

附件

污染场地修复技术目录

(第一批)

序号	名称	适用性	原理	修复周期及参考成本	成熟程度
1	异位固化/稳定化技术	<p>适用于污染土壤。可处理金属类、石棉、放射性物质、腐蚀性无机物、氰化物以及砷化合物等无机物；农药/除草剂、石油或多环芳烃类、多氯联苯类以及二噁英等有机化合物。</p> <p>不适用于挥发性有机化合物和以污染物总量为验收目标的项目。当需要添加较多的固化/稳定剂时，对土壤的增容效应较大，会显著增加后续土壤处置费用。</p>	<p>向污染土壤中添加固化剂/稳定剂，经充分混合，使其与污染介质、污染物发生物理、化学作用，将污染土壤固封为结构完整的具有低渗透系数的固化体，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的迁移和扩散。</p>	<p>日处理能力通常为 100-1200 立方米 (m^3)。</p> <p>据美国 EPA 数据显示，对于小型场地 (1000 立方码 (cy)，约合 $765 m^3$) 处理成本约为 160-245 美元/m^3，对于大型场地 (50000cy，约合 $38228 m^3$) 处理成本约为 90-190 美元/m^3；国内处理成本一般为 500-1500 元/m^3。</p>	<p>国外应用广泛。据美国环保署统计，1982-2008 年已有 200 余项超级基金项目应用该技术。</p> <p>国内有较多工程应用。</p>

序号	名称	适用性	原理	修复周期及参考成本	成熟程度
2	异位化学氧化/还原技术	<p>适用于污染土壤。其中，化学氧化可处理石油烃、BTEX（苯、甲苯、乙苯、二甲苯）、酚类、MTBE（甲基叔丁基醚）、含氯有机溶剂、多环芳烃、农药等大部分有机物；化学还原可处理重金属类（如六价铬）和氯代有机物等。</p> <p>异位化学氧化不适用于重金属污染土壤的修复，对于吸附性强、水溶性差的有机污染物应考虑必要的增溶、脱附方式；异位化学还原不适用于石油烃污染物的处理。</p>	<p>向污染土壤添加氧化剂或还原剂，通过氧化或还原作用，使土壤中的污染物转化为无毒或相对毒性较小的物质。常见的氧化剂包括高锰酸盐、过氧化氢、芬顿试剂、过硫酸盐和臭氧。常见的还原剂包括连二亚硫酸钠、亚硫酸氢钠、硫酸亚铁、多硫化钙、二价铁、零价铁等。</p>	<p>处理周期较短，一般为数周到数月。</p> <p>国外处理成本为 200-660 美元/m³；国内处理成本一般为 500-1500 元/m³。</p>	<p>国外已经形成了较完善的技术体系，应用广泛。</p> <p>国内发展较快，已有工程应用。</p>
3	异位热脱附技术	<p>适用于污染土壤。可处理挥发及半挥发性有机污染物（如石油烃、农药、多氯联苯）和汞。</p> <p>不适用于无机物污染土壤（汞除外），也不适用于腐蚀性有机物、活性氧化剂和还原剂含量较高的土壤。</p>	<p>通过直接或间接加热，将污染土壤加热至目标污染物的沸点以上，通过控制系统温度和物料停留时间有选择地促使污染物气化挥发，使目标污染物与土壤颗粒分离、去除。</p>	<p>处理周期为几周到几年。</p> <p>国外对于中小型场地（2 万吨（t）以下，约合 26800m³）处理成本约为 100-300 美元/m³，对于大型场地（大于 2 万吨，约合 26800m³）处理成本约为 50 美元/m³。</p> <p>国内处理成本约为 600-2000 元/吨。</p>	<p>国外已广泛应用于工程实践。1982-2004 年约有 70 个美国超级基金项目采用该技术。</p> <p>国内已有少量工程应用。</p>

序号	名称	适用性	原理	修复周期及参考成本	成熟程度
4	异位土壤洗脱技术	<p>适用于污染土壤。可处理重金属及半挥发性有机污染物、难挥发性有机污染物。</p> <p>不宜用于土壤细粒（粘/粉粒）含量高于 25% 的土壤。</p>	<p>采用物理分离或增效洗脱等手段，通过添加水或合适的增效剂，分离重污染土壤组分或使污染物从土壤相转移到液相，并有效地减少污染土壤的处理量，实现减量化。洗脱系统废水应处理去除污染物后回用或达标排放。</p>	<p>处理周期约为 3-12 个月。</p> <p>美国处理成本约为 53-420 美元/m³；欧洲处理成本约 15-456 欧元/m³，平均为 116 欧元/m³。</p> <p>国内处理成本约为 600-3000 元/m³。</p>	<p>美国、加拿大、欧洲及日本等已有较多的应用案例。</p> <p>国内已有工程案例。</p>
5	水泥窑协同处置技术	<p>适用于污染土壤，可处理有机污染物及重金属。</p> <p>不宜用于汞、砷、铅等重金属污染较重的土壤，由于水泥生产对进料中氯、硫等元素的含量有限值要求，在使用该技术时需慎重确定污染土壤的添加量。</p>	<p>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。</p>	<p>处理周期与水泥生产线的生产能力及污染土壤添加量相关，添加量一般低于水泥熟料量的 4%。</p> <p>国内的应用成本为 800-1000 元/m³。</p>	<p>国外发展较成熟，广泛应用于危险废物处理，但应用于污染土壤处理相对较少。</p> <p>国内已有工程应用。</p>
6	原位固化/稳定化技术	<p>适用于污染土壤，可处理金属类、石棉、放射性物质、腐蚀性无机物、氰化物以及砷化合物等无机物；农药/除草剂、石油或多环芳烃类、多氯联苯类以及二噁英等有机化合物。</p> <p>不宜用于挥发性有机化合物，不适用于以污染物总量为验收目标的项目。</p>	<p>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，将污染土壤固封为结构完整的具有低渗透系数的固化体，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的迁移和扩散。</p>	<p>处理周期一般为 3-6 个月。</p> <p>根据美国 EPA 数据显示，应用于浅层污染介质处理成本约为 50-80 美元/m³，应用于深层处理成本约为 195-330 美元/m³。</p>	<p>国外已经形成了较完善的技术体系，应用广泛。据美国环保署统计，2005-2008 年应用该技术的案例占修复工程案例的 7%。</p> <p>国内处于中试阶段。</p>

序号	名称	适用性	原理	修复周期及参考成本	成熟程度
7	原位化学氧化/还原技术	<p>适用于污染土壤和地下水。其中，化学氧化可处理石油烃、BTEX（苯、甲苯、乙苯、二甲苯）、酚类、MTBE（甲基叔丁基醚）、含氯有机溶剂、多环芳烃、农药等大部分有机物；化学还原可处理重金属类（如六价铬）和氯代有机物等。</p> <p>受腐殖酸含量、还原性金属含量、土壤渗透性、pH 值变化影响较大。</p>	<p>通过向土壤或地下水的污染区域注入氧化剂或还原剂，通过氧化或还原作用，使土壤或地下水中的污染物转化为无毒或相对毒性较小的物质。常见的氧化剂包括高锰酸盐、过氧化氢、芬顿试剂、过硫酸盐和臭氧。常见的还原剂包括硫化氢、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。</p>	<p>清理污染源区的速度相对较快，通常需要 3-24 个月的时间，使用该技术修复地下水污染羽流区通常需要更长的时间。</p> <p>美国使用该技术修复地下水处理成本约为 123 美元/m³。</p>	<p>国外已经形成了较完善的技术体系，应用广泛。据美国环保署统计，2005-2008 年应用该技术的案例占修复工程案例总数的 4%。</p> <p>国内发展较快，已有工程应用。</p>
8	土壤植物修复技术	<p>适用于污染土壤，可处理重金属（如砷、镉、铅、镍、铜、锌、钴、锰、铬、汞等）以及特定的有机污染物（如石油烃、五氯酚、多环芳烃等）。</p>	<p>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。</p>	<p>处理周期需 3-8 年。</p> <p>美国应用的成本约为 25-100 美元/吨，国内的工程应用成本约为 100-400 元/吨。</p>	<p>国外应用广泛。</p> <p>国内已有工程应用，常用于重金属污染土壤修复。</p>
9	土壤阻隔填埋技术	<p>适用于重金属、有机物及重金属有机物复合污染土壤的阻隔填埋。</p> <p>不宜用于污染物水溶性强或渗透率高的污染土壤，不适用于地质活动频繁和地下水水位较高的地区。</p>	<p>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，使污染土壤与周围环境隔离，避免污染物与人体接触和随土壤水迁移进而对人体和周围环境造成危害。</p>	<p>处理周期较短。</p> <p>国内处理成本为 300-800 元/m³</p>	<p>国外应用广泛，技术成熟。</p> <p>国内已有较多工程应用。</p>

序号	名称	适用性	原理	修复周期及参考成本	成熟程度
10	生物堆技术	<p>适用于污染土壤，可处理石油烃等易生物降解的有机物。</p> <p>不适用于重金属、难降解有机污染物污染土壤的修复，粘土类污染土壤修复效果较差。</p>	<p>对污染土壤堆体采取人工强化措施，促进土壤中具备降解特定污染物能力的土著微生物或外源微生物的生长，降解土壤中的污染物。</p>	<p>处理周期一般为 1-6 个月。</p> <p>在美国应用的成本约为 130-260 美元/ m³，国内的工程应用成本为 300-400 元/ m³。</p>	<p>国外已广泛应用于石油烃等易生物降解污染土壤的修复，技术成熟。</p> <p>国内已有用于处理石油烃污染土壤及油泥的工程应用案例。</p>
11	地下水抽出处理技术	<p>适用于污染地下水，可处理多种污染物。</p> <p>不宜用于吸附能力较强的污染物，以及渗透性较差或存在 NAPL(非水相液体) 的含水层。</p>	<p>根据地下水污染范围，在污染场地布设一定数量的抽水井，通过水泵和水井将污染地下水抽取至地面进行处理。</p>	<p>处理周期一般较长。</p> <p>美国处理成本约为 15-215 美元/ m³。</p>	<p>国外已经形成了较完善的技术体系，应用广泛。据美国环保署统计，1982-2008 年期间，在美国超级基金计划完成的地下水修复工程中，涉及抽出处理和其他技术组合的项目 798 个。</p> <p>国内已有工程应用。</p>

序号	名称	适用性	原理	修复周期及参考成本	成熟程度
12	地下水修复可渗透反应墙技术	<p>适用于污染地下水，可处理 BTEX（苯、甲苯、乙苯、二甲苯）、石油烃、氯代烃、金属、非金属和放射性物质等。</p> <p>不适用于承压含水层，不宜用于含水层深度超过 10m 的非承压含水层，对反应墙中沉淀和反应介质的更换、维护、监测要求较高。</p>	<p>在地下安装透水的活性材料墙体拦截污染物羽状体，当污染羽状体通过反应墙时，污染物在可渗透反应墙内发生沉淀、吸附、氧化还原、生物降解等作用得以去除或转化，从而实现地下水净化的目的。</p>	<p>处理周期较长，一般需要数年时间。根据国外应用情况，处理成本约为 1.5-37.0 美元/m³。</p>	<p>在国外应用较为广泛。2005-2008 年约有 8 个美国超级基金项目采用该技术。</p> <p>国内尚处于小试和中试阶段。</p>
13	地下水监控自然衰减技术	<p>适用于污染地下水，可处理 BTEX（苯、甲苯、乙苯、二甲苯）、石油烃、多环芳烃、MTBE（甲基叔丁基醚）、氯代烃、硝基芳香烃、重金属类、非金属类（砷、硒）、含氧阴离子（如硝酸盐、过氯酸）等。</p> <p>在证明具备适当环境条件时才能使用，不适用于对修复时间要求较短的情况，对自然衰减过程中的长期监测、管理要求高。</p>	<p>通过实施有计划的监控策略，依据场地自然发生的物理、化学及生物作用，包含生物降解、扩散、吸附、稀释、挥发、放射性衰减以及化学性或生物性稳定等，使得地下水和土壤中污染物的数量、毒性、移动性降低到风险可接受水平。</p>	<p>处理周期较长，一般需要数年或更长时间。</p> <p>根据美国实施的 20 个案例统计，单个项目费用为 14-44 万美元。</p>	<p>在美国应用较为广泛，美国 2005-2008 年涉及该技术的地下水修复项目有 100 余项。</p> <p>国内尚无完整工程应用案例。</p>
14	多相抽提技术	<p>适用于污染土壤和地下水，可处理易挥发、易流动的 NAPL（非水相液体）（如汽油、柴油、有机溶剂等）。</p> <p>不宜用于渗透性差或者地下水水位变动较大的场地。</p>	<p>通过真空提取手段，抽取地下污染区域的土壤气体、地下水和浮油等到地面进行相分离及处理。</p>	<p>清理污染源区域的速度相对较快，通常需要 1-24 个月的时间。</p> <p>国外处理成本约为 35 美元/m³ 水。</p> <p>国内修复成本为 400 元每千克 NAPL 左右。</p>	<p>技术成熟，在国外应用广泛。</p> <p>国内已有少量工程应用。</p>

序号	名称	适用性	原理	修复周期及参考成本	成熟程度
15	原位生物通风技术	适用于非饱和带污染土壤，可处理挥发性、半挥发性有机物。 不适合于重金属、难降解有机物污染土壤的修复，不宜用于粘土等渗透系数较小的污染土壤修复。	通过向土壤中供给空气或氧气，依靠微生物的好氧活动，促进污染物降解；同时利用土壤中的压力梯度促使挥发性有机物及降解产物流向抽气井，被抽提去除。可通过注入热空气、营养液、外源高效降解菌剂的方法对污染物去除效果进行强化。	处理周期为 6-24 个月。 根据国外处理经验，处理成本约为 13-27 美元/m ³ 。	国外应用广泛，国内尚处于中试阶段。

备注：

- 1、场地修复周期及成本因土壤类型、污染物类型、修复目标等不同而有较大差异，一般需要通过试验确定。本表中“修复周期及成本”为参考内容，数据主要来自于 www.clu-in.org 和国内案例总结。
- 2、本表中“成熟程度”参考 Superfund Remedy Report 13th Edition, Sep 2010。

污染场地修复技术报告

(第一批)

二〇一四年十月

目录

前言.....	11
1 异位固化/稳定化技术.....	12
2 异位化学氧化/还原技术.....	16
3 异位热脱附技术.....	21
4 异位土壤洗脱技术.....	24
5 水泥窑协同处置技术.....	27
6 原位固化/稳定化技术.....	31
7 原位化学氧化/还原技术.....	35
8 土壤植物修复技术.....	39
9 土壤阻隔填埋技术.....	42
10 生物堆技术.....	46
11 地下水抽出处理技术.....	50
12 地下水修复可渗透反应墙技术.....	54
13 地下水监控自然衰减技术.....	60
14 多相抽提技术.....	63
15 原位生物通风技术.....	67

前言

场地指某一地块范围内的土壤、地下水、地表水以及地块内所有构筑物、设施和生物的总和。污染场地指对潜在污染场地进行调查和风险评估后，确认污染危害超过人体健康或生态环境可接受风险水平的场地。污染场地包含的污染介质形式多样，既有土壤又有水；涉及的污染物种类繁多，主要是各类有机污染物和重金属污染物，如农药、石油烃、多氯联苯、汞、铅、砷等等。

鉴于污染场地的复杂性，其治理技术也是多样化的。按照是否将污染源进行清挖后处理分为原位修复技术和异位修复技术，按照处理介质分为土壤修复技术和地下水修复技术，按照技术原理分为物理化学技术、生物技术、热处理技术等。而且针对具体的某个污染场地，一项技术往往没法解决其环境问题，而是应基于风险管理的基本思路，筛选适应的修复技术，并根据场地污染分布及水文地质条件对筛选出来的修复技术进行有机组合，形成系统性的污染场地修复方案。

本报告详细介绍了目录中各项技术的名称、适用性、原理、系统构成和主要设备、关键参数、应用基础和前期准备、主要实施过程、运行维护和监测、修复周期和参考成本，以及国内外应用情况等内容。报告内容参考了美国等发达国家 30 多年来经过实际验证案例的公开资料和国内实际工程案例经验。报告在编制过程中得到了北京大学、北京市环境保护科学研究院、上海市环境科学研究院、北京建工环境修复有限责任公司、轻工业环境保护研究所、环境保护部南京环境科学研究所、中国环境科学研究院、中国科学院地理科学与资源研究所、中节能大地环境修复有限公司、北京高能时代环境修复公司、环保部固体废物与化学品管理技术中心、沈阳环境科学研究院、清华大学、总参某部、北京金隅红树林环保技术有限责任公司、永清环保股份有限公司、长沙华时捷环保科技发展有限公司、武汉都市环保工程技术股份有限公司、浩蓝环保股份有限公司等单位的支持，在此一并表示感谢。报告中的案例不具备强制推荐性，仅供相关各方在场地修复过程中参考，其技术内容的真实性和有效性由案例提供单位负责。

1 异位固化/稳定化技术

1.1 技术名称

技术名称：异位固化/稳定化，英文名称：Ex-Situ Solidification/Stabilization

1.2 技术适用性

1.2.1 适用的介质：污染土壤

1.2.2 可处理的污染物类型：金属类、石棉、放射性物质、腐蚀性无机物、氰化物、砷化合物等无机物以及农药/除草剂、石油或多环芳烃类、多氯联苯类以及二噁英等有机化合物。

1.2.3 应用限制条件：不适用于挥发性有机化合物和以污染物总量为验收目标的项目。当需要添加较多的固化/稳定剂时，对土壤的增容效应较大，会显著增加后续土壤处置费用。

1.3 技术介绍

1.3.1 原理：向污染土壤中添加固化剂/稳定剂，经充分混合，使其与污染介质、污染物发生物理、化学作用，将污染土壤固封为结构完整的具有低渗透性的固化体，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的迁移和扩散。

1.3.2 系统构成和主要设备：主要由土壤预处理系统、固化/稳定剂添加系统、土壤与固化/稳定剂混合搅拌系统组成。其中，土壤预处理系统具体包括土壤水分调节系统、土壤杂质筛分系统、土壤破碎系统。主要设备包括土壤挖掘系统（如挖掘机等）、土壤水分调节系统（如输送泵、喷雾器、脱水机等）、土壤筛分破碎设备（如振动筛、筛分破碎斗、破碎机、土壤破碎斗、旋耕机等）、土壤与固化/稳定剂混合搅拌设备（双轴搅拌机、单轴螺旋搅拌机、链锤式搅拌机、切割锤击混合式搅拌机等）。

1.3.3 关键技术参数或指标

（1）固化/稳定剂的种类及添加量

固化/稳定剂的成分及添加量将显著影响土壤污染物的稳定效果，应通过试验确定固化/稳定剂的配方和添加量，并考虑一定的安全系数。目前国外应用的固化/稳定化技术药剂添加量大都低于 20%。

（2）土壤破碎程度

土壤破碎程度大有利于后续与固化/稳定剂的充分混合接触，一般要求土壤颗粒最大的尺寸不宜大于 5 cm。

（3）土壤与固化/稳定剂的混匀程度

混合程度是该技术一个关键性瓶颈指标，混合越均匀固化/稳定化效果越好。土壤与固化/稳定剂的混匀程度往往依靠现场工程师的经验判断，国内外还缺乏相关标准。

（4）土壤固化/稳定化处理效果评价

土壤固化/稳定化修复效果通常需要物理和化学两类评价指标：物理指标包括无侧限抗压强度、渗透系数；化学指标为浸出液浓度。

（a）物理学评价指标

经固化/稳定化处理后的固化体，其无侧限抗压强度要求大于 50psi (0.35MPa)，而固化后用于建筑材料的无侧限抗压强度至少要求达到 4000 psi (27.58MPa)。

渗透系数表征土壤对水分流动的传导能力，经固化处理后的渗透系数一般要求不大于 1×10^{-6} cm/s。

（b）化学评价指标

针对固化/稳定化后土壤的不同再利用和处置方式，采用合适的浸出方法和评价标准。

典型固化/稳定化处理效果评价方法详见表 1-1。

表 1-1 典型的固化/稳定化处理效果评价方法

评价方法类型	主要评价方法	关键特征	优势	不足
最大释放水平的测试	美国: USEPA1311、1312 荷兰: NEN 7371 中国: HJ/T 299-2007 HJ/T 300-2007 HJ 557-2010	<ul style="list-style-type: none"> • 固化体破碎后达到浸出平衡; • 参照固废的管理体系, 带有一定的强制性; • 设定明确评价标准限值, 如 40 CFR 261.24, MCL 等。 	<ul style="list-style-type: none"> • 方法简单, 便于操作; • 时间和经济成本均较低; • 有较多的科学性验证结论 	<ul style="list-style-type: none"> • 主要模拟非规范填埋场渗滤液和酸雨对污染物的浸提; • 浸出方法仅考虑最不利情况, 过于保守; • 不能真实反映实际环境状况。
动态释放能力的测试	荷兰: NEN 7375 欧盟: CEN/TS14405: 2004	<ul style="list-style-type: none"> • 保持固化体本身物理特性; • 基于动态释放通量; • 考虑风险累积。 	<ul style="list-style-type: none"> • 更接近于实际环境状况; • 降低预处理难度; • 能够反应随时间变化的趋势。 	<ul style="list-style-type: none"> • 操作相对复杂, 所需时间较长; • 影响因素相对较多, 实验的重现性不高。
针对再利用情景的浸出方法体系	美国: USEPA 1313-1316	<ul style="list-style-type: none"> • 基于土壤再利用情景, 设置 4 种不同的浸出方法。 	<ul style="list-style-type: none"> • 接近于实际环境状况; • 可以根据实际情况, 选择不同的浸出测试方法。 	<ul style="list-style-type: none"> • 部分测试方法相对复杂, 耗时较长; • 方法的稳定性和重现性有待于改进; • 还缺乏相应的评价标准。

1.4 技术应用基础和前期准备

土壤物理性质（机械组成、含水率等）、化学特性（有机质含量、pH 值等）、污染特性（污染物种类、污染程度等）均会影响到异位固化/稳定修复技术的适用性及其修复效果。应针对不同类型的污染物，特别是砷、铬等毒性和活性较大的污染物，选择不同的固化/稳定剂；应基于土壤类型研究固化/稳定剂的添加量与污染物浸出毒性的相互关系，确定不同污染物浓度时的最佳固化/稳定剂添加量。

1.5 主要实施过程

（1）根据场地污染空间分布信息进行测量放线之后开始土壤挖掘；（2）挖掘出的土壤根据情况进行土壤预处理（水分调节、土壤杂质筛分、土壤破碎等）；（3）固化/稳定剂添加；（4）土壤与固化/稳定剂混合搅拌、养护；（5）固化/稳定体的监测与处置、验收。其中（2）、（3）、（4）也可以在一体式混合搅拌设备中同时完成。

1.6 运行维护和监测

（1）土壤挖掘安全：围栏封闭作业，设立警示标志，规避地下隐蔽设施。（2）安全防护：工人应注意劳动防护。（3）防止二次扩散：采取措施防止雨水进入土壤，防止降雨冲洗土壤携带污染物进入周边环境，防止刮风尘土飞扬，造成二次扩散。（4）长期监测：根据国外经验，对于固化/稳定化后采用回填处理的土壤，需要在地下水的下游设置至少 1 口监测井，每季度监测一次，持续 2 年，确保没有泄露。

1.7 修复周期及参考成本

污染土方量、修复工艺、土壤养护时间、施工设备、修复现场平面布局等均显著影响处理周期。一般而言，水泥基固化修复需要较长的养护时间，稳定化修复需要的养护时间较短。根据施工机械台班等设置情况，异位土壤固化/稳定化修复的每日处理量从 100 至 1200m³ 不等。

根据污染物不同类型及其污染程度需要添加不同剂量、不同种类的固化/稳定剂；土壤污染深度、挖掘难易程度、短驳距离长短等都会影响修复成本。据美国 EPA 数据显示，对于小型场地（1000 立方码（cy），约合 765 m³）处理成本约为 160-245 美元/ m³，对于大型场地（50000cy，约合 38228 m³）处理成本约为 90-190 美元/ m³；国内一般为 500-1500 元/ m³。

1.8 国外应用情况

固化/稳定化是比较成熟的固体废物处置技术，上世纪八九十年代，美国环境保护署率先将固化/稳定化技术用于污染土壤的修复研究。据美国超级基金项目统计，1982-2008 年污染源处理项目中，有 203 项应用该技术，占污染源异位修复项目的 21.4%，是使用最多的污染源修复技术。2004 年，英国环保署组织编写了《污染土壤稳定/固化处理技术导则》。

表 1-2 污染土壤异位固化/稳定化处理典型案例

序号	场地名称	目标污染物	固化/稳定药剂	规模
1	Massachusetts Military Reservation, USA	Pb	某 M 药剂	13,601 m ³
2	Sulfur Bank Mercury Mine Superfund Site, USA	Hg	硫化物	/
3	Pepper Steel & Alloy, Miami	Pb, As, PCBs	水泥等	47,400 m ³
4	Douglasville, PAHAZCON	Zn、Pb、PCBs、苯酚、石油烃	水泥等	191,100 m ³
5	Former industrialsite, Chineham, Basingstoke, UK	重金属、石油烃	水泥、改性活性蒙脱石	1,200 m ³

1.9 国内案例分析

1.9.1 国内应用情况

我国的污染土壤固化/稳定化研究起步于本世纪初。2010 年以来，该技术在工程上的应用快速增长，已成为重金属污染土壤修复的主要技术方法之一。据不完全统计，目前国内实施土壤固化/稳定化修复的工程案例已超过 50 项。

1.9.2 国内案例介绍

(1) 工程背景：某地块原为某发电厂，将开发为文化创意街区。对场地进行网格化划分后进行土壤质量监测，确定污染单元后进行加密监测。由于该地块要求尽量削减修复时间，以缓解地块再开发面临的施工进度压力，同时该地块对现场遗留土壤质量的要求较高，综合考虑以上因素，确定采用污染土壤清挖、现场处理、异地处置的方式对地块进行修复，以《展览会用地土壤环境质量评价标准（暂行）》（HJ350-2007）的 A 级标准作场地清理的判断标准。

(2) 工程规模：场地面积为 5400 m²，土壤污染深度约为 1-4 m，需修复的总土方量约为 1.24 万 m³。

(3) 主要污染物及污染程度：场地大部分地块土壤污染物为重金属铜、铅、锌，其中一个地块为多环芳烃。污染物的最大监测浓度为：铜 7220 mg/kg、铅 4150 mg/kg、锌 3340 mg/kg、苯并(a)蒽 4.6 mg/kg、苯并(b)荧蒽 5.78 mg/kg、苯并(a)芘 4.07 mg/kg。

(4) 土壤理化特征：土壤为粘性土，呈微碱性。铜、铅、锌在土壤中主要以二价阳离

子形式存在，较易转化为氢氧化物或被吸附。

(5) 技术选择：该修复项目要求时间短、修复费用低，同时污染物以重金属和低浓度的多环芳烃为主，基于现场土壤开展了异位固化/稳定修复技术可行性评价研究，该技术能满足制定的修复目标；从场地特征、资源需求、成本、环境、安全、健康、时间等方面进行详细评估，最终选定处理时间短、技术成熟操作灵活、且对场地水文地质特性要求较为宽松的固化/稳定化技术进行处理。

(6) 工艺流程和关键设备

修复工程技术路线和施工流程主要过程包括污染土壤挖掘、土壤含水量控制、粉状稳定剂布料添加、混匀搅拌处理、养护反应、外运资源化利用、现场验收监测等环节。采用挖掘机进行土壤挖掘，挖掘深度深于 1 m 时，土壤含水量较高，采用晾晒风干方式降低土壤含水量；使用筛分破碎铲斗进行土壤与粉状稳定剂的混匀搅拌，同时实现土壤的破碎。验收监测包括挖掘后基坑采样及污染物全量分析、稳定化处理后土壤采样及浸出毒性测试。关键设备主要有土壤挖掘设备、土壤短驳运输设备、土壤/稳定剂混合搅拌设备等组成。

(7) 主要工艺及设备参数

基于现场污染土壤进行了大量实验室研究，确定了最佳稳定剂类型和添加量。稳定剂主要由粉煤灰、铁铝酸钙、高炉渣、硫酸钙以及碱性激活剂组成，另外，为了增强对重金属污染物的吸附作用添加了约 30% 的粘土矿物。稳定剂的质量添加比例为 16.5%。

土壤/稳定剂混合搅拌设备为筛分破碎铲斗，该设备能实现土壤与稳定剂的混匀，由于土壤水分含量较低，在混匀搅拌过程中可实现土壤的破碎。

(8) 成本分析

该项目包含建设施工投资、稳定剂费用、设备投资、运行管理费用，处理成本约 480 万元，其运行过程中的主要能耗为挖掘机及筛分破碎铲斗的油耗、普通照明、生活用水用电，约为 60 万元。

(9) 修复效果

经过挖掘后所采集土壤样品中污染物含量均低于制定的修复目标值。稳定处理后的土壤，参照《固体废物浸出毒性浸出方法硫酸硝酸法》(HJ/T299-2007) 提取浸出液，浸出液中污染物的浓度均低于制定的土壤浸出液污染物浓度目标值，满足修复要求并通过业主独立委托的某地环境监测中心验收监测。

(案例提供单位：上海市环境科学研究院)

2 异位化学氧化/还原技术

2.1 技术名称

技术名称：异位化学氧化/还原，英文名称：Ex-Situ Chemical Oxidization/Reduction

2.2 技术适用性

2.2.1 适用的介质：污染土壤

2.2.2 可处理的污染物类型：化学氧化可处理石油烃、BTEX（苯、甲苯、乙苯、二甲苯）、酚类、MTBE（甲基叔丁基醚）、含氯有机溶剂、多环芳烃、农药等大部分有机物；化学还原可处理重金属类（如六价铬）和氯代有机物等。

2.2.3 应用限制条件：异位化学氧化不适用于重金属污染土壤的修复，对于吸附性强、水溶性差的有机污染物应考虑必要的增溶、脱附方式；异位化学还原不适用于石油烃污染物的处理。

2.3 技术介绍

2.3.1 原理：向污染土壤添加氧化剂或还原剂，通过氧化或还原作用，使土壤中的污染物转化为无毒或相对毒性较小的物质。常见的氧化剂包括高锰酸盐、过氧化氢、芬顿试剂、过硫酸盐和臭氧。常见的还原剂包括连二亚硫酸钠、亚硫酸氢钠、硫酸亚铁、多硫化钙、二价铁、零价铁等。

2.3.2 系统构成和主要设备：修复系统包括土壤预处理系统、药剂混合系统和防渗系统等。其中：（1）预处理系统。对开挖出的污染土壤进行破碎、筛分或添加土壤改良剂等。该系统设备包括破碎筛分铲斗、挖掘机、推土机等。（2）药剂混合系统。将污染土壤与药剂进行充分混合搅拌，按照设备的搅拌混合方式，可分为两种类型：采用内搅拌设备，即设备带有搅拌混合腔体，污染土壤和药剂在设备内部混合均匀；采用外搅拌设备，即设备搅拌头外置，需要设置反应池或反应场，污染土壤和药剂在反应池或反应场内通过搅拌设备混合均匀。该系统设备包括行走式土壤改良机、浅层土壤搅拌机等。（3）防渗系统为反应池或是具有抗渗能力的反应场，能够防止外渗，并且能够防止搅拌设备对其损坏，通常做法有两种，一种采用抗渗混凝土结构，一种是采用防渗膜结构加保护层。

2.3.3 关键技术参数：影响异位化学氧化/还原技术修复效果的关键技术参数包括：污染物的性质、浓度、药剂投加比、土壤渗透性、土壤活性还原性物质总量或土壤氧化剂耗量（Soil Oxidant Demand, SOD）、氧化还原电位、pH、含水率和其它土壤地质化学条件。

（1）土壤活性还原性物质总量：氧化反应中，向污染土壤中投加氧化药剂，除考虑土壤中还原性污染物浓度外，还应兼顾土壤活性还原性物质总量的本底值，将能消耗氧化药剂的所有还原性物质量加和后计算氧化药剂投加量。

（2）药剂投加比：根据修复药剂与目标污染物反应的化学反应方程式计算理论药剂投加比，并根据实验结果予以校正。

（3）氧化还原电位：对于异位化学还原修复，氧化还原电位一般在-100 mV 以下，并可通过补充投加药剂、改变土壤含水率、改变土壤与空气接触面积等方式进行调节。

（4）pH：根据土壤初始 pH 条件和药剂特性，有针对性的调节土壤 pH，一般 pH 范围 4.0~9.0。常用的调节方法如加入硫酸亚铁、硫磺粉、熟石灰、草木灰及缓冲盐类等。

（5）含水率：对于异位化学氧化/还原反应，土壤含水率宜控制在土壤饱和持水能力的 90%以上。

2.4 技术应用基础和前期准备

对选择的修复技术进行小试实验测试，判断修复效果是否能达到修复目标要求，并探索药剂投加比、反应时间、氧化还原电位变化、pH 变化、含水率控制等，作为技术应用可行性判断的依据。小试实验参数指导中试扩大化试验，根据试验现象确定大规模实施的可行性，并记录工程参数，指导工程实施。

2.5 主要实施过程

(1) 污染土壤清挖；(2) 将污染土壤破碎、筛分，筛除建筑垃圾及其它杂物；(3) 药剂喷洒；(4) 通过多次搅拌将修复药剂与污染土壤充分混合，使修复药剂与目标污染物充分接触；(5) 监测、调节污染土壤反应条件，直至自检结果显示目标污染物浓度满足修复目标要求；(6) 通过验收的修复土壤按设计要求合理处置。

2.6 运行维护和监测

异位化学氧化/还原反应进行过程中，应监测污染物浓度变化，判断反应效果。通过监测残余药剂含量、中间产物、氧化还原电位、pH 及含水率等参数，根据数据变化规律判断反应条件并及时加以调节，保证反应效果，直至修复完成。

异位化学氧化/还原技术所需要的工程维护工作较少，如采用碱激活过硫酸盐氧化时需要监测并维持一定的 pH 值，采用厌氧生物化学还原技术时要注意维持一定的含水率以保证系统的厌氧状态。

使用氧化剂时要根据氧化剂的性质，按照规定进行存储和使用，避免出现危险。

2.7 修复周期及参考成本

异位化学氧化/还原技术的处理周期与污染物初始浓度、修复药剂与目标污染物反应机理有关。一般化学氧化/还原修复的周期较短，一般可以在数周到数月内完成。处理成本，在国外约为 200~660 美元/m³；在国内，一般介于 500~1500 元/m³ 之间。

2.8 国外应用情况

异位氧化/还原处理技术反应周期短、修复效果可靠，在国外已经形成了较完善的技术体系，应用广泛。

表 2-1 异位化学氧化/还原技术国外应用案例

序号	场地名称	修复药剂	目标污染物	规模
1	美国明尼苏达州某木材制造厂	芬顿试剂和活化过硫酸盐	五氯苯酚	656 吨
2	韩国光州某军事基地燃料存储区	过氧化氢	石油烃	930 m ³
3	美国马里兰州某赛车场地	某 K 药剂	苯系物、甲基萘	662 m ³
4	加拿大亚伯达某废弃管道场地	过氧化氢	苯系物	8800 m ³
5	美国阿拉巴马州某场地	某 D 药剂（强还原性铁矿物质+缓释碳源）	毒杀芬，滴滴涕，DDD 和 DDE	4500 吨
6	美国犹他州图埃勒县军方油库	某 D 药剂（强还原性铁矿物质+缓释碳源）	三硝基甲苯，环三亚甲基三硝胺	7645 m ³

2.9 国内应用分析

2.9.1 国内应用情况

该技术在国内发展较快，2011 年之后开始在一些工程项目上应用。目前，异位化学氧化/还原技术在国内污染场地修复中的应用越来越广泛。

2.9.2 国内案例介绍

2.9.2.1 江苏某钢铁厂污染土壤修复工程

(1) 工程背景：该企业始建于 1958 年，是特殊钢生产基地，场地南侧为焦化厂，场地污染区块主要靠近焦化厂附近，主要污染物为多环芳烃类。其中苯并(a)芘、萘、二苯并(a,h)

葱的修复目标值为 1.56mg/kg、2.93 mg/kg、1.56 mg/kg。施工工期 100 日历天。修复后场地用于居住用地。

(2) 工程规模：采用原地异位化学氧化搅拌工艺处理，处理土方量为 3500m³。

(3) 主要污染物及污染程度：场地土壤检出率较高的污染物为苯并(a)芘、萘、二苯并(a,h)蒽、苯并(a)蒽、苯并(b)荧蒽、茚并(1,2,3-cd)芘。其中苯并(a)芘最高检出含量为 23.1 mg/kg，萘的最高检出浓度为 23.2 mg/kg，其他污染物浓度在 10~20 mg/kg 之间。本场地污染深度为 0~2 m。

(4) 水文地质条件：本场地表面 1 m 左右为素填土，-1.0 m~-7.2 m 均为粉质粘土。场地内地下水为潜水，初见水位约为-1.5 m，稳定水位在-1.0 m~-1.8 m 左右，地下水受大气降水入渗补给明显。

(5) 技术选择：选用原地异位化学氧化搅拌工艺，可实现药剂与污染物的充分混合及反应。药剂采用某 K 药剂（主要成分为过硫酸盐及专利活化剂）。

(6) 工艺流程和关键设备

主要工序为：定位放线→土方清挖→筛分预处理→土壤倒运至反应池→药剂投加→机械搅拌 7~8 天（pH 值监测）→倒运至待检区反应（氧化剂残留）→验收合格→土壤干化→土壤回填→工程竣工。

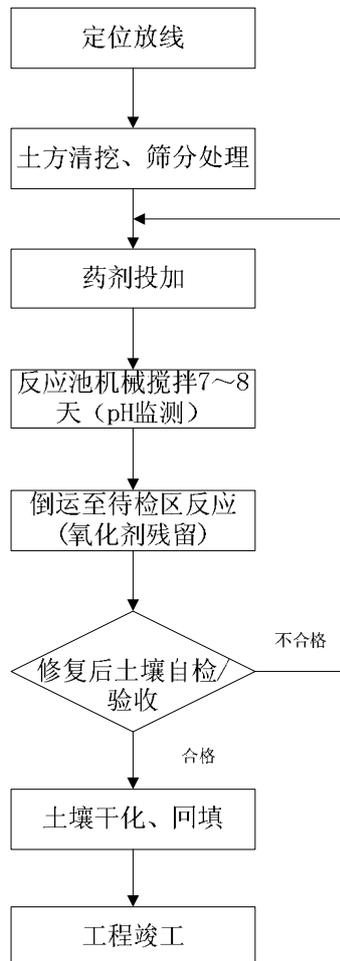


图 2-1 污染土壤化学氧化处理工艺流程图

(7) 关键设备及参数：主要使用挖掘机设备，用于土壤挖掘筛分、药剂添加、土壤搅拌、土壤干化处理等。监测仪器有氧化剂残留测试套件、pH 计等。

(8) 成本分析：原地异位反应池化学氧化搅拌费用主要包括反应池建设费用、药剂费用、机械设备费用、过程监测费用、检测费用等，其中药剂费用占总修复费用的 40%~50%。综合分析，项目修复费用为 1100 元/m³。

(9) 修复效果：检验结果合格。

2.9.2.2 华中某有机氯农药污染场地治理工程项目

(1) 工程背景：项目场地原为农药厂，上世纪 60 年代开始生产有机氯农药六六六和滴滴涕，后来也生产其他农药。农药厂关闭后经过场地污染调查与健康风险评价，六六六和滴滴涕修复目标值分别是 2.1 mg/kg 和 37.8 mg/kg。该场地大部分污染土壤外运到水泥厂进行水泥窑焚烧处理，部分低浓度（六六六和滴滴涕浓度均低于 50 mg/kg）污染土壤采用生物化学还原+好氧生物降解联合修复技术。施工工期 2 年。

(2) 工程规模：29.68 万 m³，其中采用生物化学还原+好氧生物降解联合修复的土壤 8 万 m³。

(3) 主要污染物及污染程度：该场地主要污染物为六六六和滴滴涕污染，两者最高浓度分别达 4000 mg/kg、20000 mg/kg 以上。

(4) 土壤理化特征：本场地土壤质地类型主要为建筑杂填土和粉质粘土，建筑杂填土集中在 0~2 m 土层，污染粉质粘土最深达 9 m。

(5) 技术选择：有机氯农药污染土壤治理可采用土壤洗脱技术、热脱附修复技术、水泥窑协同处置技术和化学还原-生物氧化联合修复技术等。由于洗脱技术对土壤的质地有一定要求，因此本项目未采用；热脱附设备投入较大，高含水率情况下运行费用高，因此本项目未选用；当地附近有大型的水泥厂，且经过了改造，具备协同处理危险废物的能力，因此对于高浓度污染土壤采用水泥窑焚烧处理的方式；对于部分低浓度污染土壤，采用某 D 药剂（主要成分为强还原性铁矿物质和缓释碳源）的生物化学还原+好氧生物降解联合修复技术，该技术对环境友好、无毒、节能，修复成本相对较低。

(6) 工艺流程和关键设备：1) 项目施工准备阶段时对治理的污染土壤范围进行测量放线，建设药剂修复污染土壤车间；2) 对污染土壤进行开挖与破碎筛分，去除大块建筑垃圾等杂物；3) 筛分后的污染土壤运输到车间堆置；4) 车间内污染土壤添加药剂与旋耕搅拌、加水厌氧处理 5 天，再旋耕好氧处理 3 天，如此循环处理 3 个周期；5) 自验收采样检测合格待监理确认后出土到待检场堆放，如果检测不合格则继续加药周期处理，直到检测合格为止；6) 污染土壤全部处理后进行竣工验收。

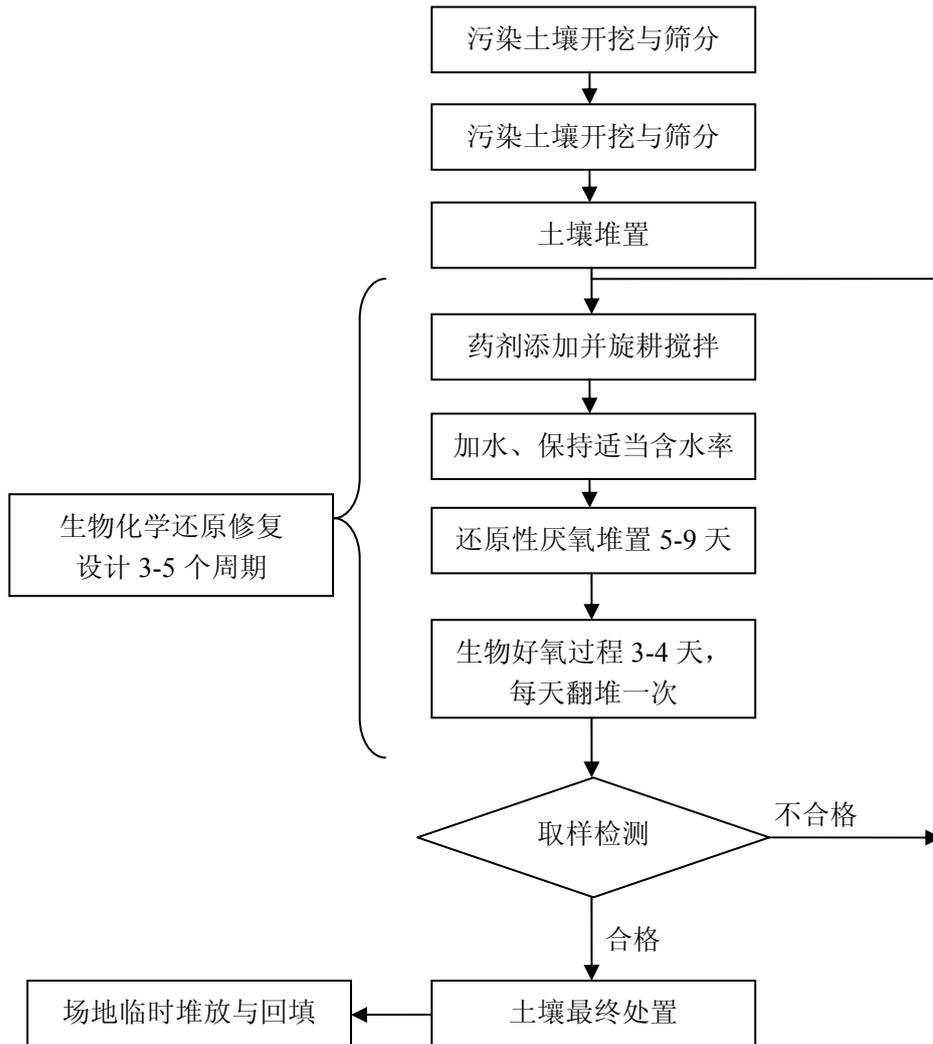


图 2-2 生物化学还原+好氧生物降解联合修复技术工艺流程

(7) 关键设备及参数：建设修复车间，污染土壤在车间堆高 60 cm，以利于旋耕搅拌与加水厌氧；根据试验，药剂每周期添加 1%；添加药剂后要加水至土壤饱和，保证厌氧 5 天；厌氧后需好氧反应 3 天，每天要旋耕搅拌 2 个来回；处理 3 个周期后采样自验，自检合格后土壤到待检场堆放。主要设备有液压驱动筛分斗、旋耕机。

(8) 成本分析：生物化学还原+生物氧化联合修复技术涉及的成本主要包括修复车间建设费、土方工程费、药剂费、人工机械费、旋耕费用和采样检测费用等，污染土壤的处理成本为 700 元/m³。

(9) 修复效果：修复 3 个周期后有机氯农药浓度降低到修复目标值以下，少数污染浓度稍高的土壤药剂处理 5 个周期后达标。

(案例提供单位：北京建工环境修复股份有限公司)

3 异位热脱附技术

3.1 技术名称

技术名称：异位热脱附，英文名称：Ex-Situ Thermal Desorption

3.2 技术适用性

3.2.1 适用的介质：污染土壤

3.2.2 可处理的污染物类型：挥发及半挥发性有机污染物（如石油烃、农药、多环芳烃、多氯联苯）和汞。

3.2.3 应用限制条件：不适用于无机物污染土壤（汞除外），也不适用于腐蚀性有机物、活性氧化剂和还原剂含量较高的土壤。

3.3 技术介绍

3.3.1 原理：通过直接或间接加热，将污染土壤加热至目标污染物的沸点以上，通过控制系统温度和物料停留时间有选择地促使污染物质挥发，使目标污染物与土壤颗粒分离，去除。

3.3.2 系统构成和主要设备：

异位热脱附系统可分为直接热脱附和间接热脱附，也可分为高温热脱附和低温热脱附。

(1) 直接热脱附由进料系统、脱附系统和尾气处理系统组成。进料系统：通过筛分、脱水、破碎、磁选等预处理，将污染土壤从车间运送到脱附系统中。脱附系统：污染土壤进入热转窑后，与热转窑燃烧器产生的火焰直接接触，被均匀加热至目标污染物质化的温度以上，达到污染物与土壤分离的目的。尾气处理系统：富集气态污染物的尾气通过旋风除尘、焚烧、冷却降温、布袋除尘、碱液淋洗等环节去除尾气中的污染物。

(2) 间接热脱附由进料系统、脱附系统和尾气处理系统组成。与直接热脱附的区别在于脱附系统和尾气处理系统。脱附系统：燃烧器产生的火焰均匀加热转窑外部，污染土壤被间接加热至污染物的沸点后，污染物与土壤分离，废气经燃烧直排。尾气处理系统：富集气态污染物的尾气通过过滤器、冷凝器、超滤设备等环节去除尾气中的污染物。气体通过冷凝器后可进行油水分离，浓缩、回收有机污染物。

主要设备包括进料系统：如筛分机、破碎机、振动筛、链板输送机、传送带、除铁器等；脱附系统：回转干燥设备或是热螺旋推进设备；尾气处理系统：旋风除尘器、二燃室、冷却塔、冷凝器、布袋除尘器、淋洗塔、超滤设备等。

3.3.3 关键技术参数或指标

热脱附技术关键参数或指标主要包括土壤特性和污染物特性两类。

(1) 土壤特性

(a) 土壤质地：土壤质地一般划分为沙土、壤土、粘土。沙土质疏松，对液体物质的吸附力及保水能力弱，受热易均匀，故易热脱附；粘土颗粒细，性质正好相反，不易热脱附。

(b) 水分含量：水分受热挥发会消耗大量的热量。土壤含水率在 5-35%间，所需热量约在 117-286 kcal/kg。为保证热脱附的效能，进料土壤的含水率宜低于 25%。

(c) 土壤粒径分布：如果超过 50%的土壤粒径小于 200 目，细颗粒土壤可能会随气流排出，导致气体处理系统超载。最大土壤粒径不应超过 5 cm。

(2) 污染物特性

(a) 污染物浓度：有机污染物浓度高会增加土壤热值，可能会导致高温损害热脱附设备，甚至发生燃烧爆炸，故排气中有机物浓度要低于爆炸下限 25%。有机物含量高于 1%-3%的土壤不适用于直接热脱附系统，可采用间接热脱附处理。

(b) 沸点范围：一般情况下，直接热脱附处理土壤的温度范围为 150-650℃，间接热脱附处理土壤温度为 120-530℃。

(c) 二噁英的形成：多氯联苯及其它含氯化合物在受到低温热破坏时或者高温热破坏后低温过程易生产二噁英。故在废气燃烧破坏时还需要特别的急冷装置，使高温气体的温度迅速降低至 200℃，防止二噁英的生成。

3.4 技术应用基础和前期准备

异位热脱附技术应用前，需要识别土壤污染物的类型及其浓度，了解土壤质地、粒径分布和湿度等参数，同时还需要确定场地信息、处理土壤体积、项目周期和处理目标等。此外，

还需要考虑是否有足够的空间进行土壤预处理，公用设施（燃料、水、电）是否满足要求，以及管理部门和当地群众对热脱附技术的接受程度等。

3.5 主要实施过程

(1) 土壤挖掘：对地下水位较高的场地，挖掘时需要降水使土壤湿度符合处理要求；
(2) 土壤预处理：对挖掘后的土壤进行适当的预处理，例如筛分、调节土壤含水率、磁选等。(3) 土壤热脱附处理：根据目标污染物的特性，调节合适的运行参数（脱附温度、停留时间等），使污染物与土壤分离。(4) 收集脱附过程产生的气体，通过尾气处理系统对气体进行处理后达标排放。

3.6 运行维护和监测

根据热脱附装置的工艺流程和设备的运行状况和特点，制定完善的设备维护和保养制度，并编制相应的维修和保养手册，确保装置的稳定和安全运行。系统中热脱附的炉体、燃烧腔体、烟气管道、急冷和中和装置、布袋除尘器及引风机等主要设备应作为维护的重点部位。设备系统应建立大修制度，大修周期应按系统设备的实际运行时间确定，一般大修周期不应超过1年。

热脱附装置自动化程度高，一般采用 PLC 系统（程序逻辑控制系统）对污染土壤进料和热脱附过程等进行控制，对如进料速率、供油速度、加热温度、氧气含量、CO 浓度、CO₂ 浓度及停留时间等重要参数进行监控。

3.7 修复周期及参考成本

异位热脱附技术的处理周期可能为几周到几年，实际周期取决于以下因素：(1) 污染土壤的体积；(2) 污染土壤及污染物性质；(3) 设备的处理能力。一般单台处理设备的能力在3~200 吨/小时之间，直接热脱附设备的处理能力较大，一般 20~160 吨/小时；间接热脱附的处理能力相对较小，一般 3~20 吨/小时。

影响异位热脱附技术处置费用的因素有：(1) 处置规模；(2) 进料含水率；(3) 燃料类型、土壤性质、污染物浓度等。国外对于中小型场地（2 万吨以下，约合 26800m³）处理成本约为 100-300 美元/m³，对于大型场地（大于 2 万吨，约合 26800m³）处理成本约为 50 美元/m³。根据国内生产运行统计数据，污染土壤热脱附处置费用约为 600-2000 元/吨。

3.8 国外应用情况

热脱附技术在国外始于七十年代，广泛应用于工程实践，技术较为成熟。在 1982~2004 年期间，约有 70 个美国超级基金项目采用异位热脱附作为主要的修复技术。部分国外应用案例信息见表 3-1。

表 3-1 异位热脱附技术应用案例

序号	场地名称	目标污染物	规模
1	工业乳胶超级基金场地 美国新泽西州	有机氯农药、PCBs、PAHs	41045 m ³
2	FCX 华盛顿超级基金场地	农药，氯丹，DDT，DDE，	10391m ³
3	海军航空站塞西基地 美国佛罗里达州	石油烃和氯代溶剂	11768t
4	美国某杂酚油生产厂 路易斯安那州	多环芳烃类污染物	129000 m ³
5	美国西部某农药厂	汞	26000 吨

3.9 国内应用分析

3.9.1 国内应用情况

我国对异位热脱附技术的应用处于起步阶段，已有少量应用案例。

3.9.2 国内案例介绍

(1) 工程背景：某两个退役化工厂曾大规模生产农药、氯碱、精细化工、高分子材料等近百个品种。经场地调查与风险评估发现，两个厂区内土壤及厂区毗邻河道底泥均受到以 VOCs 和 SVOCs 为主的复合有机污染，开发前需要进行修复。

(2) 工程规模：12 万 m³

(3) 主要污染物及污染程度：主要污染物为卤代 VOCs、BTEX、有机磷农药、多环芳烃等。其中二甲苯最高浓度为 2344 mg/kg，修复目标值为 6.99 mg/kg；毒死蜱最高浓度 29600 mg/kg，修复目标值为 46 mg/kg。

(4) 土壤理化特征：现场调查结果显示，污染土壤主要为粉土、淤泥质粉质粘土和粉砂，含水率 25%-35%。

(5) 技术选择：综合以上污染物特性、污染物浓度、土壤特征以及项目开发建设需求，异位热脱附技术对污染物的去除效率可达 99.99%，适合处理本项目中 VOCs、SVOCs 的复合污染土壤。

(6) 工艺流程和关键设备：其工艺流程如图 3-1 所示。

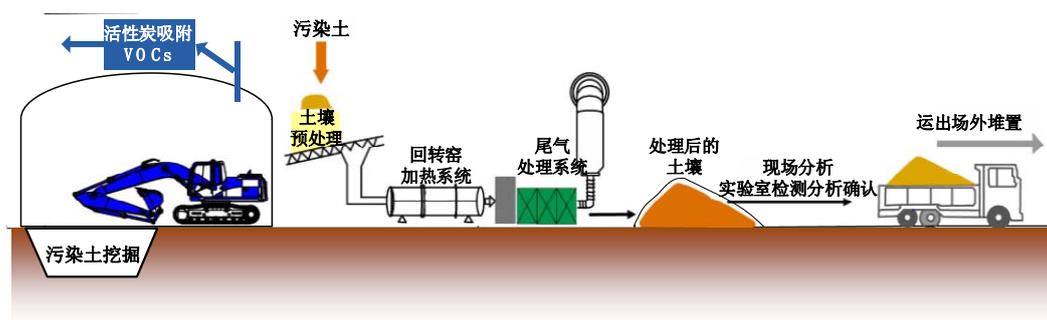


图 3-1 热脱附技术工艺流程

(7) 主要工艺及设备参数：

1) 污染土壤进料阶段：将污染土壤转运至贮存车间内的预处理区域，粒径小于 50 mm 的土块直接被送入回转窑，超规格的土块经过破碎后再次返回振荡筛进行筛分。

2) 回转窑加热阶段：将污染土壤均匀加热到设定的温度（300~500℃），并按照设定速率向窑尾输送，在此期间土壤中的污染物充分气化挥发。

3) 尾气处理阶段：尾气处理系统包括二燃室、急冷塔、布袋除尘器和酸性气体洗涤塔等。烟囱上装有烟气实时在线监测装置，经过处理后的尾气达标排放。

表 3-2 异位热脱附技术主要设备参数

指标	说明	指标	说明
平均处理能力	30 吨/小时	占地面积	1,900 m ²
回转窑工作温度	300~500℃	氧化焚烧室工作温度	1200 ℃
氧化燃烧室气体停留时间	> 2 秒	氧化焚烧室污染物去除率	99.99999%

(8) 成本分析：

本项目实际工程中热脱附部分费用包括：人工费、挖运费、设备折旧、设备运输和安装/拆除费、燃料费、动力费、检修及维护费等，约为 1000 元/m³。

(9) 修复效果：已处理污染土壤 10000 吨，处理后污染土壤浓度达到修复目标。

（案例提供单位：北京建工环境修复股份有限公司）

4 异位土壤洗脱技术

4.1 技术名称

技术名称：异位土壤洗脱；英文名称：Ex-Situ Soil Washing

4.2 技术适用性

4.2.1 适用的介质：污染土壤。

4.2.2 可处理的污染物类型：重金属及半挥发性有机污染物、难挥发性有机污染物

4.2.3 应用限制条件：不适合于土壤细粒（粘/粉粒）含量高于 25% 的土壤；处理含挥发性有机物污染土壤时，应采取合适的气体收集处理设施。

4.3 技术介绍

4.3.1 原理：污染物主要集中分布于较小的土壤颗粒上，异位土壤洗脱是采用物理分离或增效洗脱等手段，通过添加水或合适的增效剂，分离重污染土壤组分或使污染物从土壤相转移到液相的技术。经过洗脱处理，可以有效地减少污染土壤的处理量，实现减量化。

4.3.2 系统构成和主要设备：异位土壤洗脱处理系统一般包括土壤预处理单元、物理分离单元、洗脱单元、废水处理及回用单元及挥发气体控制单元等。具体场地修复中可选择单独使用物理分离单元或联合使用物理分离单元和增效洗脱单元。

主要设备包括土壤预处理设备（如破碎机、筛分机等）、输送设备（皮带机或螺旋输送机）、物理筛分设备（湿法振动筛、滚筒筛、水力旋流器等）、增效洗脱设备（洗脱搅拌罐、滚筒清洗机、水平振荡器、加药配药设备等）、泥水分离及脱水设备（沉淀池、浓缩池、脱水筛、压滤机、离心分离机等）、废水处理系统（废水收集箱、沉淀池、物化处理系统等）、泥浆输送系统（泥浆泵、管道等）、自动控制系统。

4.3.3 关键技术参数或指标

影响土壤洗脱修复效果的关键技术参数包括：土壤细粒含量、污染物的性质和浓度、水土比、洗脱时间、洗脱次数、增效剂的选择、增效洗脱废水的处理及药剂回用等。

(1) 土壤细粒含量：土壤细粒的百分含量是决定土壤洗脱修复效果和成本的关键因素。细粒一般是指粒径小于 63-75 μm 的粉/粘粒。通常异位土壤洗脱处理对于细粒含量达到 25% 以上的土壤不具有成本优势。

(2) 污染物性质和浓度：污染物的水溶性和迁移性直接影响土壤洗脱特别是增效洗脱修复的效果。污染物浓度也是影响修复效果和成本的重要因素。

(3) 水土比：采用旋流器分级时，一般控制给料的土壤浓度在 10% 左右；机械筛分根据土壤机械组成情况及筛分效率选择合适的水土比，一般为 5:1 到 10:1。增效洗脱单元的水土比根据可行性实验和中试的结果来设置，一般水土比为 3:1 至 20:1 之间。

(4) 洗脱时间：物理分离的物料停留时间根据分级效果及处理设备的容量来确定；一般时间为 20 分钟 (min) 到 2 小时 (h)，延长洗脱时间有利于污染物去除，但同时也增加了处理成本，因此应根据可行性实验、中试结果以及现场运行情况选择合适的洗脱时间。

(5) 洗脱次数：当一次分级或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。

(6) 增效剂类型：一般有机污染选择的增效剂为表面活性剂，重金属增效剂可为无机酸、有机酸、络合剂等。增效剂的种类和剂量根据可行性实验和中试结果确定。对于有机物和重金属复合污染，一般可考虑两类增效剂的复配。

(7) 增效洗脱废水的处理及增效剂的回用：对于土壤重金属洗脱废水，一般采用铁盐+碱沉淀的方法去除水中重金属，加酸回调后可回用增效剂；有机物污染土壤的表面活性剂洗脱废水可采用溶剂增效等方法去除污染物并实现增效剂回用。

4.4 技术应用基础和前期准备

技术应用前期需要了解：(1) 土壤粒径组成；(2) 土壤类型、物理状态和湿度；(3) 污染物类型和浓度；(4) 土壤有机质含量；(5) 土壤阳离子交换量；(6) 土壤 pH 及缓冲容量；(7) 场地修复目标。

前期应开展技术可行性实验，评估异位土壤洗脱技术是否适合于特定场地的修复；初步证实技术可行后，可根据需要进行中试试验，为修复工程设计提供基础参数。

4.5 主要实施过程

(1) 污染土壤挖掘及预处理，包括筛分和破碎等，剔除超尺寸（如大于 100 mm）的大块杂物并进行清洗；(2) 预处理后的土壤进入物理分离单元，采用湿法筛分或水力分选，分离出粗颗粒和砂粒，经脱水筛脱水后得到清洁物料；(3) 分级后的细粒直接进入或进行增效洗脱后进入污泥脱水系统，泥饼根据污染性质选择最终处理处置技术；(4) 洗脱系统的废水经物化或生物处理去除污染物后，可回用或达标排放；(5) 若土壤含有挥发性重金属或有机污染物，应对预处理及土壤洗脱单元设置废气收集装置，并对收集的废气进行处理；(6) 定期采集处理后粗颗粒、砂粒及细粒土壤样品以及处理前后洗脱废水样品进行分析，掌握污染物的去除效果。

4.6 修复周期及参考成本

处理周期一般为 3-12 个月。异位土壤洗脱修复的周期和成本因土壤类型、污染物类型、修复目标不同而有较大差异，与工程规模以及设备处理能力等因素也相关，一般需通过试验确定。据不完全统计，在美国应用的成本约为 53-420 美元/m³，欧洲的应用成本约 15-456 欧元/m³，平均为 116 欧元/m³。国内的工程应用成本约为 600-3000 元/m³。

4.7 运行维护和监测

异位土壤洗脱系统的运行可通过自动控制系统控制，操作简单、效果稳定。需定期对各单元设备进行维护和检修以保证系统正常运行。实时观测运行过程中设备负荷、运行功率、运行状态等，检查设备是否有漏液、漏料、堵料等异常状况。

运行过程中应根据实际工程处理进度定期采集处理前后各土壤组分样品、水样进行分析监测，如土壤涉及挥发性有机物污染还需定期检测气体收集单元和气体处理单元尾气。

4.8 国外应用情况

污染土壤异位洗脱修复技术在加拿大、美国、欧洲及日本等已有较多的应用案例，目前已应用于石油烃类、农药类、POPs 类、重金属等多种污染场地。国外典型应用案例如表 4-1 所示。

表 4-1 异位土壤洗脱技术应用案例

序号	场地名称	目标污染物	规模	效果
1	美国新泽西州 king of Prussia 超级基金场地	Cr、Cu、Ni	19200 吨	>90%重金属经物理分离后去除
2	加拿大蒙特利尔市的 7 块棕地	Cu、Pb、Zn	22300 吨	-
3	美国加州 Santa Maria 某场地	石油、PCBs、PAHs	30- 65 吨/小时	石油烃去除率 99%
4	加拿大蒙特利尔 LonguePointe	Pb	150000 吨	93%

4.9 国内应用分析

4.9.1 国内应用情况

我国在上世纪 90 年代就开始异位土壤洗脱修复技术的研究，目前已有工程应用案例。

4.9.2 国内案例介绍

(1) 项目背景：项目位于某有机氯农药厂内，该农药企业有 40 多年的生产历史，于 2000 年关闭，后该地块规划为城市建设用地。

(2) 工程规模：1000 m³

(3) 主要污染物及污染程度：主要污染物为六六六和滴滴涕；经检测分析杂填层六六六初始浓度为 4.52-46.4 mg/kg，滴滴涕初始浓度为 9.81-33.2 mg/kg。

(4) 污染物及土壤理化特征：六六六和滴滴涕属于有机氯农药，疏水性强，溶解度低，在环境中持久存在，难于通过生物和化学方式降解。项目处理土壤主要为杂填层，其碎石、石砾等粗粒（2-10 mm）含量在 58%左右，砂粒（0.3-2 mm）含量接近 25%，细粒（小于 0.3 mm）在 17%左右。

(5) 技术选择：综合以上污染物特性、污染物浓度、土壤特征，选择异位土壤洗脱技术对场地杂填土进行处理。

(6) 工艺流程和关键设备：

1) 采用挖掘机将土壤从污染区域转运至原土堆放区。2) 采用挖掘破碎机对原土进行初级破碎后，转运至进料土堆放区，进行二次粉碎筛分后，装载至进料仓中。3) 通过输送带输入至湿法振动筛分设备，对污染土进行分级，将物料按粒径分为大于 10mm 的粗料，2-10mm 的砂砾以及小于 2mm 的细粒。4) 通过皮带输送带，使粗料进入滚筒洗石机，在滚筒洗石机内通过水流的冲刷、物料与滚筒内壁、物料之间的摩擦作用，粗料表面的粘粒经过滤孔进入集水箱，排放至细粒暂存池内，而清洗干净的粗料则输送到粗料堆放区。5) 通过皮带输送带将砂砾进入螺旋洗砂机，通过冲刷和摩擦作用，表面粘粒通过后端溢流口进入粘粒暂存池，清洗干净的砂砾则通过螺旋推送及皮带传输到砂砾堆放区。6) 振动筛分后的细粒泥浆通过滑槽进入到泥浆暂存池。7) 暂存池中泥浆通过管道输入高频振动筛，对泥浆进行二次筛分处理，进一步将细粒进行减量化，大于 0.3mm 的细砂进入螺旋洗砂机处理，小于 0.3mm 的粘粒泥浆通过管道输送到增效洗脱装置。9) 通过加药系统向洗脱装置中加入增效剂后，开启搅拌装置进行增效洗脱处理。10) 停止搅拌，静置 2 小时或更长时间，粘粒和洗脱液自然分层后，上清液通过分层排放管道进入洗脱液存放箱进行循环使用；下部粘粒则通过洗脱罐底部管道输送到泥水分离系统。11) 粘粒与絮凝剂分别经过管道输送，并在混合器内充分混合后，输送到泥水分离单元，分离后的粘粒进入粘粒收集箱，洗脱废水进入废水收集箱。12) 废水经过多级物化处理，去除有毒有害物质，最后进入回用水箱。增效剂大部分留在溶液中，可以回用到增效洗脱系统。

(7) 主要工艺及设备参数：

增效洗脱土壤修复系统总体处理能力：50 吨/天 (t/d)。筛分系统设计处理能力 10 吨/小时。增效洗脱装置单体容积 12 m³。增效洗脱液固比为 3:1 至 4:1，洗脱时间 2 小时，增效剂为非离子表面活性剂。

(8) 成本分析：

系统设备运行成本约 300 元/m³ 土，运行过程中能耗为系统设备的电耗，约为 36 kWh/m³ 土；主要物耗为增效剂表面活性剂和废水处理药剂、絮凝剂等，成本约为 240 元/m³ 土。

(9) 修复效果：

经过水洗和增效洗脱处理后，总体上物料的六六六去除率为 88.5%，滴滴涕去除率为 85.8%，达到了去除率 85%以上修复目标要求，通过了工程项目验收。

(案例提供单位：环境保护部南京环境科学研究所)

5 水泥窑协同处置技术

5.1 技术名称

技术名称：水泥窑协同处置，英文名称：Co-processing in Cement Kiln

5.2 技术适用性

5.2.1 适用的介质：污染土壤；

5.2.2 可处理的污染物类型：有机污染物及重金属；

5.2.3 应用限制条件：不宜用于汞、砷、铅等重金属污染较重的土壤；由于水泥生产对进料中氯、硫等元素的含量有限值要求，在使用该技术时需慎重确定污染土的添加量。

5.3 技术介绍

5.3.1 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。

5.3.2 系统构成和主要设备：水泥窑协同处置包括污染土壤贮存、预处理、投加、焚烧和尾气处理等过程。在原有的水泥生产线基础上，需要对投料口进行改造，还需要必要的投料装置、预处理设施、符合要求的贮存设施和实验室分析能力。

水泥窑协同处置主要由土壤预处理系统、上料系统、水泥回转窑及配套系统、监测系统组成。

土壤预处理系统在密闭环境内进行，主要包括密闭贮存设施（如充气大棚），筛分设施（筛分机），尾气处理系统（如活性炭吸附系统等），预处理系统产生的尾气经过尾气处理系统后达标排放。上料系统主要包括存料斗、板式喂料机、皮带计量秤、提升机，整个上料过程处于密闭环境中，避免上料过程中污染物和粉尘散发到空气中，造成二次污染。水泥回转窑及配套系统主要包括预热器、回转式水泥窑、窑尾高温风机、三次风管、回转窑燃烧器、篦式冷却机、窑头袋收尘器、螺旋输送机、槽式输送机。监测系统主要包括氧气、粉尘、氮氧化物、二氧化碳、水分、温度在线监测以及水泥窑尾气和水泥熟料的定期监测，保证污染土壤处理的效果和生产安全。

5.3.3 关键技术参数或指标

影响水泥窑协同处置效果的关键技术参数包括：水泥回转窑系统配置、污染土壤中碱性物质含量、重金属污染物的初始浓度、氯元素和氟元素含量、硫元素含量、污染土壤添加量。

（1）水泥回转窑系统配置：采用配备完善的烟气处理系统和烟气在线监测设备的新型干法回转窑，单线设计熟料生产规模不宜小于 2000 吨/天。

（2）污染土壤中碱性物质含量：污染土壤提供了硅质原料，但由于污染土壤中 K₂O、Na₂O 含量高，会使水泥生产过程中中间产品及最终产品的碱当量高，影响水泥品质，因此，在开始水泥窑协同处置前，应根据污染土壤中的 K₂O、Na₂O 含量确定污染土壤的添加量。

（3）重金属污染物初始浓度：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。

（4）污染土壤中的氯元素和氟元素含量：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%。

(5) 污染土壤中硫元素含量：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。

(6) 污染土壤添加量：应根据污染土壤中的碱性物质含量、重金属含量、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。

5.4 技术应用基础和前期准备

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，以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。

5.5 主要实施过程

(1) 将挖掘后的污染土壤在密闭环境下进行预处理（去除掉砖头、水泥块等影响工业窑炉工况的大颗粒物）；(2) 对污染土壤进行检测，确定污染土壤的成分及污染物含量，计算污染土壤的添加量；(3) 污染土壤用专门的运输车转运到喂料斗，为避免卸料时扬尘造成的二次污染，卸料区密封；(4) 计量后的污染土壤经提升机由管道进入喂料点，送入窑尾烟室高温段处置；(5) 定期监测水泥回转窑烟气排放口污染物浓度及水泥熟料中污染物含量。

5.6 运行维护和监测

因水泥窑协同处置是在水泥生产过程中进行的，协同处置不能影响水泥厂正常生产、不能影响水泥产品质量、不能对生产设备造成损坏，因此水泥窑协同处置污染土壤过程中，除了需按照新型干法回转窑的正常运行维护要求进行运行维护外，为了掌握污染土壤的处置效果及对水泥品质的影响，还需定期对水泥回转窑排放的尾气和水泥熟料中特征污染物进行监测，并根据监测结果采取应对措施。

5.7 修复周期及参考成本

水泥窑协同处置技术的处理周期与水泥生产线的生产能力及污染土壤投加量相关，而污染土壤投加量又与土壤中污染物特性、污染程度、土壤特性等有关，一般通过计算确定污染土壤的添加量和处理周期，添加量一般低于水泥熟料量的 4%。

水泥窑协同处置污染土壤在国内的工程应用成本为 800-1000 元/m³。

5.8 国外应用情况

水泥窑是发达国家焚烧处理工业危险废物的设施，已得到了广泛应用，即使难降解的有机废物（包括 POPs）在水泥窑内的焚毁去除率率也可达到 99.99%到 99.9999%。从技术上水泥窑协同处置完全可以用于污染土壤的处理，但由于国外其它污染土壤修复技术发展较成熟，综合社会、环境、经济等多方面考虑，在国外水泥窑协同处置技术在污染土壤处理方面应用相对较少。下表列出的是国外水泥窑协同处置技术在污染土壤修复方面的应用情况。

表 5-1 国外应用情况

序号	场地名称	目标污染物
1	美国德克萨斯州拉雷多市某土壤修复工程 (U.S.-Mexico Environmental Program)	PAHs
2	澳大利亚酸化土壤修复	多种有机污染物及重金属等
3	美国 Dredging Operations and Environmental Research Program	PAHs、PCBs
4	德国海德尔堡某场地修复	PCDDs/PCDFs
5	斯里兰卡锡兰电力局土壤修复工程	PCBs

5.9 国内应用分析

5.9.1 国内应用情况

水泥窑协同处置常用于处置各种固体废物（如毒鼠强等剧毒农药）、不合格产品（如含三聚氰胺奶粉、伪劣日化产品等）以及事故污染土壤等。水泥窑协同处置技术受污染土壤性质及污染物性质影响较少，而且我国是水泥生产和消费大国，水泥厂数量多，分布广，因此，目前在国内水泥窑协同处置越来越多应用于污染土壤的处理，特别是重度污染土壤的处理。

我国水泥窑协同处置污染土壤的应用始于2005年，某地修建地铁时，发现含六六六、滴滴涕农药类污染土壤1.6万m³，首次采用水泥窑协同处置污染土壤。2007年，该技术应用于某染料厂污染场地重金属及染料污染土壤的处置，处置规模达2.5万m³。2011年，该技术应用于某地某焦化厂污染场地多环芳烃污染土壤的处理，处理规模达到6万m³。截止2013年年底，某地已处置约40万m³含六六六、滴滴涕、多环芳烃、总石油烃、重金属等污染物的污染土壤。除此以外，某些地区还开展了水泥窑协同处置POPs 污染土壤的实践。

5.9.2 国内案例介绍

(1) 工程背景：某地铁线路规划途经某地原化工区，建设过程中开展的场地调查与风险评估发现，存在多环芳烃污染土壤。为满足项目施工进度的要求，污染土壤采用异位处理至修复目标：萘50mg/kg，苯并(a)蒽0.5mg/kg，苯并(b)&(k)荧蒽0.5 mg/kg，苯并(a)芘0.2mg/kg，茚并(1,2,3-cd)芘 0.41mg/kg，二苯并(a,h) 蒽 0.22mg/kg。

(2) 工程规模：61665m³

(3) 主要污染物及污染程度：土壤中的污染物为多环芳烃。16种常见的多环芳烃沸点大多在200-500℃之间，属于半挥发性有机物，均较难被生物降解。调查发现，萘最大检出浓度为4100 mg/kg，苯并(a)蒽138 mg/kg，苯并(b)&(k)荧蒽393mg/kg，苯并(a)芘72mg/kg，茚并(1,2,3-cd)芘144mg/kg，二苯并(a,h) 蒽45.7mg/kg。

(4) 技术选择依据：考虑到污染物多环芳烃半挥发性、难被生物降解特性、以及污染物浓度较高特点，同时考虑到污染场地再开发建设项目急迫，对场地污染修复时间短的需求，最终选定水泥窑协同处置技术。

(5) 工艺流程和关键设备：工艺流程如图5-1所示。

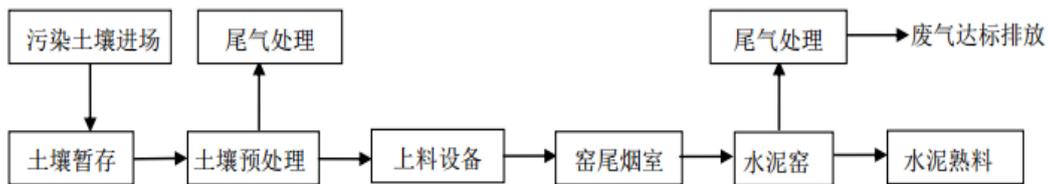


图 5-1 工艺流程图

具体为：1) 污染土壤进场后暂存的过程中防止对环境的污染；2) 在密闭设施内对土壤进行筛分预处理，密闭设施配备尾气净化设备，保证筛分过程中产生的废气能达到排放标准；3) 筛分后的土壤运至污染土卸料点，卸料点由密闭输送装置连接至窑尾烟室，卸料区设置防尘帘等密闭措施；4) 污染土经板式喂料机进入皮带秤计量，计量后的土壤经提升机提升后由密闭输送装置进入喂料点，送入窑尾烟室高温段焚烧；5) 污染土壤中的有机物经过水泥窑高温煅烧彻底分解，实现污染土壤的无害化处置，土壤则直接转化为水泥熟料，尾气达标排放，整个过程无废渣排出。

(6) 主要工艺及设备参数：

根据污染土壤中污染物的性质以及土壤元素组成，本项目污染土壤按照4%的添加量进行添加，每天处理污染土壤约300吨，全部处理完61665m³污染土壤用时约400天。

水泥窑协同处置的设备主要由上料系统、水泥回转窑及配套系统组成。上料系统主要

由存料斗、板式喂料机、皮带计量秤、提升机等组成、水泥回转窑及配套系统主要由五级旋风预热器带预热炉型、新型回转式水泥窑、窑尾高温风机、三次风管、回转窑燃烧器、篦式冷却机、窑头袋收尘器、螺旋输送机、槽式输送机等组成。

(8) 成本分析:

该项目包含设备改造、水泥产量损失、运行管理费用的处理成本约 800 元/m³，其运行过程中的主要能耗为额外增加的燃料和电消耗。

(9) 修复效果:

依据设计方案，该项目处理污染土壤 61665m³，在水泥熟料中多环芳烃污染物等目标污染物均未检出，达到修复目标并通过管理部门验收。

(案例提供单位：北京金隅红树林环保技术有限责任公司)

6 原位固化/稳定化技术

6.1 技术名称

技术名称：原位固化/稳定化，英文名称：In-situ Solidification/Stabilization

6.2 技术适用性

6.2.1 适用的介质：污染土壤。

6.2.2 可处理的污染物类型：金属类，石棉，放射性物质，腐蚀性无机物，氰化物以及砷化合物等无机物；农药/除草剂，石油或多环芳烃类，多氯联苯类以及二噁英等有机化合物。

6.2.3 应用限制条件：该技术不宜用于挥发性有机化合物，不适用于以污染物总量为验收目标的项目。

6.3 技术介绍

6.3.1 原理：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。

6.3.2 系统构成和主要设备：主要由挖掘、翻耕或螺旋钻等机械深翻松动装置系统、试剂调配及输料系统、气体收集系统、工程现场取样监测系统以及长期稳定性监测系统组成。

主要设备包括机械深翻搅动装置系统（如挖掘机、翻耕机、螺旋中空钻等）、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）、气体收集系统（气体收集罩、气体回收处理装置）、工程现场取样监测系统（驱动器、取样钻头、固定装置）、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）。

6.3.3 关键技术参数或指标

主要包括：污染介质组成及其浓度特征、污染物组成、污染物位置分布、固化剂/稳定化剂组成与用量、场地地质特征、无侧限抗压强度、渗透系数以及污染物浸出特性。

(1) 污染介质组成及其浓度特征：污染介质中可溶性盐类会延长固化剂的凝固时间并大大降低其物理强度，水分含量决定添加剂中水的添加比例，有机污染物会影响固化体中晶体结构的形成，往往需要添加有机改性黏结剂来屏蔽相关影响，修复后固体的水力渗透系数会影响到地下水的侵蚀效果。

(2) 污染物组成：对无机污染物，添加固化剂/稳定化剂即可实现非常好的固化/稳定化效果；对无机物和有机物共存时，尤其是存在挥发性有机物（如多环芳烃类），则需添加除固化剂以外的添加剂以稳定有机污染物。

(3) 污染物位置分布：污染物仅分布在浅层污染介质当中时，通常采用改造的旋耕机或挖掘铲装置实现土壤与固化剂混合；当污染物分布在较深层污染介质当中时，通常需要采用螺旋钻等深翻搅动装置来实现试剂的添加与均匀混合；

(4) 固化剂组成与用量：有机物不会与水泥类物质发生水合作用，对于含有机污染物的污染介质通常需要投加添加剂以固定污染物。石灰和硅酸盐水泥一定程度上还会增加有机物质的浸出。同时，固化剂添加比例决定了修复后系统的长期稳定性特征。

(5) 场地地质特征：水文地质条件、地下水水流速率、场地上是否有其他构筑物、场地附近是否有地表水存在，这些都会增加施工难度并会对修复后系统的长期稳定性产生较大影响。

(6) 无侧限抗压强度：修复后固体材料的抗压强度一般应大于 $50\text{Pa}/\text{ft}^2$ 帕/平方英尺，（约合 $538.20\text{Pa}/\text{m}^2$ ），材料的抗压强度至少要 and 周围土壤的抗压强度一致。

(7) 渗透系数：衡量固化/稳定化修复后材料的关键因素。渗透系数小于周围土壤时，才不会造成固化体侵蚀和污染物浸出。固化/稳定化后固化体的渗透系数一般应小于

10⁻⁶cm/s。

(8) 浸出性特征：针对固化/稳定化后土壤的不同再利用和处置方式，采用合适的浸出方法和评价标准，具体方法见表 6-1。

表 6-1 典型的固化/稳定化处理效果评价方法

评价方法类型	主要评价方法	关键特征	优势	不足
最大释放水平的测试	美国：USEPA1311、1312； 荷兰：NEN 7371； 中国：HJ/T 299-2007； HJ/T 300-2007。	<ul style="list-style-type: none"> • 固化体破碎后达到浸出平衡； • 参照固废的管理体系，带有一定的强制性； • 设定明确评价标准限值，如 40 CFR 261.24, MCL 等。 	<ul style="list-style-type: none"> • 方法简单，便于操作； • 时间和经济成本均较低； • 有较多的科学性验证结论 	<ul style="list-style-type: none"> • 主要模拟非规范填埋场渗滤液和酸雨对污染物的浸提； • 浸出方法仅考虑最不利情况，过于保守； • 不能真实反映实际环境状况；
动态释放能力的测试	荷兰：NEN 7375； 欧盟：CEN/TS1440 5:2004。	<ul style="list-style-type: none"> • 保持固化体本身物理特性； • 基于动态释放通量； • 考虑风险累积。 	<ul style="list-style-type: none"> • 更接近于实际环境状况； • 降低预处理难度； • 能够反应随时间变化的趋势。 	<ul style="list-style-type: none"> • 操作相对复杂，所需时间较长； • 影响因素相对较多，实验的重现性不高。
针对再利用情景的浸出方法体系	美国：USEPA 1313~1316	<ul style="list-style-type: none"> • 基于土壤再利用情景，设置 4 种不同的浸出方法。 	<ul style="list-style-type: none"> • 接近于实际环境状况； • 可以根据实际情况，选择不同的浸出测试方法。 	<ul style="list-style-type: none"> • 部分测试方法相对复杂，耗时较长； • 方法的稳定性和重现性有待于改进； • 还缺乏相应的评价标准。

6.4 技术应用基础和前期准备

在利用该技术进行修复前，应进行相关测试评估污染场地应用原位固化/稳定化技术的可行性，并为下一步工程设计提供基础参数。具体测试参数包括：(1) 固化/稳定化药剂选择，需考虑药剂间的干扰以及化学不兼容性、金属化学因素、处理和再利用的兼容性、成本等因素；(2) 分析所选药剂对其他污染物的影响；(3) 优化药剂添加量；(4) 污染物浸出特征测试；(5) 评估污染介质的物理化学均一性；(6) 确定药剂添加导致的体积增加量；(7) 确定性能评价指标；(8) 确定施工参数。

6.5 主要实施过程

首先基于修复目标建立修复材料的性能参数，进行实验室可行性分析，确定固化剂、添加剂和水的最佳混合配料比。然后进行场地试验，进一步优化实施技术，建立运行性能参数。最后，实施修复工程，并对修复过程实施后的材料性能进行长期监控与监测。

实施过程具体包括：(1) 针对污染场地情况选择回转式混合机、挖掘机、螺旋钻等钻探装置对深层污染介质进行深翻搅动，并在机械装置上方安装灌浆喷射装置；(2) 通过液压驱动、液压控制将药剂直接输送到喷射装置，运用搅拌头螺旋搅拌过程中形成的负压空间或液压驱动将粉体或泥浆状药剂喷入污染介质中，或使用高压灌浆管来迫使药剂进入污染介质孔隙中。通过安装在输料系统阀端的流量计检测固化剂的输入速度、掺入量，使其按照预定的比例与污染介质以及污染物进行有效的混合；(3) 对于固化/稳定化处理过程中释放的气体，

通过收集罩输送至处理系统进行无害化处理；(4) 选择不同的采样工具，对不同深度和位置的修复后样品进行取样分析；(5) 布置长期稳定性监测网络，定期对系统的稳定性和浸出性（地下水）进行监测。

6.6 运行维护和监测

修复实施过程质量控制的主要内容包括：(1) 确保药剂添加比例与实验室及中试阶段所验证比例的一致性；(2) 确保药剂与污染介质的充分混合；(3) 对处理后的材料进行取样分析以验证其是否符合固化/稳定化修复性能指标；(4) 核实处理后的体积。

实施监测的主要内容包括：(1) 地下水是否渗透进入固化材料中；(2) 所有样品是否超过土壤修复标准；(3) 固化体是否发生物理或化学退化；(4) 通过地下水监测判断是否发生污染物浸出；(5) 利用监测模型评估未来浸出的可能性。

6.7 修复周期及参考成本

处理周期一般为 3-6 个月。具体应视修复目标值、工程大小、待处理土壤体积、污染物化学性质及其浓度分布情况及地下土壤特性等因素而定。根据美国 EPA 数据显示，应用于浅层污染介质修复成本约为 50-80 美元/m³，对于深层修复成本约为 195-330 美元/m³。

6.8 国外应用情况

原位固化/稳定化是比较成熟的废物处置技术，经过几十年的研究，已成功应用于污染土壤、放射性废物、底泥和工业污泥的无害化和资源化。与其他技术相比，该技术对于大多数的无机污染物以及一些有机污染物都具有显著的修复效果，此技术在顽固性及混合型污染场地的修复中具有明显的优势，处理时间短、适用范围广，装置及材料简单易得。

美英等国家率先开展了污染土壤的固化/稳定化研究，并制订了相应的技术导则。据美国环保署统计，2005-2008 年应用该技术的案例占修复工程案例的 7%。原位技术不需要对污染土壤进行搬运，节省了运输费用，减小了有机污染物挥发的可能性。此外，原位固化/稳定化也成功应用到了棕地污染修复中。

表 6-2 原位固化/稳定化技术应用案例

序号	场地名称	目标污染物	规模
1	美国阿肯色州西孟菲斯填埋场	PAHs(多环芳烃), PCBs (多氯联苯), Pb(铅)	121405.6 m ²
2	美国哥伦布天然气厂场地	PAHs, BTEX(苯、甲 苯、乙苯、二甲苯), 氰 化物	无数据
3	美国卡罗莱纳州南部科伯斯公司 阿什利河超级基金场地	PAHs, DNAPL(高密度 非水相液体)	7436.1 m ²
4	美国新泽西州港市前木材处理棕地	砷, 木材防腐剂 (Creosote)	72843.4 m ²

6.9 国内应用分析

6.9.1 国内应用情况

该技术在国内处于中试阶段。

6.9.2 国内案例介绍

(1) 工程背景

某焦化厂占地面积约 147.3 万 m²，以煤炭为原料，生产煤气和焦炭，并主要从粗焦油中提取各类煤化工产品。主要污染物类型为 PAHs，污染物最高浓度达到 666.43 mg/kg，其含量从地表到深层递减。该场地修复后将规划为遗址公园、综合开发区（居住与商业）、工业用地（车辆段开发）三类用地。本案例为中试试验。

(2) 工程规模

237.5 m³。

(3) 主要污染物及污染程度

主要污染物为 PAHs，其含量为 1.11-666.43 mg/kg。

(4) 污染物及土壤理化特性

场地调查结果表明，污染物主要以 4 环以上难挥发的 PAHs 为主，2-3 环易挥发的 PAHs 浓度较低。表层土壤较为酥松，深层粘土 (~9.5 m) 对 PAHs 的吸附能力强，在固化剂添加量达到 10% 时满足修复目标的要求。

(5) 技术选择

由于表层土壤较为酥松，深层土壤对污染物的粘滞力较强，污染物难挥发等特点，在污染深度较浅 (小于 10m) 的情况下，适合于采用原位固化稳定化处理，使得污染物被固定在一个完整的固化体内，不易进行二次扩散。

(6) 工艺流程

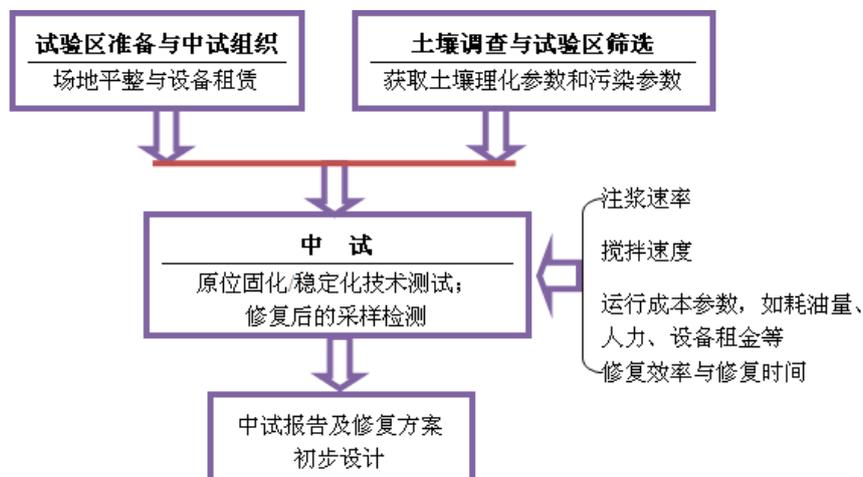


图 6-1 中试工艺流程

(7) 主要工艺及设备参数

固化区域深度 0-9.5 m，固化剂添加量 10%，单套中试装置处理效率为 12.57 立方米/小时。该过程采用的钻杆扭矩为 48 kN，钻头直径为 1.5 m。

(8) 成本分析

原位固化/稳定化技术单位土方修复费用为 309.9 元/m³，包含设备折旧、人员工资、水电消耗、技术服务、管理费、检修、保险、税金等费用。

(9) 修复效果

当固化剂用量达到 10% 时，污染物浸出浓度大幅度下降，表层浸出浓度由 583.84 mg/kg 降至 131.29 mg/kg，下降 77.5%。

(案例提供单位：北京建工环境修复股份有限公司)

7 原位化学氧化/还原技术

7.1 技术名称

技术名称：原位化学氧化/还原，英文名称：In Situ Chemical Oxidation&Reduction

7.2 技术适用性

7.2.1 适用的介质：污染土壤和地下水

7.2.2 可处理的污染物类型：化学氧化可以处理石油烃、BTEX（苯、甲苯、乙苯、二甲苯）、酚类、MTBE（甲基叔丁基醚）、含氯有机溶剂、多环芳烃、农药等大部分有机物；化学还原可以处理重金属类（如六价铬）和氯代有机物等。

7.2.3 应用限制条件：土壤中存在腐殖酸、还原性金属等物质，会消耗大量氧化剂；在渗透性较差的区域（如粘土），药剂传输速率可能较慢；化学氧化/还原过程可能会发生产热、产气等不利影响。同时，化学氧化/还原反应受 pH 值影响较大。

7.3 技术介绍

7.3.1 原理：通过向土壤或地下水的污染区域注入氧化剂或还原剂，通过氧化或还原作用，使土壤或地下水中的污染物转化为无毒或相对毒性较小的物质。常见的氧化剂包括高锰酸盐、过氧化氢、芬顿试剂、过硫酸盐和臭氧。常见的还原剂包括硫化氢、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。

7.3.2 系统构成和主要设备：由药剂制备/储存系统、药剂注入井（孔）、药剂注入系统（注入和搅拌）、监测系统等组成。

其中，药剂注入系统包括药剂储存罐、药剂注入泵、药剂混合设备、药剂流量计、压力表等组成；药剂通过注入井注入到污染区，注入井的数量和深度根据污染区的大小和污染程度进行设计；在注入井的周边及污染区的外围还应设计监测井，对污染区的污染物及药剂的分布和运移进行修复过程中及修复后的效果监测。

可以通过设置抽水井，促进地下水循环以增强混合，有助于快速处理污染范围较大的区域。

7.3.3 关键技术参数或指标

影响原位化学氧化/还原技术修复效果的关键技术参数包括：药剂投加量、污染物类型和质量、土壤均一性、土壤渗透性、地下水位、pH 和缓冲容量、地下基础设施等。

（1）药剂投加量：药剂的用量由污染物药剂消耗量、土壤药剂消耗量、还原性金属的药剂消耗量等因素决定。由于原位化学氧化/还原技术可能会在地下产生热量，导致土壤和地下水中的污染物挥发到地表，因此需要控制药剂注入的速率，避免发生过热现象。

（2）污染物类型和质量：不同药剂适用的污染物类型不同。如果存在非水相液体（NAPL），由于溶液中的氧化剂只能和溶解相中的污染物反应，因此反应会限制在氧化剂溶液/非水相液体（NAPL）界面处。如果 LNAPL（轻质非水相液体）层过厚，建议利用其它技术进行清除。

（3）土壤均一性：非均质土壤中易形成快速通道，使注入的药剂难以接触到全部处理区域，因此均质土壤更有利于药剂的均匀分布。

（4）土壤渗透性：高渗透性土壤有利于药剂的均匀分布，更适合使用原位化学氧化/还原技术。由于药剂难以穿透低渗透性土壤，在处理完成后可能会释放污染物，导致污染物浓度反弹，因此可采用长效药剂（如高锰酸盐、过硫酸盐）来减轻这种反弹。

（5）地下水水位：该技术通常需要一定的压力以进行药剂注入，若地下水水位过低，则系统很难达到所需的压力。但当地面有封盖时，即使地下水水位较低也可以进行药剂投加。

（6）pH 和缓冲容量：pH 和缓冲容量会影响药剂的活性，药剂在适宜的 pH 条件下才能发挥最佳的化学反应效果。有时需投加酸以改变 pH 条件，但可能会导致土壤中原有的重金属溶出。

(7) 地下基础设施：若存在地下基础设施（如电缆、管道等），则需谨慎使用该技术。

7.4 技术应用基础和前期准备

原位化学氧化/还原技术的应用需要充分了解原位化学氧化/还原反应和传质过程。

应用该技术之前，需通过实验室研究确定药剂处理效果和投加量，并进行中试试验进一步确定和优化设计参数，确定注入点的水平和垂向有效影响半径、土壤结构分布、污染去除率、反应产物等。还可以通过建立场地概念模型、反应传质模型等方式指导系统设计和运行。

进行原位化学氧化/还原修复系统设计时，需重点考虑注入井布置的间距和深度、药剂注入量、监测井布置的间距和深度等。还要注意工人的培训、化学药剂的安全操作以及修复产生废物的管理。

7.5 主要实施过程

(1) 处理系统建设：依据和现场中试试验确定的注入井位置和数量，建立原位化学氧化或还原处理系统。(2) 药剂注入过程：依据前期实验确定的药剂对污染物的降解效果，选择适用的药剂。再结合中试试验，确定注入浓度、注入量和注入速率，实时监测药剂注入过程中的温度和压力变化。药剂注入前需要通过药剂搅拌系统进行充分混合。(3) 进行污染土壤和地下水原位化学氧化/还原的修复过程监测以及修复后的监测。主要包括对污染物浓度、pH、氧化还原电位等参数进行监测，如果污染物浓度出现反弹，可能需要进行补充注入。

7.6 运行维护和监测

原位化学氧化/还原修复技术的运行维护相对简单，运行过程中需对药剂注入系统以及注入井和监测井进行相应的运行维护。

监测包括修复过程监测和效果监测。修复过程监测通常在药剂注射前、注射中和注射后很短时间内进行，监测参数包括药剂浓度、温度和压力等。若修复过程中产生大量气体或场地正在使用，则可能还需要对挥发性有机污染物、爆炸下限（LEL）等参数进行监控。效果监测的主要目的是依据修复前的背景条件，确认污染物的去除、释放和迁移情况，监测参数为污染物浓度、副产物浓度、金属浓度、pH、氧化还原电位和溶解氧。若监测结果显示污染物浓度上升，则说明场地中存在未处理的污染物，需要进行补充注入。

7.7 修复周期及参考成本

该技术处理周期与污染物特性，污染土壤及地下水的埋深和分布范围极为相关。使用该技术清理污染源区的速度相对较快，通常需要 3-24 月的时间。修复地下水污染羽流区域通常需要更长的时间。

其处理成本与特征污染物、渗透系数、药剂注入影响半径、修复目标和工程规模等因素相关，主要包括注入井/监测井的建造费用、药剂费用、样品检测费用以及其他配套费用。美国使用该技术修复地下水处理成本约为 123 美元 /m³。

7.8 国外应用情况

该技术在国外已经形成了较完善的技术体系，应用广泛。据美国环保署统计，2005-2008 年应用该技术的案例占修复工程案例总数的 4%。应用案例如表 7-1 所示。

表 7-1 原位化学氧化/还原技术应用案例

序号	场地名称	目标污染物	规模	污染介质	氧化剂/还原剂
1	Peterson/Puritan, Inc. Superfund Site, Cumberland, RI 美国超级基金项目	Arsenic (砷)	/	地下水	溶氧
2	Washington State 美国华盛顿州某	Cr ⁶⁺ (六价铬)	16000m ³	土壤	硫基专利还原剂

重金属污染场地					
3	荷兰某金属处理公司	三氯乙烯、二氯乙烯	/	土壤	芬顿试剂 臭氧/过氧化物
4	美国丹佛市某制造厂	苯系物	900 m ²	地下水	双氧水
5	加拿大安大略省某军事基地	三氯乙烯、四氯乙烯	2500 m ²	地下水	高锰酸钾

7.9 国内应用分析

7.9.1 国内应用情况

该技术在国内外发展较快，已有工程应用。

7.9.2 国内案例介绍

(1) 工程背景：某原农药生产场地，场地调查与风险评估发现场地中部分区域存在土壤或地下水污染，主要污染物为邻甲苯胺、对氯甲苯、1,2-二氯乙烷，需要进行修复。

(2) 工程规模：土壤污染量约 25000 m³，地下水污染面积约 6000 m²，深度 18 m。

(3) 主要污染物及污染程度：根据场地调查数据，土壤中的主要污染物为邻甲苯胺、对氯甲苯、1,2-二氯乙烷，最大污染浓度分别为 10.6 mg/kg、36 mg/kg、8.9 mg/kg。地下水中的主要污染物为邻甲苯胺、1,2-二氯乙烷，最大污染浓度分别为 1.27 mg/kg、2 mg/kg。土壤的修复目标值为对氯甲苯 6.5 mg/kg，邻甲苯胺 0.7 mg/kg，1,2-二氯乙烷 1.7 mg/kg。

(4) 技术选择：综合场地污染物特性、污染物浓度及土壤特征以及项目开发需求，选定原位化学氧化技术进行非挖掘区地下水污染治理。

(5) 工艺流程和关键设备

地下水原位化学氧化现场处置工艺流程如下图 7-1 所示。

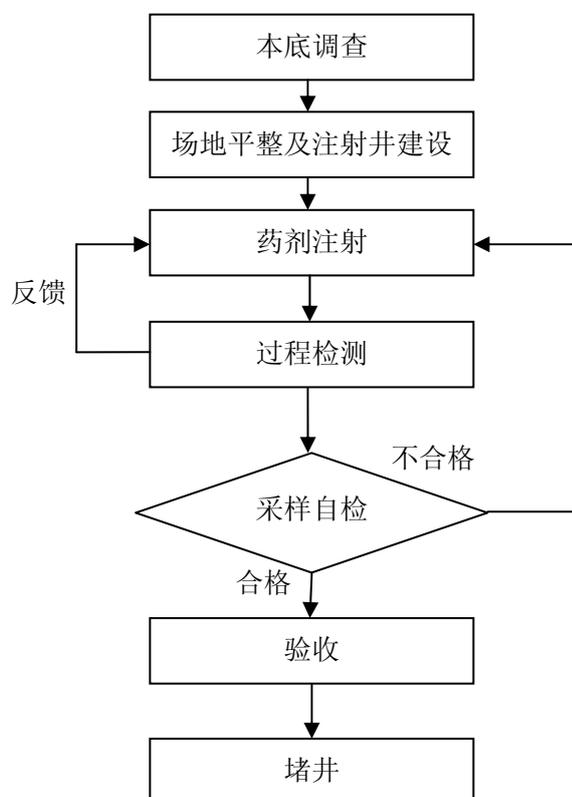


图 7-1 工艺流程图

具体步骤为：1) 测定地下水污染物浓度、pH 值等参数，作为污染本底值，2) 进行系统设计，建设注射井、降水井及监测井；3) 配置适当浓度的药剂溶液，向污染区域进行注射；4) 药剂注射完成一段时间后，采样观察地下水气味、颜色变化情况，并对地下水污染物浓度进行过程监测；5) 连续监测达标区域停止药剂注射，污染浓度检出较高，或颜色明显异常、异味较重的区域，则增加药剂注射量或加布注射井，直至达到修复标准。

(7) 主要工艺及设备参数

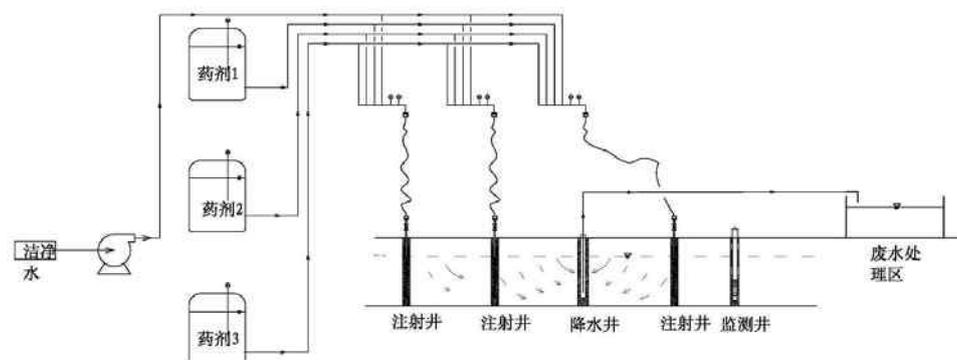


图 7-2 项目主要工艺示意图

(8) 成本分析：

该地下水原位化学氧化处置项目的投资、运行和管理费用约 2000~2500 元/m² (深度约 18m)，约合 110~150 元/m³，其运行过程中的主要能耗为离心泵的电耗，约为 1.5 kWh/m³。

(9) 修复效果

修复后地下水中邻甲苯胺和 1,2-二氯乙烷浓度分别低于修复目标值，满足修复要求并通过环保局的修复验收。

(案例提供单位：中节能大地环境修复有限公司)

8 土壤植物修复技术

8.1 技术名称

技术名称：土壤植物修复，英文名称：Soil Phytoremediation

8.2 技术适用性

8.2.1 适用的介质：污染土壤

8.2.2 可处理的污染物类型：重金属（如砷、镉、铅、镍、铜、锌、钴、锰、铬、汞等），以及特定的有机污染物（如石油烃、五氯酚、多环芳烃等）。

8.2.3 应用限制条件：不适用于未找到修复植物的重金属，也不适用于 8.2.2 中指明之外的有机污染物（如六六六、滴滴涕等）污染土壤修复；植物生长受气候、土壤等条件影响，本技术不适用于污染物浓度过高或土壤理化性质严重破坏不适合修复植物生长的土壤。

8.3 技术介绍

8.3.1 原理：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。

8.3.2 系统构成和主要设备：主要由植物育苗、植物种植、管理与刈割系统、处理处置系统与再利用系统组成。富集植物育苗设施、种植所需的农业机具（翻耕设备、灌溉设备、施肥器械）、焚烧并回收重金属所需的焚烧炉、尾气处理设备、重金属回收设备等。

8.3.3 关键技术参数或指标

关键技术参数包括：污染物类型，污染物初始浓度，修复植物选择，土壤 pH 值，土壤通气性，土壤养分含量，土壤含水率，气温条件，植物对重金属的年富集率及生物量，尾气处理系统污染物排放浓度，重金属提取效率等。

(1) 污染物初始浓度：采用该技术修复时，土壤中污染物的初始浓度不能过高，必要时采用清洁土或低浓度污染土对其进行稀释，否则修复植物难以生存，处理效果受到影响。

(2) 土壤 pH：通常土壤 pH 值适合于大多数植物生长，但适宜不同植物生长的 pH 值不一定相同。

(3) 土壤养分含量：土壤有机质或肥力应能维持植物较好生长，以满足植物的生长繁殖和获取最大生物量以及污染物的富集效果。

(4) 土壤含水率：为确保植物生长过程中的水分需求，一般情况下土壤的水分含量应控制在确保植物较好生长的土壤田间持水量。

(5) 气温条件：低温条件下植物生长会受到抑制。在气候寒冷地区，需通过地膜或冷棚等工程措施确保植物生长。

(6) 植物对金属的富集率及生物量：由于主要以植物富集为主，因此，对于生物量大且有可供选择的超富集植物的重金属（如砷、铅、镉、锌、铜等），植物修复技术的处理效果往往较好。但是，对于难以找到富集率高或植物生物量小的重金属污染土壤，植物修复技术对污染重金属的处理效果有限。

8.4 技术应用基础和前期准备

修复前应进行相应的可行性试验，目的在于评估该技术是否适合于特定场地的修复以及为修复工程设计提供基础参数。试验参数包括：土壤中污染物初始浓度、气候条件、土壤肥力等，并根据已有的研究成果确定修复植物生长情况、植物对重金属的年富集率及生物量等。

8.5 主要实施过程

(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。

8.6 运行维护和监测

该技术田间管理相对简单，仅需对植物生长过程进行相应的灌溉和施肥等农业措施。为掌握污染土壤中污染物的年去除率，运行过程中需定期对污染土壤中污染物浓度等相关指标进行监测。同时为避免二次污染，应对焚烧炉、尾气处理设施和重金属提取效果进行定期监测，以便及时采取相应的应对措施。

8.7 修复周期及参考成本

该技术处理周期较长，一般需 3-8 年。其处理成本与工程规模等因素相关。在美国应用的成本约为 25-100 美元/吨，国内的工程应用成本约为 100-400 元/吨。

8.8 国外应用情况

该技术修复成本相对低廉，相关配套设施已能够成套化生产制造，在国外已广泛应用于重金属、放射性核素、卤代烃、汽油、石油烃等污染土壤的修复，技术相对比较成熟，国外部分应用案例信息如表 8-1 所示。

表 8-1 植物修复技术应用案例

序号	场地名称	目标污染物	选用植物	规模
1	Argonne, Illinois	VOC (挥发性有机物) (Cl、PCE (四氯乙烯)、TCE(三氯乙烯))	杂交杨树、杂交柳树	5 英亩 (约合 20234.28 m ²)
2	Milwaukee, Wisconsin	PAHs (多环芳烃), PCBs (多氯联苯)	玉米杂交种、沙洲柳树、当地草	1007m ³
3	Trenton, NJ; Fort Dix, NJ	铅	印度芥子、向日葵、黑麦、大麦	1594 m ³
4	Palmerton, Pennsylvania	重金属	冰草、黑麦草等	850 英亩 (约合 3439827.96 m ²)
5	Blue Ridge Mountains of Virginia	砷	蜈蚣草	20 英亩 (约合 80937.13m ²)

8.9 国内应用分析

8.9.1 国内应用情况

我国对植物修复技术处理重金属的实验研究起步较早，相继开展了铜、铅、锌、镉和砷等污染土壤的植物修复研究。1999 年起国内开展了砷的超富集植物筛选和砷污染土壤的植物修复研究，用于砷污染农田土壤修复。本技术在国内发展已比较成熟，已广泛用于重金属污染土壤的修复。2009 年，利用化学-植物修复技术处理日本遗弃化学武器引起的农田有机砷污染土壤，对该技术进行了工程应用示范，用于修复数百公顷有机砷污染土壤。

8.9.2 国内案例介绍

(1) 工程背景：某地因开矿和尾矿大坝损坏引起农田大面积砷污染，经场地调查与风险评估，砷污染土壤面积总计约 1000 余亩。先期进行了 17 亩蜈蚣草治理砷污染土壤示范工程，直接采用种植蜈蚣草、蜈蚣草+桑树套种技术，将污染土壤修复至 30 mg/kg 以下。

(2) 工程规模：17 亩。

(3) 主要污染物及污染程度：土壤污染物为砷，另有铅、锌和镉污染。砷的检出浓度超出国家环境标准 5-10 倍，最高超出 50 倍以上。

(4) 土壤理化特性：土壤 pH 值范围为 3.8~7.0，大部分区域呈酸性，重污染区 pH 值低至 3.8。

(5) 技术选择：主要进行重金属污染与酸污染修复。在进行砷、铅等复合污染土壤的植物修复过程中，应充分考虑修复植物对这些重金属的抗性、耐性和富集性，以及酸污染对修复植物的毒害，搭配适宜的富集植物蜈蚣草以修复重金属复合污染与酸污染土壤。富集砷的蜈蚣草晾干后采用焚烧方式处理。

(6) 工艺流程及关键设备：富集植物育苗设施、种植所需的农业翻耕设备、灌溉设备、施肥器械、焚烧炉、尾气处理设备等。

(7) 主要工艺及设备参数：

主要包括场地调查、育苗、移栽、田间管理、刈割和安全焚烧。蜈蚣草采用孢子育苗，育苗温室温度控制在 20~25℃，湿度 60~70%。种植密度约 7000 株/亩。在田间种植条件下，蜈蚣草叶片含砷量高达 0.8%。蜈蚣草生长至 0.5m 时收割，年收割 4 次。收获的蜈蚣草晾干后，通过添加重金属固定剂，进行安全焚烧处理。

(8) 成本分析：

包含建设施工投资、设备投资、运行管理费用。处理成本约 2-3 万元/亩。运行过程中的主要能耗为灌溉、焚烧和尾气处理的电耗，另外有田间管理的人工成本。

(9) 修复效果：

污染土壤中砷的浓度降低至修复目标 30 mg/kg 以下，满足修复要求。

(案例提供单位：总参某部)

9 土壤阻隔填埋技术

9.1 技术名称

技术名称：土壤阻隔填埋，英文名称：Soil Barrier and Landfill

9.2 技术适用性

9.2.1 适用的介质：污染土壤。

9.2.2 可处理的污染物类型：适用于重金属、有机物及重金属有机物复合污染土壤。

9.2.3 应用限制条件：不宜用于污染物水溶性强或渗透率高的污染土壤，不适用于地质活动频繁和地下水水位较高的地区。

9.3 技术介绍

9.3.1 原理：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。按其实施方式，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。

9.3.2 系统构成和主要设备：原位土壤阻隔覆盖系统主要由土壤阻隔系统、土壤覆盖系统、监测系统组成。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；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；监测系统主要是由阻隔区域上下游的监测井构成。异位土壤阻隔填埋系统主要由土壤预处理系统、填埋场防渗阻隔系统、渗滤液收集系统、封场系统、排水系统、监测系统组成。其中：该填埋场防渗系统通常由 HDPE 膜、土工布、钠基膨润土、土工排水网、天然粘土等防渗阻隔材料构筑而成。根据项目所在地地质及污染土壤情况需要，通常还可以设置地下水导排系统与气体抽排系统或者地面生态覆盖系统。

主要设备包括：阻隔填埋技术施工阶段涉及大量的施工工程设备，土壤阻隔系统施工需冲击钻、液压式抓斗、液压双轮铣槽机等设备，土壤覆盖系统施工需要挖掘机、推土机等设备，填埋场防渗阻隔系统施工需要吊装设备、挖掘机、焊膜机等设备，异位土壤填埋施工需要装载机、压实机、推土机等设备，填埋封场系统施工需要吊装设备、焊膜机、挖掘机等设备。阻隔填埋技术在运行维护阶段需要的设备相对较少，仅异位阻隔填埋土壤预处理系统需要破碎、筛分设备、土壤改良机等设备。

9.3.3 关键技术参数或指标

影响原位土壤阻隔覆盖技术修复效果的关键技术参数包括：阻隔材料的性能、阻隔系统深度、土壤覆盖层厚度等。

(1) 阻隔材料：阻隔材料渗透系数要小于 10^{-7} cm/s，阻隔材料要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。阻隔材料应确保阻隔系统连续、均匀、无渗漏。

(2) 阻隔系统深度：通常阻隔系统要阻隔到不透水层或弱透水层，否则会削弱阻隔效果。

(3) 土壤覆盖厚度：对于粘土层通常要求厚度大于 300 mm，且经机械压实后的饱和渗透系数小于 10^{-7} cm/s；对于人工合成材料衬层，满足《垃圾填埋场用高密度聚乙烯土工膜》(CJ/T 234) 相关要求。

影响异位土壤阻隔填埋技术修复效果的关键技术参数包括：防渗阻隔填埋场的防渗阻隔效果及填埋的抗压强度、污染土壤的浸出浓度、土壤含水率等。

(1) 阻隔防渗效果：该阻隔防渗填埋场通常是由压实粘土层、钠基膨润土垫层 (GCL) 和 HDPE 膜组成，该阻隔防渗填埋场的防渗阻隔系数要小于 10^{-7} cm/s。

(2) 抗压强度：对于高风险污染土壤，需经固化稳定化后处置。为了能安全贮存，固化体必须达到一定的抗压强度，否则会出现破碎，增加暴露表面积和污染性，一般在 0.1-0.5MPa 即可。

(3) 浸出浓度：高风险污染土壤经固化稳定化处置后浸出浓度要小于相应《危险废物鉴别标准浸出毒性鉴别》(GB5085.3) 中浓度规定限制。

(4) 土壤含水率：土壤含水率要低于 20%。

9.4 技术应用基础和前期准备

在利用土壤阻隔技术前，应进行相应的可行性测试，目的在于评估污染土壤是否适用该技术。原位土壤阻隔覆盖技术测试参数包括：土壤污染类型及程度、场地水文地质、土壤污染深度、土壤渗透系数等，可根据需要在现场进行工程中试。异位土壤阻隔填埋技术测试参数包括：土壤含水率、土壤重金属含量、土壤有机物含量、土壤重金属浸出浓度、土壤渗透系数、场地水文地质等，可以在实验室开展相应的小试或中试实验。

9.5 主要实施过程

根据污染程度与污染土壤的不同情况，该技术可以与其他修复技术联合使用。对于高风险污染土壤可以联合固化/稳定化技术使用后，对污染土壤进行填埋；对于低风险污染土壤可直接填埋在阻隔防渗的填埋场内或原位阻隔覆盖。该技术一方面可以隔绝土壤中污染物向周边环境迁移，另一方面可使其污染物在阻隔区域内自然降解。

原位土壤阻隔覆盖技术主要实施过程：(1) 确定污染阻隔区域边界；(2) 在污染阻隔区域四周设置由阻隔材料构成的阻隔系统；(3) 在污染区域表层设置覆盖系统；(4) 定期对污染阻隔区域进行监测，防止渗漏污染。

异位土壤阻隔填埋技术主要实施过程：(1) 对挖掘后的污染土壤进行适当的预处理；(2) 建设填埋场防渗系统，根据地下水位情况建设地下水导排系统；(3) 将预处理后的污染土壤填埋在阻隔填埋场；(4) 填埋完毕后进行填埋场封场系统，并建设相应的排水系统，根据填埋土壤性质建设导气收集系统；(5) 填埋场监测系统，定期监测地下水水质，防止渗漏造成污染。

9.6 运行维护和监测

原位土壤阻隔覆盖技术的运行维护主要是定期维护阻隔体的完整性，指标包括：HDPE 膜有无破损、覆盖粘土层是否有大型植物生长、上下游地下水水质情况（监测污染土壤中特征污染因子）等。

异位土壤阻隔填埋技术的运行维护主要是对阻隔防渗填埋场的运行维护。根据填埋土壤的不同类型，设置必要的运行维护措施。若填埋的是有机物污染土壤，为防止有机污染物在降解过程中产生气体，要设置相应的气体收集系统、渗滤液收集系统；如填埋的是重金属污染土壤，则只需要设置渗滤液收集系统。同时为了防止降水进入填埋区域，在技术实施完毕后应进行封场生态恢复，一方面可以防止雨水和积水进入该填埋区域，避免污染物浸泡；另一方面封场生态恢复后可以重新恢复该填埋区域的利用价值，可以建设公园绿地等。

对该阻隔系统的监测主要是沿着阻隔区域地下水水流方向设置地下水监测井，监测井分别设置在阻隔区域的上游、下游和阻隔区域内部。通过比较分析流经该阻隔区域内的地下水

中目标污染物含量变化，及时了解阻隔区域对周围环境的影响，并适时作出响应，防止二次污染。

9.7 修复周期及参考成本

该技术的处理周期与工程规模、污染物类别、污染程度密切相关，相比其他修复技术，该技术处理周期较短。

该技术的处理成本与工程规模等因素相关，通常原位土壤阻隔覆盖技术应用成本为 500~800 元/m²；异位土壤阻隔填埋技术应用成本为 300~800 元/m³。

9.8 国外应用情况

污染土壤阻隔填埋技术早在 20 世纪 80 年代初期就已经开始应用，该技术在外国已经应用 30 多年，已成功用于近千个工程，技术已经相对比较成熟，国外部分案例信息表如下。

表 9-1 土壤阻隔填埋技术应用案例

序号	场地名称	目标污染物	规模
1	佛罗里达 Pepper 钢铁合金厂场地修复	PCBs、铅、砷	65000m ³
2	Kassauf-Kimerling 电池处理项目	铬、铅	34000m ³
3	美国 Lawrence Livermore National Laboratory Site 300 (填埋场)	重金属、有机物	9700m ²
4	美国 Kerramerican Mine site (金属矿)	锌等重金属	77000 m ²

9.9 国内应用分析

9.9.1 国内应用情况

我国对该技术的最早应用是在 2007 年，以阻隔填埋方式处置重金属污染土壤；2010 年，某工程采用 HDPE 膜作为主要阻隔材料，阻挡污染物随地下水的水平迁移，将污染物以及污染土壤与外界环境隔绝，杜绝污染扩散，保护周围土壤和地下水。

原位土壤阻隔覆盖技术未对污染物进行降解和去除，由于“以风险控制为目标”的修复理念尚未被国内环境管理部门认可，该技术在外国尚未大规模推广。土壤异位阻隔填埋技术通常与固化/稳定化修复技术联用，在国内发展已比较成熟，已广泛用于重金属污染土壤的处置，相关技术设备已能够完全本土化。该联用技术具有处置速度快、效果好、可操作性强、成本低、对土壤质地限制要求少，可适用不同类型污染土壤的优点。

9.9.2 国内案例介绍

(1) 工程背景：某水源地对重金属污染土壤进行综合治理，以异位土壤阻隔填埋方法治理土壤中重金属污染，该区域原为企业用地后变更为水源地，由于该工期较短为 5 个月，修复标准严格，清挖参照《展览会用地土壤环境质量标准》A 级标准，阻隔填埋标准参照《地表水环境质量标准》IV 类水体标准值，为此对高风险污染土壤经清挖处置后，采取土壤阻隔填埋技术。

(2) 工程规模：17 万 m³ 污染土壤。

(3) 主要污染物及污染程度：Cr (铬)、Pb (铅)、Cd (镉)、As (砷)、Cu (铜)、Zn (锌)、Hg (汞)、Ni (镍)。Cr 最高污染浓度 28500mg/kg；Pb 最高污染浓度 7514mg/kg；Cd 最高污染浓度 0.97mg/kg；As 最高污染浓度 30.41mg/kg；Cu 最高污染浓度 3560 mg/kg；Zn 最高污染浓度 3926mg/kg；Hg 最高污染浓度 6.05mg/kg；Ni 最高污染浓度 106mg/kg。

(4) 土壤理化特性：该项目污染土壤主要为粉粘和粘土，渗透系数较低，达到 10⁻⁷~10⁻⁸ cm/s。

(5) 技术选择：综合以上污染物特性、污染物浓度、土壤特征、以及项目开发建设需求，最终选定技术成熟、成本较低、运行管理简单的污染土壤阻隔填埋技术。

(6) 工艺流程和关键设备:



图 9-1 工艺流程图

具体为: 1) 污染土壤清挖预处理包括土壤破碎筛分、固化稳定化; 2) 土壤阻隔填埋场建设; 3) 土壤分层填埋压实; 4) 土壤填埋完毕封场。

关键设备: 本处置过程用到的关键处置设备为土壤改良机、土壤压实机、挖掘机等。

(7) 主要工艺及设备参数:

考虑到本项目重金属污染较为严重, 采取固化/稳定化处置后, 再进入填埋场阻隔填埋。污染土壤固化稳定化采用土壤改良机, 该设备由进料设备、加药设备和搅拌出料设备构成, 履带移动式, 可方便到达任何修复现场, 最大处理能力 50~80 立方米/小时。填埋场阻隔防渗主要选用 1.5mm HDPE 膜和 600g/m² 土工布, 采用热熔挤压式手持焊接机、温控自行式热合机、土工布缝纫机等设备进行焊接。

(8) 成本分析:

该项目包含建设施工投资、设备投资、运行管理费用等的处理成本约 500 元/m³。

(9) 修复效果: 项目实施后满足修复要求并通过环保局的修复验收, 保护了水源地水质安全。

(案例提供单位: 北京高能时代环境技术股份有限公司)

10 生物堆技术

10.1 技术名称

技术名称：生物堆，英文名称：Biopile

10.2 技术适用性

10.2.1 适用的介质：污染土壤、油泥

10.2.2 可处理的污染物类型：石油烃等易生物降解的有机物。

10.2.3 应用限制条件：不适用于重金属、难降解有机污染物污染土壤的修复，粘土类污染土壤修复效果较差。

10.3 技术介绍

10.3.1 原理：对污染土壤堆体采取人工强化措施，促进土壤中具备污染物降解能力的土著微生物或外源微生物的生长，降解土壤中的污染物。

10.3.2 系统构成和主要设备

生物堆主要由土壤堆体、抽气系统、营养水分调配系统、渗滤液收集处理系统以及在线监测系统组成。其中，土壤堆体系统具体包括污染土壤堆、堆体基础防渗系统、渗滤液收集系统、堆体底部抽气管网系统、堆内土壤气监测系统、营养水分添加管网、顶部进气系统、防雨覆盖系统。抽气系统包括抽气风机及其进气口管路上游的气水分离和过滤系统、风机变频调节系统、尾气处理系统、电控系统、故障报警系统。营养水分调配系统主要包括固体营养盐溶解搅拌系统、流量控制系统、营养水分投加泵及设置在堆体顶部的营养水分添加管网。渗滤液收集系统包括收集管网及处理装置。在线监测系统主要包括土壤含水率、温度、二氧化碳和氧气在线监测系统。

主要设备包括抽气风机、控制系统、活性炭吸附罐、营养水分添加泵、土壤气监测探头、氧气、二氧化碳、水分、温度在线监测仪器等。

10.3.3 关键技术参数或指标

影响生物堆技术修复效果的关键技术参数包括：污染物的生物可降解性、污染物的初始浓度、土壤通气性、土壤营养物质含量、土著微生物数量、土壤含水率、土壤温度和 pH、运行过程中堆体内氧气含量以及土壤中重金属含量。

(1) 污染物的生物可降解性：对于易于生物降解的有机物（如石油烃、低分子烷烃等），生物堆技术的降解效果较好；对于 POPs（持久性有机污染物）、高环的 PAHs（多环芳烃）等难以生物降解的有机污染物污染土壤的处理效果有限。

(2) 污染物初始浓度：土壤中污染物的初始浓度过高时影响微生物生长和处理效果，需要采用清洁土或低浓度污染土对其进行稀释。如土壤中石油烃浓度高于 50000 mg/kg 时，应对其进行稀释；

(3) 土壤通气性：污染土壤本征渗透系数应不低于 10^{-8} cm^2 ，否则应采用添加木屑、树叶等膨松剂增大土壤的渗透系数；

(4) 土壤营养物质比例：土壤中碳:氮:磷的比例宜维持在 100:10:1,以满足好氧微生物的生长繁殖以及污染物的降解；

(5) 微生物含量：一般认为土壤微生物的数量应不低于 10^5 数量级；

(6) 土壤含水率：宜控制在 90%的土壤田间持水量；

(7) 土壤温度和 pH: 温度宜控制在 30~40℃范围，pH 宜控制在 6.0-7.8；

(8) 堆体内氧气含量：运行过程中应确保堆体内氧气分布均匀且含量不低于 7%。

(9) 土壤中重金属含量：土壤中重金属含量不应超过 2500 mg/L。

10.4 技术应用基础和前期准备

在利用生物堆技术进行修复前，应进行可行性测试，对其适用性和效果进行评估并获取相关修复工程设计参数，测试参数包括：土壤中污染物初始浓度、污染物生物降解系数（或呼吸速率）、土著微生物数量、土壤含水率、营养物质含量、渗透系数、重金属含量等。

10.5 主要实施过程

(1) 对挖掘后的污染土壤进行适当预处理（例如调整土壤中碳、氮、磷、钾的配比，土壤含水率、土壤孔隙度、土壤颗粒均匀性等）；

(2) 在堆场依次铺设防渗材料、砾石导气层、抽气管网（与抽气动力机械连接），形成生物堆堆体基础。将预处理后的土壤堆置其上形成堆体。在堆体顶部铺设水分、营养调配管网（与堆外的调配系统连接）以及进气口，采用防雨膜进行覆盖。

(3) 开启抽气系统使新鲜空气通过顶部进气口进入堆内，并维持堆内土壤中氧气含量在一定浓度水平。定期监测土壤中氧气、营养、水分含量并根据监测结果进行适当调节，确保微生物处于最佳的生长环境，促进微生物对污染物的降解。定期采集堆内土壤样品，了解污染物的去除速率。

10.6 运行维护和监控

运行过程中需对抽气风机、管道阀门进行维护。定期对堆内氧气含量、含水率、营养物质含量、土壤中污染物浓度、微生物数量等指标进行监测。为避免二次污染，应对尾气处理设施的效果进行监测，以便及时采取应对措施。

10.7 修复周期及参考成本

该技术处理周期一般为 1-6 个月。在美国应用的成本约为 130-260 美元/ m³，国内的工程应用成本约为 300-400 元/ m³。特定场地生物堆处理的成本和周期，可通过实验室小试或中试结果进行估算。

10.8 国外应用情况

生物堆技术修复成本相对低廉，相关配套设施已能够成套化生产制造,在国外已广泛应用于石油烃等易生物降解污染土壤的修复，技术成熟。美国环保局、美国海军工程服务中心等机构已制定并发布了本技术的工程设计手册。国外部分应用案例信息如表 10-1 所示。

表 10-1 生物堆技术应用案例

序号	场地名称	目标污染物	规模
1	南澳大利亚某燃料油污染场地	石油烃	2000m ³
2	北青衣土壤净化工程	石油烃	65000m ³
3	竹高湾财利船厂土壤修复	石油烃	57000m ³
4	比利时某炼油厂	石油烃	15000m ³
5	加拿大亚伯达某场地	石油烃	27000m ³

10.9 国内应用分析

10.9.1 国内应用情况

2008 年，某研究院对该技术进行了工程应用示范，用于修复某地某焦化厂石油烃、苯系物、多环芳烃复合污染土壤，示范规模 450 m³。2010 年，该技术再次应用于某地铁线施工场地苯胺污染土壤的修复，修复规模达 49920 m³。2012 年，某农药厂应用该技术修复苯系物等有机物污染土壤，修复规模达 10 万 m³。通过以上案例的工程应用，本技术在国内发展已比较成熟，相关核心设备已能够完全国产化。

10.9.2 国内案例介绍

(1) 工程背景：某原化工区，场地调查与风险评估发现存在苯胺污染土壤约 49920 m³。

为满足项目施工进度及项目建设施工方案的要求，这部分污染土壤采用异位处理使苯胺浓度小于 4 mg/kg。

(2) 工程规模：49920 m³

(3) 主要污染物及污染程度：主要污染物为苯胺，最大检出浓度为 5.2 mg/kg。苯胺饱和蒸汽压为 0.3，辛醇-水分配系数为 0.9，具备一定的挥发性，能在负压抽提下部分通过挥发而去除。同时，研究表明，其在好氧条件下的生物降解半衰期为 5~25 天，降解性能较好。

(4) 土壤理化特征：污染土壤以中砂为主，有机质含量相对较低，污染物“拖尾”效应较弱。其通气性能较好，本征渗透系数达到 10⁻⁶ cm²，有利于氧气的均匀传递。

(5) 技术选择：考虑到污染较轻，污染物的挥发性和生物易降解性，以及土壤有机质含量低、渗透性较好及修复成本等因素，选定批次处理能力大、设备成熟、运行管理简单、无二次污染且修复成本相对较低的生物堆技术。

(6) 工艺流程和关键设备：

其工艺流程如图 10-1 所示：

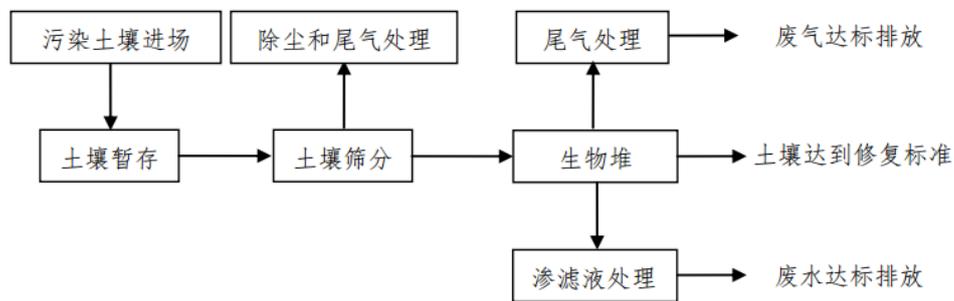


图 10-1 工艺流程图

具体为：1) 污染土壤首先进入土壤暂存场暂存，然后根据土壤处置的进程安排，取土进行土壤筛分，筛分设施配备除尘和尾气净化设备，保证筛分过程中产生的粉尘和废气能达到排放标准；2) 筛分后的土壤和卵石运入土壤处置场，卵石铺设在生物堆的最底层，用于抽气管网的气体分配和保护；3) 运行生物堆对污染土壤进行处理，并定期监测污染物的去除程度和抽气量、压力、温度、湿度、堆内氧气含量等参数。处理过程中产生的废气进入尾气净化设备处理，渗滤液进入废水处理设施；5) 修复后的土壤达到修复目标后可用于填埋造地，尾气净化后达标排放，废水处理按照修复方案的废水利用标准进行回用。

(7) 主要工艺及设备参数：

考虑到该项目的土方量及甲方要求的修复工期，该项目采用模块化设计，单个批次总共建设 3 个堆体，批次处理能力为 10000 m³，每个堆体配置独立的抽气控制设备进行控制，每个堆体的设计处理时间为 1.5 个月，堆体剖面结构如图 10-2 所示。

该项目生物堆的设备主要由抽气设备、气液分离设备和尾气净化设备组成。抽气设备主要由真空泵、空气真空球阀和系统排气口等组成；气液分离设备由真空平衡分离排液灌、自动排液泵、过滤器和空气真空球阀组成；尾气净化设备由活性炭吸附塔、取样口和排气口组成。

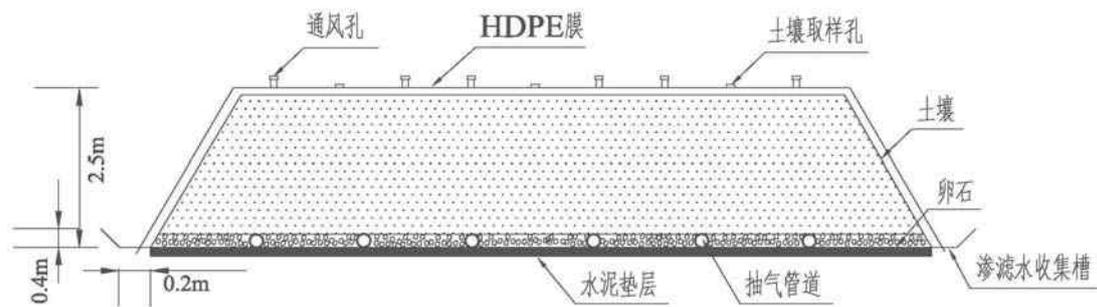


图 10-2 生物堆堆体剖面图

(8) 成本分析:

该项目包含建设施工投资、设备投资、运行管理费用的处理成本约 350 元/m³。

(9) 修复效果:

依据设计方案, 该项目 49920m³ 污染土壤中苯胺的浓度均降低至修复目标 4.0 mg/kg 以下, 满足修复要求并通过环保局的修复验收。

(案例提供单位: 北京市环境保护科学研究院, 北京金隅生态岛科技有限公司)

11 地下水抽出处理技术

11.1 技术名称

技术名称：地下水抽出处理，英文名称：Groundwater Pump and Treat

11.2 技术适用性

11.2.1 适用介质：污染地下水。

11.2.2 可处理的污染物类型：用于处理重度污染地下水区域中多种污染物类型。

11.2.3 应用限制条件：治理时间长，难以将污染物彻底去除；抽出井群影响半径有限；不宜用于吸附能力较强的污染物，以及渗透性较差或存在 NAPL（非水相液体）的含水层；污染地下水抽出处理后的后续处置问题较难解决。

11.3 技术介绍

11.3.1 原理：根据地下水污染范围，在污染场地布设一定数量的抽水井，通过水泵和水井将污染地下水抽取上来，然后利用地面设备处理。处理后的地下水，排入地表径流回灌到地下或用于当地供水。

11.3.2 系统构成和主要设备：

系统构成包括地下水控制系统、污染物处理系统和地下水监测系统。

主要设备包括钻井设备、建井材料、抽水泵、压力表、流量计、地下水水位仪、地下水水质在线监测设备、污水处理设施等。

11.3.3 关键技术参数或指标：

关键技术参数包括：渗透系数、含水层厚度、抽水井间距、抽水井数量、井群布局和抽提速率。

(1) 渗透系数：渗透系数对污染物运移影响较大，随着渗透系数加大，污染羽扩散速度加大，污染羽范围扩大，从而增加抽水时间和抽水量。

(2) 含水层厚度：在承压含水层水头固定的情况下，抽水时间和总抽水量都是随着承压含水层厚度增加呈线性递增的趋势；当含水层厚度呈等幅增加时，抽水时间和总抽水量都是呈等幅增加趋势。

在承压含水层厚度固定的情况下，抽水时间和总抽水量都不随承压含水层水头的增加而变化（除了水头值为 15m 时）。其主要原因是，测压水位下降时，承压含水层所释放出的水来自含水层体积的膨胀及含水介质的压密，只与含水层厚度有关。

对于潜水含水层，地面与底板之间厚度固定的情况下，抽水时间和总抽水量都是随着潜水含水层水位的增加呈线性递减的趋势。

(3) 抽水井位置：抽水井在污染羽上的布设可分为横向与纵向两种方式，每种方式中，抽水井的位置也不同。横向可将井位的布设分为两种：(1) 抽水井在污染羽的中轴线上；(2) 抽水井在污染羽中心。

(4) 抽水井间距：在多井抽水中，应重叠每个井的截获区，以防止污染地下水从井间逃逸。

(5) 井群布局：天然地下水使得污染羽的分布出现明显偏移，地下水水流方向被拉长，垂直地下水水流方向变扁。抽水井的最佳位置在污染源与污染羽中心之间（靠近污染源，约位于整个污染羽的三分之一处），并以该井为圆心，以不同抽水量下的影响半径为半径布设其余的抽水井。

11.4 技术应用基础和前期准备

在利用抽提处理技术进行修复前，应进行相应的可行性测试，目的在于评估抽提处理技术是否适合于特定场地的修复并为修复工程设计提供基础参数，测试参数包括：

(1) 污染源情况：污染源的位置、污染物性质及其持续释放特性；土壤中污染物类型、浓度及分布特征。

(2) 水文地质条件：含水层地层情况、地下水深度、水力坡度、渗透系数、储水系数、水位变化、地下水的补给与径流；地下水和地表水相互作用。

(3) 自净潜力：污染物总量、污染物浓度变化趋势、土壤吸附能力、污染物转化过程和速率、污染物迁移速率、非水相液体成分、影响污染物迁移的其他参数。

11.5 主要实施过程

(1) 捕获区分析和优化系统设计：通过数学模型来计算捕获区、分析地下水流场、计算地下水抽出时间。对于相对复杂的污染地下水含水层，通过数学模型可以模拟抽出处理方法、设计地下水监测系统和监测频率。

(2) 建立地下水控制系统：①把污染源和地下水污染羽去除相结合，分阶段建立抽出井群系统，通过前期井群建立获取监测数据分析含水层抽出效果，指导后续井群选址；②安装抽水泵；③脉冲式抽取地下水，通过抽取最少量地下水达到最优的污染物去除效率。

(3) 处理抽出污染地下水：选择适当的处理设备和处理方法处理受污染地下水。具体处理方法包括生物法、物理/化学法等。

(4) 监测效果评估：建立地下水抽出处理监测系统，评价地下水抽出处理效果。

(5) 修复成功后关闭抽出处理系统。

11.6 运行维护和监测

总体来说，该技术运行维护相对简单，运行过程中仅需对水泵、抽提井、管道阀门进行相应维护。污水处理系统的运行维护需根据不同污染物进行相应调整。

抽出处理系统投入运行后，就应开展实时监测，以判断系统运转是否满足既定治理目标，确保系统运行长期有效。借助于水位监测和水质检测，对系统运行做出相应调整。

11.7 修复周期及参考成本

该技术的处理周期与场地的水文地质条件、井群分布和井群数量密切相关。受水文地质条件限制，含水层介质与污染物之间相互作用，随着抽水工程的进行，抽出污染物浓度变低，出现拖尾现象；系统暂停后地下水中污染物浓度升高，存在回弹现象。因此，该技术可以用于短时期的应急控制，不宜作为场地污染治理的长期手段。

其处理成本与工程规模等因素相关，美国处理成本约为 15-215 美元/m³。

11.8 国外应用情况

该技术在国外已经形成了较完善的技术体系，应用广泛。据美国环保署统计，1982 - 2008 年期间，在美国超级基金计划完成的地下水修复工程中，涉及抽出处理和其他技术组合的项目 798 个。应用案例见下表 11-1。

表 11-1 抽出处理修复地下水技术应用案例

序号	场地名称	目标污染物	规模	费用
1	Hamptonbug, NY	挥发性有机化合物和多环芳烃类	83000 吨	约 300 万美元
2	intertidal marsh along San FranciscoBay	挥发性有机化合物	12.6 英亩（约合 50990.39 m ² ），峰 值处理量为 700 万 加仑（26497.88 m ³ ） 废液每年	2500 万美元
3	Acid Brook Delta and PomptonLake	三氯乙烯和四氯乙烯	200000 吨污染土壤 和沉积物	

4	Lowr Lowry Landfill of Arapahoe Helena	溶剂和金属废料，成品油，杀虫剂，污水污泥，颜料，轮胎，动物尸体，家居废物，医疗废物	480 英亩（约合 1942491.08 m ² ）， 13800 万加仑（约合 522386.83 m ³ ）废液
5	Chemical Co. Landfill	杀虫剂	13.5 英亩（约合 54632.56 m ² ）

11.9 国内应用分析

11.9.1 国内应用情况

抽出处理技术适用范围广，是地下水污染治理主要技术之一。该技术在国内外已有工程应用。

11.9.2 国内案例介绍

(1) 工程背景：某电子企业在地环境调查期间，发现厂区内土壤和地下水受到了总石油烃类化合物（TPH）的污染，该类污染物质主要来源于化学品泄漏和含有污水的排水系统。该修复工程的工期为半年，通过异位修复技术，清除场地内污染源，使场地内的污染土壤和地下水得到有效地治理。修复目标值参考荷兰标准干预值（Dutch Intervention Value），即土壤样品检出的总石油烃不超过 5000mg/kg，地下水样品检出的总石油烃不超过 0.6 mg/L。经可行性分析，该场地的污染土壤采用挖出-外运处置的方法进行治理，而污染地下水采用抽出-处理和原位化学氧化的方法进行联合治理。

(2) 工程规模：土壤：168 m³；地下水：130 m³，其中包括 LNAPL（轻质非水相液体）污染物 0.2 m³。

(3) 主要污染物及污染程度：土壤和地下水中的污染物为总石油烃烷基苯类组分（C₁₅-C₂₈），污染范围调查期间，在监测井中发现有 8 mm 厚的 LNAPL 污染物和石油类气味，涉及区域面积约 150 m²。

(4) 水文地质特征：根据现场地面以下 5m 内的钻孔试验结果确定场地浅层地质基本情况：0~2.0 m 深度为回填土，以夹杂砾石和砂的粘土为主；2.0~5.0 m 深度以粘土为主，夹杂砂或砾石。地下水稳定水位在地下 1.2~1.9 m，流向为由西北向东南，水力梯度约为 0.02，地下水流速为 0.08~0.18 m/a。地下水 pH 为 6.44~7.12，溶解氧浓度为 1.30~2.73 mg/L，氧化还原电位为 -66.9~-47 mV，电导率为 0.55~1.39 mS/cm。

(5) 技术选择：

污染场地污染物为总石油烃烷基苯类组分（C₁₅-C₂₈），在地下水中浓度最高达到 1.09×10⁵ μg/L，且在监测井中观察到 LNAPL 污染物和石油类气味；污染物特征符合抽出处理技术适用的污染物类型，因此，污染场地选用抽出处理技术治理。

(7) 工艺流程：抽出处理系统由气动隔膜泵和空压机组成的抽出装置，隔油池与活性炭吸附单元组成的处理装置及相应的管路和仪表系统共同构成，工艺流程见图 11-1。

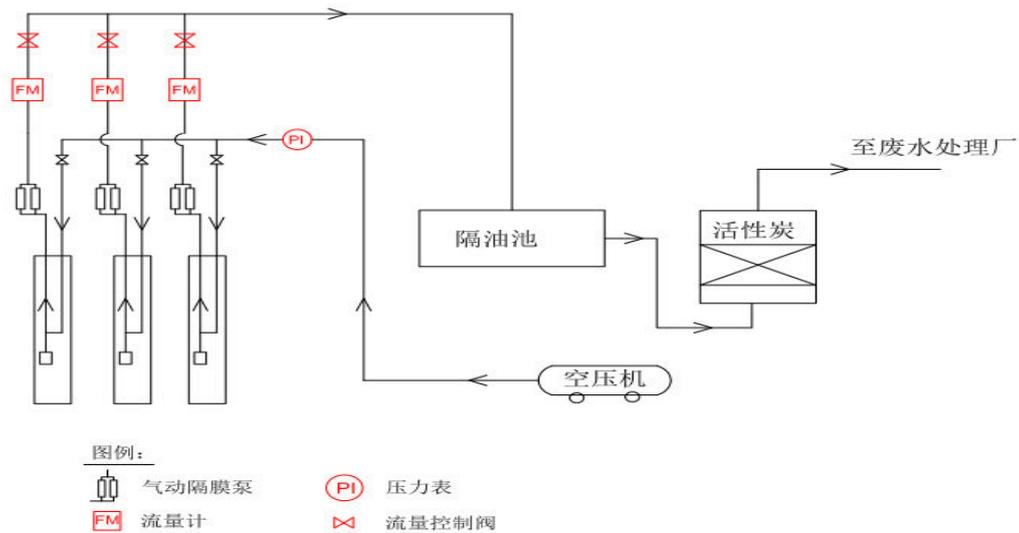


图 11-1 工艺流程

具体的流程为：抽提井中的 LNAPL 污染物和污染地下水首先会通过气动隔膜泵和空压机组成的装置被抽出地面；抽出后的 LNAPL 污染物和地下水会在隔油池内进行分离，分离出的 LNAPL 污染物作为危险废物外运处置，分离出的地下水通过活性炭吸附处理后外运至有资质的废水处理厂处理。

(8) 关键设备及工艺参数：抽提井采用 UPVC 材质，井径 100 mm，井深 5.0 m，其中筛管位于地下 1 m 至地下 4 m 的位置。共设置 10 口抽提井，总共运行 30 天。单个抽提井每天的抽提时间 8 小时。

(9) 成本分析：去除 1 m³ 含 LNAPL 的污染地下水的费用约为 900 元。

(10) 修复效果：在 180d 的运行时间内，抽出-处理系统从 10 口井中总共抽出约 130 m³ 流体（LNAPL 和受污染的地下水），其中去除 LNAPL 污染物 0.2 m³，修复完成后，监测井中没有观察到 LNAPL 污染物。由结果可知，抽出-处理技术对场地 LNAPL 污染物的去除有较好的效果。后续原位化学氧化处理实施后，地下水最终达到修复目标。

（案例提供单位：艾奕康环保技术顾问（广州）有限公司）

12 地下水修复可渗透反应墙技术

12.1 技术名称

技术名称：地下水修复可渗透反应墙，英文名称：Permeable Reactive Barrier (PRB)

12.1 技术适用性

12.1.1 适用的介质：污染地下水

12.1.2 可处理的污染物类型：碳氢化合物（如 BTEX（苯、甲苯、乙苯、二甲苯）、石油烃）、氯代脂肪烃、氯代芳香烃、金属、非金属、硝酸盐、硫酸盐、放射性物质等。

12.1.3 应用限制条件：不适用于承压含水层，不宜用于含水层深度超过 10m 的非承压含水层，对反应墙中沉淀和反应介质的更换、维护、监测要求较高。

12.3 技术介绍

12.3.1 原理：在地下安装透水的活性材料墙体拦截污染物羽状体，当污染羽状体通过反应墙时，污染物在可渗透反应墙内发生沉淀、吸附、氧化还原、生物降解等作用得以去除或转化，从而实现地下水净化的目的。

最常见的应用形式与原理如表 12-1 所示：

表 12-1 常见的 PRB 形式与原理

去除原理	污染物	反应墙类型
微生物还原	氯代脂肪烃、氯代芳香烃、硝酸盐、硫酸盐	厌氧生物反应墙、草皮或有机肥生物反应墙
化学还原	氯代脂肪烃、氯代芳香烃、硝酸盐、硫酸盐	铁反应墙
厌氧微生物降解	BTEX	厌氧生物反应墙
微生物氧化（矿化）	苯类、苯乙烯、少量多环芳烃、少量废油	厌氧生物反应墙或压缩气体反应墙
金属物质的沉淀和还原	金属类	厌氧生物反应墙、铁反应墙
吸附	几乎所有污染物	活性炭、草皮或有机肥生物反应墙

12.3.2 系统构成和主要设备：

目前投入应用的 PRB 可分为单处理系统 PRB 和多单元处理系统 PRB。单处理系统 PRB 的基本结构类型包括连续墙式 PRB 和漏斗-导门式 PRB，还有一些改进构型，如墙帘式 PRB、注入式 PRB、虹吸式 PRB 以及隔水墙-原位反应器等，适用于污染物比较单一、污染浓度较低、羽状体规模较小的场地；多单元处理系统则适用于污染物种类较多、情况复杂的场地。多单元处理系统又可分为串联和并联两种结构。串联处理系统多用于污染组分比较复杂的场地，对于不同的污染组分，串联系统中的每个处理单元可以装填不同的活性填料，以实现将多种污染物同时去除的目的。实际场地中应用的串联结构有沟箱式 PRB、多个连续沟壕平行式 PRB 等。并联多用于系统污染羽较宽、污染组分相对单一的情况。常用的并联结构有漏斗-多通道构型、多漏斗-多导门构型或多漏斗-通道构型。

PRB 的结构是地下水污染去处效果优劣的影响因素之一，其结构设计需要考虑两个关键问题：一是 PRB 能嵌进隔水层或弱透水层中，以防止地下水通过工程墙底部运移，确保能完全捕获地下水的污染带；二是能确保地下水在反应材料中有足够的水力停留时间。不同结构的 PRB 适用情况不同（表 12-2），实际应用中应结合具体的地下水水文及污染状况进行合理设计。

表 12-2 PRB 的结构类型

项目	结构类型	备注
连续反应墙	连续式	必须足够大以确保整个污染水羽都通过 PRB
漏斗-通道系统	单通道系统	用低渗透性隔墙引导污染水羽
	并联多通道	适用于宽污染地下水羽的处理
	串联多通道	适用于同时含多种类型污染地下水羽处理

PRB 的主要设备：沟槽构建设备（双轮槽机、链式挖掘机等）、阻隔幕墙构建设备（大型螺旋钻、打桩机等）、监测系统（氢气、氧化还原电位、pH 值、水文地质情况、污染物、反应墙渗透性能的变幅和变化情况等等在线监测系统）等。

12.3.3 关键技术参数或指标

主要包括 PRB 安装位置的选择、结构的选择、埋深、规模、水力停留时间、方位、反应墙的渗透系数、活性材料的选择及其配比。

(1) PRB 安装位置的选择：第一步，通过土壤和地下水体取样、试验室测试研究、现有数据整理，圈定污染区域，其范围应大于污染物羽流，防止污染物随水流从 PRB 的两侧漏过去，建立污染物三维空间模型，然后选择计算范围，进而建立污染物浓度分布图。第二步，通过现场水文地质勘察，绘出地下水流场，了解地下水大体流向。第三步，根据地下水动力学，探讨污染物的迁移扩散方式和范围，在污染物可能扩散圈的前端划定 PRB 的安装位置。第四步，在初定位置的可能范围进行地面调查。

(2) PRB 结构的选择：对于比较深的承压层，采用灌注处理式 PRB 比较合适；而对于浅层潜水，可采用的 PRB 形式多种多样。此外，还应考虑反应材料的经济成本问题，若用高成本的反应材料时，可采用材料消耗较少的漏斗-导水门式结构；若使用便宜的反应原料，宜选用连续式渗透反应墙。

(3) PRB 的规模：根据欧美国家多个 PRB 工程的现场经验可知，PRB 的底端嵌入不透水层至少 0.60 m，PRB 的顶端需高于地下水最高水位；PRB 的宽度主要由污染物羽流的尺寸决定，一般是污染物羽流宽度的 1.2~1.5 倍，漏斗—导水门式结构同时取决于隔水漏斗与导水门的比率及导水门的数量。考虑到工程成本因素，当污染物羽流分布过大时，可采用漏斗—导水门式结构的并联方式，设计若干个导水门，以节省经济成本和减少对地下水流场的干扰。

(4) PRB 水力停留时间：污染物羽流在反应墙的停留时间主要由污染物的半衰期和流入反应墙时的初始浓度决定。污染物的半衰期由室内柱式试验确定。

(5) PRB 走向：一般来说，反应墙的走向垂直于地下水流向，以便最大限度截获污染物羽流。在实际工程设计中，一般根据以下两点确定反应墙的走向：a) 根据长期的地下水水文资料，确定地下水流向随季节变化的规律；b) 建立考虑时间的地下水动力学模型，根据近乎垂直原理，确定反应墙的走向。

(6) PRB 的渗透系数：一般来说，反应墙的渗透系数宜为含水层渗透系数的 2 倍以上，对于漏斗—导水门结构甚至是 10 倍以上。

(7) 活性材料的选择及其配比：反应介质的选择主要考虑稳定性、环境友好性、水力性能、反应速率、经济性和粒度均匀性等因素。PRB 处理污染地下水使用的反应材料，最常见的是零价铁，其它还有活性碳、沸石、石灰石、离子交换树脂、铁的氧化物和氢氧化物、磷酸盐以及有机材料（城市堆肥物料、木屑）等。

12.4 技术应用基础和前期准备

PRB 系统的设计施工比较复杂，加上 PRB 修复污染物的过程涉及物理、化学、生物等多学科领域，在设计 PRB 时需要综合考虑很多因素。只有经过前期可行性调研、水文地质勘察，获得一些参数后才能进行设计。需调研的参数主要包括：污染物特征，如非饱和土壤

和含水层污染物的种类、浓度、三维空间分布、迁移方式及转化条件；当地的地理地质概况和水文气象、地下水的埋深、运移参数、季节性变化；含水层的厚度及其渗透系数、孔隙度、颗粒粒径和级配、地下水的地球化学特性（如 pH 值、Eh、DO、温度、电导率、Ca²⁺、Mg²⁺、NO₃⁻、SO₄²⁻等离子含量等）；现场微生物活性和群落；现场施工环境条件、对周围环境的影响；治理周期、效益、成本、监测；工程项目经费。然后在试验室进行批量试验和柱式试验，确定活性反应介质并测试其修复效果和反应动力学参数，建立水动力学模型。根据这些参数计算确定 PRB 的结构、安装位置、方位及尺寸、使用期限、监测方案，并估算总投资费用。

12.5 主要实施过程

(1) 对于深度不超过 10m 的浅层 PRB，在污染羽流向的垂向位置，使用连续挖沟机进行挖掘，并回填活性材料，同时设置监测井、排水管、水位控制孔等，最后在墙体上覆盖土层。也可采用板桩、地沟箱、螺旋钻孔等挖掘方式。(2) 对于深度大于 10m 的 PRB，有多种方式进行开挖和回填。由于深度较大，回填时常采用生物泥浆运送反应材料，通常是采用瓜尔豆胶，并在混合物中添加酶，可以使瓜尔豆胶在几天内降解，留下空隙，形成高渗透性的结构。采用该胶时，安装前先测试地下水的化学性质是否与反应材料和生物泥浆的混合物相适合，以确定生物泥浆能否在合适的时间内得到降解。

采用深层土壤混合法时，一般采用螺旋钻机进行钻挖和回填，随着螺旋钻在土壤中缓慢推进，将生物泥浆和反应材料的混合物注入并与土壤混合。在松散的沉积层中可将反应材料放置到地表下近 50m 处。采用旋喷注入法时，将喷注工具推进到需要的深度，通过管口高压注射反应材料和生物泥浆，连续喷注一系列的钻孔形成可渗透反应墙。垂直水力压裂法是将专用工具放入钻孔中来定向垂直裂缝，利用低速高压水流，将材料注入土壤层，形成裂缝，由一系列并排邻近的钻孔水力压裂形成渗透反应墙。

12.6 运行维护和监测

PRB 建好后，需进行长期观测、运行和管理。其运行维护相对简单，运行过程中仅需在长期监测的基础上对反应介质进行定期更换。为了精确测量监测效果，需在 PRB 上下游及 PRB 内布置监测井观测水位深度变化，并周期性地监测相关的水文地质化学参数、流速等。监测井的布置要保证能够捕获污染羽流的运动方向，因此应在浓度较高或接近反应墙的位置集中布置监测井。常用的监测指标有目标污染物、降解中间产物、ORP（氧化还原电位）、pH 值、Eh、BOD₅、COD 等。

12.7 修复周期及参考成本

PRB 的处理周期较长，一般需要数年，常通过实验室小试或中试确定。其处理成本与 PRB 类型、工程规模等因素相关。据 2012 年 3 月美国海军工程司令部发布的技术报告（编号：TR-NAVFAC-ESC-EV-1207, Permeable reactive barrier cost and performance report），处理地下水的成本介于 1.5-37.0 美元/m³。目前，国内尚无可参考的工程案例成本。

12.8 国外应用情况

12.8.1 国外应用概况

该技术较为成熟，在北美和欧洲等发达国家有较多应用。美国环保署、美国海军工程服务中心等机构已制定并发布了本技术的工程设计手册。根据美国超级基金项目统计，2005-2008 年有 8 个项目使用了该技术。国外部分应用案例信息如表 12-3 所示。

表 12-3 PRB 技术应用案例

序号	场地名称	类型	活性材料	目标污染物
1	安大略	连续反应墙	活性炭	Ni、Fe
2	纽约	连续反应墙	Fe ⁰	TCE

3	北卡罗来纳	连续反应墙	Fe ⁰	Cr ⁶⁺ 、TCE
4	堪萨斯	隔水漏斗-导水门	Fe ⁰	TCE、TCA
5	科罗拉多	隔水漏斗-导水门	Fe ⁰	TCE
6	加利福尼亚	隔水漏斗-导水门	Fe ⁰	TCE、DCE

12.8.2 国外应用案例

(1) 工程背景:

上世纪 90 年代初美国北卡罗来纳州 Elizabeth 城东南 5 公里处海岸警卫飞机场 79 号机库污染场地 Cr⁶⁺和 TCE (三氯乙烯) 污染严重, 位于 Pasquotank 河南岸 60 m。场地之前为一镀铬厂旧址, 使用历史长达 30 多年。在使用过程中排放了酸性含铬废物和有机溶剂, 它们通过混凝土地板上的小洞穿透土壤进入地下含水层。根据监测结果, 该污染羽宽约 35 米, 深至地下 6.3 米, 长约 60 米, 从机库一直延伸至 Pasquotank 河。该场地平面布置图如 12-1 所示。整个监测网络包含 130 多个地下取样点, 安装于 1996 年 11 月, 为 PRB 的布设提供了详实的地球化学孔隙水空间和时间变化数据。修复目标值: Cr⁶⁺ 0.05mg/L; TCE 5 μg/L; c-DCE 70μg/L; VC 2μg/L。

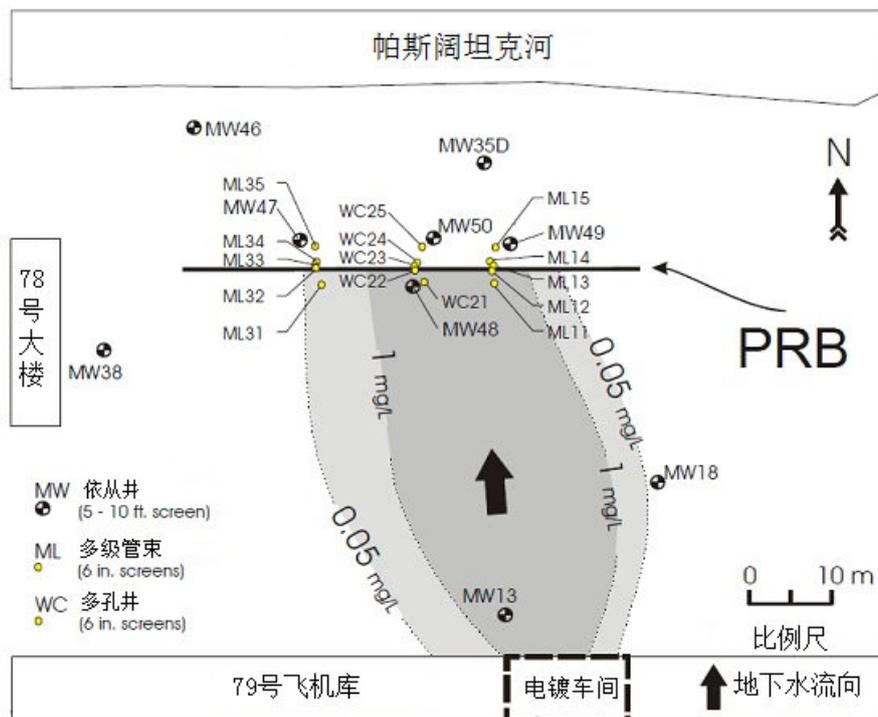


图 12-179 号机库附近的场地平面布置图

(2) 工程规模: 约 13230 m³

(3) 主要污染物及污染程度: 土壤和地下水中的污染物为 Cr⁶⁺和 TCE, 污染调查阶段揭露的最大检出浓度为 14.5 g/kg, 地下水中六价铬最大浓度超过 10 mg/L, TCE 最大浓度 19 mg/L。研究表明, 其在零价铁还原条件下降解性能较好, 因此, 能够采用化学还原的方式进行降解。

(4) 水文地质特征: 对土壤的理化特征测试表明, 含水层上部 2m 为砂质粉性粘土。地下水位介于 1.5m 至 2.0m, 含水层传导性 0.3-9.0m/d, 含水层深度 7.2m, 地下水流速

0.12-0.18m/d, 平均横向水力梯度 0.0011-0.0033, 渗透系数 0.3-8.6m/d。

(5) 技术选择: 综合以上污染物特性、污染物浓度、水文地质特征以及项目修复目标值, 最终选定处理能力大、设备成熟、运行管理简单、无二次污染的 PRB 技术。

(6) 工艺流程和关键设备:

其平面布置如图 12-2 所示:

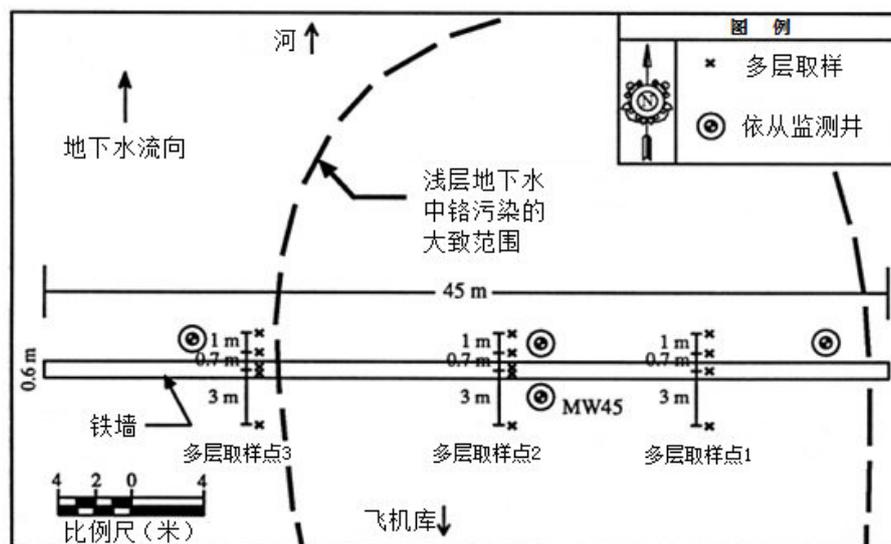


图 12-2 PRB 平面布置图

(7) 主要工艺及设备参数:

对于反应材料的选择, 设计者专门抽取了区域内的地下水进行试验。在第 34 号监测井中测得的 TCE 和 Cr^{6+} 的质量浓度分别为 $750 \mu\text{g/L}$ 和 8mg/L , 为了试验方便, 两者质量浓度分别被提高到 $2000 \mu\text{g/L}$ 和 10mg/L 。在经过批量试验和圆柱试验后, 发现零价铁颗粒混合物对去除 TCE 和 Cr^{6+} 的效果很好, 因此采用零价铁作为反应材料。其中铁颗粒的设计粒径为 0.4mm , 表面积为 $0.8\sim 0.9 \text{m}^2/\text{g}$ 。基于对场地条件、工程使用与维护的方便和成本的要求及长期监测成本的考虑, 该 PRB 工程选择了连续墙的形式。该工程设计要达到的目标为使 Cr^{6+} 的质量浓度降为 0.05mg/L 以下和 TCE 的质量浓度降为 $0.5 \mu\text{g/L}$ 以下。反应墙体为连续墙形式, 填充 450 吨零价铁为反应材料, 大致呈东西走向, 长 46m , 深 7.3m , 宽 0.6m , 墙体垂直于地下水的流向。

(8) 成本分析:

该项目包含建设施工投资、设备投资、运行管理总费用约为 70 万美元, 其中第一年的运行管理费用为 85000 美元, 之后的运行管理费用为 30000 美元/年。据估算, 如果该系统运行 20 年, 将比采用抽出处理系统节省 400 万美元的运行和维护成本。

(9) 修复效果:

该 PRB 建成投产后, 3 年的监测数据显示, 未经处理时 Cr^{6+} 的质量浓度最高达 2mg/L , 而经过 PRB 反应墙后, Cr^{6+} 的质量浓度接近于 0 或者是无法检出; 未经处理的 TCE 质量浓度最高可达 $114 \mu\text{g/L}$, 经过处理后 TCE 的质量浓度最大仅为 $2.9 \mu\text{g/L}$ 。该工程对 Cr^{6+} 和 TCE 的去除效果非常明显, 满足修复要求并通过环保局的修复验收。

案例信息来源于:

(1) Robert WP, David WB, Robert WG. Long-term performance monitoring for a permeablereactive barrier at the U.S. Coast Guard SupportCenter, Elizabeth City, North Carolina. Journal of Hazardous Materials, 1999, 68: 109-124.

(2) Evaluation of Permeable ReactiveBarrier Performance.Member Agencies of theFederal

Remediation Technologies Roundtable, 2002.

12.9 国内应用情况

该技术在我国尚处于中试阶段，缺乏工程应用案例

13 地下水监控自然衰减技术

13.1 技术名称

技术名称：地下水监控自然衰减，英文名称：Groundwater Monitored Natural Attenuation (MNA)

13.2 技术适用性

13.2.1 适用的介质：污染地下水

13.2.2 可处理的污染物类型：碳氢化合物（如 BTEX（苯、甲苯、乙苯、二甲苯）、石油烃、多环芳烃、MTBE（甲基叔丁基醚）、氯代烃、硝基芳香烃、重金属类、非金属类（砷、硒）、含氧阴离子（如硝酸盐、过氯酸）等。

13.2.3 应用限制条件：在证明具备适当环境条件时才能使用，不适用于对修复时间要求较短的情况，对自然衰减过程中的长期监测、管理要求高。

13.3 技术介绍

13.3.1 原理：通过实施有计划的监控策略，依据场地自然发生的物理、化学及生物作用，包含生物降解、扩散、吸附、稀释、挥发、放射性衰减以及化学性或生物性稳定等，使得地下水和土壤中污染物的数量、毒性、移动性降低到风险可接受水平。

13.3.2 系统构成和主要设备：由监测井网系统、监测计划、自然衰减性能评估系统和紧急备用方案四部分组成。

监测井网系统：能够确定地下水中污染物在纵向和垂向的分布范围，确定污染羽是否呈现稳定、缩小或扩大状态，确定自然衰减速率是否为常数，对于敏感的受体所造成的影响有预警作用。监测井设置密度（位置与数量）需根据场地地质条件、水文条件、污染羽范围、污染羽在空间与时间上的分布而定，且能够满足统计分析上可信度要求所需要的数量。建立监测井网系统所需设备包括建井钻机、水井井管等。

监测计划：主要监测分析项目需集中在污染物及其降解产物上。在监测初期，所有监测区域均需要分析污染物、污染物的降解产物及完整的地球化学参数，以充分了解整个场地的水文地质特性与污染分布。后续监测过程中，则可以依据不同的监测区域与目的，做适当的调整。地下水监测频率在开始的前两年至少每季度监测一次，以确认污染物随着季节性变化的情形，但有些场地可能监测时间需要更长（大于 2 年）以建立起长期性的变化趋势；对于地下水文条件变化差异性大，或是易随着季节有明显变化的地区，则需要更密集的监测频率，以掌握长期性变化趋势；而在监测 2 年之后，监测的频率可以依据污染物移动时间以及场地其它特性做适当的调整。主要包括取样设备和监测设备等。

监控自然衰减性能评估：评估监测分析数据结果，判定 MNA 程序是否如预期方向进行，并评估 MNA 对污染改善的成效。MNA 性能评估依据主要来源于监测过程中所得到的检测分析结果，主要根据监测数据与前一次（或历史资料）的分析结果做比对。主要包括：（1）自然衰减是否如预期的正在发生；（2）是否能监测到任何降低自然衰减效果的环境状况改变，包括水文地质、地球化学、微生物族群或其它的改变；（3）能判定潜在或具有毒性或移动性的降解产物；（4）能够证实污染羽正持续衰减；（5）能证实对于下游潜在受体不会有无法接受的影响；（6）能够监测出新的污染物释放到环境中，且可能会影响到 MNA 修复的效果；（7）能够证实可以达到修复目标。

紧急备用方案：紧急备用方案是在 MNA 修复法无法达到预期目标，或是当场地内污染有恶化情形，污染羽有持续扩散的趋势时，采用其它土壤或地下水污染修复工程，而不是仅以原有的自然衰减机制来进行场地的修复工作。当地下水中出现下列情况时，需启动紧急备案。（1）地下水中污染物浓度大幅度增加或监测井中出现新的污染物；（2）污染源附近采样结果显示污染物浓度有大幅增加情形，表示可能有新的污染源释放出来；（3）在原来污染羽边界以外的监测井发现污染物；（4）影响到下游地区潜在的受体；（5）污染物浓度下降速率

不足以达到修复目标；(6) 地球化学参数的浓度改变，导致生物降解能力下降；(7) 因土地或地下水使用改变，造成污染暴露途径。

13.3.3 关键技术参数或指标

(1) 场地特征污染物。自然衰减的机制有生物性和非生物性作用，需要根据污染物的特性评估自然衰减是否存在；不同污染物的自然衰减机制和评估所需参数，包括地质与含水层特性、污染物化学性质、原生污染物浓度、总有机碳、氧化还原反应条件、pH 值与有效性铁氢氧化物浓度、场地特征参数（如微生物特征、缓冲容量等）

(2) 污染源及受体的暴露位置：开展监控自然衰减修复技术时，需确认场地内的污染源、高污染核心区域、污染羽范围及邻近可能的受体所在位置，包含平行及垂直地下水流向上任何可能的受体暴露点，并确认这些潜在受体与污染羽之间的距离。

(3) 地下水水流及溶质运移参数：在确认场地有足够的条件发生自然衰减后，须利用水力坡度、渗透系数、土壤质地和孔隙率等参数，模拟地下水的水流及溶质运移模型，估计污染羽的变化与移动趋势。

(4) 污染物衰减速率：多数常见的污染物的生物衰减是依据一阶反应进行，在此条件下最佳的方式是沿着污染羽中心线（沿着平行地下水流方向），在距离污染源不同的点位进行采样分析，以获取不同时间及不同距离的污染物浓度来计算一阶反应常数。重金属类污染物可以通过同位素分析方法获取自然衰减速率，对同一点位的不同时间进行多次采样分析，并由此判断自然衰减是否足以有效控制污染带扩散。通过重金属的存在形态，判定自然衰减的发生和主要过程。若无法获取当前数据也可以参考文献报告数据获取污染物衰减速率。

13.4 技术应用基础和前期准备

在利用 MNA 进行场地修复前，应进行相应的场地特征详细调查，以评估该技术是否适用，并为监测井网设计提供基础参数。场地特征详细调查主要确认信息包括污染物特性、水文地质条件及暴露途径和潜在受体。调查结果必须能够提供完整的场地特征描述，包括污染物分布情况与场地的水文地质条件，以及其它进行 MNA 可行性评估所需要的信息。取得相关的地质、生物、地球化学、水文学、气候学与污染分析数据后，可以利用二维或三维可视化模型展示场地内污染物分布情形、高污染源区附近地下环境、下游未受污染地区的状态、地下水流场以及污染传输系统等，即建立场地特征概念模型。

取得场地数据后，利用污染传输模式或是自然衰减模式进行模拟，并与实际场地特征调查结果进行验证，修正先前所建立的场地概念模型；如果场地差异性较大时，可以适当修正模型所有的相关参数，并重新进行模拟。在后续执行 MNA 过程中，如取得最新的监测数据资料，也应随时修正场地概念模型，以便精确评估及预测 MNA 修复效果。

在完成初步评估、污染迁移与归趋模拟之后，需要进行可能受体暴露途径分析，界定出可能潜在的人体与生物受体或是其它自然资源，结合现有与未来的土地和地下水使用功能，分析其可能产生的危害风险。通过对场地的风险评估，明确健康风险。如果暴露途径的分析结果表明，对于人体健康及自然环境并不会产生危害的风险，且能够在合理的时间内达到修复目的，则开始设计长期性的监测方案，完成 MNA 可行性评估，开展监控自然衰减修复技术的具体实施。

13.5 主要实施过程

(1) 初步评价监控自然衰减的可行性；(2) 构建地下水监测系统；(3) 制定监测计划；(4) 详细评价监控自然衰减的效果；提供进一步的标准来确认是否监控自然衰减可能是有效的。完成效果评估后，需要审查监控数据、污染物的化学和物理参数及现场条件，确定场地组成特征；(5) 制定应急方案。在监控过程中，在合理时间框架下，若发现 MNA 无效时，则需要执行应急方案。

13.6 运行维护和监测

场地特征调查所需的时间较长。由于存在经自然衰减后产生毒性或移动性更大的物质的可能，需要对修复过程采取严密的监测和管制措施；密切观测污染物的迁移、转化过程，适时评估动态结果，及时调整监测和管制策略。

13.7 修复周期及参考成本

相较于其它修复技术，监控自然衰减技术所需时间较长，需要数年或更长时间。

主要成本为场地监测井群建立、环境监测和场地管理费用。根据国外经验，若场地预期监测期程长，监测计划规模大，过程中无法避免采取应变措施，甚至因为监控自然衰减法失败，造成污染物扩散，需重新采取积极性的修复措施等，种种因素均可能造成总整治经费变化很大。

根据美国实施的 20 个案例统计，单个项目费用为 14-44 万美元。目前国内尚无工程应用，没有成本参考。

13.8 国外应用情况

美国超级基金场地地下水修复技术统计结果显示，从 1986 年，监控自然衰减技术逐年增加。在 2005-2008 年实施修复的 164 个场地中，应用监控自然衰减技术的比例高达 56%，其中单独使用的场地有 21%。主动修复和被动修复自然衰减技术配套使用已成为地下水污染修复的发展趋势，配套监控自然衰减的技术路线有抽出处理（场地占 10%），原位处理（场地占 17%），原位处理、抽出处理（场地占 8%）。

13.9 国内应用分析

监控自然衰减技术在我国地下水环境的治理中还处于萌芽阶段，尚无工程应用案例。

14 多相抽提技术

14.1 技术名称

技术名称：多相抽提，英文名称：Multi-Phase Extraction (MPE)

14.2 技术适用性

14.2.1 适用的介质：污染土壤和地下水

14.2.2 可处理的污染物类型：适用于易挥发、易流动的 NAPL（非水相液体）（如汽油、柴油、有机溶剂等）。

14.2.3 应用限制条件：不宜用于渗透性差或者地下水水位变动较大的场地。

14.3 技术介绍

14.3.1 原理：通过真空提取手段，抽取地下污染区域的土壤气体、地下水和浮油层到地面进行相分离及处理，以控制和修复土壤与地下水中的有机污染物。

14.3.2 系统构成和主要设备：MPE 系统通常由多相抽提、多相分离、污染物处理三个主要部分构成。系统主要设备包括真空泵（水泵）、输送管道、气液分离器、NAPL/水分离器、传动泵、控制设备、气/水处理设备等。

多相抽提设备是 MPE 系统的核心部分，其作用是同时抽取污染区域的气体和液体（包括土壤气体、地下水和 NAPL），把气态、水溶态以及非水溶性液态污染物从地下抽吸到地面上的处理系统中。多相抽提设备可以分为单泵系统和双泵系统。其中单泵系统仅由真空设备提供抽提动力，双泵系统则由真空设备和水泵共同提供抽提动力。

多相分离指对抽出物进行的气-液及液-液分离过程。分离后的气体进入气体处理单元，液体通过其他方法进行处理。油水分离可利用重力沉降原理除去浮油层，分离出含油量低的水。

污染物处理是指经过多相分离后，含有污染物的流体被分为气相、液相和有机相等形态，结合常规的环境工程处理方法进行相应的处理处置。气相中污染物的处理方法目前主要有热氧化法、催化氧化法、吸附法、浓缩法、生物过滤及膜法过滤等。污水中的污染物处理目前主要采用膜法（反渗透和超滤）、生化法（活性污泥）和物化法等技术，并根据相应的排放标准选择配套的水处理设备。

14.3.3 关键技术参数或指标：评估 MPE 技术适用性的关键技术参数主要分为水文地质条件和污染物条件两个方面，关键参数适宜范围如表 14-1 所示。

表 14-1 MPE 技术关键参数

	关键参数	单位	适宜范围
场 地 参 数	渗透系数(K)	cm/s	$10^{-3} \sim 10^{-5}$
	渗透率	cm^2	$10^{-8} \sim 10^{-10}$
	导水系数	cm^2/s	0.72
	空气渗透性	cm^2	$< 10^{-8}$
	地质环境	/	砂土到粘土
	土壤异质性	/	均质
	污染区域	/	包气带、饱和带、毛 细管带
	包气带含水率	/	较低
	地下水埋深	英寸	> 3
	土壤含水率（生物通风）	饱和持水量	40~60%
	氧气含量（好氧降解）		$> 2\%$
污 染 物	饱和蒸气压	mm Hg	$> 0.5 \sim 1$
	沸点	$^{\circ}\text{C}$	$< 250 \sim 300$
	亨利常数	无量纲	$> 0.01 (20^{\circ}\text{C})$

性质	土-水分配系数	mg/kg	适中
	LNAPL 厚度	cm	>15
	NAPL 粘度	cp	<10

14.4 技术应用基础和前期准备

在技术应用前，需开展可行性测试，以对其适用性和效果进行评价和提供设计参数。参数包括：土壤性质（渗透性、孔隙率、有机质等）、土壤气压、地下水水位、污染物在土、水、气相中的浓度、生物降解参数（微生物种类、氮磷浓度、O₂、CO₂、CH₄ 等）、地下水水文地球化学参数（氧化还原电位、pH、电导率、溶解氧、无机离子浓度等）、NAPL 厚度和污染面积、汽/液抽提流量、井头真空度、NAPL 回收量、污染物回收量、真空影响半径等。

14.5 主要实施过程

(1) 建立地下水抽提井，井与井间距应在水力影响半径范围内。对于有 DNAPL（高密度非水相液体）存在的场地，抽提井的深度应达到隔水层顶部。(2) 整个抽提管路应保持良好的密闭性，包括井口、管路、接口等。抽提开始后，根据观测流量，调节真空度及抽提管位置，使系统稳定运行。对尾气排放口的挥发性有机物应进行监测，如浓度明显增大应停止抽提，更换活性炭罐中的活性炭。(3) 观察维护油水分离器，确保油水分离效果，并对水、油分别进行收集、处理、处置。

14.6 运行维护和监测

运行维护包括 NAPL 收集、抽提井真空度调节、活性炭更换、沉积物清理、仪表和电路及管路检修和校正等。同时，为有效地评估 MPE 对地下环境的影响，需在运行过程中持续监测系统的物理及机械参数（抽提井和监测井内的真空度、抽提井内的地下水降深、抽提地下水体积、单井流量、风机进口流量、抽提井附近地下水位变化等）、化学指标（气相污染物浓度、气/水排放口污染物浓度、抽提地下水污染物浓度、NAPL 组成变化等），以及生物相关指标（溶解性气体、氮和磷浓度、pH 值、氧化还原电位、微生物数量等）。此外，为避免二次污染，应对废水/尾气处理设施的效果进行定期监测，以便及时采取应对措施。

14.7 修复周期及参考成本

MPE 技术的处理周期与场地水文地质条件和污染物性质密切相关，一般需通过场地中试确定。通常应用该技术清理污染源区的速度相对较快，一般需要 1-24 月的时间。其处理成本与污染物浓度和工程规模等因素相关，具体成本包括建设施工投资、设备投资、运行管理费用等支出。根据国内中试工程案例，每处理 1 千克 LNAPL（低密度非水相液体）的成本约为 385 元。

14.8 国外应用情况

MPE 技术在国外已被广泛应用，技术相对比较成熟，国外部分应用案例信息如表 14-2 所示。同时，美国陆军工程部等机构已制定并发布了本技术的工程设计手册。

表 14-2 MPE 技术国外应用案例

序号	场地名称	NAPL	处理前污染物浓度	处理后污染物浓度	处理范围	处理深度
1	美国印第安纳某加油站	LNAPL	苯: 21 ppm	未检出	169760 ft ³	10-20 ft
2	捷克某空军基地	LNAPL	PCE: 0.4 ppm	PCE: 0.1 ppm	22030 lbs	26 ft
3	美国加利福尼亚某工业场地	LNAPL DNPAL	TCE: 7-20 ppm	TCE: 0.46-0.88 ppm	4500 ft ³	3.5-13 ft

4	美国俄克拉荷马某军事基地	LNAPL	燃油: 8.6 加仑 /天	燃油: 1.2 加仑 /天	5000000 ft ³	25-31 ft
---	--------------	-------	---------------	---------------	-------------------------	----------

14.9 国内案例分析

14.9.1 国内应用情况

国内对 MPE 技术处理污染土壤和地下水的工程应用起步较晚，仅有少数中试研究，尚无大规模的工程应用示范和自主研发的 MPE 设备。

14.9.2 国内案例介绍

(1) 工程背景：我国某化工企业历史上曾发生化工原料泄漏事故，场地环境调查发现厂区大面积的土壤和地下水受到了甲苯的污染，并在发生泄漏的化学品仓库下发现了明显的轻质非水相流体 (LNAPL) 污染物。该修复工程的工期要求为 2 年，修复目标为甲苯浓度降至饱和溶解度的 1% 以下，以便进一步开展原位修复技术。

(2) 工程规模：中试工程，227.5m³

(3) 主要污染物及污染程度：土壤和地下水中的污染物为甲苯，污染调查阶段揭露的甲苯 LNAPL 层厚度为 7.8~64.1cm，涉及区域面积约 350m²。

(4) 水文地质特征：根据现场地面以下 5m 内的钻孔试验结果确定场地浅层地质基本情况：0~0.9m 深度为混凝土；0.9~2.0m 深度以粉质粘土为主，夹杂碎石，潮湿；2.0~3.0m 深度为粉质粘土，潮湿至饱水状态；3.0~5.0m 深度为砂质粉土，饱水。潜水位在地下 1.8~2.2m，流向为由东向西，水力梯度约为 0.5‰，现场粉质粘土层横向渗透系数为 0.012m/天，砂质粉土层横向渗透系数为 0.15m/天。

(5) 技术选择：

该污染场地污染物为甲苯，是一种挥发性有机污染物，不易溶于水，且在该场地地下水中浓度已超过自身溶解度，形成了 LNAPL 相。该污染物特征符合多相抽提技术适用的污染物类型，因此，可选用多相抽提技术处理该污染场地。

(6) 工艺流程：抽提装置由气水分离器、真空泵、活性炭吸附器及相应的管路和仪表系统构成，工艺流程见图 14-1。

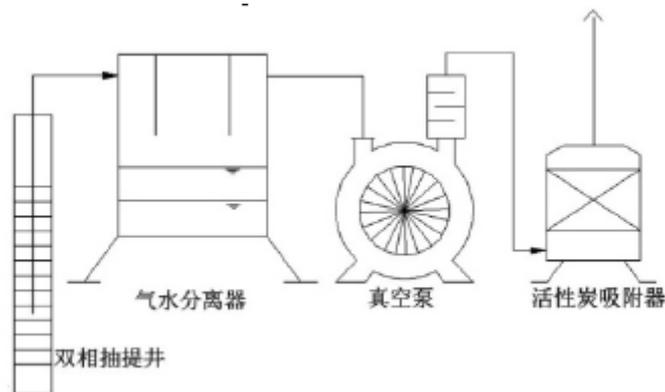


图 14-1 工艺流程

具体的流程为：抽提井中的 LNAPL 和受污染的地下水首先会通过真空泵被抽出地面；在抽提井附近区域的 LNAPL 会随着地下水对井的补给一起进入抽提井内而被抽出。被真空泵抽出的土壤气体、地下水以及 LNAPL 会在气水分离器内进行气水分离，分离出的气相部分通过活性炭吸附处理后排入大气，分离出的液相部分则在气水分离器内进一步通过重力作用分离，得到的上层 LNAPL 污染物作为危险废物处置，下层受污染的地下水则送现场污水处理站处理后达标排放。

(7) 关键设备及工艺参数：抽提井采用 UPVC 材质，井径 25 mm，井深 3.5 m，其中

筛管位于地下 1 m 至地下 3 m 的位置。多相抽提中试系统的运行以单个抽提井逐一轮流抽提方式进行，总共运行 25 天。单个抽提井每天的抽提时间在 0.5 小时内，25 天的累积抽提时间共约 8 小时。抽提时系统真空度控制在-0.065MPa，抽提井井头真空度控制在-0.03MPa，平均气体抽提流量为 80~100 升/分钟 (L/min)。

(8) 成本分析：去除 1 千克 LNAPL 的费用约为 385 元。

(9) 修复效果：在 25d 的运行时间内，多相抽提系统从 9 口井中总共抽出约 720 升流体 (LNAPL 和部分受污染的地下水)，通过不同方式总共去除甲苯污染物约 125kg。中试前后 LNAPL 厚度变化见表 14-3。单个抽提井中甲苯平均去除速率约为 1.75 千克/小时。甲苯大部分以 LNAPL 形式去除。由中试运行结果可知，多相抽提装置对场地 LNAPL 污染物的去除有较好的效果。多相抽提系统的抽提影响半径约 6.0m，系统运行过程中场地的地下水水位与系统运行前相比略有下降。由于中试工程在 25 天内已取得了较好的修复效果，因此，可以预期在 2 年内利用该技术可将该污染场地地下水中甲苯的浓度降至饱和溶解度的 1%以下，即无 LNAPL 存在，并达到修复目标。

表 14-3 MPE 处理前后抽提井中 LNAPL 厚度变化

抽提井	LNAPL 厚度 (cm)	
	处理前	处理后
1	16.2	0.5
2	39.2	3.5
3	14.3	0.4
4	12.7	<0.1
5	19.5	1.1
6	7.8	<0.1
7	15.4	1.4
8	64.1	2.7
9	8.0	<0.1

(案例提供单位：上海格林曼环境技术有限公司)

15 原位生物通风技术

15.1 技术名称

技术名称：原位生物通风，英文名称：In Situ Bioventing

15.2 技术适用性

15.2.1 适用的介质：非饱和带污染土壤

15.2.2 可处理的污染物类型：挥发性、半挥发性有机物。

15.2.3 应用限制条件：不适合于重金属、难降解有机物污染土壤的修复，不宜用于粘土等渗透系数较小的污染土壤修复。

15.3 技术介绍

15.3.1 原理：生物通风法由土壤气相抽提法（SVE）发展而来，通过向土壤中供给空气或氧气，依靠微生物的好氧活动，促进污染物降解；同时利用土壤中的压力梯度促使挥发性有机物及降解产物流向抽气井，被抽提去除。可通过注入热空气、营养液、外源高效降解菌剂的方法对污染物去除效果进行强化。

15.3.2 系统构成和主要设备：生物通风系统主要由抽气系统、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组成。

主要设备包括输气系统（鼓风机、输气管网等）、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）、营养水分调配系统（包括营养水分添加管网、添加泵、营养水分存储罐等）、在线监测系统及配套控制系统、尾气处理系统（除尘器、活性炭吸附塔）等。

15.3.3 关键技术参数或指标

影响生物通风技术修复效果的因素包括：土壤理化性质、污染物特性和土壤微生物三大类。

（1）土壤理化性质因素

土壤的气体渗透率：土壤的渗透率一般应该大于 0.1 达西。

土壤含水率：一般认为含水率达到 15-20%时，生物修复的效果最好。

土壤温度：大多数生物修复是在中温条件（20-40℃）下进行的，最大不超过 40℃。

土壤的 pH：大多数微生物生存的 pH 范围为 5-9，通常酸碱中性条件下微生物对污染物降解效果较好。

营养物的含量：一般认为，利用微生物进行修复时，土壤中 C:N:P 的比例应维持在 100:5-10:1，以满足好氧微生物的生长繁殖以及污染物的降解，并为缓慢释放形式时，效果最佳。一般添加的 N 源为 NH_4^+ ，P 源为 PO_4^{3-} 。

土壤氧气/电子受体：氧气作为电子受体，其含量是生物通风最重要的环境影响因素之一。在生物通风修复中，除了用空气提供氧气外，还可采用 H_2O_2 、 Fe^{3+} 、 NO_3^- 或纯氧作为电子受体。

（2）污染物特性因素

污染物的可生物降解性：生物降解性与污染物的分子结构有关，通常结构越简单，分子量越小的组分越容易被降解。此外，污染物的疏水性、与土壤颗粒的吸附以及微孔排斥都会影响污染物的可生物降解性。

污染物的浓度：土壤中污染物浓度水平应适中。污染物浓度过高会对微生物产生毒害作用，降低微生物的活性，影响处理效果；污染物浓度过低，会降低污染物和微生物相互作用的几率，也会影响微生物的降解率。

污染物的挥发性：一般来说挥发性强的污染物通过通风处理易从土壤中脱离。

（3）土壤微生物因素

一般认为采用生物降解技术对土壤进行修复时土壤中土著微生物的数量应不低于 10^5 数量级；但是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，需考虑接种高效菌。

15.4 技术应用基础和前期准备

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，目的在于评估生物通风技术是否适合于场地的修复并为修复工程设计提供基础参数，测试参数包括：土壤温度、土壤湿度、土壤 pH 值、营养物质含量、土壤氧含量、渗透系数、污染物浓度、污染物理化性质、污染物生物降解系数（或呼吸速率）、土著微生物数量等，可在实验室开展相应的小试或中试实验。

15.5 主要实施过程

在需要修复的污染土壤中设置注射井及抽提井，安装鼓风机/真空泵，将空气从注射井注入土壤中，从抽提井抽出。大部分低沸点、易挥发的有机物直接随空气一起抽出，而高沸点、不易挥发的有机物在微生物的作用下，可以被分解为 CO_2 和 H_2O 。在抽提过程中注入的空气及营养物质有助于提高微生物活性，降解不易挥发的有机污染物（如原油中沸点高、分子量大的组分）。定期采集土壤样品对目标污染物的浓度进行分析，掌握污染物的去除速率。

15.6 运行维护和监测

生物通风技术的运行维护较简单，运行过程中需对鼓风机、真空泵、管道阀门进行相应的运行维护。同时，为了解土壤中污染物的去除速率及微生物的生长环境，运行过程中需定期对土壤氧气含量、含水率、营养物质含量、土壤中污染物浓度、土壤中微生物数量等指标进行监测。同时，为避免二次污染，应对尾气处理设施的效果进行定期监测，以便及时采取相应的应对措施。

15.7 修复周期及参考成本

生物通风技术的处理周期与污染物的生物可降解性相关，一般处理周期为 6-24 月。其处理成本（包括通风系统、营养水分调配系统、在线监测系统）与工程规模等因素相关，根据国外相关场地的处理经验，处理成本约为 13-27 美元/ m^3 （土壤 10000cy，约合 7646 m^3 ）。

15.8 国外应用情况

生物通风技术可以修复的污染物范围广泛，修复成本相对低廉，尤其对修复成品油污染土壤非常有效，包括汽油、喷气式燃料油、煤油和柴油等的修复。国外部分应用案例信息如表 15-1 所示。

表 15-1 生物通风技术应用案例

序号	场地名称	目标污染物	规模
1	美国犹他州空军基地	90 吨航空燃料油	30000 m^3
2	美国内布拉斯加州油泄漏场地	柴油	11500 m^3
3	美国能源部的萨凡纳河场地	氯代脂肪烃	不详
4	美国空军部下属 50 个空军基地共 142 个场地	石油烃	不详

15.9 国内应用分析

该技术在国内外实际修复或工程示范极少，尚处于中试阶段，缺乏工程应用经验和范例。