂用量	确定热脱附温度与时长
污染物浸出	判断污染并提供基础数据	/
稳定化药剂		
药剂种类	判断组合工艺顺序	

附录 B
(资料性)
堆体式热脱附系统结构示意图 (热传导加热)

图 B.1 给出了堆体式热脱附系统结构示意图 (热传导加热)

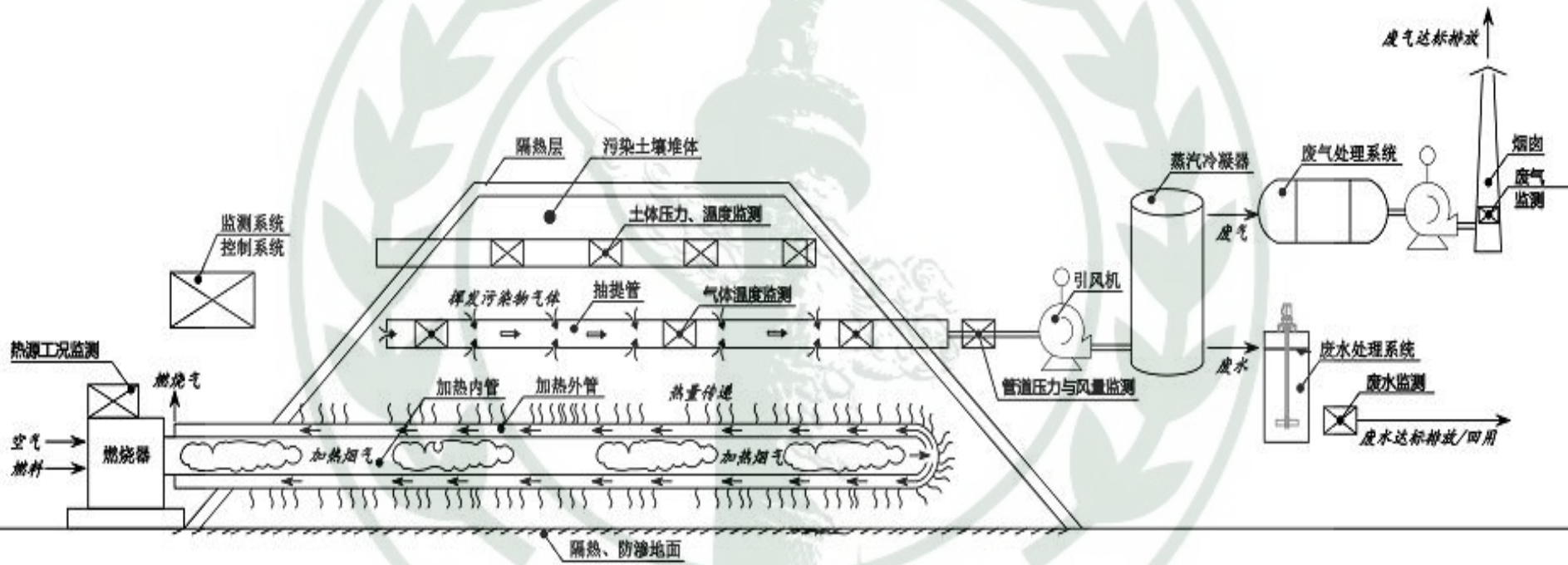


图 B.1 堆体式热脱附系统示意图

图 B.2 给出了加热管/抽提管/监测点布设示例（热传导加热）

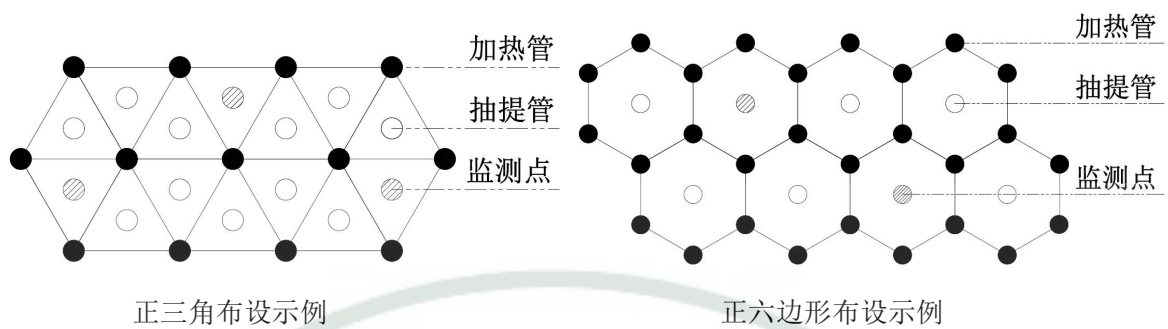


图 B.2 加热管/抽提管/监测点布设示例（热传导加热）

图 B.3 给出了蒸汽加热堆体立面横向示意图

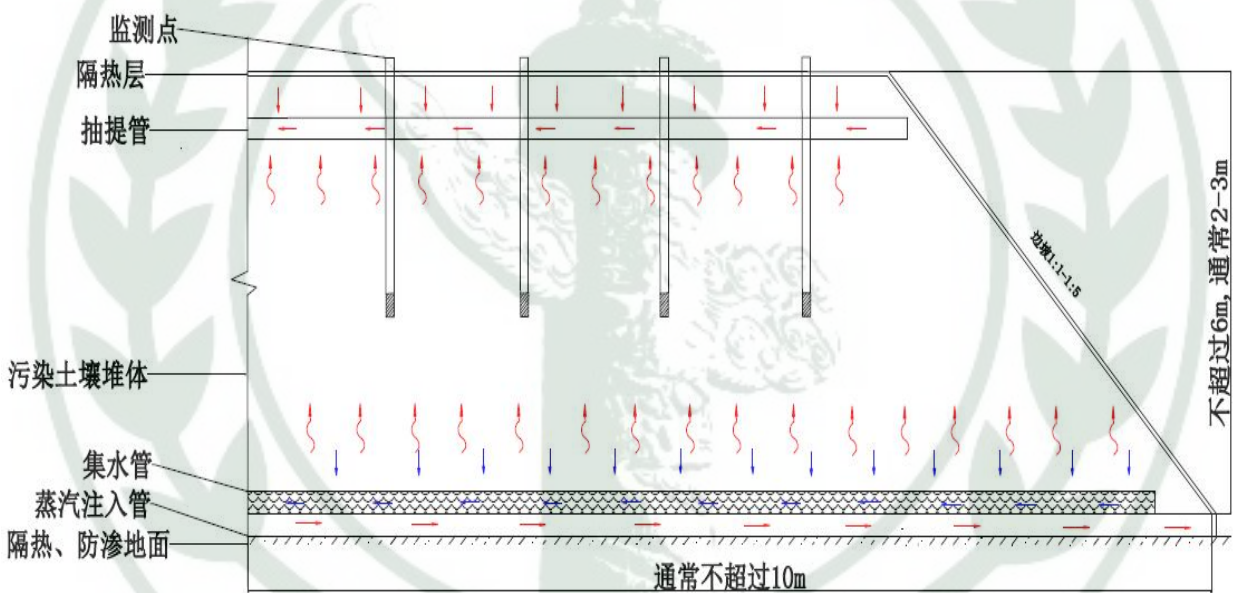


图 B.3 蒸汽加热堆体立面横向示意图

参 考 文 献

- [1] 污染土壤修复工程技术规范 固化/稳定化（征求意见稿）
- [2] HJ 1165—2021 污染土壤修复工程技术规范 原位热脱附
- [3] HJ 25.5—2018 污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术导则
- [4] 污染土壤原位热传导修复工艺设计指南（征求意见稿）

