



T/CECS XXX- 202X

中国工程建设标准化协会标准

污染土壤修复工程设计标准

**Design standards for polluted soil remediation
engineering**

（征求意见稿）

中国 XX 出版社

中国工程建设标准化协会标准

污染土壤修复工程设计标准

**Design standards for polluted soil remediation
engineering**

T/CECS XXX- 202X

主编单位：中建工程产业技术研究院有限公司

批准单位：中国工程建设标准化协会

施行日期：202X 年 XX 月 X 日

中国 XX 出版社

202X 北 京

前 言

《污染土壤修复工程设计标准》（以下简称标准）根据中国工程建设标准化协会《关于印发<2022 年第一批协会标准制订、修订计划>的通知》（建标协字〔2022〕13 号）的要求进行编制。编制组经广泛调查研究、认真总结实践经验，参考有关国内标准和国外先进标准，并在广泛征求意见的基础上，制定本标准。

本标准共分 6 章，主要内容包括：总则、术语、基本规定、现状评估与方案编制、工程设计等。

本标准的某些内容可能直接或间接涉及专利，本标准的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本标准由中国工程建设标准化协会绿色建筑与生态城区分会归口管理，由中建工程产业技术研究院有限公司负责具体内容的解释。实施过程中如有意见或建议，请反馈至中建工程产业技术研究院有限公司（地址：北京市顺义区林河大街 15 号，邮政编码：100130，邮箱：wuwenling@cscec.com）。

主编单位：中建工程产业技术研究院有限公司

参编单位：南开大学

安庆市绿巨人环境技术股份有限公司

安庆师范大学

中国建筑西南勘察设计研究院有限公司

上海建工环境科技有限公司

中国建筑第六工程局有限公司

生态环境部土壤与农业农村生态环境监管技术中心

中建八局环保科技有限公司

森特士兴环保科技有限公司

四川省天晟源环保股份有限公司

中国水电基础局有限公司

南京源博环境科技有限公司

中节能铁汉生态环境股份有限公司

贵州建设职业技术学院
中国建筑第八工程局有限公司
中建国际投资集团有限公司

主要起草人：

目次

1 总 则	1
2 术语	2
3 现状评估与方案编制	4
3.1 现状评估	4
3.2 方案编制	5
4 工程总体设计	8
4.1 一般规定	8
4.2 设计文件要求	10
4.3 总体布置	11
5 化学氧化还原法	12
5.1 一般规定	12
5.2 原位化学氧化还原法	12
5.3 异位化学氧化还原法	13
6 气相/多相抽提法	17
7 热脱附法	21
7.1 原位热脱附法	21
7.2 异位热脱附法	24
8 土壤淋洗法	29
8.1 一般规定	29
8.2 原位土壤淋洗法	29
8.3 异位土壤淋洗法	30
9 固化/稳定化法	34
9.1 一般规定	34
9.2 原位固化/稳定化法	35
9.3 异位固化/稳定化法	36
10 水泥窑协同处置法	40

11 阻隔填埋法	43
11.1 原位阻隔覆盖	43
11.2 异位阻隔填埋技术	44
12 微生物修复法	45
12.1 原位生物通风技术	45
12.2 生物堆技术	46
13 植物修复法	49
附录 A 土壤修复技术筛选矩阵	50
附录 B 土壤修复技术适用污染物类型	51
附录 C 原位热脱附法不同加热方式的适用条件	52
附录 D 异位热脱附法土壤的停留时间及出料温度	53
附录 E 固化/稳定化法常用药剂	54
附录 F 植物修复法常用植物	55
用词说明	56
引用标准名录	57
条文说明	58

Contents

1	General provisions.....	1
2	Terms	2
3	Current situation assessment and scheme design.....	4
3.1	Current situation assessment.....	4
3.2	Scheme design.....	5
4	Overall engineering design	8
4.1	General requirements.....	8
4.2	Design document requirements.....	10
4.3	Overall layout.....	11
5	Chemical oxidation-reduction technology	12
5.1	General requirements.....	12
5.2	In-situ chemical oxidation-reduction technology.....	12
5.3	Ex-situ chemical oxidation-reduction technology.....	13
6	Gas phase/multiphase extraction technology	17
7	Thermal desorption technology.....	21
7.1	In-situ thermal desorption technology.....	21
7.2	Ex-situ thermal desorption technology.....	24
8	Soil washing technology	29
8.1	General requirements.....	29
8.2	In-situ soil washing technology.....	29
8.3	Ex-situ soil washing technology.....	30
9	Solidification/stabilization technology	34
9.1	General requirements.....	34
9.2	In-situ solidification/stabilization technology.....	35
9.3	Ex-situ solidification/stabilization technology.....	36
10	Collaborative disposal technology with cement kilns	40
11	Barrier landfill technology.....	43
11.1	In-situ barrier landfill technology.....	43
11.2	Ex-situ barrier landfill technology.....	44

12	Microbial remediation technology.....	45
12.1	In-situ biological ventilation technology.....	45
12.2	Bioreactor technology.....	46
13	Plant remediation technology.....	49
Appendix A	Soil remediation technology screening matrix.....	50
Appendix B	Types of pollutants for series soil remediation technology.....	51
Appendix C	Applicable conditions for different heating methods of in-situ thermal desorption method.....	52
Appendix D	Residence time and discharge temperature of soil using ectopic thermal desorption method.....	53
Appendix E	Commonly used reagents for solidification/stabilization technology...	54
Appendix F	Common plants used in plant remediation technology.....	55
	Explanation of wording.....	56
	List of quoted standards.....	57
	Addition: Explanation of provisions.....	58

1 总 则

1.0.1 为科学设计污染土壤修复工程，改善和保护土壤环境，提高人民健康水平，制定本标准。

1.0.2 本标准适用于新建、扩建和改建的污染土壤修复工程的设计。

1.0.3 本标准不适用于放射性污染和致病性生物污染土壤修复工程的设计。

1.0.4 污染土壤修复工程的设计除应符合本标准规定外，尚应符合国家现行有关标准及现行中国工程建设标准化协会有关标准的规定。

2 术语

2.0.1 土壤修复 soil remediation

采用物理、化学或生物的方法固定、转移、吸收、降解或转化土壤中的污染物，使其含量降低到可接受水平，或将有毒有害的污染物转化为无害物质的过程。

2.0.2 化学氧化还原 chemical oxidation reduction

根据土壤或地下水中污染物的类型和属性选择适当的氧化或还原剂，将制剂注入到土壤或地下水中，利用氧化或还原剂与污染物之间的氧化还原反应将污染物转化为无毒无害物质或毒性低、稳定性强、移动性弱的惰性化合物，从而达到对土壤净化的目的。

2.0.3 气相抽提 soil vapor extraction

通过专门的地下抽提（井）系统，利用真空或注入空气产生的压力迫使非饱和区土壤中气体发生流动，从而将其中的挥发性有机污染物和半挥发性有机污染物脱除，达到清洁土壤的目的。

2.0.4 多相抽提 multiple phase extraction

通过真空抽取手段，抽取地下污染区域的土壤气体、地下水和油层到地面进行相分离及处理，以控制土壤和地下水中有有机污染的技术。

2.0.5 原位热脱附 in-situ thermal desorption

向地下输入热能，加热土壤、地下水，改变目标污染物的饱和蒸气压及溶解度，促进污染物挥发或溶解，并通过土壤气相抽提或多项抽提实现对目标污染物去除的处理过程，包括热传导加热、电阻加热及蒸汽强化抽提等。

2.0.6 异位热脱附 ex-situ thermal desorption

将污染土壤从发生污染的位置挖掘出来，转移或搬运到其他场所或位置，采用加热处理的方式将污染物从污染土壤中挥发去除的过程。

2.0.7 土壤淋洗 soil washing

用清水或化学溶剂对污染的土壤进行洗涤，将附着在土壤颗粒表面的有机和无机污染物转移至溶液中，从而达到洗涤和清洁污染土壤的目的。

2.0.8 固化/稳定化 solidification / stabilization

将污染土壤与水泥等胶凝材料或稳定化药剂相混合，通过形成晶格结构或化学键等，将土壤中污染物捕获或者固定在固体结构中，从而降低有害组分的移动性或浸出性的过程。固化通过采用结构完整性的整块固体将污染物密封起来以降低其物理有效性，而稳定性则降低了污染物的化学有效性。

2.0.9 生物通风 bioventing

通过加压（并可适当加温）对污染土壤进行曝气，使土壤中的氧气浓度增加，从而促进好氧微生物的活性，提高土壤中污染物的降解效果。

2.0.10 水泥窑协同处置 co-dispose in cement kiln

将满足或经预处理后满足入窑要求的污染土壤投入水泥窑，在进行水泥熟料生产的同时实现对污染土壤的无害化处置的过程。

2.0.11 阻隔填埋 barrier landfill

将污染土壤运至限定的阻隔区域内（山间、峡谷、矿坑或垃圾填埋场内）进行有计划的填埋，使其发生物理、化学和生物学等变化，最终达到污染物减量化和无害化的目的。

2.0.12 植物修复 phytoremediation

根据植物可耐受或超积累某些特定化合物的特性，利用植物及其共生微生物提取、转移、吸收、分解、转化或固定地块土壤和地下水中的有机或无机污染物，从而达到移除、削减或稳定污染物，或降低污染物毒性等目的。

2.0.13 原位土壤修复 in-situ soil remediation

不移动土壤，直接在发生污染的位置进行土壤修复。

2.0.14 异位土壤修复 ex-situ soil remediation

将受污染的土壤从发生污染的位置挖掘出来，搬运或转移到其他位置或场所进行修复的过程。

3 现状评估与方案编制

3.1 现状评估

3.1.1 在进行风险评估前，应对土壤污染状况进行调查，调查内容应包括：

1 污染地块的利用变迁资料、环境资料、地块相关记录、有关政府文件，以及地块所在区域的自然和社会信息；

2 污染地块及周边区域的现状与历史情况、区域地质、水文地址和地形情况；

3 污染物种类、浓度水平和空间分布；

4 土壤理化性质、地块气候、水文、地质特征等地块特征参数；

5 地块及周边地区土地利用方式、人群及建筑物等信息。

3.1.2 建设用地土壤污染状况调查应按现行行业标准《建设用地土壤污染状况调查技术导则》HJ25.1 的规定进行。

3.1.3 土壤污染状况调查可分三个阶段进行，也可将第二和第三阶段调查合并进行，各阶段调查内容应符合下列规定：

1 第一阶段土壤污染状况调查宜包括资料收集与分析、现场踏勘、人员访谈三步进行；

2 第二阶段土壤污染状况调查宜包括初步采样分析和详细采样分析；

3 第三阶段土壤污染状况调查内容宜包括环境特征参数调查和受体暴露参数调查。

3.1.4 土壤污染状况调查结果应编制成土壤污染状况调查报告。

3.1.5 地块风险评估工作宜根据土壤污染状况调查报告等资料进行，内容应包括危害识别、暴露评估、毒性评估、风险表征，以及土壤和地下水风险控制值的计算。

3.1.6 建设用地土壤污染风险评估应按照行业标准《建设用地土壤污染风险评估技术导则》HJ25.3 的规定进行。

3.1.7 土壤污染风险评估结果宜以土壤污染风险评估报告呈现。

3.2 方案编制

3.2.1 污染土壤修复程度、修复方法应根据国家现行有关标准、污染物的来源和性质和修复目标确定。

3.2.2 建设用地土壤修复方案的编制应符合行业标准《建设用地土壤修复技术导则》HJ25.4 的规定。

3.2.3 污染土壤修复方案的制定应符合科学性、可行性、安全性原则。

3.2.4 污染土壤修复方案编制的工作程序宜包括选择修复模式、筛选修复技术、编制修复方案 3 个步骤（图 3.2.4）。

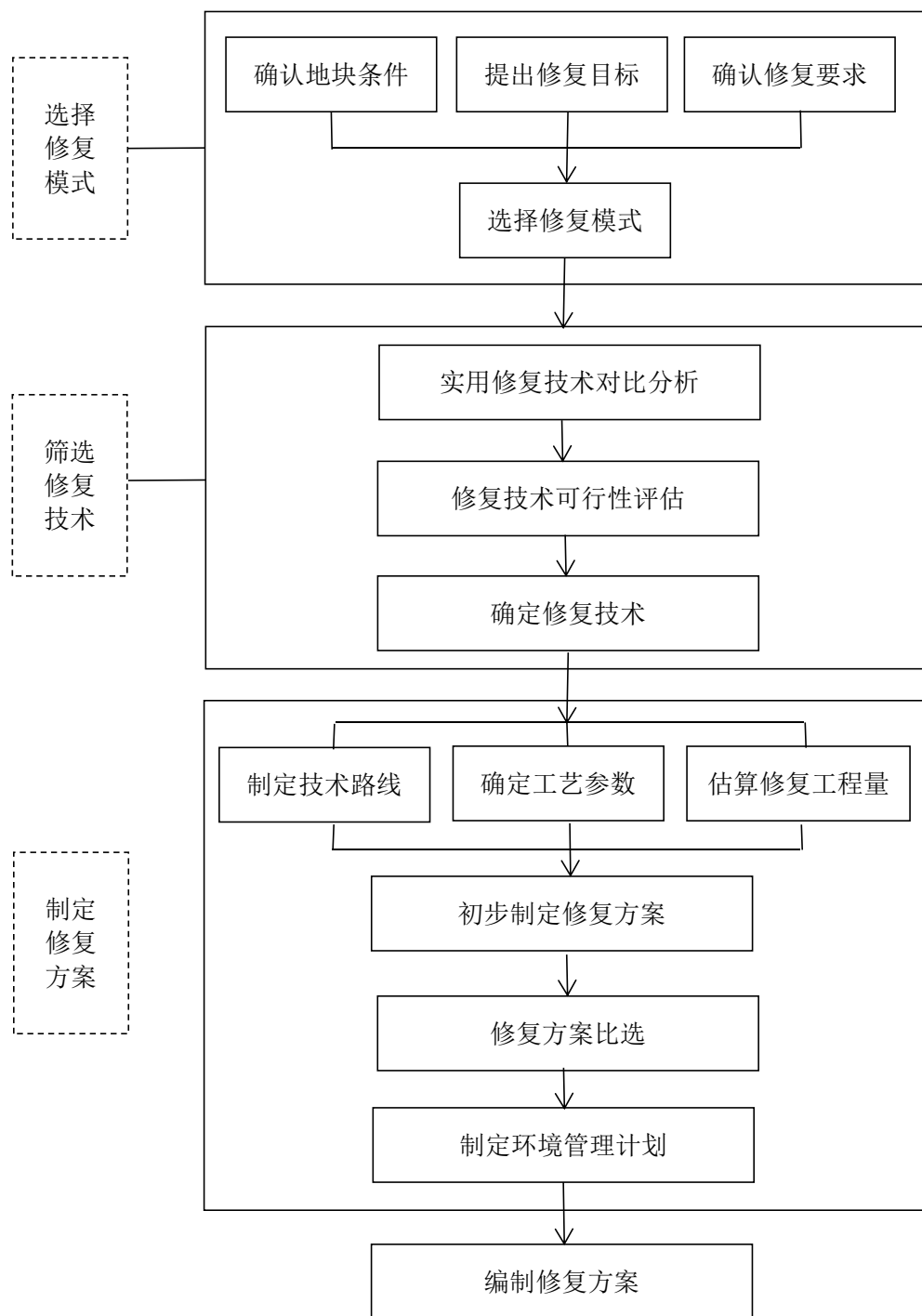


图 3.2.4 土壤修复方案编制程序

3.2.5 土壤修复方案编制前应对土壤污染状况调查报告、风险评估报告等资料进行核实，现场考察地块状况，并在必要时进行补充调查监测。

3.2.6 土壤修复的目标值应通过比较分析按照行业标准《建设用地土壤污染风险评估技术导则》HJ25.3 计算的土壤风险控制值、按照国家标准《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准》GB36600 规定的筛选值和管控值、地块所在区域土壤中目标污染物的背景含量以及国家和地方有关标准中规定的限制合理确定。

3.2.7 土壤修复方案编制前应明确修复范围、需要修复的土壤量、修复时间等修复要求。

3.2.8 土壤修复模式的选择应根据地块特征条件、修复目标和修复要求确定。

3.2.9 土壤修复工程宜原址进行，确需转运污染土壤的，应明确运输方式、路线和污染土壤数量、去向和最终处置措施。

3.2.10 土壤修复工程宜从技术成熟度、适用的污染物和土壤类型、修复效果、修复时间和成本、环境安全性等方面综合分析，选择备选的修复技术并进行可行性评估，备选修复技术可根据附录 A 和附录 B 选取。

3.2.11 对于复合污染土壤，应根据污染特征和工程技术要求，确定污染物修复次序。

3.2.12 土壤修复工程宜通过小试、中试实验，及应用案例分析对备选修复技术进行评估，并选择确定修复技术。

3.2.13 应根据地块修复模式和土壤修复技术制定土壤修复技术路线，土壤修复技术路线应反映地块修复总体思路和修复方式、修复工艺流程和具体步骤，还应包括土壤修复过程中污染水体、气体和固体废弃物的无害化处理处置等。

3.2.14 制定修复方案时应确定工艺参数，工艺参数应通过小试或中试实验获得。

3.2.15 制定修复方案时应根据修复技术、技术路线、工艺流程和参数等确定每个修复方案的修复工程量。

3.2.16 宜从技术指标、工程费用、二次污染防治等方面对比各个修复方案，并确定最佳修复方案。

3.2.17 土壤修复方案的编制宜全面准备的表述地块条件、修复目标、修复模式、修复技术、技术路线、工艺参数、工程量、修复方案对比，以及最佳修复方案等内容，表述应简洁准确，便于后续土壤修复工程的设计与施工。

4 工程总体设计

4.1 一般规定

4.1.1 污染土壤修复工程设计应因地制宜、科学合理，本着成熟可靠、技术先进、经济适用的原则，并考虑节能、安全、操作简便。

4.1.2 当已有的地质和水文地质资料不能满足工程设计需要时，在工程设计之前应开展必要的地质和水文地质调查工作。

4.1.3 污染土壤修复工程设计前，应对地下构筑物或埋藏物进行彻底排查，排除安全隐患。

4.1.4 污染土壤修复工程设计前，应对目标污染物地块进行深入调查，并根据工程设计需要收集相关资料，所收集材料宜包括下列内容：

- 1 地块污染特征；
- 2 地块地质和水文地质条件；
- 3 土壤特征；
- 4 区域气象气候条件；
- 5 地下构筑物或埋藏物分布；
- 6 地块用途；
- 7 周边敏感点及分布；
- 8 能源供应条件；
- 9 修复后土壤的去向。

4.1.5 污染土壤修复工程应对产生的二次污染物进行处理，二次污染物涵盖内容范围宜按表 4.1.5 确定。

表 4.1.5 污染土壤修复工程产生的二次污染物

污染类型	排放源	包含污染物
废气	抽提蒸汽、燃料燃烧废气、无组织排放废气	柴油机尾气、土壤修复目标污染物、颗粒物、非甲烷总烃

废水	抽出地下水、施工废水、井点降水、热脱附法蒸汽冷凝水、土壤淋洗废水	土壤修复目标污染物、中间产物
固体废弃物	生活垃圾、包装材料、安装废料、施工泥浆、处理废水产生的污泥、冷凝费油、废活性炭	土壤修复目标污染物、中间产物
噪声	污染土壤修复工程施工	噪声

4.1.6 污染土壤修复工程废气处理可采用吸附法、燃烧法等，污染土壤修复工程废气处理应符合《大气污染防治工程技术导则》HJ2000 等标准的相关规定，废气排放应符合《挥发性有机物无组织排放控制标准》GB37822、《大气污染物综合排放标准》GB16297、《工业炉窑大气污染物排放标准》GB9078、《恶臭污染物排放标准》GB14554 及相关行业和地方标准要求。

4.1.7 污染土壤修复工程废水处理工艺可包括油水分离、混凝、吹脱、高级氧化、活性炭吸附等，污染土壤修复工程废水处理设计应按照《水污染治理工程技术导则》HJ2015 等标准规范进行，废水排放应符合《污水综合排放标准》GB8978、《地表水环境质量标准限值》GB3838、《地下水质量标准》GB/T14848、《污水排入城镇下水道水质标准》GB/T31962 及相关行业和地方标准的要求。

4.1.8 污染土壤修复工程的固体废弃物处理处置应满足下列要求：

- 1 除尘器收集的粉尘应转送至出料堆放区，含二噁英烟气除尘处理产生的粉尘与急冷设备产生的污泥应密闭收集后重新投入到进料系统中；
- 2 废吸附剂宜进行再生，无法再生的应进行危险废弃物特性鉴别；
- 3 废水处理产生的污泥应脱水处理后进行危险废弃物特性鉴别；
- 4 预处理产生的砖瓦、石块、木块、铁块等固体废物应进行清洗，清洗后可按建筑垃圾进行处理处置；
- 5 药剂包装材料宜由药剂厂商回收或作为危险废弃物处理处置；
- 6 废气处理单元和废水处理单位产生的非水相液体宜进行回收利用，没有回收利用价值时应按照固体废物鉴别相关要求进行了鉴别后处理。

4.1.9 土壤修复工程噪声控制应满足《工业企业厂界环境噪声排放标准》GB12348 要求。

4.1.10 土壤修复技术可分为原位土壤修复技术和异位土壤修复技术，原位和异位修复技术的选择和应用应符合下列规定：

- 1** 原位土壤修复技术宜用于不宜进行土壤挖掘、缺乏储存和作业空间，以及污染区域短期内无开发、利用和施工需求的地块；
- 2** 原位土壤修复技术宜用于深层污染土壤的处理；
- 3** 应用原位土壤修复技术的场地条件和地层结构应能够满足原位药剂注入和搅拌混合施工的要求；
- 4** 异位土壤修复技术宜用于固化/稳定化质量控制要求高或污染区域需要开发、利用或施工的地块；
- 5** 异位土壤修复技术宜用于浅层污染土壤的处理；
- 6** 应用异位土壤修复技术的场地应具备土壤开挖和基坑支护条件，应具备地下水止水和降水条件；
- 7** 应用异位土壤修复技术处理后的土壤应有安全可靠的处置利用途径。

4.1.11 异位土壤修复工程的挖掘应满足下列要求：

- 1** 污染土壤挖掘应编制专项方案，深基坑开挖应满足《建筑深基坑工程施工安全技术规范》JGJ311 的要求；
- 2** 对于地下水位以下的污染土壤进行开挖时应进行降水设计。

4.2 设计文件要求

4.2.1 污染土壤修复工程设计宜分为初步设计和施工图设计，对于小型项目，也可根据实际情况直接进行施工图设计。

4.2.2 初步设计文件宜包括初步设计说明书、初步设计图纸和初步设计概算书，并应符合下列规定：

- 1** 初步设计说明书宜包括设计总说明、各专业设计说明、主要设备材料表；
- 2** 初步设计图纸应包括总图和工艺专业图纸；当修复工程包括修复车间、仓库、地面处理设备等建（构）筑物时，宜包括建筑、结构专业图纸；当工程包含给排水、消防用水时，宜包括给排水专业图纸；当工程需要进行地下水抽出、药剂注入、地

面处理设备自动化控制、在线监测时，宜包括自动化专业图纸；当工程采用阻隔填埋、土方挖掘、钻井等技术时，宜包括岩土工程专业图纸；当工程需要进行供电、电气控制时，宜包括电气专业图纸；当工程包括采暖、空调、通风等时，宜包括采暖通风专业图纸；

3 初步设计概算书宜包括编制说明、编制依据、工程总概算表、单项工程概算表和其他费用概算表等。

4.2.3 施工图设计文件，宜包括施工图设计说明书、施工图设计图纸、工程预算书，并应符合下列规定：

1 施工图设计说明书宜包括设计总说明书、各专业设计说明书和工程量表；

2 施工图设计图纸应包括总图、工艺专业图纸，以及各相关专业图纸，各相关专业图纸组成宜根据 5.2.2-2 确定；

3 工程预算书宜包括编制说明、工程设备材料表、工程总预算书、单项工程预算书、单位工程预算书和需要补充的估价表等。

4.2.4 污染土壤修复工程设计，根据专业不同可划分为工艺专业设计和辅助专业设计。

4.3 总体布置

4.3.1 污染土壤修复工程宜结合工艺特点和地块现状对办公区、修复区、设备控制区、能源供应区、材料加工区、废水处理区、废气处理区和危废暂存区等进行合理分区布置。

4.3.2 施工平面布置应综合考虑周边主要敏感点的分布，废气、废水处理设备宜布置在主要敏感区主导下风向处或远离主要敏感区域。

5 化学氧化还原法

5.1 一般规定

5.1.1 化学还原法可用于修复六价铬和氯代有机物污染的土壤和地下水。

5.1.2 化学氧化还原剂的选择应符合以下规定：

1 化学氧化剂宜通过小试或中试实验确定，可选择过氧化氢、过硫酸盐、高锰酸盐或臭氧等；

2 化学还原剂宜通过小试或中试实验确定，可选择硫化氢、连二亚硫酸钠、亚硫酸氢钠、硫酸亚铁、多硫化钙、二价铁、零价铁等；

3 化学氧化剂和还原剂投加量宜通过小试或中试实验确定。

5.2 原位化学氧化还原法

5.2.1 原位化学氧化还原系统宜由药剂制备储存系统、药剂注入井、药剂注入系统、监测系统等组成，药剂注入系统宜包括药剂存储罐、药剂注入泵、药剂混合设备、流量计和压力表等。

5.2.2 原位化学氧化还原工程的注入点分布、数量和深度宜根据污染区大小、污染分布情况和污染程度进行设计。

5.2.3 注入井的周边及污染区的外围应设计监测井，对污染区的污染物和药剂的分布和运移状况进行监测。

5.2.4 原位化学氧化还原工程可通过设置抽水井或其他辅助工程来提高修复效果。

5.2.5 原位化学氧化还原工程药剂注入方式的选择应符合下列规定：

1 当污染土壤为渗透性较好的砂土时，宜选择注入井注入或直推注入；

2 当污染土壤为渗透性较差的黏土时，宜选择高压旋喷注入。

5.2.6 原位化学氧化还原工程注入井间距可设置为影响半径的 2 倍左右，并应根据中试实验进行调整。

5.2.7 原位化学氧化还原工程应设计监测系统，应对药剂注入过程中药剂的流量和压力实时监测，应对修复过程中和修复后的污染物浓度、pH、氧化还原电位等参数进行监测。

5.2.8 原位化学氧化工程的药剂注入井井管应采用耐腐蚀的无污染材料，井管之间连接可采用丝扣或焊接方式，不得使用造成二次污染的粘结剂。

5.3 异位化学氧化还原法

5.3.1 异位化学氧化还原的工艺流程可包括污染土壤的挖运、暂存、预处理、计量、化学药剂的计量、污染土壤与化学药剂的混合搅拌等（图 5.3.1）。

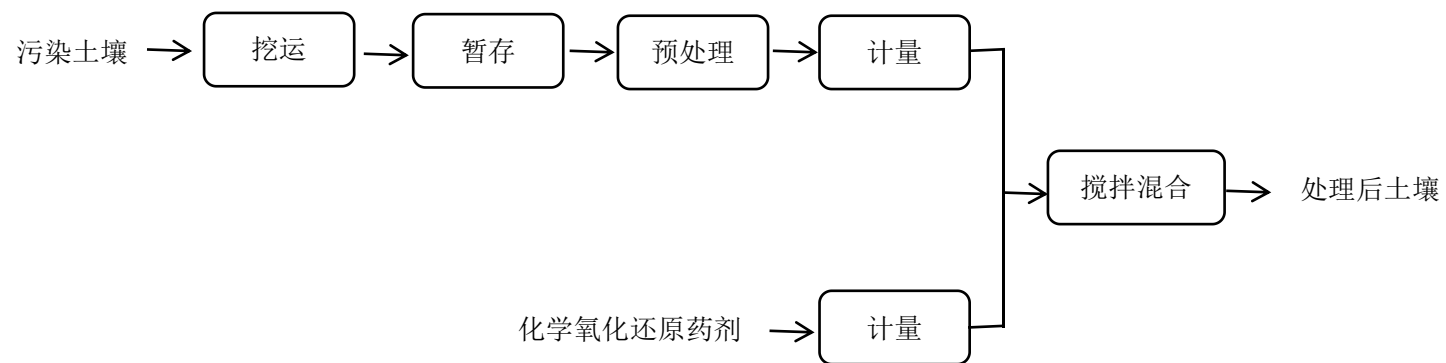


图 5.3.1 异位化学氧化还原工艺流程图

5.3.2 预处理场所宜满足下列要求：

- 1 预处理场所应根据预处理污染土流转量、配套设施要求和现有地块条件进行设计；
- 2 预处理场所进行功能区划分，可分为污染土壤卸料区、暂存区、预处理区、废水收集处理区等；
- 3 预处理场所应采取防尘、防雨措施，地面应作硬化和防渗处理，周边应设置围堰或排水沟渠，污染土渗滤液应统一收集、集中处理；
- 4 预处理区应配置破碎机、筛分机等设备对污染土壤进行分选、破碎和筛分。

5.3.3 土壤预处理措施可包括破碎、筛分等，宜满足下列要求：

- 1 应把土壤中直径大于 50mm 的石块和建筑垃圾进行筛分；
- 2 土壤中砂砾含量较多时，宜采用多级筛分级出去 0.5mm 以上的砂粒和砾粒或 2mm 以上的砾粒；
- 3 处理土壤量不大时，可简化筛分流程，采用筛分斗分批筛分或直接采用搅拌设备自带的筛分装置筛分；
- 4 可采用圆筒筛、振动筛、筛分斗或固定格栅等设备进行筛分处理；
- 5 可采用颚式破碎机、锤式破碎机等设备进行破碎处理；
- 6 经预处理后的土壤颗粒一般不宜大于 5mm。

5.3.4 搅拌混合宜满足下列要求：

- 1 宜根据小试和中试优化的参数，确定药剂配方、使用量和混合时间，并应在正式运行前对参数进行调试；
- 2 宜采用双轴搅拌机、土壤改良机等专用设备混合搅拌土壤和药剂，搅拌混合系统宜具备自动计量投加装置；
- 3 当污染土壤处理规模较小时，可采用挖掘机、翻抛机、旋耕机、浅层搅拌设备等分批进行混合搅拌，并应做好防渗和抑尘设计。

5.3.5 应对下列工艺参数进行监测：

- 1 污染土壤的给料速率；
- 2 药剂的添加流量；
- 3 搅拌混合时间；

4 搅拌速度；

5 处理后土壤中污染物含量。

6 气相/多相抽提法

6.0.1 气相/多相抽提工程所需设备宜包括钻井设备、鼓风机、真空泵、水泵、气液分离器、污水处理设备、废气处理设备。

6.0.2 气相抽提工艺流程可包括气体污染物的抽提、冷凝，以及废气和废水的净化等（图 6.0.2-1），多相抽提工艺流程可包括污染物的抽提、气液分离、油水分离，以及废气、废水和 NAPL 的净化等（图 6.0.2-2）。

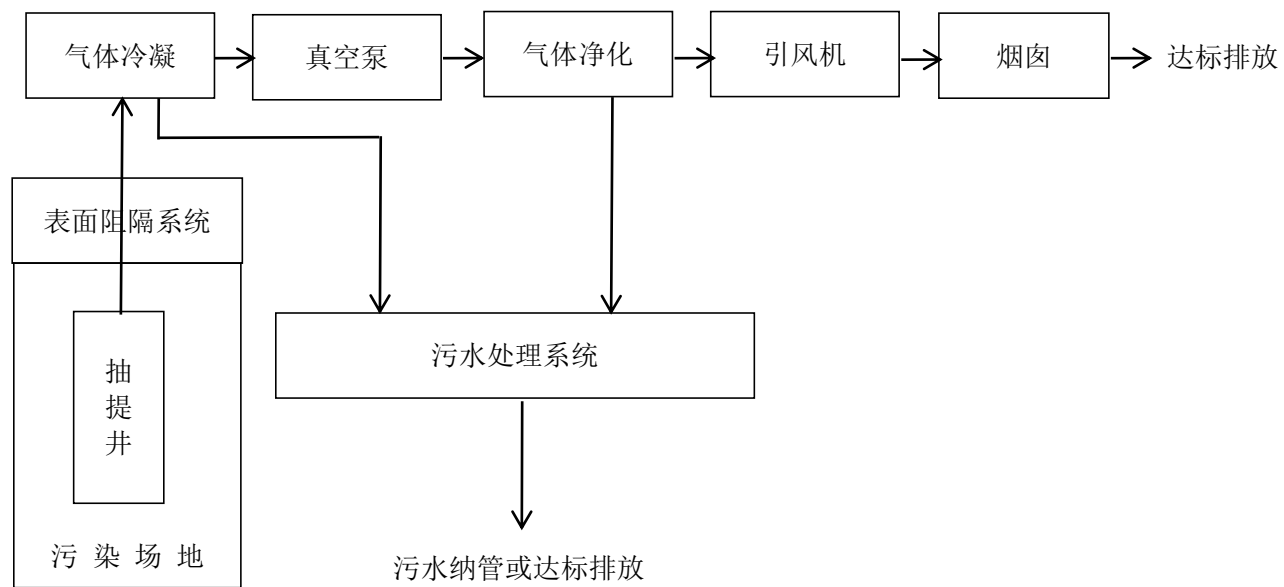


图 6.0.2-1 气相抽提技术工艺流程图

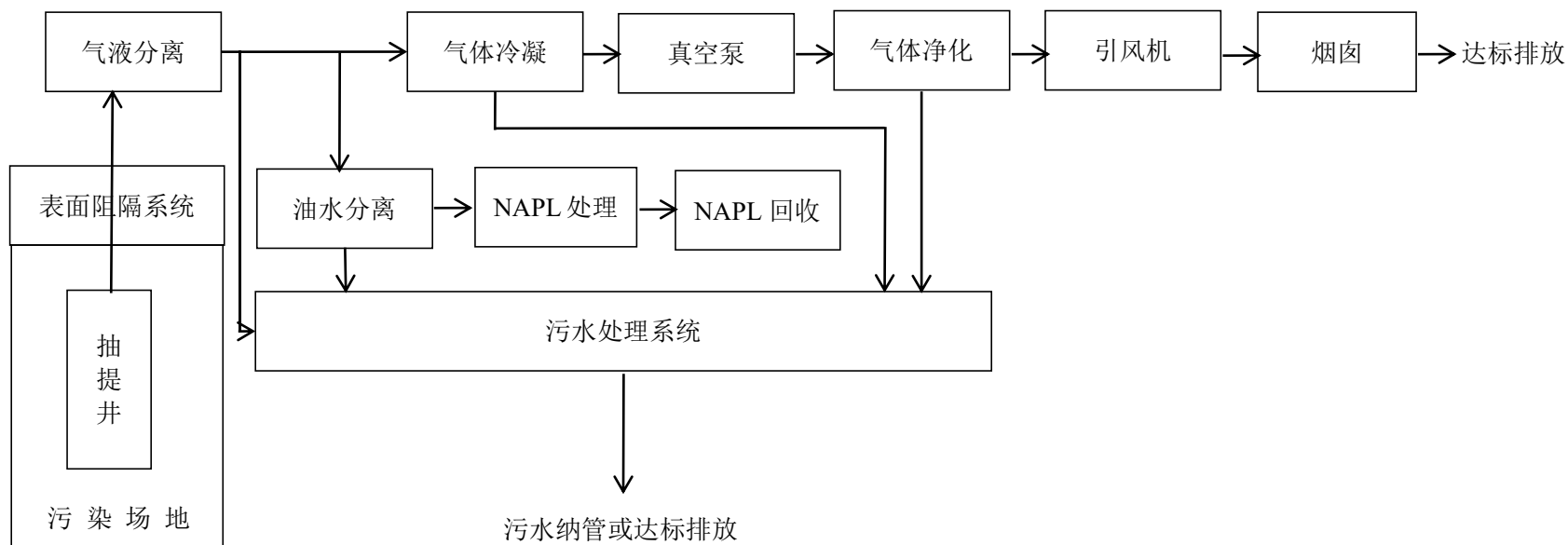


图 6.0.2-2 多相抽提技术工艺流程图

6.0.3 抽提真空度及抽气速率应根据污染物性质、修复面积及深度、土壤渗透性等确定。

6.0.4 抽提井数量和分布应通过中试实验根据影响半径计算确定。

6.0.5 抽提井井管应采用耐腐蚀的无污染材料，井管之间连接可采用丝扣或焊接方式，不得使用造成二次污染的粘结剂，井口地面应采取防渗措施。

6.0.6 抽提系统应采取保温措施，或提高流速、设置刮板、扰流片等，以防止污染物在管路中大量冷凝对抽提系统造成影响。

6.0.7 抽提单元应保证污染其他不外泄至大气环境造成二次污染，可采取下列措施：

- 1 井口地面采取阻隔防渗措施；
- 2 进行负压设计，保证抽提单元在负压状态运行；
- 3 保证抽提单元的动力设备稳定运行；
- 4 抽提管道全密封。

6.0.8 宜采取阻隔、降水等方法控制地下水进入修复区。

7 热脱附法

7.1 原位热脱附法

7.1.1 采用原位热脱附法的污染土壤修复工程应符合《污染土壤修复工程技术规范 原位热脱附》HJ1165 的规定。

7.1.2 热脱附法的加热方式可选择热传导加热、电阻加热或蒸汽注入加热中的一种或几种联用，加热方式宜根据中试试验资料确定，可按附录 C 选择加热方式进行试验。

7.1.3 原位热脱附加热温度、加热时间宜通过小试或中试试验确定。

7.1.4 原位热脱附工艺设计内容应包括加热单元、抽提单元、监测单元、控制单元、阻隔单元、废水废气处理单元等的设计，其中加热单元设计应包括加热模式、能源供应、加热抽提井布设、地下加热单元构造及安装。

7.1.5 原位热脱附的工艺流程应包括：在污染区域内设置加热井或电极井、对目标污染区域的土壤及地下水加热、利用真空抽提井对气相/液相污染物进行抽提、冷凝及气液分离、对提取的气体 and 液体进行无害化处理等（图 7.1.5）。

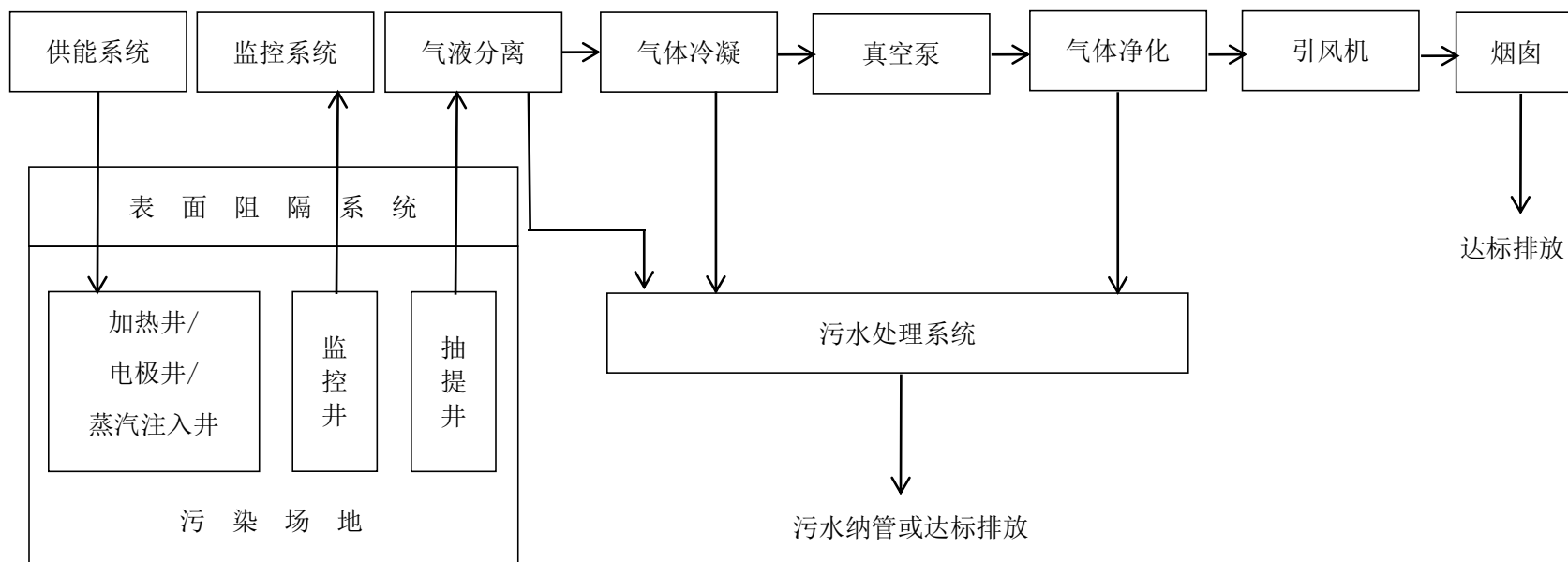


图 7.1.5 原位热脱附技术工艺流程图

7.1.6 加热井宜采用正六边形或正三角形布置，抽提井可与加热井设置在同一点位或靠近加热井的位置，也可设置在以加热井为顶点构成的六边形或正三角形的中心位置。

7.1.7 加热井和抽提井的数量比宜介于 4:1~1:1 之间，井间距设置宜符合下列规定

- 1 当采用热传导加热时，井间距宜为 2~6m；
- 2 当采用电阻加热时，井间距宜为 4~6m；
- 3 当采用蒸汽注入加热时，井间距宜为 6~15m。

7.1.8 原位热脱附工程应对以下系统参数进行监控：

- 1 加热区地下温度、压力；
- 2 地上废气、废水抽提总管及部分抽提井口温度、压力、目标污染物浓度；
- 3 废水废气排放口污染物浓度；
- 4 燃气热传导的监控指标还应包括：
 - 1) 燃气/燃油流量；
 - 2) 管道压力；
 - 3) 燃烧器出气温度和一氧化碳含量；
- 5 电加热传导技术的监控指标还应包括：
 - 1) 加热棒温度；
 - 2) 加热电流等；
- 6 电阻加热技术监控指标还应包括：
 - 1) 加热电流；
 - 2) 地层电阻率；
 - 3) 加热区地表电压等；
- 7 蒸汽注入加热技术监控指标还应包括：
 - 1) 入口处蒸汽温度；
 - 2) 蒸汽压力；
 - 3) 蒸汽流量等。

7.2 异位热脱附法

7.2.1 采用异位热脱附法的污染土壤修复工程应符合《污染土壤修复工程技术规范 异位热脱附》HJ1164 的规定。

7.2.2 污染土壤异位热脱附修复工程应由主体工程、辅助工程和配套设施构成，主体工程宜包括暂存、预处理、热处理、烟气处理、出料与存放、废水处理、检测与控制系统等；辅助工程宜包括能源供应、给排水及消防、供配电、通风与空调、实验室、库房等；配套设施宜包括办公室、值班室、厂区围挡、道路等。

7.2.3 进入热处理设备的污染土壤应满足以下条件：

- 1 直接热脱附处理土壤中污染物含量不宜超过 4%，间接热脱附处理土壤中污染物含量不宜超过 60%；
- 2 含水率不宜大于 30%；
- 3 颗粒大小不宜大于 5cm；
- 4 pH 值不宜小于 4；
- 5 塑性指数宜低于 10。

7.2.4 异位热脱附土壤修复设施宜采用自动化、信息化、模块化和撬装化设计，异位热脱附设施应进行负压设计。

7.2.5 异位热脱附工艺应根据污染土壤修复目标、修复土方量、修复周期、污染物类型及污染物浓度确定，当有机污染土壤浓度低且修复土方量较大时，宜采用直接热脱附工艺，宜采用二次燃烧法处理烟气（图 7.2.5-1）；当有机污染土壤修复土方量较小或有机污染浓度较高时，宜采用间接热脱附工艺，宜采用冷凝-吸附-二次燃烧法处理烟气（图 7.2.5-2）；当修复汞污染土壤时宜采用间接热脱附工艺，宜采用冷凝-吸附法处理烟气（图 7.2.5-3）。

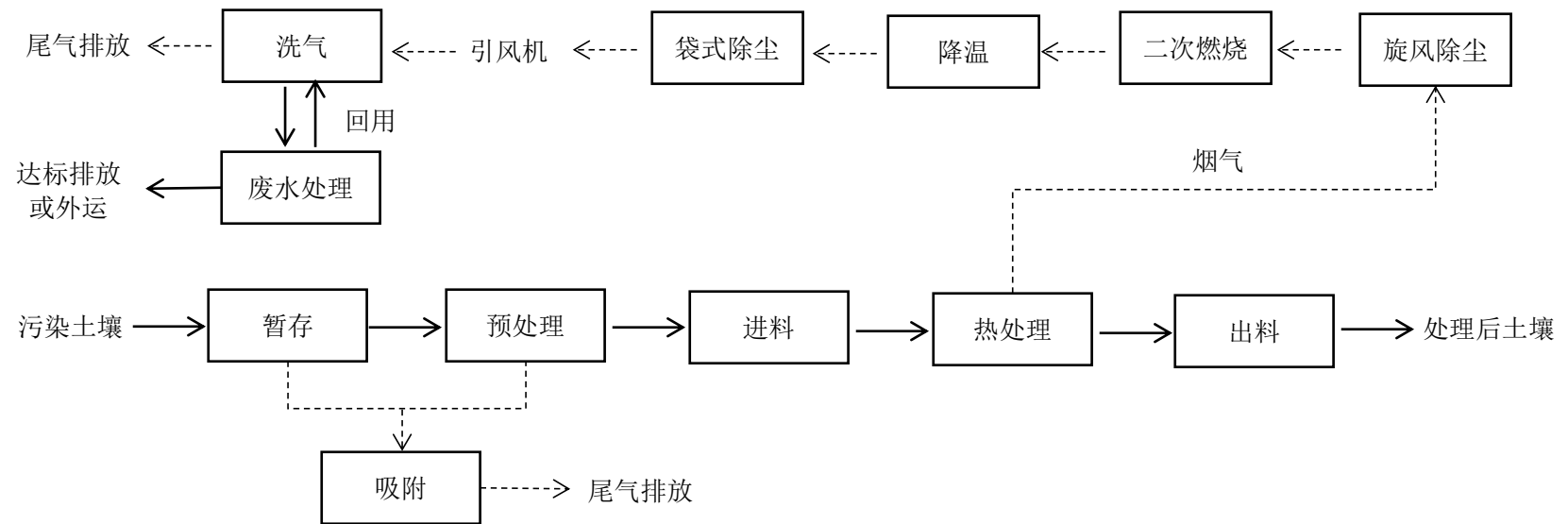


图 7.2.5-1 直接热脱附工艺流程图

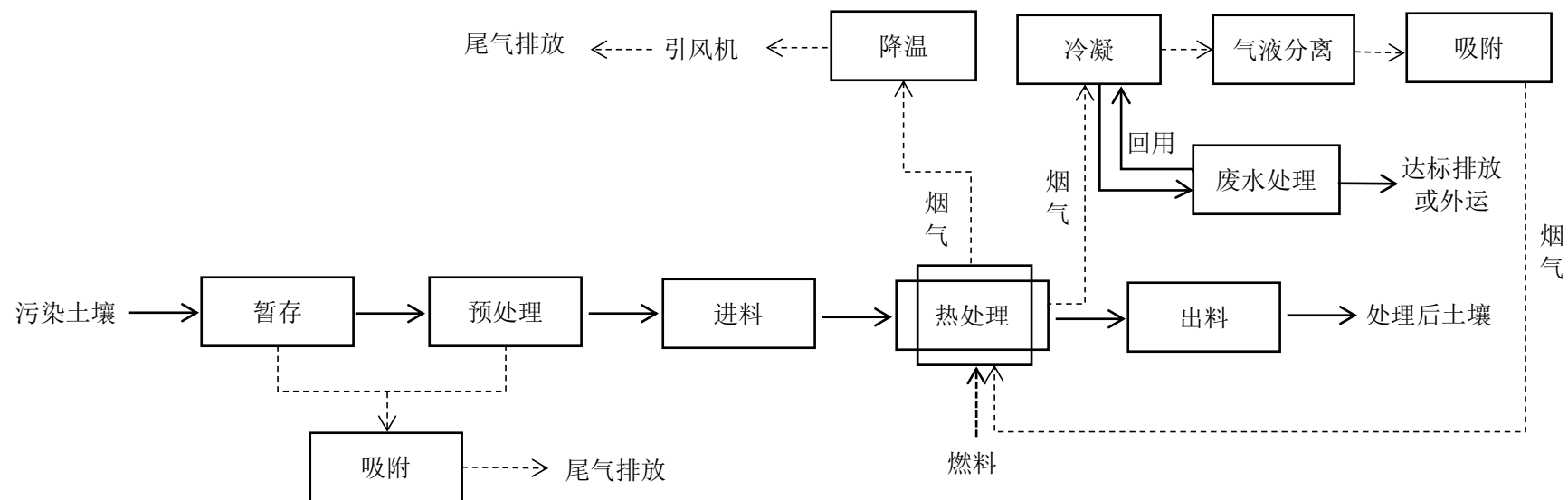


图 7.2.5-2 间接热脱附处理有机污染土壤工艺流程图

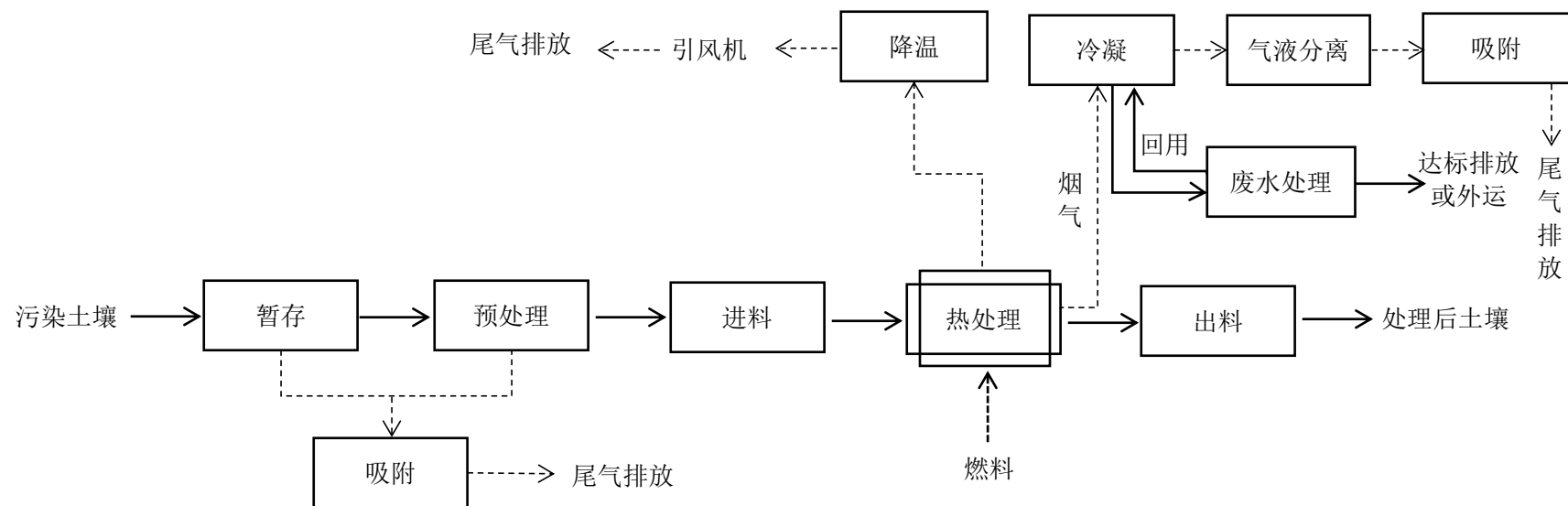


图 7.2.5-3 间接热脱附处理汞污染土壤工艺流程图

7.2.6 异位热脱附修复工程应设置暂存和预处理车间，暂存和预处理车间应进行功能区划分，可分为土壤卸车去、暂存区、预处理区、废气处理区等，预处理区宜配置分选、脱水、破碎、筛分、混合、搅拌、输送等设备。

7.2.7 直接热脱附热处理设备宜采用回转窑，间接热脱附热处理设备宜采用回转窑或螺旋推进式热脱附炉，热处理温度和停留时间可按附录 D 的规定取值。

7.2.8 异位热脱附土壤修复工程应配有检测设备，对污染物进行监测，处理后的土壤应分批次存放并对每一批次进行检测。

8 土壤淋洗法

8.1 一般规定

8.1.1 淋洗剂的选择应符合下列规定：

- 1 重金属污染土壤宜选用水或酸溶液、盐溶液、络合剂等化学药剂；
- 2 有机污染土壤宜选用表面活性剂；
- 3 复合污染土壤宜选用复合药剂；
- 4 宜尽量选用绿色环保药剂；
- 5 淋洗剂浓度宜通过小试或中试实验确定，并根据现场情况进行调节。

8.2 原位土壤淋洗法

8.2.1 原位土壤淋洗系统宜包括淋洗药剂配置与喷淋系统、注入井与抽提井系统、废水处理系统和监测控制系统等，各系统所需设备应符合表 8.2.1 的规定。

表 8.2.1 原位土壤淋洗系统设备构成

序号	系统名称	设备构成
1	淋洗剂配置与喷淋系统	药剂存储罐、药剂混合设备、流量计、压力表、水泵、喷灌设备等
2	注入井与抽提井系统	打井钻机、水泵等
3	废水处理系统	污水处理设备
4	监测控制系统	监测设备、水泵控制设备

8.2.2 原位土壤淋洗工程的药剂注入方式的选择应符合下列规定：

- 1 当污染土壤为渗透性较好的砂土，且污染深度较浅时，宜选择地表喷灌注入；
- 2 当污染土壤为渗透性较差的黏土或污染深度较深时，宜选择注入井注入或直推注入。

8.2.3 注入井和抽提井的设置应符合下列要求：

1 注入井的分布、数量和深度宜根据污染区大小、污染分布情况和污染程度进行设计；

2 注入井的周边及污染区的外围应设计监测井，对污染区的污染物和药剂的分布和运移状况进行监测；

3 注入井间距可设置为影响半径的 2 倍左右，并应根据中试实验进行调整；

4 注入井宜采用正六边形或正三角形布置，抽提井可设置在以加热井为顶点构成的六边形或正三角形的中心位置；

5 注入井和抽提井井管应采用耐腐蚀的无污染材料，井管之间连接可采用丝扣或焊接方式，不得使用造成二次污染的粘结剂。

8.2.4 宜对下列运行参数进行监测：

1 药剂注入流量；

2 个喷头喷淋范围重合度；

3 抽提井抽提废水的污染物浓度；

4 废水处理设施排放口污染物浓度。

8.3 异位土壤淋洗法

8.3.1 异位土壤淋洗工程设计宜包括主体工艺设计和辅助工程设计，主体工艺设计宜包括预处理工段、进料工段、混合制浆工段、筛分洗涤工段、增效洗脱工段、泥浆浓缩工段、泥水分离工段、废水处理工段和固废处置工段的关键技术及参数设计，辅助工程设计宜包括能源供应工程、给排水工程和消防工程设计等。

8.3.2 污染土壤异位淋洗工艺流程应根据小试实验结果确定，典型工艺流程可包括预处理、洗涤、固液分离、废水处理等（图 8.3.2）。

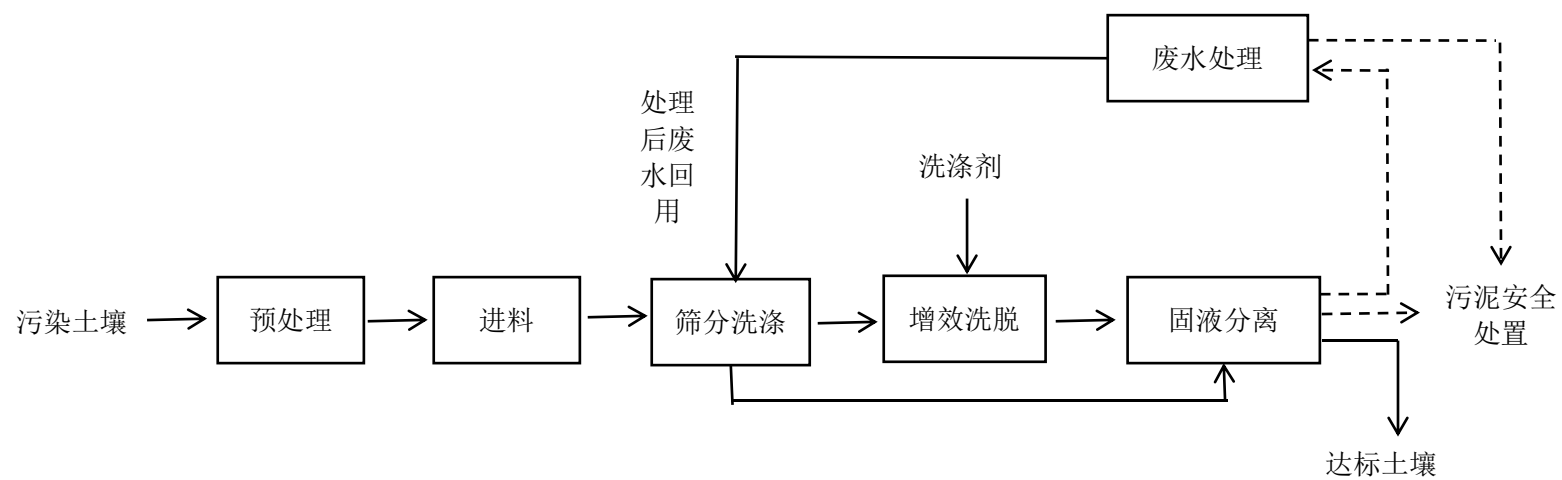


图 8.3.2 异位土壤淋洗典型工艺流程

8.3.3 预处理措施可包括破碎、筛分、含水率调节等，预处理设备宜包括破碎机、筛分机等，预处理后的土壤颗粒粒径不宜大于 80mm，预处理场所选择应满足下列要求：

1 预处理场所应根据预处理污染土流转量、配套设施要求和现有地块条件进行设计；

2 预处理场所进行功能区划分，可分为污染土壤卸料区、暂存区、预处理区、废水收集处理区等；

3 预处理场所应采取防尘、防雨措施，地面应作硬化和防渗处理，周边应设置围堰或排水沟渠，污染土渗滤液应统一收集、集中处理；

4 预处理区应配置破碎机、筛分机等设备对污染土壤进行分选、破碎和筛分。

8.3.4 异位土壤淋洗工程的进料应符合下列规定：

1 当不同污染区域土壤污染物浓度差异较大时，宜根据污染物浓度按区域分批进料；

2 当污染土壤为杂填土、砂土、粉性土时，宜采用干法进料；

3 干法进料宜采用皮带输送机、螺旋输送机或链斗输送机等设备，并配备计量装置；

4 当污染土壤为粘性土时，宜采用湿法进料；

5 湿法进料设备宜包括泥浆池、搅拌装置、注水装置、计量装置、泥浆泵等。

8.3.5 异位土壤淋洗工程的筛分洗涤应符合下列规定：

1 筛分洗涤工艺宜设计多级筛分，可采用滚筒筛、振动筛、水力旋流器等的一种或多种设备组合，进料口宜设高压水喷淋装置，并配备流量监控调节装置；

2 筛分终端出料土壤颗粒不宜超过 2mm；

3 筛分洗涤宜根据土壤机械组成和筛分效率选择合适的水土比，宜为(5~10):1。

8.3.6 异位土壤淋洗工程的增效洗脱应符合下列规定：

1 增效洗脱设备包括带搅拌功能的增效洗脱池、配药罐、流量计、泥浆泵等；

2 增效洗脱的水土比宜通过中试试验结果设定，并可根据现场运行状况进行调节，水土比宜为(4~10):1；

3 淋洗时间宜通过小试或中试试验确定，一般不宜低于 30 min，淋洗设备容积

和泥浆流量应满足淋洗时间要求；

4 当一次淋洗不能达到修复目标时，可采用多级连续淋洗或循环淋洗；

5 增效洗脱土壤粒径不宜超过 2mm。

8.3.7 异位土壤淋洗工程的固液分离宜包括泥浆浓缩和机械脱水工序，并应符合下列规定：

1 泥浆浓缩宜采用连续式重力浓缩池，并配备混凝剂混合设备、流量计和污泥泵；

2 机械脱水宜采用板框压滤脱水、带式压滤脱水和离心脱水中的一种或多种组合工艺。

8.3.8 应对下列工艺参数进行监测：

1 污染土壤的给料速率；

2 洗涤剂的添加流量；

3 淋洗时间；

4 出料土壤含水率；

5 出料土壤污染物含量。

9 固化/稳定化法

9.1 一般规定

9.1.1 采用固化/稳定化法的污染土壤修复工程应符合《污染土壤修复工程技术规范 固化/稳定化》HJ1282 的规定。

9.1.2 固化/稳定化药剂配方及用量宜通过小试或中试试验确定，可根据附录 E 的规定选择药剂进行试验。

9.1.3 应对固化/稳定化处理前后的污染土壤进行采样检测，采样检测应符合下列要求：

1 采样应符合《建设用地土壤污染风险管控和修复监测技术导则》HJ25.2、《污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术导则》HJ25.5 的要求；

2 处理后的固化/稳定化土壤应进行浸出测试，一般宜按《固体废物 浸出毒性浸出方法 硫酸硝酸法》HJ/T299 进行浸出测试，污染物浸出浓度应满足《地下水质量标准》GB/T14848 或达到《污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术导则》HJ25.5 规定的要求，当处理后固化/稳定化土壤进入生活垃圾填埋场时，应按照《固体废物浸出毒性方法醋酸缓冲渗液法》HJ/T300 进行浸出测试，并满足相应限值要求；

3 当采用固化技术时，应对固化块的无侧限抗压强度、渗透系数和耐久性等指标进行测试，固化块的无侧限抗压强度应大于 0.35MPa，渗透系数不宜大于 $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ 。

9.1.4 应按照《建设用地土壤污染风险管控和修复监测技术导则》HJ25.2、《污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术导则》HJ25.5 以及国家、地方、相关行业标准的要求对固化/稳定化处理后的土壤进行长期环境监测，当长期环境监测发现地下水和地表水、污染物浸出量明显升高或风险控制措施损毁等时，应经过评估后及时采取补救措施。

9.2 原位固化/稳定化法

9.2.1 原位固化/稳定化系统宜包括挖掘、翻耕或螺旋钻等机械深翻搅拌系统、药剂调配及输料系统、工程现场取样监测系统以及长期稳定性监测系统等，所需设备构成宜符合表 9.2.1 的规定。

表 9.2.1 原位固化/稳定化系统的设备构成

序号	系统名称	设备构成
1	机械深翻搅拌系统	挖掘机、翻耕机、螺旋搅拌机、转筒搅拌机、高压旋喷机等
2	试剂调配及输料系统	输料管路、试剂储存罐、流量计、混配装置、水泵、压力表等
3	工程现场取样监测系统	驱动器、取样钻头、固定装置
4	长期稳定性监测系统	气体监测探头、水分、温度、地下水在线监测系统等

9.2.2 药剂调配宜满足下列要求：

1 应设置药剂储存库、料仓、配药站和泵送系统，并配备液位监控和溢流液收集系统；

2 制备好的水泥浆储存不宜超过 2 小时。

9.2.3 机械搅拌和药剂注入宜满足下列要求：

1 应根据小试和中试试验结果确定药剂注入和搅拌设备的注药速率、搅拌杆移动速率、搅拌时间、搅拌深度等参数；

2 对于小于 5m 的浅层污染土壤，可采用挖掘机、旋耕机或专用浅层搅拌机等设备混合，可采用液体、浆状或粉末状材料和药剂，混合搅拌与药剂添加宜同步进行；

3 对于大于 5m 的深层污染土壤，可采用高压注入或螺旋搅拌的方式混合药剂和土壤，可采用液体、浆状材料和药剂，混合搅拌与药剂添加宜同步进行；

4 液体材料和药剂的注入宜采用固定式注入井或压力喷射注入，水泥浆等浆状材料宜选择压力喷射注入；

5 搅拌/注入单元数量及平面布置应根据影响半径和修复污染面积确定，单元之间应相互重叠，确保药剂覆盖整个污染区域；

6 施工过程遇到地层和污染物状况与调查报告差异较大时，应根据现场测试结果调整药剂注入影响半径、注入压力和注入流量等工艺参数。

9.2.4 养护和管理宜满足下列要求：

1 原位固化/稳定化处理后的土壤应进行养护，对表层裸露部分进行覆盖，保持水分；

2 原位固化/稳定化处理后，宜考虑土壤增容膨胀的影响，宜根据地形、土地利用等进行整形；

3 原位稳定化处理后宜采取高密度聚乙烯、膨润土垫或黏土等封盖措施，减少降水对稳定化土壤的淋溶。

9.2.5 宜对下列运行参数进行监测：

1 灌浆注射压力和速率；

2 搅拌速率和压力；

3 搅拌头垂直方向移动速度；

4 搅拌时长；

5 搅拌深度；

6 土柱数量和重叠度。

9.3 异位固化/稳定化法

9.3.1 异位固化/稳定化的工艺流程可包括污染土壤挖运、预处理、计量、混合搅拌、养护等（图 9.3.1）。

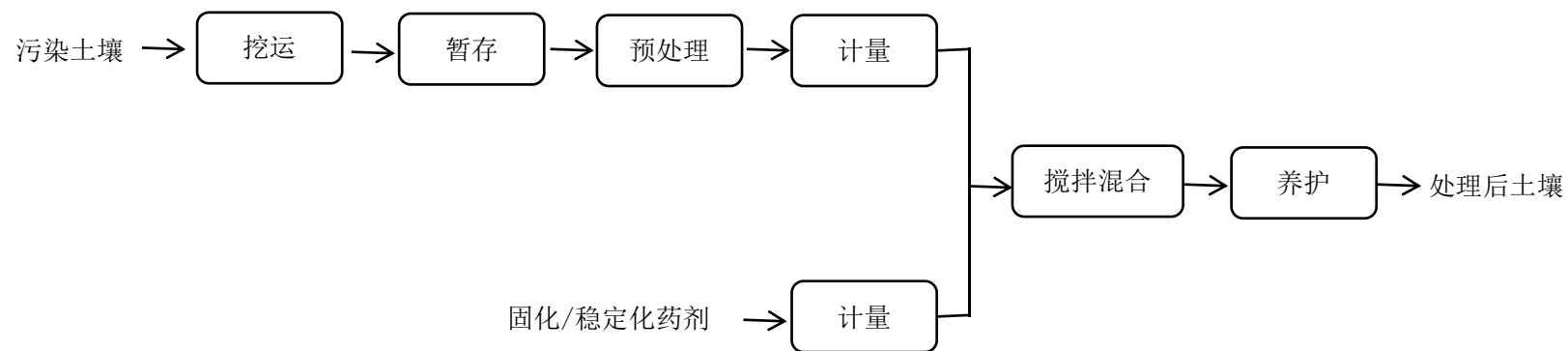


图 9.3.1 异位固化/稳定化工艺流程图

9.3.2 土壤预处理宜满足下列要求：

- 1** 应把土壤中直径大于 50mm 的石块和建筑垃圾进行筛分；
- 2** 土壤中砂砾含量较多时，宜采用多级筛分去除 1~2mm 以上的砂砾；
- 3** 处理土壤量不大时，可简化筛分流程，采用筛分斗分批筛分或直接采用搅拌设备自带的筛分装置筛分；
- 4** 可采用圆筒筛、振动筛、筛分斗或固定格栅等设备进行筛分处理；
- 5** 可采用颚式破碎机、锤式破碎机等设备进行破碎处理；
- 6** 经预处理后的土壤颗粒一般不宜大于 5mm。

9.3.3 土壤和药剂暂存宜满足下列要求：

- 1** 挖掘出来的污染土壤应按照土壤类别、污染物种类和污染程度分类存放；
- 2** 污染土壤暂存区应配备有防雨、防渗、防扬尘措施；
- 3** 制备好的水泥浆储存不宜超过 2 小时。

9.3.4 搅拌混合宜满足下列要求：

- 1** 宜根据小试和中试优化的参数，确定药剂配比、使用量和混合时间，并应在正式运行前对参数进行调试；
- 2** 宜采用双轴搅拌机、土壤改良机等专用设备混合搅拌土壤和药剂，搅拌混合系统宜具备自动计量投加装置；
- 3** 当污染土壤处理规模较小时，可采用挖掘机、翻抛机、旋耕机、浅层搅拌设备等分批进行混合搅拌，并应做好防渗和抑尘设计。

9.3.5 养护宜满足下列要求：

- 1** 固化后的土壤应在初凝前完成成型，一般宜在 8 小时内，可采用制砖机、造粒机等制成块状、粒状固化块，或直接浇注成型，振动压实；
- 2** 固化初凝成型完成后应进行养护，将固化体用油毡、薄膜、草席等覆盖，保持表面潮湿，养护时间一般不宜少于 14 天；
- 3** 当只采用稳定化技术时不需要成型，宜在搅拌完成后堆成条垛状保持水分养护，养护时间一般不宜少于 7 天。

9.3.6 应对下列工艺参数进行监测：

- 1** 污染土壤的给料速率；

- 2** 药剂的入料速率；
- 3** 土壤在搅拌机中的停留时间；
- 4** 加水速率；
- 5** 搅拌速度。

10 水泥窑协同处置法

10.0.1 用于协同处置污染土壤的水泥窑应满足以下条件：

- 1 窑型应为新型干法水泥窑；
- 2 单线设计熟料生产规模不宜小于 2000 吨/日；
- 3 对于改造利用原有设施协同处置污染土壤的水泥窑，在改造之前原有设施应连续两年达到《水泥工业大气污染物排放标准》GB4915 的要求。

10.0.2 用于协同处置污染土壤的水泥窑应具备以下功能：

- 1 采用窑磨一体机模式；
- 2 配备在线监测设备，保证运行工况的稳定；
- 3 水泥窑及窑尾余热利用系统采用高效布袋除尘器作为烟气除尘设施；
- 4 水泥窑及窑尾余热利用系统排气筒配备粉尘、NO_x、SO₂ 浓度在线监测设备；
- 5 配备窑灰返窑装置，将除尘器等烟气处理装置收集的窑灰返回送往生料入窑系统。

10.0.3 用于协同处置污染土壤的水泥生产设施所在位置应该满足以下条件：

- 1 应符合城市总体发展规划、城市工业发展规划要求；
- 2 所在区域应无洪水、潮水或内涝威胁，设施所在标高应位于重现期不小于 100 年一遇的洪水位之上，并建设在现有和各类规划中的水库等人工蓄水设施的淹没区和保护区之外。

10.0.4 污染土壤投加设施应该满足以下条件：

- 1 应能实现自动进料，并配置可调节投加速率的计量装置实现定量投料；
- 2 污染土壤输送装置和投加口应保持密闭，污染土壤投加口应具有防回火功能；
- 3 应保持进料通畅，防止污染土壤搭桥堵塞；
- 4 应配置可实时显示污染土壤投加状况的在线监视系统；
- 5 应具有自动联机停机功能，当水泥窑或烟气处理设施因故障停止运转，或者当窑内温度、压力、窑转速、烟气中氧含量等运行参数偏离设定值时，或者烟气排放超过标准设定值时，可自动停止污染土壤投加。

10.0.5 水泥窑协同处置污染土壤的工艺流程可包括污染土壤预处理、污染土壤投加、尾气处理等（图 10.0.5）。

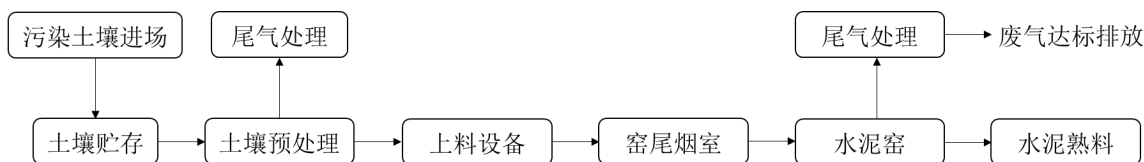


图 10.0.5 水泥窑协同处置污染土壤工艺流程图

10.0.6 污染土壤投加位置的选择应符合以下规定：

1 可选择窑头高温段、窑尾高温段和生料配料系统三个位置进行污染土壤的投加；

2 宜根据污染土壤的特性和进料装置的要求，以及投加口的工况特点，选择合适的污染土壤投加位置。

10.0.7 污染土壤暂存场地应采取防雨、防渗、防尘、通风、除臭等措施，并符合环保部门的相关规定。

10.0.8 污染土壤预处理设施宜满足下列要求：

1 土壤预处理系统应在密闭环境内进行，污染土壤的筛分设施要有良好的密闭性，并保证与操作人员隔离；

2 预处理系统产生的尾气应经过尾气处理系统后达标排放；

3 预处理设施应符合 GB50016 等相关消防规范的要求，区域内应配备防火防爆装置，灭火用水储量应大于 50m³。

10.0.9 入窑协同处置的污染土壤添加量的控制宜满足下列要求：

1 污染土壤添加量应保证污染土壤中的 K₂O、Na₂O 含量不影响水泥的品质；

2 入窑配料中重金属污染物的浓度应满足《水泥窑协同处置固体废物环境保护技术规范》HJ622 的要求；

3 应根据水泥回转窑工艺特点，控制随物料入窑的氯和氟投加量，以保证水泥回转窑的正常生产和产品质量符合国家标准，入窑物料中氟元素含量不应大于 0.5%，氯元素含量不应大于 0.04%；

4 水泥窑协同处置过程中，应控制污染土壤中的硫元素含量，配料后的物料中硫化物硫与有机硫总含量不应大于 0.014%，从窑头、窑尾高温区投加的全硫与配料

系统投加的硫酸盐硫总投加量不应大于 3000mg/kg。

11 阻隔填埋法

11.1 原位阻隔覆盖

11.1.1 原位阻隔覆盖系统应由下列系统构成：

1 土壤阻隔系统：主要由 HDPE 膜、泥浆墙等防渗阻隔材料组成，通过在污染区域四周建设阻隔层，将污染区域限制在某一特定区域；

2 土壤覆盖系统：通常由粘土层、人工合成材料衬层、砂层、覆盖层等一层或多层组合而成；

3 监测系统：主要是由阻隔区域上下游的监测井构成。

11.1.2 原位阻隔覆盖技术阻隔材料应满足下列条件：

1 阻隔材料渗透系数应小于 10^{-7}cm/s ；

2 阻隔材料应具有极高的抗腐蚀性、抗老化性，具有强抵抗紫外线能力，使用寿命 100 年以上，无毒无害；

3 阻隔材料应确保阻隔系统连续、均匀、无渗漏。

11.1.3 阻隔系统深度宜阻隔到不透水层或弱透水层。

11.1.4 土壤覆盖厚度应满足下列条件：

1 粘土层厚度宜大于 300 mm，经机械压实后的饱和渗透系数小于 10^{-7}cm/s ；

2 人工合成材料衬层，应满足《垃圾填埋场用高密度聚乙烯土工膜》CJ/T 234 相关要求。

11.1.5 原位土壤阻隔覆盖技术的运行维护应对下列指标进行监测：

1 HDPE 膜有无破损；

2 覆盖粘土层是否有大型植物生长；

3 上下游地下水水质情况等。

11.2 异位阻隔填埋技术

11.2.1 异位阻隔填埋技术的工艺流程可包括污染土壤预处理、填埋场建设、污染土壤填埋、填埋场封场等（图 11.2.1）。

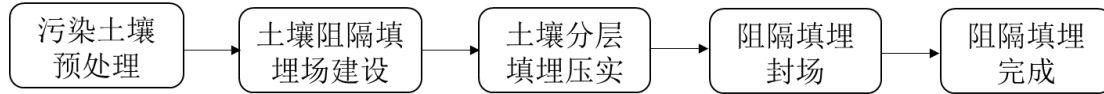


图 11.2.1 异位阻隔填埋技术的工艺流程图

11.2.2 异位阻隔填埋系统应由以下几种系统构成：

- 1 土壤预处理系统；
- 2 填埋场防渗阻隔系统；
- 3 渗滤液收集系统；
- 4 封场系统；
- 5 排水系统；
- 6 监测系统；
- 7 地下水导排系统、气体抽排系统及地面生态覆盖系统。

11.2.3 采用异位阻隔填埋技术的污染土壤的含水率宜低于 20%。

11.2.4 异位土壤阻隔填埋技术的运行维护应包括下列内容：

- 1 针对有机污染土壤，应设置气体收集系统和渗滤液收集系统；
- 2 针对重金属污染土壤，应设置渗滤液收集系统；
- 3 在技术实施完毕后应进行封场生态恢复；
- 4 监测系统应设置地下水监测井，监测井应分别设置在阻隔区域的上游、下游和阻隔区域内部。

11.2.5 减少二次污染的措施应包括：

- 1 开挖污染土壤应采取苫盖等防止扬尘的措施；
- 2 操作全程宜使用吸附剂、泵等设备清理泼散物；
- 3 地块周围宜设地面导水沟，以控制地表径流；
- 4 在地块下坡处宜构筑贮留池以阻隔受污染径流。

12 微生物修复法

12.1 原位生物通风技术

12.1.1 在利用生物通风技术进行修复前，应进行相应的可行性测试，宜在实验室开展相应的小试或中试实验。

12.1.2 生物通风系统应包括抽气系统、抽提井、输气系统、营养水分调配系统、注射井、尾气处理系统、在线监测系统及配套控制系统等，宜包括表 12.1.2 中列出的主要设备。

表 12.1.2 生物通风系统主要设备列表

序号	系统名称	主要设备
1	输气系统	鼓风机、输气管网等
2	抽气系统	真空泵、抽气管网、气水分离罐、压力表、流量计、抽气风机
3	营养水分调配系统	营养水分添加管网、水泵、营养水分存储罐等
4	在线监测系统及配套控制系统	在线监控设备
5	尾气处理系统	除尘器、活性炭吸附塔等

12.1.3 采用生物通风技术的土壤理化性质应符合以下要求：

- 1 土壤的气体渗透率应大于 0.1 达西；
- 2 土壤含水率宜为 15~20%；
- 3 土壤温度宜为 20~40℃；
- 4 土壤的 pH 宜为 5~9；
- 5 土壤中 C:N:P 比例宜为 100: (5~10) :1；
- 6 土壤中存在 Fe^{3+} 、 NO_3^- 、氧气等电子受体。

12.1.4 土壤中土著微生物的数量不宜低于 10^5 CFU/g 土壤（干重），当土著微生物数量不足或土著微生物不能有效降解目标污染物时，宜接种高效菌。

12.1.5 生物通风系统运行过程中应对土壤氧气含量、含水率、营养物质含量、土壤

中污染物浓度、土壤中微生物数量、尾气污染物含量等指标进行监测。

12.2 生物堆技术

12.2.1 生物堆技术修复污染土壤的工艺流程宜包括预处理、营养水份补给、抽气及废气处理、滤液收集与处理等（图 12.2.1）。

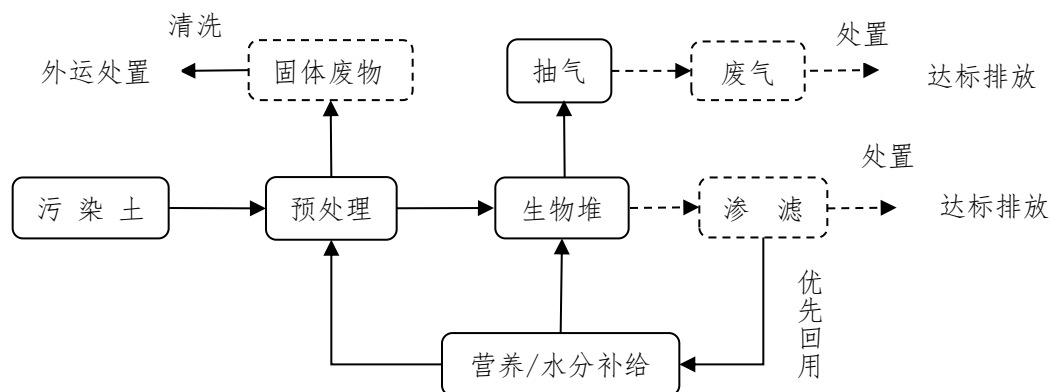


图 12.2.1 生物堆修复污染土壤工艺流程

12.2.2 预处理系统应满足以下要求：

- 1 预处理作业区应设置防扬尘与防雨等设施；
- 2 目标污染物具有异味或挥发特性时，作业区应设置在密闭负压大棚内，并配套相应的废气收集处理设施；
- 3 宜采用破碎设备对大粒径土块进行破碎，破碎后的土块颗粒不宜大于 5 cm；
- 4 水分、氮磷等营养物质、pH 值调节剂及功能微生物菌剂等调理剂宜以溶液形式通过喷洒方式添加至破碎筛分后的土壤，固体调理剂可通过拌合方式添加；
- 5 调理后土壤重量含水率宜控制在 10%~20%；
- 6 调理后土壤微生物总数不宜低于 1000 CFU/g 土壤（干重）；
- 7 调理后土壤 pH 值宜控制在 6~9；
- 8 调理后土壤孔隙度不宜低于 25%；

12.2.3 防渗及渗滤液收集系统宜满足以下要求：

- 1 生物堆建设区域宜优先采用铺设防渗膜或地面硬化的方式进行防渗，也可采用夯实建设区域土壤进行防渗；

2 采用防渗膜进行防渗的，应在防渗膜上下各铺设一层非织造土工布保护层，防止防渗膜在施工过程中被刺穿；

3 采用夯实土壤进行防渗的，施工前应通过现场实验确定压实方法、压实设备、压实次数等以确保可达到设计要求，夯实后土壤厚度应大于 0.75 m，渗透系数应低于 1×10^{-5} cm/s；

4 堆体底部宜根据渗滤液产生情况并结合区域降雨量等气象气候条件，设置渗滤液收集管，收集管应布置于生物堆建设区地势最低处。

12.2.4 抽气系统宜满足以下要求：

1 抽气系统应于堆体底部防渗层上铺设一层厚 20 cm~30 cm 且均匀的砂砾石导气层；

2 堆体与抽气系统的砂砾石导气层之间应设置一层土工布；

3 生物堆通气速率一般宜控制在每立方污染土每小时通气 0.5 m^3 ，堆体土壤中氧气含量宜不低于 10%；

4 抽气支管直径根据抽气量确定，宜为 5 cm~10 cm；

5 抽气干管上宜设置气量调节阀门与流量自动计量装置；

6 抽气管网连接后应开展气密性测试，确保阀门、仪表与管道连接处以及支管与干管连接处的气密性。

12.2.5 生物堆堆体设计宜满足以下要求：

1 单个生物堆堆体尺寸与建设规模应综合考虑总体修复土方量、项目工期、单批次土壤修复周期、可用于建设堆体的厂区面积、共用设施的一次性投资等因素确定；

2 为保证施工的可行性及通气效率，单个堆体宽度不宜超过 10 m，高度宜控制在 2 m~3 m，堆体边坡坡度宜控制在 1:1~1:1.5 以保证稳定性；

3 堆体四周应利用自然地形，设置排水沟等导排系统，将降雨等地表径流及时导排后集中收集，经检测合格后外排，如不具备自然导排条件，应设置提升井等导排设施；

4 堆体内温度宜控制在 $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ，温度过低时应对堆体加温，温度过高时应通风降温。

12.2.6 土壤气监测系统宜满足下列条件：

1 土壤气监测点应设置在两根抽气支管距离中心线的垂直正上方且抽气过程中堆体内气体流动较差的区域，相邻两个土壤气监测点水平向垂直距离宜为 4 m~6 m；

2 土壤气监测点距离堆体顶部不宜小于 1 m，距离堆体底部不宜小于 0.3 m。应对堆体不同深度的土壤气进行监测，水平方向相邻两个土壤气监测点竖直方向的垂直距离不宜大于 1.2 m。

12.2.7 进气系统宜满足下列条件：

1 生物堆堆体顶部应设置进气系统，主要由进气管构成；

2 进气管水平间距一般宜为 2 m~3 m，布置于气体流通薄弱区域，进气管插入堆体的深度一般不宜小于 0.2 m，以能固定进气管为准。

12.2.8 营养水分调配系统宜满足下列条件：

1 营养水分调配宜通过添加含氮、磷等物质的营养液及水分实施，营养元素应浓度适当、添加均匀并满足堆体中微生物生长需求；

2 运行过程中堆体土壤的碳氮磷含量比值宜控制在 100:10:1~100:10:0.5，重量含水率宜控制在 10%~20%。

12.2.9 生物堆运行期间的监测指标宜包括：

1 目标污染物浓度；

2 土壤含水率、pH 值；

3 微生物数量与活性；

4 堆体内温湿度、压力，氧气、二氧化碳及挥发性组分含量；

5 废气排放量及污染物浓度，渗滤液流量及污染物浓度等。

13 植物修复法

13.0.1 植物修复工程的工艺流程可包括植物育苗、植物种植、植物管理与刈割、植物处置等（图 13.0.1）。

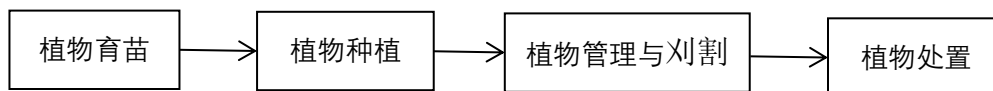


图 13.0.1 植物修复工程工艺流程图

13.0.2 宜根据污染物类型选择适宜的修复植物（附录 F）。

13.0.3 植物修复设备应包括富集植物育苗设施、种植所需的农业机具、焚烧并回收重金属所需的焚烧炉、尾气处理设备、重金属回收设备。

13.0.4 宜对土壤进行调理以满足植物生长要求：

- 1 土壤的 pH 值应适宜植物生长；
- 2 土壤中有机质或肥力应能维持植物较好生长；
- 3 土壤的水分含量应适宜植物生长。

13.0.5 在气候寒冷地区，宜设置地膜或暖棚。

13.0.6 宜设置土壤污染物、焚烧尾气污染物监测设施。

附录 A 土壤修复技术筛选矩阵

表 A 土壤修复技术筛选矩阵

技术名称	技术成熟度	运行维护投入	资金投入	系统可靠性	其他成本	修复时间	非卤代 VOCs	卤代 VOCs	非卤代 SVOCs	卤代 SVOCs	重金属
原位化学氧化还原	△	▽	○	○	○	△	○	○	▽	○	◇
异位化学氧化还原	△	○	▽	△	○	△	○	○	○	○	△
气相/多相抽提	△	▽	○	△	△	○	△	△	▽	▽	▽
原位热脱附	△	▽	▽	△	○	△	△	△	△	△	▽
异位热脱附	△	▽	▽	○	○	△	△	△	△	△	▽
原位土壤淋洗	△	▽	○	○	○	○	△	△	○	○	△
异位土壤淋洗	△	▽	▽	△	○	△	○	○	○	○	○
原位固化/稳定化	△	○	▽	△	△	△	▽	▽	○	○	△
异位固化/稳定化	△	○	▽	△	△	△	▽	▽	○	○	△
水泥窑协同处置	△	▽	▽	○	△	△	△	△	△	△	▽
阻隔填埋	△	○	▽	△	△	▽	○	○	○	○	○
生物通风	△	△	△	△	△	○	△	◇	△	▽	▽
生物堆	△	△	△	△	△	○	△	△	○	◇	◇
植物修复	△	△	△	▽	△	▽	○	○	○	◇	○

注：△优于平均水平，○平均水平，▽低于平均水平，◇技术有效性取决于现场条件、污染物种类等。

附录 B 土壤修复技术适用污染物类型

表 B 各土壤修复技术适用污染物类型

修复技术	污染物类型
化学氧化	石油烃、苯系物、酚类、含氯有机溶剂、多环芳烃、农药
化学还原	六价铬和氯代有机物
气相	挥发性有机物
多相抽提	可用于挥发性有机物、NAPL
热脱附	苯系物、石油烃、卤代烃、有机农药类、多氯联苯、二噁英等挥发性有机污染物和半挥发性有机污染物以及汞污染
土壤淋洗	重金属、半挥发性有机污染物、难挥发性有机污染物
固化/稳定化	可用于重金属（铅、锌、铜、镉、铬、汞、砷、镍等）、半挥发性有机污染物（多环芳烃、多氯联苯、长链润滑油（>C ₂₈ ）、二噁英等）、无机污染物（石棉，氰化物、氟化物等），不适用挥发性有机污染物
水泥窑协同处置	可用有机污染、重金属，不宜用于汞、砷、铅等重金属污染较重的土壤
阻隔填埋	可用于重金属、有机物及重金属与有机物复合污染，不宜用于水溶性强的污染物修复
生物通风	宜用于易生物降解有机物污染土壤的修复，不宜用重金属、难降解有机物污染土壤的修复
生物堆	宜用于易生物降解有机物污染土壤的修复，不宜用重金属、难降解有机物污染土壤的修复
植物修复	砷、镉、铅、镍、铜、锌、钴、锰、铬、汞等重金属

附录 C 原位热脱附法不同加热方式的适用条件

表 C 原位热脱附法不同加热方式的适用条件

加热方式	最高温度 /°C	适合土质	适用条件	不适用条件
热传导加热	750~800	粉砂、粉土、壤土、黏土、基岩裂隙	1) 可用于各种地层，宜用于低渗透及匀质性差的污染区域修复； 2) 宜用于挥发性有机物、石油类半挥发性有机物、农药、二噁英以及多氯联苯等； 3) 可实现定深加热或不同深度分段加热	
电阻加热	100~120	粉砂、粉土、壤土、黏土	1) 宜用于各种地层的污染区域修复，宜用于低渗透性污染区域的修复； 2) 宜用于挥发性有机物、含氯有机物和石油类半挥发性有机物的修复。	1) 不宜用于基岩和裂隙等地质状况； 2) 不宜用于地下有绝缘体构筑物的情况； 3) 不宜用于含水率低于 20% 的土壤修复。
蒸汽注入加热	170	砂砾、砂土、粉砂	1) 宜用于渗透性较好的地层； 2) 宜用于挥发性有机物污染区域及污染程度重的区域进行修复	1) 不宜用于渗透性系数小于 10^{-4}m/s 的区域； 2) 不宜用于地层均质性差的污染区域； 3) 不宜用于污染深度浅及污染范围大的情况。

附录 D 异位热脱附法土壤的停留时间及出料温度

表 D 异位热脱附法土壤的停留时间及出料温度

污染物类型	停留时间/min	出料温度/℃
挥发性有机物	10~20	100~200
半挥发性有机物	10~30	150~500
有机农药类	10~40	300~650
多氯联苯、多溴联苯和二噁英类	30~60	300~600
石油烃类	10~30	150~600
汞	20~60	200~600

附录 E 固化/稳定化法常用药剂

表 E 固化/稳定化法常用药剂

序号	污染物类型	土地类型	药剂
1	重金属	建设用地	固化剂：硅酸盐水泥、火山灰、粉煤灰、高炉矿渣、生石灰、熟石灰、水泥窑灰、石灰窑灰、沥青等； 稳定化剂：氧化钙、氢氧化钙、氧化镁等碱性材料，零价铁、铁盐、铁氧化物等含铁材料，磷酸盐、骨炭、磷矿石和羟基磷灰石等含磷材料，黏土、沸石等吸附材料。
2	重金属	农田	固化剂：火山灰、粉煤灰、高炉矿渣、生石灰、熟石灰、石灰窑灰等； 稳定化剂：氧化钙、氢氧化钙、氧化镁等碱性材料，零价铁、铁盐、铁氧化物等含铁材料，磷酸盐、骨炭、磷矿石和羟基磷灰石等含磷材料，黏土、沸石等吸附材料。
3	有机污染物	建设用地	固化剂：硅酸盐水泥、火山灰、粉煤灰、高炉矿渣、生石灰、熟石灰、水泥窑灰、石灰窑灰、沥青等； 稳定化剂：膨润土、活性炭、生物炭等吸附材料。
4	有机污染物	农田	固化剂：火山灰、粉煤灰、高炉矿渣、生石灰、熟石灰、石灰窑灰等； 稳定化剂：膨润土、活性炭、生物炭等吸附材料。

附录 F 植物修复法常用植物

表 F 植物修复法常用植物

序号	污染物	植物名称	植物图片
1	铬 (Cr)	李氏禾	
2	镉 (Cd)	宝山堇菜	
3	镉 (Cd)、锌 (Zn)	遏蓝菜	
4	镉 (Cd)、铅 (Pb)、锌 (Zn)	芥菜	
5	砷 (As)	蜈蚣草	
6	砷 (As)	大叶井口边草	

用词说明

为便于在执行本标准条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

1 表示很严格，非这样做不可的：

正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；

2 表示严格，在正常情况下均应这样做的：

正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；

3 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的：

正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；

4 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

引用标准名录

- 《地表水环境质量标准限值》GB3838
- 《水泥工业大气污染物排放标准》GB4915
- 《污水综合排放标准》GB8978
- 《工业炉窑大气污染物排放标准》GB9078
- 《恶臭污染物排放标准》GB14554
- 《地下水质量标准》GB/T14848
- 《大气污染物综合排放标准》GB16297
- 《污水排入城镇下水道水质标准》GB/T31962
- 《挥发性有机物无组织排放控制标准》GB37822
- 《工业企业厂界环境噪声排放标准》GB12348
- 《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准》GB36600
- 《建设用地土壤污染状况调查技术导则》HJ25.1
- 《建设用地土壤污染风险管控和修复监测技术导则》HJ25.2
- 《建设用地土壤污染风险评估技术导则》HJ25.3
- 《建设用地土壤修复技术导则》HJ25.4
- 《污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术导则》HJ25.5
- 《水泥窑协同处置固体废物环境保护技术规范》HJ622
- 《污染土壤修复工程技术规范 异位热脱附》HJ1164
- 《污染土壤修复工程技术规范 原位热脱附》HJ1165
- 《污染土壤修复工程技术规范 固化/稳定化》HJ1282
- 《大气污染防治工程技术导则》HJ2000
- 《水污染治理工程技术导则》HJ2015
- 《固体废物 浸出毒性浸出方法 硫酸硝酸法》HJ/T299
- 《固体废物浸出毒性方法醋酸缓冲渗液法》HJ/T300
- 《建筑深基坑工程施工安全技术规范》JGJ311

中国工程建设标准化协会标准

污染土壤修复工程设计标准

T/CECS XXX—202X

条 文 说 明

制定说明

本标准制定过程中，编制组针对污染土壤修复工程，进行了广泛深入的调查研究，总结了我国污染土壤修复工程的实践经验，参考了我国生态环境部近年来的发布的行业标准（如《建设用地土壤污染风险管控和修复术语（HJ682）》、《污染土壤修复工程技术规范 原位热脱附（HJ1165）》、《污染土壤修复工程技术规范 固化/稳定化（HJ1282）》等）。此外，本标准还广泛征求了设计、科研、管理等单位的意见，在充分吸收和采纳各方意见的基础上，通过反复讨论、修改和完善，最终完成编制。

为了便于广大设计、施工、科研、学校等单位有关人员在使用本标准时能正确理解条文规定，标准编制组按章、节、条的顺序编制了本标准的条文说明，对条文规定的目的、依据及执行中需注意的有关事项进行了说明，供使用者作为理解和把握标准规定的参考。

本条文说明不具备与标准正文及附录同等的法律效力，仅供使用者作为理解和把握条文规定的参考。

目次

1 总 则.....	61
3 现状评估与方案设计.....	62
3.1 现状评估.....	62
3.2 方案设计.....	62
4 工程设计总体设计要求.....	65
4.1 一般规定.....	65
4.2 设计文件要求.....	65
4.3 总体布置.....	66
5 化学氧化还原法.....	67
5.1 一般规定.....	67
5.2 原位化学氧化还原法.....	68
6 气相/多相抽提法.....	69
7 热脱附法.....	70
7.1 原位热脱附法.....	70
7.2 异位热脱附法.....	71
8 土壤淋洗法.....	74
8.1 一般规定.....	74
8.3 异位土壤淋洗法.....	74
9 固化/稳定化法.....	76
9.1 一般规定.....	76
9.2 原位固化/稳定化法.....	77
10 水泥窑协同处置法.....	78
11 阻隔填埋法.....	79
11.1 原位阻隔覆盖.....	79
12 微生物修复法.....	80
12.1 原位生物通风技术.....	80
13 植物修复法.....	82

1 总 则

1.0.1 本条规定了本标准的编制目的。我国土壤污染形势严峻，2014 年发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示，全国土壤污染点位超标率达 16.1%，总体呈现污染面积大、程度深、类型多样的普遍现象。其中，重污染企业用地、工业废弃物场地的点位超标率更是高达 36.3%和 34.9%，污染尤为严重。土壤的污染导致其引起的人体健康事件频发，成为影响公众健康以及社会稳定的一大隐患。因此，国家颁布了一系列法律法规，防治土壤污染。2013 年，国务院办公厅印发了《近期土壤环境保护和综合治理工作安排》，对治理土壤污染工作提出了明确要求。2016 年，国家颁布出台《土壤污染防治行动计划》（简称“土十条”）对土壤环境保护做出了纲领性指导意见；2019 年，《土壤污染防治法》正式实施，这也是我国首次制定专门的法律以规范防治土壤污染，这一年也被称为“土壤修复元年”。在此背景下，土壤修复产业蓬勃发展。“十三五”期间，涉足土壤修复企业激增，从 2016 年的 1541 家，增长到 2020 年的 23530 家。2022 年，全国中标项目 3931 项。然而，目前土壤修复项目工程质量良莠不齐，急需统一的标准规范工程设计与施工，为良好的工程质量提供有效保障。

1.0.2 本条规定了本标准的适用范围，本标准适用于土壤修复工程的设计。

3 现状评估与方案设计

3.1 现状评估

3.1.1 地块利用变迁资料包括土地使用规划资料（航片、卫星图片、土地登记信息资料等），建设用地还包括地块内建筑、设施、工艺流程和生产污染变化情况等资料，农业用地包括农作物种植、农药、化肥使用情况等。

地块环境资料包括土壤及地下水污染记录、地块危险废物堆放记录以及地块与自然保护区和水源地保护区等位置关系等。

建设用地地块的相关记录包括：产品、原辅材料及中间体清单、平面布置图、工艺流程图、地下管线图、化学品储存及使用清单、泄漏记录、废物管理记录、地上及地下储罐清单、环境影响报告书、环境审计报告、地勘报告、环境监测数据等；农用地地块的相关记录包括：农药、化肥的采购及使用清单、喷灌及灌溉管网布置图等。

地块所在区域的自然和社会信息包括：地理位置图、地形、地貌、土壤、水文、地质和气象资料等；人口密度分布，敏感目标分布，土地利用方式，经济现状和发展规划，国家和地方政策法规与标准等。

土壤的理化性质参数包括 pH 值、容重、有机碳含量、含水率、土壤质地等。气候和水文地质特征参数包括年平均风速、水力传导系数、地下水位、地下水流向与流速、地质结构等。

3.2 方案设计

3.2.3 本条规定了土壤修复方案制定的原则，为科学性、可行性和安全性。科学性是指采用科学的方法，综合考虑地块修复目标、土壤修复技术的处理效果、修复时间、修复成本和修复工程的环境影响等因素，科学制定修复方案；可行性是指制定的土壤修复方案要合理可行，要在前期工作的基础上，针对污染地块的污染物性质、污染程度、范围以及对人体健康或生态环境造成的危害，合理选择土壤修复技术，因地制宜制定修复方案，使修复目标可达，且修复工程切实可行；安全性是指制定的土壤修复方案要确保修复工程实施安全，防止对施工人员、周

边人群健康以及生态环境产生危害和二次污染。

3.2.4 本条规定了土壤修复方案编制的程序，分为 3 步。第一步，选择修复模式。在分析前期土壤污染状况调查和风险评估资料的基础上，根据地块特征条件、目标污染物、修复目标、修复范围和修复时间长短，选择确定地块修复总体思路。第二步，筛选修复技术。根据地块的具体情况，按照确定的修复模式，筛选实用的修复技术，开展必要的实验室小试和现场中试，或对土壤修复技术应用案例进行分析，从适用条件、对本地卡土壤修复效果、成本和环境安全性等方面进行评估，最终筛选出适用的修复技术。第三步，制定修复方案。根据确定的修复技术，制定土壤修复技术路线，确定土壤修复技术的工艺参数，估算土壤修复的工程量，提出初步修复方案，然而从技术制备、工程费用、二次污染防治等方面进行方案可行性比选，最终编制成经济、实用和可行的修复方案。

3.2.5 本条规定了土壤修复方案编制前的准备工作，包括资料核实、现场考察和补充监测 3 个方面。首先应该审阅土壤污染状况调查报告、风险评估报告等相关资料，核实地块相关资料的完整性和有效性，重点核实前期地块信息和资料是否能反应地块目前的实际情况。其次是需要进行现场考察，考察现场的施工条件，特别需要关注地块用电、用水、施工道理、安全保卫等方面的情况，以为后边修复方案制定时施工区域布置提供基础信息。第三方面是补充监测，当发现已有资料不能满足修复方案编制需求时，需要做必要的补充监测。

3.2.6 本条规定了修复目标值的确定方法。修复目标值根据风险筛选值和风险管控值等限制确定，一般介于风险筛选值和风险管控值之间。

对于建设用地，污染物含量 $\leq$ 风险筛选值时，认为是不存在健康风险的洁净土壤，当污染物含量 $>$ 风险管控值时，认为人体健康存在不可接受风险，必须采取管控或修复措施，而当污染物含量介于风险筛选值和风险管控值之间时，认为可能存在健康风险，需要详细调查及风险评估，以进一步确认是否需要管控或修复措施（图 3.2.6-1）。

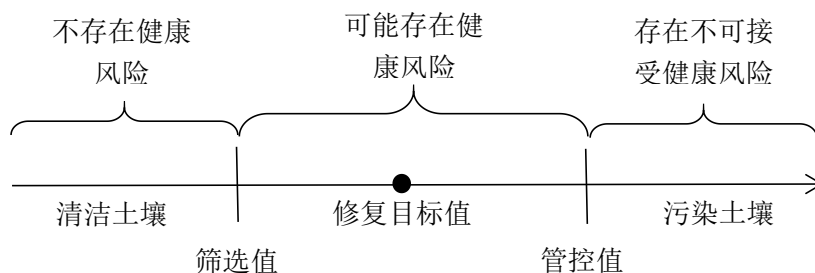


图 4.2.6-1 建设用地环境质量标准各值关系

对于农用地，当污染物含量 $\leq$ 风险筛选值时，认为对农产品质量安全、农作物生长或土壤生态环境的风险较低，可以忽略；当污染物含量 $>$ 风险管控值时，食用农产品不符合安全标准，风险高，且难以通过安全利用措施降低污染风险，对于这类农用地，原则上禁止种植食用农产品；当污染物含量介于筛选值和管控值之间时，可能存在食用农产品不符合安全标准的风险，需采取管控或修复措施降低风险（图 4.2.6-2）。

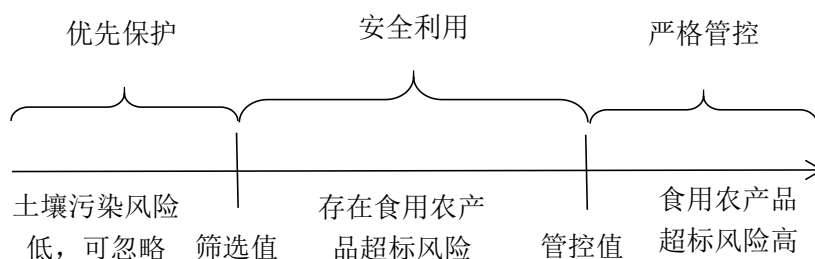


图 4.2.6-2 农用地环境质量标准各值关系

3.2.8 本条规定了修复模式选择确定的方法。修复模式就是对地块进行修复的总体思路，包括原地修复、异地修复、异地处置、自然修复、污染阻隔、居民防护和制度控制等，又称修复策略。

3.2.12 本条规定了工艺参数的确定应通过小试或中试实验获得，采用不同的修复技术工艺参数会有所不同，一般包括药剂种类及用量，设备处理能力、处理时间、能耗、设备占地面积或作业区面积等。

4 工程设计总体设计要求

4.1 一般规定

4.1.4 污染土壤修复工程设计需要收集的基础材料包括：地块污染特征、地块地质和水文地质条件、区域气象气候条件、地下构筑物或埋藏物分布、地块用途、周边敏感点及分布、能源供应条件、修复后土壤去向等。其中地块污染特征包括污染物及其浓度分布、污染深度、范围、修复土方量等，地质和水文地质条件主要包括地层结构、地下水位、地下水流向，土壤特征包括土壤渗透性、导热导电特性、土壤含水率、土壤质地、土壤粒径和塑性、pH 值等，区域气象气候条件主要包括气温、降水量、主导风向、风速等，地块的用途既包括现状用途也包括规划用途，周边敏感点发布包括居民点、学校、地表水源地及地下水源地等，能源供应包括燃气、电力、蒸汽供应等；修复后土壤去向主要是采用异位技术修复后的土壤修复完成后净土的去向。

4.2 设计文件要求

4.2.2 初步设计文件是根据污染土壤修复技术方案进行编制的，并满足编制施工图、采购主要设备及控制工程建设投资的需要。

4.2.3 污染土壤修复工程施工图设计文件，是根据初步设计文件进行编制的，对于未开展初步设计的工程，则根据技术方案进行编制。施工图设计文件，应满足编制工程预算、工程施工招标、设备材料采购、非标准设备制造、施工组织计划编制和工程施工的需要。

4.2.4 工艺专业设计，应根据技术方案确定，并应包括工艺技术路线、工艺参数、工程量等。工艺专业设计，一般包括下列内容：（1）设计计算，并绘制工艺流程图；（2）根据计算结果及工艺流程图细化设计，内容应包括处理单体、井、主要设备仪表、主要材料、链接管道等；（3）根据单体设计结果，进行工艺总平面布置设计；（4）进行工艺管道设计，并合理确定管道的位置、敷设和连接方式等；（5）完善设备仪表清单和主要材料清单，并绘制工艺管道仪表流程图；（6）设计图纸包括：工艺流程图，设施设备布置图，井点的平面布置图和结构

图，药剂配制和地面处理设备图，井和设备等的安装图，工艺总平面布置图，修复区域平面位置图，工艺管道布置图，工艺管道仪表流程图，可根据工程设计内容合理增减。

辅助专业设计，是在工艺专业设计基础上进行，并为工艺专业设计提供支撑。

4.3 总体布置

4.3.1 施工平面布置应遵从降低环境影响、方便施工及运行的原则，并应按照消防要求留出消防通道和安全保护距离。处理构筑物应设置栏杆、防滑梯等安全措施，高架处理构筑物还应设置避雷设施。

4.3.2 废气、废水处理设施布置在远离敏感区或敏感区下风向，为了减少有害气体对人群和环境的影响。

5 化学氧化还原法

5.1 一般规定

5.1.1 化学氧化修复技术是在土壤中加入强氧化剂，将污染物降解为无毒害的物质或直接矿化为 CO_2 和水。化学氧化修复技术主要针对有机污染物治理，能够修复绝大多数有机污染物，包括石油烃、BTEX、PAHs、农药、酚类、含氯有机溶剂等。

化学还原修复技术影响修复效果的因素包括：1) 污染物类型与浓度，污染物类型和浓度在很大程度上影响治理难度和治理效果；2) 土壤渗透性、均一性，高渗透性的沙壤土，有利于药剂均匀分布，从而使用原位还原技术。对于非均质土壤可能形成快速通道，使注入的药剂难以接触到全部处理区域，影响处理效果；3) 地下水位，采用注射井技术时，需要有一定的地下水位，若地下水位过低，则很难达到所需注药压力。采用高压旋喷技术时受地下水位影响较小；4) 土壤含水率，含水率达到饱和含水率的 90% 以上，有利于污染物的去除。5) pH 和缓冲容量，用铁修复六价铬及氯代溶剂时，高 pH 会导致铁表面形成覆盖膜，降低铁的还原效率，需要酸性或中性环境。用二氧化硫修复铬和氯化溶剂时，则需要碱性条件。

5.1.2 常用的化学氧化剂有过氧化氢、过硫酸盐、高锰酸盐和臭氧。过硫酸盐的氧化反应过程中形成的硫酸根自由基 ($\text{SO}_4 \cdot^-$) 和羟基自由基 ($\text{HO} \cdot$) 具有极强的氧化性，能够氧化很多有机污染物；二价铁、紫外光、加热能够促进过硫酸盐的氧化反应。类似的，过氧化氢和臭氧主要以 $\text{HO} \cdot$ 、 $\text{O}^{2-} \cdot$ 、 $\text{HO}_2 \cdot$ 氧化为主。而高锰酸盐并非通过自由基进行反应的，而是电子交换。

氧化剂需求量 = 土壤氧化剂需求量 (SOD) + 污染物氧化剂需求量 + 氧化剂自我分解量。土壤氧化剂需求量 (SOD) 取决于土壤中腐殖质和还原性物质含量，通常 SOD 远远大于污染物氧化剂需求量，有时甚至超过 1 个数量级；氧化剂自我分解量取决于氧化剂种类。不同土质 SOD 差距较大，且不同种类氧化剂对于不同污染物处理效率也是天差地别，所以必须通过小试或中试实验确定氧化剂种类与需求量。

化学还原一般不能彻底去除污染物,在实际中应用较少,但典型的如六价铬,则必须通过化学还原技术处理,常用的药剂有亚硫酸氢钠、多硫化钙、零价铁,其中多硫化钙用于处理六价铬效果较好。化学还原剂的用量也需要通过小试和中试实验确定。

5.2 原位化学氧化还原法

5.2.5 药剂注入可以采用注入井注入、直推注入或高压旋喷注入。直推式钻机的主要功能是注药管的打入和起拔,高压旋喷钻机的主要功能包括打孔、注药、药剂与土壤混合,是一种比较高效的化学氧化工程设备。



直推式钻机



高压旋喷钻机

5.5.6 氧化剂在扩散过程可能因为通过土壤时的消耗而使氧化反应受限,导致有效半径小于水力半径。此外,影响半径还与土壤的渗透性有关,渗透性高的土壤影响半径大,反之渗透性低的土壤影响半径较小。因此,布点间距设计要根据中试实验结果确定。

6 气相/多相抽提法

6.0.1 气相抽提适用于处理土壤不饱和区中的挥发性有机污染物（VOCs）。多相抽提可同时抽取含水层中的污染地下水、非水相液体（NAPL）和土壤气相中的 VOCs。

气相抽提或多相抽提技术，其原理都是通过提取手段，抽取地下污染区域的土壤气体或液体到地面进行相分离及处理。气相抽提主要通过真空抽提手段，抽取包气带污染土壤中的污染气体；多相抽提则是在气相抽提的基础上，通过真空抽提或潜水泵抽提，抽取包气带土壤中的污染气体、含水层的污染地下水或 NAPL。

6.0.2 气相抽提与多相抽提的不同点在于，气相抽提只抽提土壤中的污染气体，而多相抽提既抽提污染土壤中的气体，又抽提污染地下水，以及非水相液体（NAPL）。多相抽提工艺流程，抽出来的污染物首先进行气液分离，气体进行冷凝净化处理。经气液分离后分离出来的液体的处理分两种情况，如果液体里含有大量的 NAPL，且有回收利用价值，则液体进行油水分离，分离出来的 NAPL 经净化后回收利用，分离出来的水进入污水处理环节，如果液体里 NAPL 含量很低或没有回收价值，则直接进行污水处理。

7 热脱附法

7.1 原位热脱附法

7.1.2 美国原位热脱附工程案例有约 200 个，以电阻加热技术（ERH）应用最多，主要处理 VOCs，特别是氯代溶剂和石油碳氢化合物，其次为蒸汽热脱附技术（SEE）、热传导热脱附技术（TCH），组合技术最少。我国原位热脱附工程案例有 20 余个，主要是热传导技术（TCH），包括燃气燃烧加热的热传导技术以及电加热的热传导技术，其次为电阻加热技术（ERH），目前尚无蒸汽注入技术（SEE）案例，处理对象是高污染农药场地和焦化场地。

7.1.3 本条规定了热脱附的工艺参数热脱附温度、热脱附时间等的设计。污染物的解吸率跟污染物类型、污染浓度、热脱附温度、热脱附时间、土壤性质等多种因素有关。一般来说，污染物及其浓度、土壤性质确定时，温度越高，解吸率越高，脱附时间越长，解吸率越高。热脱附温度和热脱附时间有一定耦合关系，对于某一确定的污染，要达到同样的解吸率，既可以采用较低的温度较长的解吸时间，也可以采用较高的温度较短的时间。也就是说加热时间一定程度上可弥补加热温度的不足。此外，解吸率还与污染物的吸附点位有关，吸附在矿物质上的有机污染物易于解吸，当热脱附温度在污染物沸点处时会有大量污染物解吸；而吸附在有机质上的污染物相对比较稳定，在解吸的初始阶段，尤其是前几个小时内随着热脱附时间延长，解吸率线性增加，呈现一级解吸动力学规律。另外，解吸率还与土壤含水率有关，在水的沸点 100℃ 前后，污染物的解吸量也会增加。污染物初始浓度，对解吸率影响不大。污染物热脱附还与污染时间有关，污染时间越长，越难于脱附。此外，热脱附效率还与土壤性质相关，土壤类型、粘粒、砂粒含量、有机质含量、粒径分布、比表面积等都影响污染土壤的热脱附效率，因此，对于某一污染土壤采用哪一温度能够既达到修复效果又能尽量节约能源，宜通过小试和中试试验确定。

在进行小试或中试试验时，热脱附温度和时间可参考表 7.1.3 设置，并通过试验获得最佳的温度和时间。

表 7.1.3 热脱附法主要工艺参数

污染物类别	热脱附温度（℃）	热脱附时间（min）
苯系物（苯、甲苯、乙苯、二甲苯）	150~200	20~30
石油烃	200~300	30~60
多环芳烃	400~450	20~30
卤代烃	150~200	20~30
有机氯农药（DDT、六六六）	400~500	10~20
多氯联苯	400~600	60~120

表 7.1.3 中数据引自“多氯联苯污染土壤热脱附过程关键影响因素的实验研究及应用”、“焦化污染场地土壤中 PAHs 的赋存特征及热脱附处置研究”、“热脱附技术修复 DDTs 污染土壤的研究”、“苯系物在土壤中的吸附剂热脱附行为研究”、“石油烃污染土壤间接热脱附关键影响因素研究”、“六六六和滴滴涕污染场地土壤的修复”、“氯代烃在土壤中吸附与热脱附过程研究”等。对于连续的异位热脱附设施，可通过加热时间和设备容量反推进料速度。

7.2 异位热脱附法

7.2.5 异位热脱附分为直接热脱附、间接热脱附两种形式。直接热脱附是热源通过直接接触污染土壤的方式对土壤进行加热，将污染物从土壤中挥发去除的处理过程。间接热脱附是热源通过热传导或加热介质间接对污染土壤加热，将污染物从土壤中挥发去除的处理过程，也就是说间接热脱附的热源不与污染土壤直接接触。

对于有机污染土壤，当污染物浓度较高时，适宜采用间接热脱附，避免污染物与热源直接接触发生爆炸，一般来说当土壤有机物含量超过 4% 时，就不再适合用直接热脱附系统了，此外间接热脱附方式还可以避免高浓度有机污染物混进烟尘，更便于有机物的回收利用。当污染物浓度较低时，可以采用直接热脱附方式，也可采用间接热脱附方式，因为直接热脱附处理效率更高，所以优先推荐选用直接热脱附方式。

当土方量较小时适宜采用间接热脱附，当土方量较大时适宜采用直接热脱附方式。这是因为直接热脱附效率更高，可以处理的土方量更大。单套系统处理量主要受运输尺寸限制，间接热脱附系统一般在 3~6 t/h，对于可移动式的直接热脱

附系统，其处理量一般最大可达 20~30 t/h。

对于直接热脱附系统，设置有除尘设施，因为污染土壤与热源直接接触，所以烟气中混有土壤颗粒，所以必须进行除尘。烟气先进行旋风除尘，然后进行二次燃烧，接着烟气降温后进行布袋除尘，需要注意的是旋风除尘和布袋除尘不可以调换位置，因为布袋除尘不耐高温。对于间接热脱附系统，因为热源与污染土壤不直接接触，所以烟气中不含土壤颗粒，所以不需要除尘或其他处理，可以直接排放，但需要注意的是此处可以直接排放的烟气是指燃烧天然气等燃料产生的烟气，而不是从旋转热筒中的污染土壤中分离出来的带污染物的烟气，带旋转筒内的带污染物的烟气是必须进行严格净化处理的。

直接热脱附法处理有机污染土壤如图 7.2.5-1 所示，图中虚线表示烟气处理流程，实线表示土壤和水的流程。对于烟气的处理流程，除了除尘和降温两个工艺外，烟气处理措施还包括二次燃烧和洗气。

图 7.2.5-2 给出了高浓度有机污染土壤或土方量小时适用的间接热脱附工艺路线图，从图中可以看出，用于处理高浓度有机污染土壤的间接热脱附的烟气处理工艺包括冷凝、气液分离、吸附和燃烧。冷凝后部分气体污染物转变为液态，若液体有回收利用价值，则可以进一步纯化处理，若没有回收价值，则采用水处理工艺进行废水处理。而经气液分离后的烟气进入吸附罐，被活性炭等吸附剂吸附，溢出的烟气通入到加燃烧炉中燃烧处理。

图 7.2.5-3 给出的是汞污染土壤的异位热脱附法处理工艺流程，它与有机污染间接热脱附法基本相同，唯一不同的是汞处理的烟气经吸附后尾气直接排放，而有机污染的烟气经吸附后尾气通道热解炉经燃烧后排放，也就是说有机污染比汞污染的烟气处理多了一个燃烧的步骤。这是因为有机污染物可以燃烧，且经燃烧后排放更环保，而汞不能燃烧。

总的来说，异位热脱附系统包括暂存和预处理系统、进料系统、热处理系统、出料系统、废气处理系统、废水处理系统。

7.2.6 预处理包括分选、脱水、破碎、筛分、混合、搅拌、输送等过程。当污染土壤中存在砖瓦、石块、木块、铁块等杂质时，需要进行分选或分拣，以将这些杂质去除，有利于后续的热处理。当土壤含水率过高，需要首先对土壤进行脱水处理，脱水处理方式有晾晒或添加生石灰等脱水剂。这是因为土壤含水率高，将

消耗大量的能量用于使水蒸发，增加了热脱附的能耗，所以对于未了保证热脱附的效能，进料土壤含水率不宜超过 25%，否则应进行脱水处理。采用破碎、筛分工艺，可以降低土壤粒径，有利于后续在热处理过程中提高热传导效率，保证热脱附效果。混合和搅拌是为了让污染土壤更均匀，有利于热脱附处理。

7.2.7 本条规定了异位热脱附热处理系统的设备和参数。附录 D 表 D 中挥发性污染物主要是卤代烃，包括一氯甲烷、二氯甲烷、氯仿、四氯化碳、二氯乙烷、三氯乙烷、四氯乙烷、二氯丙烷、三氯丙烷、一氯乙烯、二氯乙烯、三氯乙烯、四氯乙烯、苯、甲苯、乙苯、二甲苯、氯苯、二氯苯、溴仿等。半挥发性有机物包括硝基苯、苯胺、氯酚、苯并[a]蒽、苯并[a]芘、苯并[b]荧蒽、苯并[k]荧蒽、二苯并[a,h]蒽、茚并[1,2,3-cd]芘、蒽、萘、五氯酚等。有机农药类包括阿特拉津、氯丹、DDT、乐果、敌敌畏、六六六、灭蚁灵、六氯苯、七氯等。石油烃（Total petroleum hydrocarbon, TPH）是指最初在原油中发现的含有碳氢化合物的混合物，包括正烷烃、支链烷烃、环烷烃、芳香烃等。

8 土壤淋洗法

8.1 一般规定

8.1.1 土壤淋洗法既可以用于处理重金属污染，也可以用于处理有机污染，能够处理石油烃、PCBs、PAHs 等多种有机污染物。土壤淋洗技术的技术原理是通过添加水或合适的淋洗剂，将污染物从土壤相转移到液相，达到净化土壤的目的。

本条给出了重金属、有机污染物适合的淋洗剂，其中常用的酸溶液有乙酸、草酸、苹果酸、柠檬酸等，盐溶液有氯化铁、氯化钙溶液等，络合剂有 EDTA 等，表面活性剂有十二烷基苯磺酸钠、十二烷基硫酸钠、十二磺基丁二酸钠等。对于复合污染，需要重金属洗涤剂 and 有机污染物洗涤剂复配，制成复合淋洗剂。

8.3 异位土壤淋洗法

8.3.2 本条给出了异位土壤淋洗的工艺流程，虚线代表水处理的流程，实线代表土壤或污泥的固体的流程。污染土壤经预处理后，通过进料系统，进入到搅拌淋洗设备中进行水土混合搅拌，然后进入到固液分离设备中进行脱水，之后分成三路，一路是净化好的土壤，一路是含污染物的污泥，一路是含污染物的废水，污泥外运进行安全化处置，废水则需要进行废水处理，经处理后的废水可以送到搅拌淋洗设备中回用，废水处理若产生污泥，则与固液分离设备产生的污泥合并外运。

8.3.5~8.3.6 淋洗包括筛分洗涤和增效洗脱，筛分洗涤是用清水洗涤，若不能达到淋洗目标则需要进一步增效洗脱，增效洗脱是加入洗涤剂洗涤。本条给出了筛分洗涤的相关规定。筛分洗涤的水土比一般为（5~10）：1，需要注意的是水土比为质量比，例如水土比为 3:1，即表示 1kg 土，加入 3kg 水。洗脱时间一般为 30min~2h，延长洗脱时间有利于污染物去除，但同时会增加处理成本，因此应根据中试试验和现场运行状况选择合适的洗脱时间。当筛分洗涤能够达到修复目标时，则不再需要增效洗涤工序，筛分洗涤的泥水直接进入固液分离环节，筛分出的干净土壤直接进入土壤堆放储存区。

当一次分级和增效洗脱不能达到既定土壤修复目标时，可采用多级连续洗脱

或循环洗脱。在成本可控的情况下，增效洗脱液可以通过采取超声、加热等方式来增强洗脱效果。

9 固化/稳定化法

9.1 一般规定

9.1.1 固化/稳定化法的原理是通过一定的机械力在原位向污染介质中添加固化剂/稳定化剂，在充分混合的基础上，使其与污染介质、污染物发生物理、化学作用，将污染介质固封在结构完整的具有低渗透系数固态材料中，或将污染物转化成化学性质不活泼形态，降低污染物在环境中迁移和扩散。固化和稳定化不同，固化是通过加入胶凝材料等固化剂把污染土壤转化为难于渗透、稳定的固化块，而稳定化是通过稳定化药剂与污染物之间的化学反应将污染物转化为难于溶解和浸出的形式。但是固化和稳定化反应往往是同时发生的，在固化剂中添加稳定化药剂，使得固化过程中伴随着稳定化反应，进一步减少污染物的释放。

固化/稳定化法适用于土壤中重金属、半挥发性有机污染物和其他无机物的治理，不适用于挥发性污染物的处理。其中，重金属包括铅、锌、铜、镉、铬、汞、砷、铍等，半挥发性有机污染物主要包括多环芳烃、多氯联苯、杀虫剂、长链润滑油、二噁英等，其他无机物主要包括氰化物、氟化物等。

9.1.2 常用固化材料的优缺点见下表：

材料	优点	缺点或需要关注的问题
水泥	不需要干燥和脱水；随添加量变化可获得不同强度和渗透性的固化块，成品可以再利用；能承受低 pH 值和氧化剂；加入其他材料可以降低污染物浸出。	水化反应放热，增加污染物的挥发；增加固化块的体积；某些污染物不适合水泥固化；会受土壤成分和污染物干扰，影响强度和凝结时间。
生石灰	酸中和能力强，能承受低 pH 值和氧化剂；可以引发粉煤灰、高炉矿渣和黏土产生水化反应，形成胶凝物质，产品可再利用；对湿土有干化作用。	水化反应放热，增加污染物的挥发；增加固化块的体积；某些污染物不适合生石灰固化；水化反应需水量大。
熟石灰	酸中和能力强；可以引发粉煤灰、高炉矿渣和黏土产生水化反应，形成胶凝物质，产品可再利用；需水量小，不发生放热反	

	应。	
高炉矿渣	废物综合利用，减少水泥用量；水化放热低，水化反应时间长；能承受硫酸盐和氯化物的侵蚀，抗冻融。	需要与水泥、石灰反应形成胶凝物质；水化反应时间长，固化块形成强度慢；增容。
粉煤灰	废物综合利用，减少水泥用量；水化放热低，水化反应时间长；残炭可以作为污染物吸附剂。	需要水泥、石灰和碱性硅酸盐引发形成胶凝，反应取决于粉煤灰玻璃相的性质和比例；水化反应时间长，固化块形成强度慢；增容；影响氧化还原环境；石灰和粉煤灰混合体浸出和耐久性效果不理想。

有机污染物一般采用活性炭、膨润土、生物炭等吸附剂作为稳定化药剂。重金属铅、铜、锌、镉等阳离子重金属的稳定化药剂可以选择氧化钙、氧化镁、氢氧化钙、石灰石等碱性材料，磷酸盐、磷肥、磷矿石等含磷材料，以及黏土、沸石等吸附材料。六价铬的稳定化药剂可以选择零价铁、硫酸亚铁等还原铁，亚硫酸盐、多硫化钙、硫化物、还原糖等还原性材料。砷的稳定化药剂可以选择零价铁、铁盐、铁氧化物、硫酸亚铁、铝氧化物、锰氧化物等。

9.2 原位固化/稳定化法

9.2.1 原位固化/稳定化技术适用于不宜进行土壤挖掘、缺乏储存和作业空间或污染区域无开发、利用和施工的地块，一般用于深层污染土壤的处理，尤其是含有地下水层的污染土壤。异位固化/稳定化适用于固化/稳定化质量控制要求高或污染区域需要开发、利用或施工的地块，一般用于浅层污染（<5m）土壤的处理。

9.2.3 固化/稳定化法的机械搅拌设备可分为浅层修复机械和深层修复机械。浅层修复机械有挖掘机、推土机、带搅拌头的挖掘机等。挖掘机是相对较易获得的施工机具，但其搅拌均匀度较差，且搅拌深度一般不超过 3m。深层修复机械有直推钻机、旋推钻机和高压旋喷钻机等。直推钻机和旋推钻机主要用于注浆管的打入和起拔，旋喷钻机可以在钻孔的同时输送药剂、压缩空气和清水，在高压条件下工作，可通过高压浆液与压缩空气切割搅拌土体，实现药剂与土壤的有效均匀混合。

10 水泥窑协同处置法

10.0.1 水泥窑协同处置技术原理：利用水泥回转窑内的高温、气体长时间停留、热容量大、热稳定性好、碱性环境、无废渣排放等特点，在生产水泥熟料的同时，焚烧固化处理污染土壤。有机物污染土壤从窑尾烟气室进入水泥回转窑，窑内气相温度最高可达 1800℃，物料温度约为 1450℃，在水泥窑的高温条件下，污染土壤中的有机污染物转化为无机化合物，高温气流与高细度、高浓度、高吸附性、高均匀性分布的碱性物料（CaO、CaCO₃ 等）充分接触，有效地抑制酸性物质的排放，使得硫和氯等转化成无机盐类固定下来；重金属污染土壤从生料配料系统进入水泥窑，使重金属固定在水泥熟料中。

10.0.6 污染土壤投加时应保证系统工况的稳定。窑头高温段，包括主燃烧器投加点和窑门罩投加点；窑尾高温段，包括分解炉、窑尾烟室和上升烟道投加点；生料配料系统指生料磨。含 POPs 物质和高氯、高毒、难降解有机物质的污染土壤优先从窑头投加，若受物理特性限制要求需要从窑尾投加时，优先选择从窑尾烟室投加点；含水率高或块状污染土壤优先选择从窑尾烟室投入；在生料磨只能投加不含有机物的重金属污染土壤。

在窑尾投加的浆状废物应通过泵力输送，粉状污染土壤通过密闭的机械传送装置或气力输送，大块状污染土壤通过机械传送装置输送；生料磨投加可借用常规生料投料设施，在窑门罩投加的液态废物通过泵力输送至窑门罩喷入窑内。

10.0.9 污染土壤添加量应根据污染土壤中的碱性物质、重金属、氯、氟、硫元素含量及污染土壤的含水率，综合确定污染土壤的投加量。在利用水泥窑协同处置污染土壤前，应对污染土壤及土壤中污染物质进行分析，确定污染土壤的投加点及投加量。污染土壤分析指标包括污染土壤的含水率、烧失量、成分等，污染物质分析指标包括：污染物质成分、氯、氟、硫浓度，重金属、氯、氟、硫元素含量等。

11 阻隔填埋法

11.1 原位阻隔覆盖

11.1.1 阻隔填埋是将污染土壤或经过治理后的土壤置于防渗阻隔填埋场内，或通过敷设阻隔层阻断土壤中污染物迁移扩散的途径，使污染土壤与四周环境隔离，避免污染物与人体接触和随降水或地下水迁移进而对人体和周围环境造成危害。

阻隔填埋技术不适用于水溶性强的污染物，是因为水溶性强的污染物易于溶解在水中，容易从土壤中向地下水迁移，从而污染地下水。不适用于渗透率高的土壤的修复，因为渗透性高的土壤污染物易于浸出，可能导致地下水污染，因此渗透率高的土壤也不适合采用阻隔填埋的处理方式。阻隔填埋的技术也不适用于地质活动频繁高的地区，因为地质活动可能导致阻隔层破损，从而导致污染物外溢。阻隔填埋技术也不适用于地下水位高的地区，因为地下水位高时，地下水容易渗入到填埋场内，导致渗滤液增多，增加填埋场渗滤液处理的负担，同时地形水文高也可能破坏阻隔层，导致污染物外溢。

阻隔填埋技术可以分为原位阻隔覆盖和异位阻隔填埋。

原位阻隔覆盖是将污染区域通过在四周建设阻隔层，并在污染区域顶部覆盖隔离层，将污染区域四周及顶部完全与周围隔离，避免污染物与人体接触和随地下水向四周迁移。也可以根据场地实际情况结合风险评估结果，选择只在场地四周建设阻隔层或只在顶部建设覆盖层。

异位阻隔填埋是将污染土壤或经过治理后的土壤阻隔填埋在由高密度聚乙烯膜（HDPE）等防渗阻隔材料组成的防渗阻隔填埋场里，使污染土壤与四周环境隔离，防止污染土壤中的污染物随降水或地下水迁移，污染周边环境，影响人体健康。该技术虽不能降低土壤中污染物本身的毒性和体积，但可以降低污染物在地表的暴露及其迁移性。

12 微生物修复法

12.1 原位生物通风技术

12.1.1 土壤微生物修复技术，即利用微生物或其代谢产物来降解土壤中有机污染物。按其实施方式，可分为原位微生物修复和异位微生物修复。

原位微生物修复不需将污染土壤搬离现场，直接向污染土壤投放氮、磷等营养物质和供氧，促进土壤中土著微生物或特异功能微生物的代谢活性，降解污染物。原位微生物修复技术主要有生物通风法（改变生物降解环境条件，将空气强制注入土壤中，然后抽出土壤中的挥发性有机毒物）、生物强化法（改变生物降解中微生物的活性和强度）、土地耕作法（尽可能地为微生物降解提供一个良好的环境）和化学活性栅修复法（掺入污染土壤的化学修复剂与污染物发生氧化、还原、沉淀、聚合等化学反应，从而使污染物得以降解或转化为低毒性或移动性较低的化学形态）等几种。其中，生物通风法是最常用的一种原位微生物修复技术。

异位微生物修复把污染土壤挖出，进行集中生物降解的方法。主要包括预制床法（农耕法的延续，使污染物的迁移量减至最低）、堆制法（利用传统的堆肥方法，将污染土壤与有机废弃物质等混合起来，使用机械或压气系统充氧，同时加入石灰以调节 pH 值，经过一段时间依靠堆肥过程中微生物作用来降解土壤中有机污染物）及泥浆生物反应器法（将污染土壤转移至生物反应器，加水混合成泥浆，调节适宜的 pH，同时加入一定量的营养物质和表面活性剂，底部鼓入空气充氧，满足微生物所需氧气的同时，使微生物与污染物充分接触，加速污染物的降解，降解完成后，过滤脱水）。其中生物堆法是最常用的异位微生物修复技术。

12.1.3 本条规定了采用生物通风技术土壤应具备的条件，包括温度、pH、含水率、营养物质含量、渗透性等。其中添加营养物质，是为了满足好氧微生物的生长繁殖以及污染物的降解需要，并且营养物质为缓慢释放形式时，效果最佳，一般添加的 N 源为 NH_4^+ ，P 源为 PO_4^{3-} 。

12.1.4 土著微生物存在着生长速度慢，代谢活性低的弱点。当土壤污染物不适合

土著微生物降解，或是土壤环境条件不适于土著降解菌大量生长时，应考虑接种高效菌。

12.2.1 本条给出了生物堆的工艺流程图，图中实线为主要工艺流线，包括预处理、营养水份高效菌的添加、堆制生物堆、通风等，图中虚线表示对废水、废气及固废进行处理，属于二次污染防治，包括对预处理中筛分处理的石块等杂物的清洗和外运，对抽出来的废气的处理，以及对渗滤液的处理。

12.2.2 本条给出了预处理的相关规定。生物堆技术的预处理包括破碎、筛分、以及混合调理。混合调理包括调节土壤水份、pH 值、孔隙度，添加营养物质和高效菌。筛分的目的是去除砖瓦、石块、木块、铁块、塑料等非土壤物质。破碎使用的是破碎机，破碎后的土块颗粒不宜大于 5cm。水份经调节后土壤含水率控制在 10%~20%。可采用石灰来提高土壤 pH 值，采用硫酸铵、硫酸铝、亚硫酸铝降低土壤 pH 值，调理后的土壤 pH 值宜为 6~9。可通过添加木屑、秸秆、砂土来增加土壤孔隙度，调理后的土壤孔隙度宜不低于 25%。营养物质添加量根据高效菌的营养需求以及土壤中原有的营养物质含量确定。木屑等调理剂可直接跟土壤拌合，营养物质、水份、硫酸铵等配置成溶液喷洒在土壤表面，然后进行混合搅拌。可采用搅拌机对土壤进行混合搅拌，以提高添加物质的均匀性，常用的搅拌设备有卧式搅拌器、立式搅拌机、行星式搅拌器、拌合站等。

12.2.8 本条给出了营养水分补给的相关规定。营养水分在预处理阶段喷洒一次，调整土壤到合适微生物生长的营养和水分含量，在运行过程中，还要根据营养物质和水份的消耗情况，适时补充营养水分。营养水分调配系统为循环管路，布置在堆体上方。主要成分是含氮、磷的物质和水分，常用的氮源包括尿素、硝酸钾等，磷素包括磷酸二氢钾等。

13 植物修复法

13.0.1 植物修复的原理是利用植物进行提取、根际滤除、挥发和固定等方式移除、转变和破坏土壤中的污染物质，使污染土壤恢复其正常功能。目前国内外对植物修复技术的研究和推广应用多数侧重于重金属元素，因此狭义的植物修复技术主要指利用植物清除污染土壤中的重金属。

植物修复技术的分类：根据植物对污染物的作用方式，可分为植物固定、植物挥发、植物过滤和植物提取等类型。根据植物类型可分为超富集植物和高生物量经济植物。植物修复技术的影响因素包括重金属的形态、土壤环境等。植物修复的优点包括：原位修复，对环境友好；能彻底清除土壤中重金属，改良土壤；对土壤理化性质扰动小，减少二次污染；成本低，操作简单，适合大规模应用等。缺点包括：植物生长速度慢，重金属生物利用度低，修复时间长，修复效果难保证。

13.0.3 种植所需要的农业机具包括翻耕设备、灌溉设备、施肥器械等。

植物修复技术主要实施过程包括：（1）对污染土壤进行调查与评价（包括污染土壤中重金属的含量与分布，土壤 pH 值、土壤有机质及养分含量、土壤含水率、土壤孔隙度、土壤颗粒均匀性等）；（2）提出修复目标，制定修复计划；（3）为了缩短修复周期，可采用洁净土稀释污染严重的土壤或将其转移至污染较轻地方进行混合；（4）选取合适的修复植物并育苗；（5）污染场地田间整理、植物栽种、管理与刈割，管理时需根据土壤具体情况进行灌溉、施肥和添加金属释放剂；（6）植物安全焚烧。

13.0.6 运行过程中应定期对污染土壤中污染物浓度等相关指标进行监测，以掌握污染土壤中污染物的年去除率。