

# 广州市工业企业场地土壤污染修复 治理技术汇编（2018年版）

广州市环境技术中心

二〇一八年七月



## 前 言

为贯彻《国务院关于印发土壤污染防治行动计划的通知》（国发〔2016〕31号），落实《广东省人民政府关于印发广东省土壤污染防治行动计划实施方案的通知》（粤府〔2016〕145号）、《广州市人民政府关于印发广州市土壤污染防治行动计划工作方案的通知》（穗府〔2017〕13号）中关于筛选、推广区域性适用土壤修复技术的要求，广州市环境技术中心基于我市工业企业场地污染特点及土壤修复工程实践，并借鉴国内外相关污染土壤修复经验，组织编制了《广州市工业企业场地土壤污染修复治理技术汇编》（2018年版）（以下简称汇编）。

当前已开展的工业企业地块场地环境调查结果显示，我市场地土壤污染以重金属、多环芳烃、石油烃、挥发性有机物为主；场地内土壤质地以粘壤土为主，伴有部分粘土和砂质土，地下水埋藏普遍较浅，交换频繁，污染物迁移扩散情况复杂，具有明显的地域性特征。

近年来，广州市工业企业场地再开发利用任务繁重、时间紧迫，场地修复相关方对修复技术了解不充分，决策较困难。综合考虑上述因素，本次汇编共筛选了12种现阶段适用于我市的土壤修复技术，旨在为相关方进行污染土壤修复技术决策时提供参考，以进一步增强污染场地修复治理技术选取的针对性和合理性，促进土壤污染治理与场地再开发利用相协调。

本汇编分为技术目录和技术介绍两部分。第一部分技术目录中，以列表形式对每项技术的名称、适用性、修复周期、参考费用、技术优点与局限性、污染防治重点进行简介，以方便使用者对各修复技术进行快速查阅了解。第二部分技术介绍中，细化说明了各项修复技术的原理、适用性、应用情况、系统构成、主要设备、关键技术参数、主要实施过程、修复周期、参考费用、污染防治重点等内容，对于其中较为成熟的技术，还提供了相关的应用案例介绍，以便使用者深入了解。

场地修复的对象具有显著的异质性、独特性和不确定性，污染土壤修复治理技术的选择是根据场地特征、技术水平、管理要求和社会经济等多因素进行综合平衡的结果，本汇编中的部分内容存在一定的时间局限性，后续将根据技术进步与行业发展情况适时进行更新、补充。

本汇编为技术指引性文件，供广州市工业企业场地污染土壤修复治理相关方决策参考，不属于强制性技术要求。

本汇编由广州市环境技术中心组织编制及负责解释，并适时修订公布。

本汇编起草单位：广州市环境技术中心、广东环境保护工程职业学院。

# 目 录

第一部分 技术目录.....	1
第二部分 技术介绍.....	13
1、异位固化/稳定化技术 .....	15
2、水泥窑协同处置技术 .....	21
3、异位热脱附技术 .....	28
4、异位化学氧化技术 .....	35
5、阻隔技术 .....	41
6、原位固化/稳定化技术 .....	46
7、土壤洗脱技术 .....	53
8、常温解吸技术 .....	56
9、原位化学氧化技术 .....	60
10、原位热解吸技术 .....	66
11、生物堆技术 .....	69
12、原位生物通风技术 .....	74



# 第一部分 技术目录



序号	技术名称	适用性	修复周期	参考费用	优点及局限性	污染防治重点
1	异位固化/稳定化技术	<p><b>可处理的污染物类型：</b> 主要适用于重金属及砷化合物等污染物。有时也用于石棉、部分氰化物和有机污染物。</p> <p><b>应用限制条件：</b> 一般不适用于单质汞、挥发性氰化物、挥发性有机污染物。</p>	根据广州市及国内其他地区现有案例，工程修复时间为4-6个月。	<p><b>主要费用组成：</b> 土方工程、修复实施、二次污染防治措施等。</p> <p>综合单价约为850-1200元/m<sup>3</sup>。</p>	<p><b>优点：</b> 技术成熟、应用广泛、处理时间短。</p> <p><b>局限性：</b> 1 不降低污染物总量，不适用于以总量为验收标准的修复情形； 2 一般需配合阻隔技术使用，并进行长期监控； 3 需根据规划和地块用途协调落实阻隔回填区域，且未来存在被扰动的风险； 4 对于场地地下基础复杂的地块，工程施工成本较高。</p>	<p>1 固化/稳定化修复作业应在具有防渗、防雨和防风的空间内进行；</p> <p>2 阻隔回填区应采用不少于四层的封闭结构，由外至内宜分别为钢筋混凝土、土工布、HDPE膜、土工布；</p> <p>3 选用环境友好型的固化/稳定化药剂；</p> <p>4 如采用浸出方式验收，目标污染物浸出浓度需达到《地下水质量标准》（GB/T 14848）III类标准。</p>

序号	技术名称	适用性	修复周期	参考费用	优点及局限性	污染防治重点
2	水泥窑协同处置技术	<p><b>可处理的污染物类型：</b> 主要适用于挥发及半挥发性有机污染物(如石油烃、农药、多环芳烃、多氯联苯等)、重金属等。</p> <p><b>应用限制条件：</b> 对重金属入窑浓度有限制，需满足《水泥窑协同处置固体废物环境保护技术规范》（HJ 662）相关要求；使用该技术时，还需考虑污染土壤中氯、氟和硫的含量，以确定污染土壤的添加比例；必要时需对水泥窑进料系统和尾气处理系统进行改造。</p>	<p>受污染土壤添加比例、水泥产能产量及水泥厂协同情况影响较大。</p> <p>根据广州市及国内其它地区现有案例，工程修复时间为6-8个月。</p>	<p><b>主要费用组成：</b> 土方工程、预处理及转运、水泥厂暂存及协同处置、二次污染防治措施等。</p> <p>综合单价受水泥厂协同处置费用影响较大，目前综合单价约为900-1200元/m<sup>3</sup>。</p>	<p><b>优点：</b> 技术成熟，适用范围较广，原场地周转较快，对有机污染物处置彻底，可实现资源化。</p> <p><b>局限性：</b> 1 需协调水泥厂进行处置，目前广州境内水泥厂协同处置污染土壤的处理能力不足； 2 耗能较大，对于含水率高、热值低的土壤需要消耗更多能量。</p>	<p>1 在预处理、运输、修复等环节做好污染防治措施；</p> <p>2 需对水泥窑尾气进行定期监测；</p> <p>3 对有异味的污染土壤，在开挖、转运、暂存、处置等过程中应做好异味控制措施，符合相关环保要求；</p> <p>4 对污染土壤的清挖、场内暂存、预处理、出场、运输、接收、水泥厂暂存和协同处置等应进行全过程环境管理。</p>

序号	技术名称	适用性	修复周期	参考费用	优点及局限性	污染防治重点
3	异位热脱附技术	<p><b>可处理的污染物类型：</b> 石油烃、挥发性有机物、半挥发性有机物、多氯联苯、呋喃、杀虫剂等。</p> <p><b>应用限制条件：</b> 不适用于腐蚀性有机物、高活性氧化剂和还原剂含量较高的土壤，亦不适用于含有汞、砷、铅等复合污染土壤。</p>	<p>根据广州市及国内其他地区现有案例，设备安装调试时间为3个月左右，工程修复时间为4-6个月（直接热脱附）。</p>	<p><b>主要费用组成：</b> 土方工程、修复实施、二次污染防治措施等。</p> <p>综合单价约为1000-1500元/m<sup>3</sup>。</p>	<p><b>优点：</b> 处理量大，修复效果好，修复效率高。</p> <p><b>局限性：</b> 1 处理效率受土壤性质影响较大，对预处理要求较高； 2 设备耐高温、耐磨损要求高，安装调试时间长，设备设施成本高，能耗高，需协调能源来源； 3 对小体量污染土壤修复项目技术经济性较差； 4 粘土含量高或含水率较大的土壤需进行预处理，增加处理费用。</p>	<p>1 清挖、运输、预处理过程中应做好控制，防止扬尘与挥发性有机物污染；</p> <p>2 土壤修复过程中应采取有效措施防止二噁英的产生；</p> <p>3 预处理环节应做好密封措施，需对废气进行处理；直接热脱附尾气宜采用二次燃烧+冷凝+除尘处理后达标排放。</p>

序号	技术名称	适用性	修复周期	参考费用	优点及局限性	污染防治重点
4	异位化学氧化技术	<p><b>可处理的污染物类型：</b> 石油烃、苯系物(苯、甲苯、乙苯、二甲苯等)、酚类、甲基叔丁基醚、含氯有机溶剂等污染物。</p> <p><b>应用限制条件：</b> 一般不适用于重金属污染的土壤修复。</p>	根据广州市及国内其他地区现有案例,工程修复时间为6-8个月。	<p><b>主要组成费用：</b> 开挖、运输、预处理、修复及养护等。</p> <p>综合单价约为700-1100 元/m<sup>3</sup>。</p>	<p><b>优点：</b> 技术成熟，国内应用较广泛；处理工艺简单；修复费用较低；适用污染物范围较广。</p> <p><b>局限性：</b> 1 可能会产生有毒有害的中间产物； 2 需关注药剂残留问题； 3 药剂使用不当可能产生安全问题。</p>	<p>1 清挖、运输过程中做好控制，防止扬尘与挥发性有机物污染；</p> <p>2 相较于其它技术，化学氧化技术二次污染较低，但预处理、修复等环节应做好密封措施，防止异味逸散；</p> <p>3 应选用环境友好型的药剂。</p>
5	阻隔技术	<p><b>可处理的污染物类型：</b> 主要适用于重金属、有机污染物及复合污染土壤。</p> <p><b>应用限制条件：</b> 用于腐蚀性、挥发性较强的污染物时，环境风险相对较大。</p>	根据广州市及国内其他地区现有案例,工程实施时间为2-3个月。	<p><b>主要费用组成：</b> 阻隔工程建设费（视阻隔工程结构而定，具体以土建定额为准）。</p> <p>综合单价约为400-600 元/m<sup>3</sup>。</p>	<p><b>优点：</b> 技术成熟、应用广泛、成本较低、实施周期短。</p> <p><b>局限性：</b> 1 存在污染物泄漏风险； 2 阻隔回填所占用区域将对场地开发利用产生影响； 3 阻隔回填区应避开地质条件较差的区域。</p>	<p>1 如进行开挖，应做好抑尘等环保措施；</p> <p>2 应在阻隔区域地下水上下游设置地下水监测井，进行长期监测，监控目标污染物的浓度变化情况，了解阻隔区域对周围环境的影响，及时响应不利状况；</p> <p>3 需避免对阻隔措施造成扰动。</p>

序号	技术名称	适用性	修复周期	参考费用	优点及局限性	污染防治重点
6	原位固化/稳定化技术	<p><b>可处理的污染物类型：</b> 主要适用于重金属及砷化合物等污染物。有时也用于石棉、氰化物及部分有机污染物。</p> <p><b>应用限制条件：</b> 一般不适用于单质汞、挥发性氰化物、挥发性有机污染物。</p>	根据广州市及国内其他地区现有案例，工程修复时间 3-4 个月。	综合单价约为 500-800 元/m <sup>3</sup> 。	<p><b>优点：</b> 技术成熟、应用广泛、处理时间短、费用低；无需进行开挖。</p> <p><b>局限性：</b> 1 不降低污染物总量，不适用于以总量为验收标准的修复情形； 2 一般需配合阻隔技术使用，并进行长期监控； 3 修复效果存在一定不确定性； 4 未来存在被扰动的风险； 5 受当地水文地质条件影响较大；不适用于未来将要开挖或其它扰动的情形。</p>	<p>1 修复区域周边应设置止水帷幕，渗透系数应小于 10<sup>-7</sup>cm/s，并在顶部采取相应防渗措施；</p> <p>2 应选用环境友好型的固化/稳定化药剂；</p> <p>3 如采用浸出方式验收，目标污染物浸出浓度需达到《地下水质量标准》（GB/T 14848）III类标准。</p>

序号	技术名称	适用性	修复周期	参考费用	优点及局限性	污染防治重点
7	土壤洗脱技术	<p><b>可处理的污染物类型：</b> 主要适用于重金属和部分半挥发性有机污染物。</p> <p><b>应用限制条件：</b> 不适用于含有挥发性有机污染物或污染废渣的土壤。</p>	<p>根据广州市及国内其他地区现有案例，工程修复时间为3-4个月。</p>	<p><b>主要费用组成：</b> 土方工程、筛分、洗脱及二次污染防治等。</p> <p>综合单价约为400-600元/m<sup>3</sup>。</p>	<p><b>优点：</b> 1 污染土壤减量化效果明显； 2 可有效降低土壤中污染物总量； 3 实施费用低。</p> <p><b>局限性：</b> 1 需配合其他技术处理洗脱后剩余的高污染土壤； 2 系统构成复杂，占地面积大； 3 需协调落实污水排放去向； 4 对小体量污染土壤项目及细颗粒含量较高的土壤技术经济性较差。</p>	<p>1 洗脱作业场地需进行防渗处理；</p> <p>2 洗脱废水需进行处理并达标排放。</p>

序号	技术名称	适用性	修复周期	参考费用	优点及局限性	污染防治重点
8	常温解吸技术	<p><b>可处理的污染物类型：</b>主要适用于易挥发的有机污染物。</p> <p><b>应用限制条件：</b>不适用于重金属和挥发性较弱的有机污染物。</p>	<p>根据国内其他地区现有案例，工程修复时间约为3-4个月。</p>	<p><b>主要组成费用：</b>修复设备设施建设、土壤开挖、运输、修复处理、二次污染防控等</p> <p>综合单价约为500-600元/m<sup>3</sup>。</p>	<p><b>优点：</b> 简单易行，修复费用低，修复周期短。</p> <p><b>局限性：</b> 1 存在较大的二次污染风险； 2 适用污染物范围较窄，对于沸点较高、饱和蒸气压低的污染物解吸效率较低； 3 当土质粘度较高、含水率大于25%时，施工难度较大； 4 当环境温度较低、湿度较大时，处理效率较低，修复时间长； 5 修复作业环境差。</p>	<p>1 常温解吸系统宜采用负压密闭大棚，废气经有效处理后达标排放； 2 需加强废气排放口及修复区域周边大气环境监测。</p>

序号	技术名称	适用性	修复周期	参考费用	优点及局限性	污染防治重点
9	原位化学氧化技术	<p><b>可处理的污染物类型：</b> 主要适用于石油烃、苯系物（苯、甲苯、乙苯、二甲苯等）、酚类、甲基叔丁基醚、含氯有机溶剂等污染物。</p> <p><b>应用限制条件：</b> 一般不适用于重金属污染土壤。</p>	根据广州市及国内其他地区现有案例，工程修复时间为6-8个月。	<p><b>主要组成费用：</b> 修复药剂费、设备费、过程监控及二次污染防治费用等。</p> <p>国内修复费用约为 900-1200 元/m<sup>3</sup>。</p>	<p><b>优点：</b> 无需进行开挖，国内多地有一定应用。</p> <p><b>局限性：</b> 1 修复效果不确定性相对较大，可能出现污染“反弹”和局部污染区域修复不彻底的问题； 2 可能会产生有毒有害的中间产物； 3 需关注药剂残留问题； 4 对于粘性土壤为主的污染场地，修复效果较差； 5 药剂使用不当可能产生安全问题。</p>	<p>1 修复完成后应对场地及周边区域开展长期监测；</p> <p>2 选用环境友好型药剂。</p>

序号	技术名称	适用性	修复周期	参考费用	优点及局限性	污染防治重点
10	原位热解吸技术	<p><b>可处理的污染物类型：</b> 主要适用于石油烃、挥发性及半挥发性有机物、多氯联苯、呋喃、杀虫剂等。</p> <p><b>应用限制条件：</b> 不适用于腐蚀性有机物、高活性氧化剂和还原剂含量较高的土壤；一般不适用于含有汞、砷、铅等的复合污染土壤。</p>	<p>根据国内其他地区现有案例，工程修复时间约为10-15个月。</p>	<p><b>主要费用组成：</b> 设备材料费、能源动力费、过程监控及二次污染防治费用等。</p> <p>综合单价约为1200-2000元/m<sup>3</sup>。</p>	<p><b>优点：</b> 对场地扰动小，二次污染风险相对较小，无需进行开挖。</p> <p><b>局限性：</b> 1 修复周期长、成本较高、工艺复杂、运行维护要求较高； 2 修复效果不确定性相对较大，可能出现局部污染区域修复不彻底的问题； 3 粘土含量高或含水率较大的土壤会在处理过程中结块而影响处理效果，增加处理费用。</p>	<p>1 需要确保地面阻隔系统的阻隔效果； 2 对抽提与处理过程中产生的废水、废气应做好二次污染防治，确保达标排放； 3 需对修复完成后的场地进行长期监测。</p>

序号	技术名称	适用性	修复周期	参考费用	优点及局限性	污染防治重点
11	生物堆技术	<p><b>可处理的污染物类型：</b> 主要适用于石油烃类等易生物降解的有机污染物。</p> <p><b>应用限制条件：</b> 一般不适用于重金属、难降解有机污染物污染土壤的修复。</p>	在广州市内无相关应用，根据国内相关研究，工程修复时间约为6-15个月。	在广州市内无相关应用，根据国内相关研究，综合单价约为400-600元/m <sup>3</sup> 。	<p><b>优点：</b> 无二次污染，处理费用较低，不破坏污染土壤的生态功能，污染土壤可二次利用。</p> <p><b>局限性：</b> 1 处理周期长，对存在重金属污染的复合污染土壤处理效果不佳； 2 粘土类、高浓度污染土壤修复效果较差。</p>	<p>1 根据现场情况采取覆膜开挖或其他措施，防止有机污染物挥发产生二次污染；</p> <p>2 对修复区域采取防渗措施，并设置渗滤液和废气收集处理系统；</p> <p>3 做好污染物排放口及周边大气环境监测。</p>
12	原位生物通风技术	<p><b>可处理的污染物类型：</b>主要适用于挥发及半挥发性有机物。</p> <p><b>应用限制条件：</b> 一般不适用于重金属和难降解有机物。</p>	广州市及国内未见相关工程应用，根据国外相关资料，工程修复时间约为6-24个月。	广州市及国内未见相关工程应用，根据国外相关资料，处理成本约为100-200元/m <sup>3</sup> 。	<p><b>优点：</b> 修复成本低、二次污染风险小，无需进行开挖。</p> <p><b>局限性：</b> 1 处理周期长； 2 不适用土壤渗透系数较小的场地。</p>	处理挥发性有机污染物时，需做好二次污染防治措施。

注：本表所列修复周期及费用是基于广州市及国内外现有案例及资料得到的统计结果，由于两者受土方量、污染深度等因素影响较大，本汇编所涉修复周期及费用按污染土壤1万方，污染深度5米的情景估算。

## 第二部分 技术介绍



## 一、异位固化/稳定化技术

（一）技术名称：异位固化/稳定化技术

（二）技术适用性

1. 可处理的污染物类型：主要适用于重金属及砷化合物等污染物。有时也用于石棉、部分氰化物和有机污染物。

2. 应用限制条件：一般不适用于单质汞、挥发性氰化物、挥发性有机污染物。

（三）技术介绍

1. 原理：向污染土壤中添加固化/稳定化药剂，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的形态，降低污染物在环境中的迁移和扩散。

2. 系统构成和主要设备

系统一般构成：主要包括土壤预处理系统、固化/稳定化药剂添加和混合搅拌系统、检测验收系统。

主要设备：

（1）土壤预处理系统主要包括：土壤水分调节、土壤破碎、土壤筛分等。涉及到的设备主要包括挖掘机、喷淋设备、破碎机、振动筛、筛分斗等。

（2）固化/稳定化药剂添加和混合搅拌系统主要设备包括双轴搅拌机、单轴螺旋搅拌机、切割锤击混合式搅拌机

等。

### 3. 关键技术参数或指标

（1）固化/稳定化药剂的种类及添加量：应通过试验确定固化/稳定化药剂的配方和添加量，并考虑一定的安全系数。工程实践中，稳定化药剂添加量大都不高于 5%，固化药剂添加量大都不高于 20%。

（2）土壤破碎程度：固化/稳定化药剂能否和土壤充分混合与土壤破碎程度有紧密联系。一般土壤颗粒最大的尺寸不宜大于 5cm。

（3）土壤与固化/稳定化药剂的混匀程度：现场工程师应根据经验判断土壤与固化/稳定化药剂的混匀程度。混合越均匀固化/稳定化效果越好。

（4）土壤固化/稳定化处理效果评价：稳定化处理后的土壤需进行浸出测试，固化效果评价还需进行无侧限抗压强度测试。

### 4. 技术应用基础和前期准备

该技术的适用性以及修复效果受土壤物理性质（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）的影响。为此，应针对不同类型的污染物选择不同的固化/稳定化药剂，并基于土壤类型，研究固化/稳定化药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/稳定化药剂

添加量。

## 5. 主要实施过程

- (1) 土壤挖掘与转运；
- (2) 土壤预处理（水分调节、土壤破碎、土壤筛分等）；
- (3) 固化/稳定化药剂配制；
- (4) 固化/稳定化药剂添加与混合；
- (5) 养护、检测、处置和验收。

## 6. 修复周期

根据广州市及国内其他地区现有案例，工程修复时间为4-6个月。

## 7. 参考费用

- (1) 主要费用组成：土方工程、修复实施、二次污染防治措施等。
- (2) 综合单价约为 850-1200 元/m<sup>3</sup>。

## 8. 应用情况

污染土壤固化/稳定化技术已成为我国重金属污染土壤修复的主要技术方法之一，广州市大部分重金属污染场地均使用该技术进行土壤修复。

## 9. 污染防治重点

- (1) 固化/稳定化修复作业应在具有防渗、防雨和防风的空间内进行；
- (2) 阻隔回填区应采用不少于四层的封闭结构，由外

至内宜分别为钢筋混凝土、土工布、HDPE膜、土工布；

(3) 选用环境友好型的固化/稳定化药剂；

(4) 如采用浸出方式验收，目标污染物浸出浓度需达到《地下水质量标准》(GB/T 14848) III类标准。

#### 10. 优点及局限性

(1) 优点：技术成熟、应用广泛、处理时间短。

(2) 局限性：不降低污染物总量，不适用于以总量为验收标准的修复情形；一般需配合阻隔技术使用，并进行长期监控；需根据规划和地块用途协调落实阻隔回填区域，且未来存在被扰动的风险；对于场地地下基础复杂的地块，工程施工成本较高。

#### (四) 应用案例：广州市某砷污染场地土壤修复项目

1. 场地背景：该厂建成于 1976 年，总占地面积约为 4.59hm<sup>2</sup>，主要进行羽绒加工生产；曾经作为工业用地、仓储用地等使用，修复前该场地被用做临时停车场。2013 年初，场地内所有建筑物均被拆除，规划为居住用地。

2. 场地污染特征：该场地的主要污染物为砷。经调查显示，砷最高超标浓度为 274mg/kg；修复总面积约 7210m<sup>2</sup>，垂直方向上砷超标点位主要集中于中层（2-4m）和深层（4-8m）土壤。

3. 工程规模：污染土壤土方量约 1.05 万 m<sup>3</sup>。

4. 修复目标：处理后土壤浸出液中砷含量小于

0.05mg/L。

5. 场地特征：场地 92.7%的土壤样品为酸性或微酸性土壤，其余为中性土壤，pH 值相对较低；修复土壤约 84%为粉质粘土，其余为杂填土，粘粒含量在 57%-67%。

6. 技术选择：综合场地基本特征，考虑技术成熟性、处理效果、修复时间、修复成本、修复工程的环境影响等因素，并结合场地责任单位对场地修复工期的实际要求，对场地采集部分污染土壤进行稳定化实验室小试。经过比选，采用稳定化+阻隔填埋的修复技术处理本场地污染土壤。

7. 污染土壤处理实施步骤可概括为：污染土壤破碎筛分、稳定化处置、处理效果检测以及验收合格土壤阻隔填埋等。

其中，异位稳定化系统主要包括清挖前准备（定位放线等）、土壤稳定化处理场建设、污染土壤清运、污染土壤与未污染土壤分类、未污染土壤回填、稳定化处理、验收合格土壤处置区填埋等。

8. 修复周期：前期准备工作主要包括修复技术方案论证、施工实施方案论证、深基坑设计论证等，共 20 天；施工准备阶段的工作包括进驻现场资料交接、人员设备材料进场、临时用电及用水工程建设、处理场地建设、开挖支护措施安装，共 20 天；施工准备工作完成后，对主要的施工设备进行安装调试，并试运行，主要调试设备为筛分破碎设备、

钢板桩及灌注桩施工设备 4 天；土壤清挖转运 40 天；污染土壤处理 20 天；土方回填 50 天；竣工验收 10 天。工程修复周期共 160 天左右。

9. 费用分析：修复费用约 1100 元/ m<sup>3</sup>。

10. 修复效果：稳定化处理后的土壤，参照《固体废物浸出毒性浸出方法水平振荡法》(HJ 557-2007) 提取浸出液，浸出液中目标污染物的浓度均低于目标值，顺利通过验收。

（案例提供单位：北京高能时代环境技术股份有限公司）

## 二、水泥窑协同处置技术

（一）技术名称：水泥窑协同处置技术

（二）技术适用性

1. 可处理的污染物类型：主要适用于挥发及半挥发性有机污染物（如石油烃、农药、多环芳烃、多氯联苯等）、重金属等。

2. 应用限制条件：对重金属入窑浓度有限制，需满足《水泥窑协同处置固体废物环境保护技术规范》（HJ 662）相关要求；使用该技术时，还需考虑污染土壤中氯、氟和硫的含量，以确定污染土壤的添加比例；必要时需对水泥窑进料系统和尾气处理系统进行改造。

（三）技术介绍

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。

2. 系统构成和主要设备

系统一般构成：土壤预处理系统、上料系统、水泥回转窑及配套系统、尾气处理系统和监测系统。

主要设备：

土壤预处理系统包括密闭贮存设施、筛分设施、上料系统等，主要设备包括存料斗、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；

水泥回转窑及配套系统主要设备包括热交换器、回转式水泥窑、窑尾高温风机、三次风管、回转窑燃烧器、急冷塔、除尘器、螺旋输送机、槽式输送机等；尾气处理系统包括除尘器、活性炭吸附系统等；

监测系统主要包括在线监测系统（氧气、粉尘、氮氧化物、二氧化碳、水分、温度等）及定期监测（水泥窑尾气、水泥熟料等），保证污染土壤处理的效果和生产安全，主要设备为相关监测仪器及设备。

### 3. 关键技术参数或指标

影响水泥窑协同处置效果的因素包括：水泥回转窑的系统配置，污染土壤中碱性物质含量，重金属污染物初始浓度，氯、氟和硫元素含量，污染土壤添加量等。

（1）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2000t/d；

（2）如污染土壤中  $K_2O$ 、 $Na_2O$  含量高，会使水泥生产过程中间产品及最终产品碱当量高，影响水泥品质；

（3）控制入窑物料中氯元素含量不应大于 0.04%，氟元素含量不应大于 0.5%；配料后硫化物硫和有机硫总含量不应大于 0.014%；

（4）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；

(5) 污染土壤添加量应根据污染土壤含水率，碱性物质含量，重金属，氟、氯、硫等元素含量综合确定，使入窑配料中各种物质浓度满足《水泥窑协同处置固体废物环境保护技术规范》（HJ 662）要求。

#### 4. 技术应用基础和前期准备

系统运行关键参数应通过检测分析确定。在利用水泥窑协同处置污染土壤前，分析各批次污染土壤的污染物质成分含量。分析指标包括：污染土壤的含水率、烧失量、成分、碱性物质含量，重金属含量，污染物质成分，氯、氟、硫元素含量。根据生产水泥质量要求，综合确定污染土壤的投加比例。

#### 5. 主要实施过程

- (1) 土壤挖掘、预处理与转运；
- (2) 水泥厂暂存；
- (3) 进入水泥窑协同处置系统；
- (4) 水泥熟料中目标污染物检测；
- (5) 尾气处理。

#### 6. 修复周期

受污染土壤添加比例、水泥产能产量及水泥厂协同情况影响较大。根据广州市及国内其它地区现有案例，工程修复时间为6-8个月。

#### 7. 参考费用

（1）主要费用组成：土方工程、预处理及转运、水泥厂暂存及协同处置、二次污染防治措施等。

（2）综合单价受水泥厂协同处置费用影响较大，目前综合单价约为 900-1200 元/m<sup>3</sup>。

## 8. 应用情况

该技术适用性强，在国内较为成熟，已获得广泛认可。据统计，在广州市已实施了 5 个工程案例。

## 9. 污染防治重点

（1）在预处理、运输、修复等环节做好污染防治措施；

（2）需要对水泥窑尾气进行定期监测；

（3）对有异味的污染土壤，在开挖、转运、暂存、处置等过程中应做好异味控制措施，以符合相关环保要求；

（4）对污染土壤的清挖、场内暂存、预处理、出场、运输、接收、水泥厂暂存和协同处置等应进行全过程环境管理。

## 10. 优点及局限性

（1）优点：技术成熟，适用范围较广，原场地周转较快，对有机污染物处置彻底，可实现资源化。

（2）局限性：需协调水泥厂进行处置，目前广州市境内水泥厂协同处置污染土壤的处理能力不足；耗能较大，对于含水率高、热值低的土壤需要消耗更多能量。

**（四）应用案例：广州市某重金属、石油烃复合污染地**

## 块土壤修复项目

1. 场地背景：该厂主要生产工艺为制浆造纸，2012年该厂完成环保搬迁，规划作为商业居住用地进行再开发利用。

2. 场地污染特征：主要污染物包括砷、铜、铅、锌和总石油烃，砷最高浓度为 1652mg/kg，铜最高浓度为 2300mg/kg，铅最高浓度为 19400mg/kg，锌最高浓度为 28700mg/kg，总石油烃最高浓度为 14100mg/kg；污染深度为 0-3.5m。

3. 工程规模：场地面积 61 万 m<sup>2</sup>，污染土方量约 1.8 万 m<sup>3</sup>。

### 4. 修复目标：

（1）砷修复目标值为：60mg/kg（敏感区）、70mg/kg（非敏感区）；

（2）铜修复目标值为：372mg/kg（敏感区）、424mg/kg（非敏感区）；

（3）铅修复目标值为：300mg/kg（敏感区）、600mg/kg（非敏感区）；

（4）锌修复目标值为：2690mg/kg（敏感区）、8450mg/kg（非敏感区）；

（5）总石油烃修复目标值为：1000mg/kg（敏感区）、1000mg/kg（非敏感区）。

## 5. 场地特征

该地块地层由上至下依次为：

- （1）0-3.0m 左右处为细沙质状土壤；
- （2）3.0-9.0m 左右处为粘土状或淤泥状。

6. 技术选择：综合场地基本特征，考虑技术成熟性、处理效果、修复时间、修复成本、修复工程的环境影响等因素，并结合场地责任单位对场地修复工期的实际要求，经过比选，最终选定水泥窑协同处置技术进行修复。

7. 工艺实施步骤：污染土壤清挖、运输、水泥厂暂存、预处理、预处理合格土壤入窑、水泥熟料检测。

具体为：

（1）污染土壤清挖后直接运输至水泥厂内符合环保要求的场地进行暂存；

（2）在密闭车间内对土壤进行筛分破碎和化学氧化预处理（少量总石油烃污染土壤），满足入窑条件，车间外配备尾气处理系统，保证预处理过程中产生的废气达标排放；

（3）预处理后土壤采样检测，符合入窑标准的土壤运输至污染土壤卸料点，由密闭输送装置送入水泥窑内高温焚烧；

（4）将污染土壤中的有机物高温焚烧彻底分解，并将重金属固定在水泥熟料中，实现土壤的无害化处置，修复后的土壤成为水泥熟料的一部分。

8. 修复周期：土壤完成清挖、运输工期 34 天，协同处置工期 147 天。

9. 费用分析：修复费用约 900 元/m<sup>3</sup>。

10. 修复效果：实际完成约 1.71 万 m<sup>3</sup> 污染土壤（不含建筑垃圾）的修复，修复后基坑内目标污染物均低于修复目标值；污染土壤经水泥窑协同处置后的水泥熟料和产品均满足水泥产品质量标准，顺利通过验收。

（案例提供单位：武汉都市环保工程技术股份有限公司）

### 三、异位热脱附技术

（一） 技术名称：异位热脱附技术

（二） 技术适用性

1. 可处理的污染物类型：石油烃、挥发性有机物、半挥发性有机物、多氯联苯、呋喃、杀虫剂等。

2. 应用限制条件：不适用于腐蚀性有机物、高活性氧化剂和还原剂含量较高的土壤，亦不适用于含有汞、砷、铅等复合污染土壤。

（三） 技术介绍

1. 原理：通过直接或者间接加热，将污染土壤加热至目标污染物的沸点以上，通过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。

2. 系统构成和主要设备：主要包括预处理系统、加热脱附系统、尾气处理系统。除上述主要系统外还应配备净化土壤后处理系统及控制系统等。

（1） 直接加热系统

加热脱附系统：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，部分污染物被直接高温氧化去除；部分污染物被加热至气化温度转移至气相，达到污染物与土壤分离的目的。

尾气处理系统：富集气化污染物的尾气通过旋风除尘、

二次燃烧、急冷降温、布袋除尘、碱喷淋等环节去除尾气中的污染物。

## （2）间接加热系统

加热脱附系统：燃烧器产生的火焰均匀加套体外部，污染土壤被间接加热至污染物的沸点后，污染物与土壤分离进入废气中，通过燃烧去除。

尾气处理系统：热脱附产生的尾气经尾气处理系统进一步处理后达标排放。

3. 关键参数或指标：影响热脱附修复效果的指标主要包括土壤理化特性和土壤污染特征。

### （1）土壤理化特性

土壤工程技术性质：土壤质地一般可划分为砂土、粉土、粘性土。砂土土质疏松，对液体物质的吸附力及保水能力弱，易热脱附。粘性土颗粒细，性质正好相反，污染物较难脱附。

土壤含水率：土壤中水分受热挥发会消耗大量的热量。为保证热脱附的效能，进料土壤的含水率宜低于 25%。

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，导致尾气处理系统超载。最大土壤粒径不宜超过 5cm。

### （2）土壤污染特征

污染物浓度：有机污染物浓度过高会增加土壤热值，进而损害热脱附设备，存在爆炸风险，故气相中有机污染物浓

度应低于爆炸下限值的 25%。一般有机污染物含量高于 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。

沸点范围：一般直接热脱附处理土壤温度范围为 150-650℃，间接热脱附处理土壤温度为 120-530℃。

二噁英的形成：多氯联苯及含其他含氯有机污染物在受到低温热破坏时或者高温热破坏后的烟气降温过程易产生二噁英。故在尾气燃烧后还需要特别的急冷装置，使高温气体的温度迅速降低至 200℃以下，防止二噁英的生成。

#### 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、粒径分布和含水率等参数，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）是否满足要求等。

#### 5. 主要实施过程

- (1) 土壤挖掘与转运；
- (2) 土壤预处理；
- (3) 进入热脱附系统处置及尾气处理；
- (4) 土壤降温除尘、堆置待检；
- (5) 检测、验收及再处置。

#### 6. 修复周期

根据广州市及国内其他地区现有案例，设备安装调试时间为3个月左右，工程修复时间约为4-6个月（直接热脱附）。

## 7. 参考费用

（1）主要费用组成：土方工程、修复实施、二次污染防治措施等。

（2）综合单价约为 1000-1500 元/m<sup>3</sup>。

## 8. 污染防治重点

（1）清挖、运输、预处理过程中应做好控制，防止扬尘与挥发性有机物污染；

（2）土壤修复过程中应采取有效措施防止二噁英的产生；

（3）预处理环节做好密封措施，需对废气进行处理；直接热脱附尾气宜采用二次燃烧+冷凝+除尘处理后达标排放。

## 9. 优点及局限性

（1）优点：处理量大，修复效果好，修复效率高；

（2）局限性：处理效率受土壤性质影响较大，对预处理要求较高；设备耐高温、耐磨损要求高，安装调试时间较长，设备设施成本高，能耗高，需协调能源来源；对小体量污染土壤修复项目技术经济性较差；粘土含量高或含水率较大的土壤需进行预处理，增加处理费用。

## （四）应用案例：

## 案例 1: 广州某重金属和多环芳烃污染场地土壤修复项目

### 目

1. 工程背景：该场地于 1958 年建厂，2013 年 9 月全部停产，开始搬迁。规划作为居住用地等进行再开发利用。

2. 场地污染特征：项目地块主要受重金属和多环芳烃污染，以多环芳烃类污染物为主，多环芳烃浓度为 0.63-2027mg/kg。

3. 工程规模：修复面积约 15.79hm<sup>2</sup>，污染最大深度 5m，污染土方量约 51.8 万 m<sup>3</sup>。

#### 4. 修复目标

多环芳烃类污染物修复目标见下表：

序号	类型	污染物	土壤修复目标 (重金属 mg/L, 多环芳烃 mg/kg)
1	多环芳烃	萘	50
2		茈	5
3		芴	50
4		蒽	50
5		荧蒽	50
6		芘	50
7		苯并(a)蒽	0.63
8		蒽	50
9		苯并(b)荧蒽	0.63
10		苯并(k)荧蒽	6.33
11		苯并(a)芘	0.63
12		茚并(1,2,3-cd)芘	0.63
13		二苯并(a,h)蒽	0.63
14		菲	5
15		苯并(g,h,i)芘	5

序号	类型	污染物	土壤修复目标 (重金属 mg/L, 多环芳烃 mg/kg)
16		萘烯	5
		二氢萘	
17		总石油烃	1000

5. 技术选择：由于该场地土壤受多环芳烃污染，且修复目标较严、工期较短，用化学氧化、生物修复等技术难以满足要求。采用热脱附技术设备可以在较短时间内将污染物彻底去除，并且可以满足修复后土壤原地回填的要求，避免了外运处置风险。

6. 实施步骤：设备安装调试、土壤热脱附处理、尾气处理达标排放、验收。

7. 调查及修复周期：4年2个月。

8. 费用分析：设备运输、安装调试、基础建设及折旧费用 286 元/ m<sup>3</sup>；合计 600 万元。水、电、燃料、机械、人工等费用合计 814 元/t 土。综合修复费用约为 1100 元/m<sup>3</sup>。

9. 修复效果：实际修复污染土壤约 52 万 m<sup>3</sup>。经修复后，有机污染土壤全部修复合格，修复过程未见对周边环境造成二次污染，顺利通过验收。

（案例提供单位：北京建工环境修复股份有限公司）

## 案例 2：北京市某有机物污染场地土壤修复项目。

1. 工程背景：该厂建于 1958 年，1959 年建成投产，主要生产管道煤气、硫铵、轻苯等 30 多种化工产品。

2. 场地污染特征：地块土壤中的主要污染物为苯并(a)蒽、苯并(b)荧蒽、苯并(k)荧蒽、苯并(a)芘、二苯并(a,h)蒽、茚并(1,2,3-芘)等。

3. 工程规模：场地面积约 34.2hm<sup>2</sup>，污染土壤约为 153 万 m<sup>3</sup>。

4. 修复目标：苯并(a)蒽修复目标值为 0.64mg/kg、苯并(b)荧蒽修复目标值为 0.64mg/kg、苯并(k)荧蒽修复目标值为 6.25mg/kg、苯并(a)芘修复目标值为 0.2mg/kg、二苯并(a,h)蒽修复目标值为 0.064mg/kg、茚并(1,2,3-cd)芘修复目标值为 0.64mg/kg。

5. 技术选择：采取异位热脱附修复工艺进行修复治理。

6. 工艺实施步骤：污染土壤清挖或运输、污染土壤预处理、热脱附、清洁土壤降温除尘置于堆场待检、尾气处理等。

7. 修复周期：约为 23 个月。

8. 费用分析：约为 1000 元/ m<sup>3</sup>。

9. 修复效果：实际修复污染土壤约 153 万 m<sup>3</sup>。修复后，目标污染物浓度均低于修复目标值，顺利通过验收。

(案例提供单位：中科鼎实环境工程股份有限公司)

## 四、异位化学氧化技术

（一）技术名称：异位化学氧化技术

（二）技术适用性

1. 可处理的污染物类型：石油烃、苯系物（苯、甲苯、乙苯、二甲苯等）、酚类、甲基叔丁基醚、含氯有机溶剂等污染物。

2. 应用限制条件：一般不适用于重金属污染的土壤修复。

（三）技术介绍

1. 原理：向污染土壤添加氧化剂，通过氧化作用，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。

2. 系统构成和主要设备

（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。

### 3. 关键技术参数或指标

影响异位化学氧化修复效果的关键技术指标包括：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、pH 值、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）pH 值：根据土壤初始 pH 条件和药剂特性，有针对性的调节土壤 pH 值，一般 pH 值范围 4.0-9.0。常用的调节方法包括加入硫酸亚铁、硫磺粉、熟石灰、草木灰及缓冲

盐类等。

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

#### 4. 技术应用基础和前期准备

该技术的适用性以及修复效果在一定程度上受土壤物理性质（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）的影响。为此，应针对不同类型的污染物，选择适用的氧化剂，并基于土壤类型，研究确定最佳氧化剂添加量。

#### 5. 主要实施过程

- （1）土壤挖掘与转运；
- （2）土壤预处理（土壤破碎、筛分等）；
- （3）氧化药剂配制、添加与混合；
- （4）养护、检测、再处置和验收。

#### 6. 修复周期

根据广州市及国内其他地区现有案例，工程修复时间为6-8个月。

#### 7. 参考费用

- （1）主要费用组成：开挖、运输、预处理、修复与养护等。
- （2）综合单价约为700-1100元/ $m^3$ 。

#### 8. 应用情况

异位化学氧化技术在国外已经形成了较完善的技术体系，应用广泛。国内发展较快，目前广州已有3个案例采取该技术对场地进行修复。

## 9. 污染防治重点

(1) 清挖、运输过程中做好控制，防止扬尘与挥发性有机物污染；

(2) 相较于其它技术，化学氧化技术二次污染较低，但预处理、修复等环节应做好密封措施，防止异味逸散；

(3) 应选用环境友好型的药剂。

## 10. 优点及局限性

(1) 优点：技术成熟，国内应用较广泛；处理工艺简单；修复费用较低；适用污染物范围较广。

(2) 局限性：可能会产生有毒有害的中间产物；需关注药剂残留问题；药剂使用不当可能产生安全问题。

### (四) 应用案例：广州市某有机污染场地土壤修复项目

1. 场地背景：该厂建成于1956年，主要生产产品为香料、食品香精、烟用香精、日化香料、调味品等，总占地面积约为4.51hm<sup>2</sup>，规划作为居住用地再开发利用。

2. 场地污染特征：该场地土壤主要污染物为苯并(a)蒽、邻苯二甲酸双(2-乙基己基)酯、总石油烃。其中，苯并(a)蒽浓度1.15 mg/kg，超过修复目标值0.8倍，污染

深度为 2.4m；邻苯二甲酸双(2-乙基己基)酯浓度 384mg/kg，超过修复目标值 9.88 倍，污染深度为 1.5m；总石油烃最大浓度为 19673.2 mg/kg，超过修复目标值 18.67 倍，最大污染深度为 1.5m。场地土壤需修复总面积为 3949m<sup>2</sup>，修复深度为 3m。

3. 工程规模：污染土壤约 1.2 万 m<sup>3</sup>。

4. 修复目标：苯并[a]蒽 0.64mg/kg；邻苯二甲酸双(2-乙基己基)酯为 35.31mg/kg；总石油烃为 1000mg/kg；

5. 场地特征：该场地周围地势平坦，主要是由冲积形成，地下层大部分为砂质粘土、粘质砂土、最下层多属砂岩、页岩，地表土壤主要为冲积土，经长期耕作，演变为冲积水稻土和菜园土。

6. 技术选择：综合场地基本特征，考虑技术成熟性、处理效果、修复时间、修复工程的环境影响等因素，根据污染土壤异味较大的特点，并结合周边敏感点情况，对场地污染土壤采取化学氧化处理使有机污染物浓度低于修复目标值，再采用水泥窑综合利用的方式进行最终处置。

7. 工艺实施步骤：污染土壤清挖及场内运输、化学氧化处理、处理后土壤外运、水泥窑综合利用、尾气处理等。

8. 修复周期：施工准备 215 天，修复设施施工 60 天，污染土壤修复约 182 天，最终验收监测和评审约 105 天。

9. 费用分析：项目修复综合单价为 1200 元/m<sup>3</sup>。

10. 修复效果：实际完成 1.27 万 m<sup>3</sup> 污染土壤的修复，污染土壤经异位化学氧化处理后目标污染物浓度均低于修复目标值，顺利通过验收。

（案例提供单位：武汉都市环保工程技术股份有限公司）

## 五、阻隔技术

### （一）技术名称：阻隔技术

### （二）技术适用性

1. 可处理的污染物类型：主要适用于重金属、有机污染物及复合污染土壤。

2. 应用限制条件：用于腐蚀性、挥发性较强的污染物时，环境风险相对较大。

### （三）技术介绍

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。

#### 2. 系统构成和主要设备

主要由土壤阻隔系统、土壤覆盖系统、监测系统构成。其中，土壤阻隔系统主要由可阻止气体和液体进行迁移的防渗阻隔材料构成，从而将污染介质限制在特定区域内；土壤覆盖系统一般由高渗透性的砂砾石与低渗透性的粘土组成，也可与人工合成材料衬层、砂石层等组合；监测系统主要是评估阻隔技术的运行状况及性能，其监测内容和频次取决于阻隔系统的具体类型。

主要设备包括：土壤阻隔系统施工需要的冲击钻、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的挖掘机、推土机等设备。填埋场防渗阻隔系统施工需要的吊装设备、挖掘机、焊膜机等设备。

### 3. 关键技术参数或指标

影响阻隔技术修复效果的因素主要包括：材料的性能、阻隔系统深度、土壤覆盖层厚度等。

（1）阻隔材料：阻隔材料应不与目标污染物发生不良反应，防渗透性强，渗透系数要小于  $10^{-7}$  cm/s；不易腐蚀，无毒无害，使用寿命应满足环境风险管控要求。

（2）阻隔系统深度：依据监测的地下水水位数据，需阻隔到不透水层或弱透水层。

（3）覆盖厚度：覆盖层最小厚度应保证其有效性。

### 4. 技术应用基础和前期准备

在利用阻隔技术前，应调查清楚场地土壤及污染物特性。广州市大部分污染场地地下水埋藏较浅、交换频繁，施工前还需对场地水文地质情况进行调查，并进行相应的可行性测试，评估是否适用该技术。

### 5. 主要实施过程

（1）核定阻隔措施的施工边界；

（2）构筑阻隔系统；

（3）设置覆盖系统；

（4）定期对污染阻隔区域进行监测，防止污染渗漏。

## 6. 修复周期

根据广州市及国内其他地区现有案例，工程实施时间为2-3个月。

## 7. 参考费用

(1) 主要费用组成：阻隔工程建设费（视阻隔工程结构而定，具体以土建定额为准）。

(2) 综合单价约为400-600元/m<sup>3</sup>。

## 8. 应用情况

阻隔技术是目前国内应用较为广泛的技术，常与其他技术联合使用。阻隔技术未对污染物进行降解和去除，而是通过减少污染物与人群及环境的接触途径，保障环境及人群健康。该技术在广州市及国内其他地区发展已比较成熟，通常与固化/稳定化技术联用，用于重金属污染土壤的处置。

## 9. 污染防治重点

(1) 如进行开挖，应做好抑尘等环保措施；

(2) 应在阻隔区域地下水的上下游设置地下水监测井，进行长期监测，监控目标污染物的浓度变化情况，了解阻隔区域对周围环境的影响，及时响应不利状况；

(3) 需避免对阻隔措施造成扰动。

## 10. 优点及局限性

(1) 优点：技术成熟、应用广泛、成本较低、实施周期短。

（2）局限性：存在污染物泄漏风险；阻隔回填所占用区域将对场地开发利用产生影响；阻隔回填区应避免地质条件较差的区域。

#### （四）应用案例：广州市某砷污染场地土壤修复项目

1. 场地背景：某电梯厂于2009年搬迁至该场地，场地面积为9.27hm<sup>2</sup>，主要生产垂直电梯和扶梯。规划用地性质为商业商务混合用地、二类居住用地、中小学用地、体育用地及公园用地等。

2. 场地污染特征：主要污染物为砷，最高污染浓度301mg/kg。

3. 工程规模：污染土壤约1.16万m<sup>3</sup>。

4. 修复目标：清挖后基坑土壤中砷浓度满足居住区≤50mg/kg、商业区≤70mg/kg。污染土壤依照《固体废物浸出毒性浸出方法水平振荡法》（HJ 557-2010）进行检测；验收标准按照《地下水质量标准》（GB/T 14848-1993）IV类水标准。

5. 场地特征：该项目污染土壤土层分布较复杂，在所揭露深度8.5m范围内主要由粘性土、粉性土组成，渗透系数较低。

6. 技术选择：综合污染物特性、浓度、土壤、地下水特征以及项目开发建设需求，对污染土壤采用异位固化/稳定化处理技术+处理后土壤回填在规划绿地及体育用地下方

的阻隔回填区，控制保护区的污染区域采用原位工程阻隔技术。

7. 工艺实施步骤：清挖运输、污染土壤与固化/稳定化药剂混合、堆置养护与检验、清挖效果验收与回填等。

8. 修复周期：约 130 天。

9. 费用分析：综合单价约 1100 元/m<sup>3</sup>（含固化/稳定化处置费用）。

10. 修复效果：阻隔回填区成功设置了四层的封闭结构，由外至内分别为钢筋混凝土、土工布、HDPE 膜、土工布。原位工程阻隔修复技术采取的阻隔层厚度、混凝土搅拌桩直径与深度和结构完整性等工程指标均通过了土建施工验收，所采取工程控制措施能有效切断污染途径，相应的污染土壤得到了阻隔控制，避免二次污染，顺利通过验收。

（案例提供单位：北京高能时代环境技术股份有限公司）

## 六、原位固化/稳定化技术

（一）技术名称：原位固化/稳定化技术

（二）技术适用性

1. 可处理的污染物类型：主要适用于重金属及砷化合物等污染物；有时也用于石棉、氰化物及部分有机污染物。

2. 应用限制条件：一般不适用于单质汞、挥发性氰化物、挥发性有机污染物。

3. 未来不进行开挖等扰动的污染土壤修复项目可选择该技术。

（三）技术介绍

1. 原理：通过一定的机械力在原位向污染介质中添加固化/稳定化药剂，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。

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、工程现场取样监测系统以及长期稳定性监测系统等组成。

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）、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（监测探头、水分、温度、地下水在线监测系统等等）。

### 3. 关键技术参数或指标

污染介质组成及其浓度特征、污染物组成及空间分布、固化/稳定化药剂配比与用量、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等。

（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粘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）污染物组成及空间分布：对无机污染物，添加固化/稳定化药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、地下水流速、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  $50\text{Pa}/\text{ft}^2$ （约合  $538.20\text{Pa}/\text{m}^2$ ），材料的抗压强度至少要与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  $10^{-6}\text{cm}/\text{s}$ 。

（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。

#### 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。

#### 5. 主要实施过程

(1) 土壤预处理;

(2) 固化/稳定化药剂配制;

(3) 固化/稳定化药剂添加与混合;

(4) 养护、检测、再处置和验收。

#### 6. 修复周期

根据广州市及国内其他地区现有案例,工程修复时间为3-4个月。

#### 7. 参考费用

工程综合单价约为 500-800 元/m<sup>3</sup>。

#### 8. 应用情况

原位固化/稳定化技术在欧美国家率先开展,相比之下,

我国原位固化/稳定化技术开展时间较晚。目前，广州市已有 1 个工程案例。

### 9. 污染防治重点

(1) 修复区域周边应设置止水帷幕，渗透系数应小于  $10^{-7}$  cm/s，并在顶部采取相应防渗措施；

(2) 应选用环境友好型的固化/稳定化药剂；

(3) 如采用浸出方式验收，目标污染物浸出浓度需达到《地下水质量标准》（GB/T 14848）III类标准。

### 10. 优点及局限性

(1) 优点：技术成熟、应用广泛、处理时间短、费用低；无需进行开挖。

(2) 局限性：不降低污染物总量，不适用于以总量为验收标准的修复情形；一般需配合阻隔技术使用，并进行长期监控；修复效果存在一定不确定性；未来存在被扰动的风险。

### （四）应用案例：广州市某重金属污染场地土壤修复项目

1. 场地背景：该场地原为造纸厂，始建于 1983 年，总占地面积为  $1.78\text{hm}^2$ ；70 年代以前，经水路运输的硫铁矿暂存在码头区域。2012 年，该场地完成环保搬迁，大部分厂房及设施已拆除，剩余少量保留建筑、废弃仓库和办公楼。规划作为居住用地等进行再开发利用。

2. 场地污染特征：该场地的主要污染物为砷、铜、铅、锌等重金属。砷最高浓度为 1652mg/kg，铜最高浓度为 673mg/kg，铅最高浓度为 10600mg/kg，锌最高浓度为 26500mg/kg。

3. 工程规模：污染土壤约 6.69 万 m<sup>3</sup>，最大污染深度 5.5m。

4. 修复目标：修复后场地土壤重金属污染物浸出值应满足《地下水质量标准》（GB/T14848-1993）IV 类标准，即砷、铜、铅、锌修复目标值分别为 0.05mg/L、1.5mg/L、0.1mg/L、5mg/L。

#### 5. 场地地层特征

地层由上至下依次为：

（1）砂质土：呈细沙质状。

（2）粘土：呈淤泥状。

6. 技术选择：综合场地基本特征，考虑技术成熟性、处理效果、修复时间、修复成本、修复工程的环境影响等因素，并结合场地责任单位对场地再开发和工期的实际要求，采集部分污染土壤进行小试。经过初步比选，选用原位固化/稳定化技术处理本地块污染土壤，必要时还须采取阻隔技术。

7. 工艺实施步骤：污染土壤筛分破碎、固化/稳定化处理、处理效果检测以及达标后表层覆土回填等。具体为：

（1）根据场地方提供的拐点坐标进行测量放线工作，确定污染场地的修复范围及边界；

（2）清除影响作业的障碍物并开挖施工沟槽；

（3）定号桩位点，布置钻头；

（4）进行预搅下沉与药剂喷注，同时进行搅拌，使污染土壤与固化/稳定化药剂充分混合均匀；

（5）对污染土壤进行养护和自检工作，联系第三方验收单位取样检测，验收达标后进行表层覆土回填，若不达标则对污染土壤重新进行处理。

8. 修复周期：126 天。

9. 费用分析：综合单价约 500 元/ m<sup>3</sup>。

10. 修复效果：实际修复污染土壤 6.28 万 m<sup>3</sup>。修复后，目标污染物浸出浓度达到修复目标值，顺利通过验收。

（案例提供单位：中科鼎实环境工程股份有限公司）

## 七、土壤洗脱技术

（一）技术名称：土壤洗脱技术

（二）技术适用性

1. 可处理的污染物类型：主要适用于重金属和部分半挥发性有机污染物。

2. 应用限制条件：不适用于含有挥发性有机污染物或污染废渣的土壤。

（三）技术介绍

1. 原理：污染物主要集中分布于较细的土壤颗粒上，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。

2. 系统构成和主要设备

异位土壤洗脱处理系统一般包括：土壤预处理系统、物理分离系统、洗脱系统、废水处理及回用系统等。具体场地修复中可选择单独使用物理分离系统或联合使用物理分离系统和增效洗脱系统。

主要设备包括：土壤预处理设备（破碎机、筛分机等）、输送设备（皮带机或螺旋输送机等）、物理分离设备（水力旋流器、湿法振动筛等）、洗脱设备（滚筒清洗机、水平振荡器等）、泥水分离设备（沉淀池、压滤机等）、废水处理及

回用设备（废水收集箱、物化处理系统等）等。

### 3. 关键技术参数或指标

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、增效剂的选择及洗脱废水的处理等。

### 4. 技术应用基础和前期准备

技术应用前期需要了解：土壤粒径组成，土壤类型、土壤质地和含水率，污染物类型和浓度，土壤有机质含量，土壤阳离子交换量，土壤 pH 及缓冲容量等。

### 5. 主要实施过程

（1）污染土壤挖掘及预处理；

（2）经过物理分离系统，得到清洁物料（粗颗粒和砂粒）；

（3）分级后的细颗粒进入泥浆处理系统进行沉淀和压滤处理，泥饼根据污染物性质选择最终处理处置方式；

（4）定期采集粗颗粒、砂粒及土壤样品进行分析，掌握污染物去除效率；

（5）洗脱系统废水需要收集处理后回用或达标排放。

### 6. 修复周期

根据广州市及国内其他地区现有案例，工程修复时间为3-4个月。

### 7. 参考费用

（1）主要费用组成：土方工程、筛分、洗脱及二次污

染防治等。

（2）综合单价约为 400-600 元/ m<sup>3</sup>。

## 8. 应用情况

土壤洗脱技术在加拿大、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、持久性有机污染物、重金属等多种污染场地。我国在 20 世纪 90 年代开始土壤洗脱技术的研究，该技术常与其他技术联用，用于污染土壤预处理和减量化。目前，广州市已有 1 个工程案例。

## 9. 污染防治重点

- （1）洗脱作业场地需进行防渗处理；
- （2）洗脱废水需进行处理并达标排放。

## 10. 优点及局限性

（1）优点：污染土壤减量化效果明显；可有效降低土壤中污染物总量；实施费用低。

（2）局限性：需配合其他技术处理洗脱后剩余的高污染土壤；系统构成复杂，占地面积大；需协调落实污水排放去向；对小体量污染土壤项目及细颗粒含量较高的土壤技术经济性较差。

## 八、常温解吸技术

（一）技术名称：常温解吸技术

（二）技术适用性

1. 可处理的污染物类型：主要适用于处理易挥发的有机污染物。

2. 应用限制条件：不适用于重金属和挥发性较弱的有机污染物。

（三）技术介绍

1. 原理：利用土壤中污染物易挥发的特点，将污染土壤进行一定预处理，常温下促进土壤中污染物的解吸和挥发，并最终通过废气处理系统将挥发出来的污染物去除。

2. 系统构成和主要设备

该技术的两个关键系统为污染物解吸系统和废气收集处理系统。主要设备包括有效的密闭负压大棚、翻抛机、抽气设备以及废气收集处理装置。

3. 关键技术参数或指标

影响常温解吸修复效果的关键技术指标包括：污染物的沸点及饱和蒸气压。

（1）当外界压力保持恒定时，沸点低的物质，挥发性较大，为常温解吸修复提供了可能。

（2）有机物的饱和蒸气压随温度升高而升高，饱和蒸气压提高有利于有机污染物的挥发。

#### 4. 技术应用基础和前期准备

该技术的适用性以及修复效果在一定程度上受土壤理化性质（含水率、土壤土质等）的影响。广州市土壤含水率较高，使用该技术宜先采取措施降低含水率，高粘性土的机械扰动需配套使用专门破碎设备。

#### 5. 主要实施过程

- （1）土壤挖掘与转运；
- （2）土壤预处理（土壤破碎、筛分等）；
- （3）土壤翻抛；
- （4）废气收集处理；
- （5）检测、再处理和验收修复土壤。

#### 6. 修复周期

根据国内其他地区现有案例，工程修复时间约为 3-4 个月。

#### 7. 参考费用

（1）主要费用组成：修复设备设施建设、土壤开挖、运输、修复处理、二次污染防控等。

（2）综合单价约为 500-600 元/ m<sup>3</sup>。

#### 8. 应用情况

近年来，该技术在石油类或易挥发有机污染物污染土壤的修复中使用较多。广州市目前有 1 个场地正在使用该技术进行修复。

## 9. 污染防治重点

(1) 常温解吸系统宜采用负压密闭大棚，废气经有效处理后达标排放；

(2) 需加强废气排放口及修复区域周边大气环境监测。

## 10. 优点及局限性

(1) 优点：简单易行，修复费用低，修复周期短。

(2) 局限性：存在较大的二次污染风险；适用污染物范围较窄，对于沸点较高、饱和蒸气压低的污染物解吸效率较低；当土质粘度较高、含水率大于 25% 时，施工难度较大；当环境温度较低、湿度较大时，处理效率较低，修复时间长；修复作业环境差。

### (四) 应用案例：武汉市某有机物污染场地土壤修复项目

1. 场地背景：该场地位于武汉化工区，主要生产硫化碱和硫化黑染料等产品，产品涉及六大类十六个品种。

2. 场地污染特征：该场地的主要污染物为有机物（氯苯、二甲苯、苯并(a)蒽等）。

3. 工程规模：总污染土方量 37.02 万  $m^3$ ，其中有机污染土壤 21.3 万  $m^3$ 。

4. 修复目标：氯苯的修复目标为 41mg/kg，二甲苯的修复目标为 5 mg/kg，苯并(a)蒽修复目标为 0.63mg/kg。

5. 技术选择：综合场地基本特征，考虑技术成熟性、处理效果、修复时间、修复成本、修复工程的环境影响等因素，并结合场地责任单位对场地再开发和工期的实际要求，对场地采集部分污染土壤进行实验室小试。经过初步比选，采用常温解吸技术处理污染土壤。

6. 污染土壤修复实施步骤包括：污染土壤清挖及预处理、常温解吸修复、处理后土壤堆置、监测及验收。

7. 修复周期：约为 22 个月。

8. 费用分析：约 500 元/ m<sup>3</sup>。

9. 修复效果：实际修复有机污染土壤 24.6 万 m<sup>3</sup>，修复后目标污染物低于修复目标值。

（案例提供单位：武汉都市环保工程技术股份有限公司）

## 九、原位化学氧化技术

（一）技术名称：原位化学氧化技术

（二）技术适用性

1. 可处理的污染物类型：主要适用于石油烃、苯系物（苯、甲苯、乙苯、二甲苯等）、酚类、甲基叔丁基醚、含氯有机溶剂等污染物。

2. 应用限制条件：一般不适用于重金属污染土壤。

（三）技术介绍

1. 原理：通过向土壤污染区域注入氧化剂，通过氧化作用，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。

2. 系统构成和主要设备

主要包括药剂制备/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；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，对污染区污染物、药剂的分布与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。

### 3. 关键技术参数或指标

影响原位化学氧化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。由于原位化学氧化技术可能会在地下产生热量，导致土壤中的污染物挥发到地表，因此需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，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/非水相液体界面处。如果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。

#### 4. 技术应用基础和前期准备

需充分了解原位化学氧化反应原理和传质过程。应用技术之前，需通过实验室研究确定药剂处理效果和投加量，并进行现场中试试验进一步确定和优化设计参数，确定药剂扩散半径、注药流量、土壤结构分布、污染去除率、反应产物等，并验证药剂配比的可行性。还可以通过建立场地概念模型、反应传质模型等方法对系统的设计和运行加以指导。

进行原位化学氧化系统设计时，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。

#### 5. 主要实施过程

(1) 化学氧化处理系统建设；

(2) 添加修复药剂，并实时监测药剂注入过程中的温度和压力变化；

(3) 修复过程监测及参数调整；

(4) 验收及长期监测。

## 6. 修复周期

根据广州市及国内其他地区现有案例，工程修复时间为6-8个月。

## 7. 参考费用

(1) 主要费用组成：修复药剂费、设备费、过程监控及二次污染防治费用。

(2) 一般来说，国内修复费用约为900-1200元/m<sup>3</sup>。

## 8. 应用情况

该技术已经形成较完善的技术体系，国内应用较多。

## 9. 污染防治重点

(1) 修复完成后应对场地及周边区域开展长期监测；

(2) 选用环境友好型药剂。

## 10. 优点及局限性

(1) 优点：无需进行开挖，国内多地有一定应用。

(2) 局限性：修复效果不确定性相对较大，可能出现污染“反弹”和局部污染区域修复不彻底的问题；可能会产生有毒有害的中间产物；需关注药剂残留问题；对于粘性土

壤为主的污染场地，修复效果较差；药剂使用不当可能产生安全问题。

#### （四）应用案例：华北某二甲苯污染场地修复治理工程

1. 场地背景：该场地的使用历史依次为农田、某农药厂、某油漆厂、某涂料公司等。2004~2020 被确定为市中心城 33 个公共交通枢纽之一，是市中心城东南部的集轨道交通、长途汽车、地面公交、出租汽车及自行车换乘于一体的综合换乘枢纽。

2. 场地污染特征：主要污染物为二甲苯。

3. 工程规模：场地面积 4.2 万  $\text{m}^2$ ，污染深度 15m，污染土方量 3750  $\text{m}^3$ 。

4. 修复目标：土壤二甲苯的修复目标为 5  $\text{mg}/\text{kg}$ 。

5. 技术选择：原位化学氧化技术。

6. 原位化学氧化修复实施步骤包括施工准备阶段、实施阶段及竣工阶段。其中实施阶段包括场地补充调查、地下管线探测、注入点位布设、注射井建立、注射系统搭建、系统试运行、药剂配置和原位注入、修复后验收等。

7. 修复周期：120 天。

8. 费用分析：修复费用主要由场地建设费、设备费、材料费、人工费、项目管理费以及部分措施费用组成，综合单价约 900 元/ $\text{m}^3$ 。

9. 修复效果：实际修复污染土壤 3750 m<sup>3</sup>。修复后，二甲苯浓度低于修复目标值，已通过管理部门验收。

（案例提供单位：北京建工环境修复股份有限公司）

## 十、原位热解吸技术

（一）技术名称：原位热解吸技术

（二）技术适用性

1. 可处理的污染物类型：主要适用于石油烃、挥发性及半挥发性有机物、多氯联苯、呋喃、杀虫剂等。

2. 应用限制条件：不适用于腐蚀性有机物、高活性氧化剂和还原剂含量较高的土壤；一般不适用于含有汞、砷、铅等的复合污染土壤。

（三）技术介绍

1. 原理

通过热交换将污染介质及其所含的有机污染物加热到足够的温度，以使有机污染物从污染介质上得以挥发或分离的过程。

2. 系统构成

主要包括动力系统、加热系统、控制系统、引导-拖拽系统、废气及废水处理系统组成。

3. 关键技术参数或指标

（1）污染物种类、浓度等；

（2）土壤机械组成、土质类型、含水率、渗透性等；

（3）热源情况、工程面积、升温梯度及时间等。

4. 技术应用基础和前期准备

该技术的修复效果受场地土壤物理性质及污染特征的

影响较大。因此，在确定使用原位热解吸技术前，应调查场地地下水赋存条件，土壤质地、含水率、渗透性、均一性、热容量，污染物种类及污染程度等。我市大部分污染场地地下水含量丰富，施工前需充分考虑该特点，确保止水措施效果，合理估算修复工期与费用，进行相应的可行性测试，综合评估是否适用该技术。

#### 5. 主要实施过程

（1）止水帷幕建设：止水帷幕建设完成后渗透系数应小于  $10^{-7}$  cm/s；

（2）系统设计：根据场地污染特征、土壤质地和水文地质条件、热源情况进行系统设计；

（3）修复处理：加热污染土壤，使目标污染物从污染土壤转移至废水、废气中，通过对废水、废气进行处理实现消除污染的效果。

#### 6. 修复周期

根据国内其他地区现有案例，工程修复时间约为 10-15 个月。

#### 7. 参考费用

（1）主要费用组成：设备材料费、能源动力费、过程监控及二次污染防治费用等。

（2）综合单价约为 1200-2000 元/m<sup>3</sup>。

#### 8. 应用情况

原位热解吸技术在国内已有工程实践，广州市目前有 1 个场地正在使用该技术进行修复。

#### 9. 污染防治重点

（1）需要确保地面阻隔系统的阻隔效果；

（2）对抽提与处理过程中产生的废水、废气应做好二次污染防控，确保达标排放；

（3）需对修复完成后的场地进行长期监测。

#### 10. 优点及局限性

（1）优点：对场地扰动小，二次污染风险相对较小，无需进行开挖。

（2）局限性：修复周期长、成本较高、工艺复杂、运行维护要求较高；修复效果不确定性相对较大，可能出现局部污染区域修复不彻底的问题；粘土含量高或含水率较大的土壤会在处理过程中结块而影响处理效果，增加处理费用。

## 十一、 生物堆技术

（一）技术名称：生物堆技术

（二）技术适用性

1. 可处理的污染物类型：主要适用于石油烃类等易生物降解的有机污染物。

2. 应用限制条件：一般不适用于重金属、难降解有机污染物污染土壤的修复。

（三）技术介绍

1. 原理：对污染土壤堆体采取人工强化措施，促进土壤中具备目标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。

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。

### 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值、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；对持久性有机污染物、高环的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壤对其进行稀释。如土壤中石油烃浓度高于50000mg/kg时，应对其进行稀释；

（3）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；

（4）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；

（5）土壤含水率：宜控制在 90% 的土壤田间持水量；

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

（7）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%。

（8）土壤中重金属含量：不应超过 2500 mg/L。

#### 4. 技术应用基础和前期准备

该技术的适用性以及修复效果在一定程度上受土壤理化性质、污染特征等因素的影响。为此，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。

#### 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。

## 6. 修复周期

在广州市内无相关应用，根据国内相关研究，工程修复时间约为6-15个月。

## 7. 参考费用

在广州市内无相关应用，根据国内相关研究，综合单价约为400-600元/ $\text{m}^3$ 。

## 8. 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；在国内发展已比较成熟，相关核心设备已能够完全国产化。

截至目前，在广州市暂无工程案例。

## 9. 污染防治重点

（1）根据现场情况采取覆膜开挖或其他措施，防止发生有机污染物挥发产生二次污染；

（2）对修复区域采取防渗措施，并设置渗滤液和废气收集处理系统；

（3）做好污染物排放口及周边大气环境监测。

#### 10. 优点及局限性

（1）优点：无二次污染，处理费用较低，不破坏污染土壤的生态功能，污染土壤可二次利用。

（2）局限性：处理周期长，对存在重金属污染的复合污染土壤处理效果不佳；粘土类、高浓度污染土壤修复效果较差。

## 十二、 原位生物通风技术

（一）技术名称：生物通风技术

（二）技术适用性

1. 可处理的污染物类型：主要适用于挥发及半挥发性有机物。

2. 应用限制条件：一般不适用于重金属和难降解有机物。

（三）技术介绍

1. 原理：通过向土壤供给空气，并依靠土壤微生物的好氧活动，降解土壤污染物，同时利用土壤中的压力梯度促使挥发性有机物、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。

2. 系统构成和主要设备：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、抽气风机等）、营养水分分配系统（包括营养水分添加管网、添加泵、营养水分储存罐等）、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。

3. 关键技术参数或指标

## （1）土壤理化性质

土壤的气体渗透率：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 pH 值：大多数微生物生存的 pH 值范围为 5-9，通常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，土壤中碳:氮:磷的比例应维持在 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。一般添加的氮源为  $\text{NH}_4^+$ ，磷源为  $\text{PO}_4^{3-}$ 。

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  $\text{H}_2\text{O}_2$ 、 $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{NO}_3^-$  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微生物大量生长时，需考虑接种高效菌。

## 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，可开展相应的小试或中试实验。

## 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<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>O。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。

#### 6. 修复周期

广州市及国内未见相关工程应用，根据国外相关资料，工程修复时间约为6-24个月。

#### 7. 参考费用

广州市及国内未见相关工程应用，根据国外相关资料，处理成本约为100-200元/m<sup>3</sup>。

#### 8. 应用情况

根据国外相关资料，生物通风技术可以修复的污染物范围广泛，修复费用相对低廉，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。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。

#### 9. 污染防治重点

处理挥发性有机污染时，需做好二次污染防治措施。

#### 10. 优点及局限性

（1）优点：修复成本低、二次污染风险小，无需进行开挖。

（2）局限性：处理周期长；不适用土壤渗透系数较小的场地。