

附件 2

污染地块修复技术指南 —固化/稳定化技术（试行）

（征求意见稿）

二〇一七年十一月

概 要

固化/稳定化技术是一种通过添加固化剂或稳定剂，将土壤中的有毒有害物质固定起来，或者将污染物转化成化学性质不活泼的形态，阻止其在环境中迁移和扩散过程，从而降低其危害的修复技术。固化和稳定化技术在工作原理和作用特点上各有不同，但在实践中经常搭配使用，是两个密切关联的过程。固化处理是利用惰性材料（固化剂）与污染土壤完全混合，使其生成结构完整、具有一定尺寸和机械强度的块状密实体（固化体）的过程；稳定化处理是利用化学添加剂与污染土壤混合，改变污染土壤中有毒有害组分的赋存状态或化学组成形式，从而降低其毒性、溶解性和迁移性的过程。固化处理的目的在于改变污染土壤的工程特性，即增加土壤的机械强度，减少土壤的可压缩性和渗透性，从而降低污染土壤处置和再利用过程中的环境与健康风险；稳定化处理的目的在于降低污染土壤中有毒有害组分的毒性（危害性）、溶解性和迁移性，即将污染物固定于支持介质或添加剂上，以此降低污染土壤处置和再利用过程中的环境与健康风险。

固化/稳定化技术已有数十年的发展历史，是较为成熟的土壤修复技术，既可用于修复污染土壤，也可用于处理沉积物、污泥和固体废物等，具有修复周期短，达标能力强，作用对象广泛（可处理多种性质稳定的污染物），并能与其他修复技术配合使用的特点，是国内外普遍应用的污染土壤修复技术。然而，固化/稳定化技术也有其不足与局限性，例如不能实质性销毁或去除污染物，修复后可能会使土壤产生增容效应，污染物的长期环境行为难以预测，需要对固化/稳定化产物进行长期监测与维护等。

根据修复模式要求或实际操作条件需要，固化/稳定化修复可在异位也可在原位进行。异位固化/稳定化适用于修复浅层污染土壤或大型机械无法进入的小型污染地块，且由于其能较好控制粘合剂的添加和混合质量，修复效果往往较为理想，不足之处是需要开挖污染土壤、暂存土壤、转运土壤和对污染土壤进行前处理（如破碎和筛分），这些过程会造成扬尘和噪音，甚至挥发物释放等环境影响，且修复完成后还需回填或处置土壤，并对土壤进行压实与覆盖等操作，修复成本较高。原位固化/稳定化适用于深层及大面积污染土壤的治理与修复，其通过利用开凿或钻孔机械将粘合剂与受污染土壤原地直接混合，操作环节相对异位修复要少，对环境造成二次污染的风险也较小，并可显著降低污染土壤的治理与修复成

本，但局限性在于难以有效治理粘稠度较大的土壤，容易受到地下障碍物（如碎石瓦砾等）和地层结构变化的影响，常因混合搅拌不够均匀而降低修复效果与质量，修复单元间对接不充分会形成污染土壤“夹层”，修复后土壤体积增容改变地面形状，操作过程对地面承载力和地块面积有一定的要求等。

固化/稳定化技术的一般工作程序包括技术适用性评价、方案设计、施工建设、修复效果评估、长期监测与维护等。具体工作步骤为：首先根据地块污染特征及固化/稳定化技术特点进行技术适用性评价；若技术适用，则可进行方案设计，开展可行性试验研究，确定污染土壤的前处理要求、粘合剂的种类和用量需求、原位/异位修复设备与条件的需求等，并对修复成本、时间和效益等进行分析，采用适当的性能指标和参数（主要包括固化/稳定化产物的抗压强度、渗透系数、增容比和浸出特性等）综合评价该技术的可行性；若可行性试验研究证明固化/稳定化技术合理可行，则可完成修复方案编制并进入施工建设阶段；施工前要做好现场布局安排和工作进度安排，施工期间则要做好施工质量控制、二次污染防治、环境监测、健康与安全防护等工作；修复完成后需对固化/稳定化产物进行修复效果评估，符合规定标准的可进行安全处置或资源化再利用；随后，对固化/稳定化产物进行长期监测与维护，保证修复效果持久有效。

常用的固化技术包括水泥固化、石灰/火山灰固化、塑性材料固化、有机聚合物固化、自胶结固化、熔融固化（玻璃固化）和陶瓷固化等；常用的稳定化技术包括 pH 值控制技术、氧化/还原电位控制技术、沉淀与共沉淀技术、吸附技术、离子交换技术等。常见的固化剂（胶凝材料）包括无机粘合物（如水泥、石灰等）、有机粘合剂（如沥青等热塑性材料）、热硬化有机聚合物（如酚醛塑料和环氧化物等）和玻璃质物质等；常见的稳定剂（添加剂）包括磷酸盐、硫化物、铁基材料、黏土矿物、微生物制品（剂）或上述材料的复合混配制品（剂）等。固化/稳定化施工建设过程使用的重型机械和装备一般包括挖掘机、推土机、搅拌机、灌浆机、喷浆机、螺旋钻机以及其他辅助设备（如防尘罩）等。

固化/稳定化技术既适用于处理无机污染物，也适用于处理部分有机污染物。许多无机物和重金属污染土壤，如无机氰化物（氢氰酸盐）、石棉、腐蚀性无机物以及砷、镉、铬、铜、铅、汞、镍、硒、锑、铀和锌等重金属污染的土壤，均可采用固化/稳定化技术进行有效治理与修复，而有机污染土壤中适用或可能适用的污染物类型包括有机氰化物（腈类）、腐蚀性有机化合物、农药、石油烃（重

油)、多环芳烃(PAHs)、多氯联苯(PCBs)、二恶英或呋喃等,但对卤代和非卤代挥发性化合物一般不适用(除非进行了特殊的前处理)。此外,由于有机污染物往往对水硬性胶凝材料的固结化作用有干扰效应,因此,在实践上固化/稳定化技术更多用于无机污染土壤的治理与修复。

影响固化/稳定化技术应用的关键因素包括土壤特性、土壤颗粒大小、密度、渗透性、自由压缩力,以及土壤含水量、重金属污染浓度、硫酸盐含量、有机物含量等。目前已知有多种无机盐和有机化合物可对固化/稳定化作用产生干扰效应,一些内部因素(如pH、渗透系数、孔隙度等)和外部环境因素(如干-湿交替、冻-融交替、气体侵蚀等)也会对固化/稳定化产物的性能造成重要影响。

固化/稳定化施工过程质量控制是保证修复效果达标的重要保证,也是决定修复工程成败的关键。施工过程必须严格做好材料与设备的质量控制以及混合过程的质量控制,以免造成修复效果不达标的不良后果。固化/稳定化修复效果不达标需重新进行修复,重新修复是一个成本昂贵且操作困难的工程,一般会涉及固化/稳定化产物的破碎和前处理,且相比于原来的污染土壤,破碎后的固化/稳定化产物其再固化/稳定化的处理效果往往相对较差,修复效果不达标的风险会升高。因此,必须严格做好固化/稳定化施工过程的质量控制,保证修复效果稳定达标。此外,施工过程还需做好二次污染防治、环境监测、健康与安全防护等工作,确保修复进程顺利。

固化/稳定化修复完成后需进行修复效果评估,并对产物进行长期监测与维护。修复效果评估以固化/稳定化产物能够有效控制污染物释放,从而实现对地下水(或地表水)的保护为主要目标,性能评价指标一般包括固化体机械强度(通过测试固化体抗压强度进行评价)、抗渗透性(用试验结果进行评价)以及固化/稳定化产物的抗浸出性(用浸出率进行评价)等,特定条件下还应评估抗干-湿性(用试验结果进行评价)、抗冻-融性(用试验结果进行评价)、耐腐蚀性(用试验结果进行评价)和耐热性(导热与不可燃性,用实验结果进行评价)等。对固化/稳定化产物处置或再利用有体量限制要求的,还应评估其增容比(用测量结果进行评价);增容比应越低越好,尽量少增容或不增容,减少土壤修复的综合成本。

长期监测通过在固化/稳定化产物处置或再利用区域周边建立地下水监测井(或地表水监测点)进行,重点监测和评估固化/稳定化产物对地下水(或地表

水)的影响,一般修复完成后前五年的监测频率为每半年一次,第五年后视具体情况进行调整。长期监测期间发现固化/稳定化产物中污染物的溶出浓度超过预先规定的地下水(或地表水)标准的,应采取补救措施,防止固化/稳定化产物对环境的污染。长期监测持续时间原则上不少于5年,第五年后根据固化/稳定化产物的长期稳定性和运行效果决定是否需要进行继续监测,当固化/稳定化产物中污染物的溶出浓度能持续满足地下水(或地表水)的相关标准要求时,可终止监测;反之,则需继续进行监测。

目 录

前言.....	50
1 适用范围.....	50
2 术语和定义.....	50
3 规范性引用文件.....	51
4 固化/稳定化技术概况.....	52
4.1 固化/稳定化技术原理与特点.....	52
4.2 影响固化/稳定化作用的主要因素.....	54
4.3 固化/稳定化技术工作流程.....	57
5 固化/稳定化技术适用性评价.....	60
6 固化/稳定化方案设计要求.....	62
6.1 可行性试验研究技术要求.....	62
6.2 粘合剂使用要求.....	64
6.3 设备及现场条件要求.....	66
6.4 方案确定.....	68
7 固化/稳定化施工建设要求.....	68
7.1 现场工作安排.....	68
7.2 施工过程操作技术要求.....	69
7.3 施工过程质量控制要求.....	70
7.4 二次污染防治要求.....	75
7.5 环境监测要求.....	76
7.6 健康与安全防护要求.....	78
8 固化/稳定化修复效果评估要求.....	80
8.1 修复效果评估内容与技术要求.....	80
8.2 修复效果评估指标与方法.....	81
9 固化/稳定化产物长期监测与维护要求.....	84
9.1 长期监测.....	84
9.2 长期维护.....	85
10 附录.....	87
附录 1 固化/稳定化技术适用条件分析.....	87
附录 2 常见粘合剂举例.....	89
附录 3 常用固化/稳定化技术装备举例.....	92
附录 4 案例评估.....	94

前 言

为贯彻落实《土壤污染防治行动计划》和《污染地块土壤环境管理办法（试行）》（环境保护部令第42号），指导和规范固化/稳定化技术在污染地块治理与修复中的应用，制定本指南。

1 适用范围

本指南适用于污染土壤的固化/稳定化治理与修复。河流沉积物、污泥及其他固体废物的治理与修复可参照执行。

本指南不适用于挥发性有机污染土壤和液体废物的固化/稳定化治理与修复。

2 术语和定义

2.1 固化/稳定化 solidification/stabilization

通过添加固化剂或稳定剂，将土壤中的有毒有害物质固定起来，或者将污染物转化成化学性质不活泼的形态，阻止其在环境中的迁移、扩散等过程，从而降低污染物毒害程度的修复技术。

2.2 固化/稳定化产物 treated material

污染土壤完成固化/稳定化处理后形成的产物。

2.3 粘合剂 binder

能够固化/稳定化土壤污染物的反应剂，可以是一种，也可以是多种反应剂的混合物，按反应特点和作用原理可分为固化剂和稳定剂。

2.4 原位修复 in-situ remediation

不经挖掘，直接在原地对污染土壤进行固化/稳定化处理。

2.5 异位修复 ex-situ remediation

将污染土壤挖出后再进行固化/稳定化处理。

2.6 可行性试验 treatability test

以特定地块污染土壤为试验材料，通过实验室小试和现场中试，研究和确定该地块土壤的污染特性和使用固化/稳定化技术修复的前处理要求、粘合剂配比与用量、现场操作条件与要求、修复成本、时间和效益，以及其他性能指标和参数的过程。

2.7 性能指标 performance specification

又称性能规范，是指在开展固化/稳定化技术适用性评价、方案设计、施工建设、修复效果评估和长期监测与维护等活动过程中，用于评价固化/稳定化产物性能与效果的各类参数以及相关的检测方法和评估标准的集合。

2.8 无侧限抗压强度 unconfined compressive strength

简称无侧限强度，是指固化/稳定化产物在无侧限条件下，抵抗轴向压力的极限强度。

2.9 水力传导系数 hydraulic conductivity

又称渗透系数，是表征固化体透水能力的参数。其物理意义为水力坡度为 1 时地下水在固化体中的渗透速度，量纲为 L/T。

2.10 浸出特性 leachability

浸出是指可溶性污染物通过浸透或扩散等方式从固化/稳定化产物中溶解到浸出液的过程，浸出特性是固化/稳定化产物通过各种理化机理固定和稳定污染物的性能描述，可用浸出率进行评价。

2.11 增容比 enlargement ratio

污染土壤固化后固化体体积与污染土壤原体积比。

3 规范性引用文件

本指南内容引用了下列文件中的条款。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本指南。

GB175	通用硅酸盐水泥
GB16297	大气污染物综合排放标准
GB 18596	危险废物贮存污染控制标准
GB 18598	危险废物填埋污染控制标准
GB 50869	生活垃圾卫生填埋处理技术规范
GB/T 749	水泥抗硫酸盐浸蚀试验方法
GB/T17671	水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)
GB/T 50082	普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准
HJ 25.1	场地环境调查技术导则
HJ 25.2	场地环境监测技术导则

HJ 25.4	污染场地土壤修复技术导则
HJ 557	固体废物浸出毒性浸出方法水平振荡法
HJ/T 299	固体废物浸出毒性浸出方法硫酸硝酸法
CECS104:99	高强混凝土结构技术规程
JGJ/T 208	后锚固法检测混凝土抗压强度技术规程
CJJ01	城镇道路工程施工与质量验收规范
JTGE51	公路工程无机结合料稳定材料试验规程
JTGF80/1	公路工程质量检验评定标准

4 固化/稳定化技术概况

4.1 固化/稳定化技术原理与特点

固化/稳定化技术是一种用于处理污染土壤及其他污染介质的技术，其主要工作原理是：通过在污染土壤中添加和混合粘合剂（如胶凝剂或凝硬剂），使之与污染土壤发生反应，改变土壤的理化性质，使土壤成形为结构密实、抗压性强、渗透性低的固化/稳定化产物，从而降低土壤中污染物的迁移性，使得污染物的溶出（浸出）浓度达到特定地块修复目标中规定的可接受水平，最终实现对地下水和（或）地表水的保护目的。

根据反应原理与特点，固化技术和稳定化技术的主要区别在于：

- ✧ 固化技术：添加固化剂使污染土壤形成高度密实、结构完整的固化体，降低土壤中污染物的浸出率；或使用低渗透惰性材料将污染土壤包裹和包埋，阻止污染物释放和流出。固化过程是将污染土壤包埋或包裹形成颗粒状或团块状固化体（固化/稳定化产物）以降低污染物迁移和减少外露面积的一个物理过程，固化剂通常不与污染物发生化学反应。
- ✧ 稳定化技术：添加稳定剂与土壤中污染物产生化学反应，通过吸附、离子交换、共沉淀等原理提升污染物在空间上的稳定性，降低外部环境对其产生的影响。稳定化过程是通过粘合剂与污染土壤发生化学反应使其中的污染物成为难溶解状态从而降低污染物迁移的化学过程，修复后土壤的物理性质一般不会发生明显改变。

虽然固化和稳定化在定义上是两个独立的过程，但在实践中往往是搭配使用，同时实施和同时发生的。固化/稳定化技术的原理性概念模型如图 4-1 所示（以

原位灌注固化/稳定化为例)。

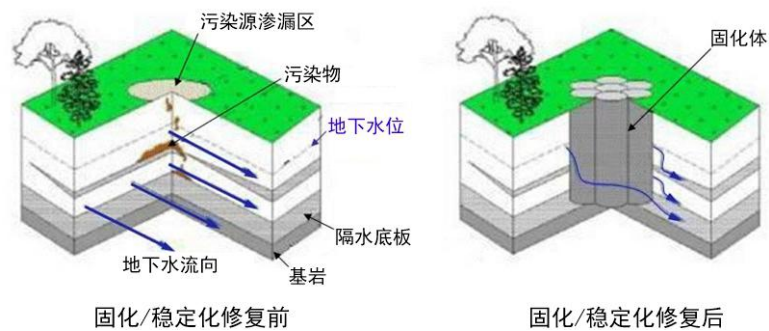


图 4-1 固化/稳定化技术概念模型图（原位灌注法）

固化/稳定化技术既适用于处理无机污染物，也适用于处理某些性质稳定的有机污染物。许多无机物和重金属污染土壤，如无机氰化物（氢氰酸盐）、石棉、腐蚀性无机物以及砷、镉、铬、铜、铅、汞、镍、硒、锑、铀和锌等重金属污染的土壤，均可采用固化/稳定化技术进行有效的治理和修复，而有机污染土壤中适用或可能适用的污染物类型包括有机氰化物（腈）、腐蚀性有机化合物、农药、石油烃（重油）、多环芳烃（PAHs）、多氯联苯（PCBs）、二恶英或呋喃等（表 4-1），但对于卤代和非卤代挥发性有机化合物一般不适用（除非进行了特殊的前处理）。此外，考虑到部分有机污染物对固化/稳定化处理后水泥类水硬性胶凝材料的固结化作用有干扰效应，因此，固化/稳定化技术更多的用作为无机污染物的源处理技术。

表 4-1 固化/稳定化技术目前可有效处理的污染物类型

● 重金属、类金属 ● 石棉 ● 放射性核素 ● 无机类腐蚀性物质，包括盐酸、硫酸、氢氧化钠、氢氧化钾 ● 无机类氰化物，包括各种氰化物盐 ● 固态有机物（塑料、树脂、焦油等） ● 半挥发性有机污染物，包括多氯苯、多氯联苯（PCBs）、多环芳烃（PAHs）、含氯苯酚 ● 二噁英、呋喃等

用于进行固化/稳定化处理的材料一般为水泥类或石灰类粘合剂，常见的有硅酸盐水泥、粉煤灰、粒化高炉矿渣细粉、硅灰、水泥窑灰、各类石灰和石灰窑灰等，但最常用的还是水泥。由于上述粘合剂（固化剂）一般不与有机污染物直接产生粘合作用，因此在处理有机污染土壤时一般还会添加一些可增进与有机污染物产生吸附和稳定作用的添加剂，常见的添加剂包括有机黏土、膨润土、活性

炭、磷酸盐、橡胶颗粒、化学胶等。

固化/稳定化技术可以单独用于处理污染土壤，也可联合其他风险管控技术处理复合污染的土壤。固化/稳定化技术的特点是通过土壤基质与粘合剂反应来降低污染物的迁移性，原理包括促进污染物吸附、共沉淀或将其固定在矿物晶格结构中或直接进行物理封隔。从固化/稳定化技术的应用实践来看，使用水硬性胶凝材料与水反应形成固化体的方法应用最为广泛，尤其是设计用于同时提高污染土壤抗浸出性及物理性能的修复方法使用最多。

固化/稳定化修复完成后需要对固化/稳定化产物进行长期监测与维护，保证其完整性、酸中和能力并明确污染物扩散的时空变化规律。因此，其修复成本除取决于污染物属性与浓度、污染土壤类型、粘合剂用量、实施和运行费用等外，还包括长期监测与维护费用等。

固化/稳定化技术虽然有许多技术上的优点，但也有一些明显的缺点或局限性，主要优、缺点见表 4-2。

表 4-2 固化/稳定化技术优、缺点对比

优点	缺点
● 实施周期短、达标能力强 ● 适用于多种性质稳定的污染物(如 NAPL、重金属、多氯联苯、二噁英等) ● 根据规划要求或实际操作条件，可在原位，也可在异位进行。 ● 修复后可就地管理，无需外运 ● 修复成本低、修复材料与设备占用空间相对较小 ● 处理后土壤的结构和性能（如机械强度、均一性、渗透性等）得到改善	● 一般不能销毁或去除污染物 ● 难以预见污染物的长期行为 ● 可行性试验研究确定的参数具有时间/空间不确定性 ● 可能会增加污染土壤的体积（增容） ● 消耗天然资源（如地下水等） ● 需要长期监测与维护

4.2 影响固化/稳定化作用的主要因素

目前，已知有多种化学物质可对固化作用的过程和结果产生直接或间接的影响，具体见表 4-3。此外，对于固化/稳定化产物，也有许多内部因素和外部环境因素可能对其性能产生影响。内部因素包括固化/稳定化产物自身固有的物理与化学因素，也包括放置固化/稳定化产物的地下环境中特有的一些因素，这些因

素应在可行性试验研究阶段进行识别和确定；影响固化/稳定化产物性能的外部因素主要为一些外部环境因素。具体影响因素以图 4-2 所示的水泥类固化/稳定化产物为例说明。

表 4-3 可能影响固化作用的因素

影响因素	可能的影响方式
重金属（铅、铬、镉、砷、汞）	如果重金属浓度过高，将延长硬化所需时间
硝酸盐、氰化物	将延长硬化时间，降低以水泥为基础的固化产物的耐久性
镁、锡、锌、铜、铅等可溶性盐类	使无机物的最终固化产物膨胀或破裂，使固化体暴露更多表面积，增加重金属浸出（溶出）可能性
降低整体 pH 值的环境及土壤特性	导致最终固化体退化
凝结剂（例如氯化铁）	影响水泥及水泥类固化体的硬化
土壤中超过 0.01% 或水中超过 150mg/L 的可溶性硫酸盐	硫会对水泥固化体产生破坏作用
土壤中超过 0.5% 或水中超过 2000mg/L 的可溶性硫酸盐	硫会对水泥固化体产生严重的破坏作用
脂肪烃和芳香烃化合物	延长水泥硬化所需时间
含氯有机物	如果浓度过高，将延长水泥硬化时间，并降低耐久性
金属盐类及复合物	延长水泥或黏土/水泥的硬化时间，并降低耐久性
无机酸	降低水泥(硅酸盐水泥)或黏土/水泥的耐久性
无机碱（如氢氧化钾和氢氧化钠）	降低黏土/水泥的耐久性
有机化合物	有机物可能会干扰土壤和无机固化剂的结合
半挥发性有机化合物或多环芳烃化合物	有机物可能会干扰土壤与粘合剂的结合
油脂	油脂会包覆土壤颗粒，降低土壤和粘合剂的结合
细颗粒物物质	由于细颗粒物物质(通过#200 筛网的不可溶颗粒)会包覆较大的颗粒物物质，降低土壤颗粒和固化剂或其他添加剂的结合
卤素	阻碍固化体形成，容易从水泥或硅酸盐水泥固化体中溶出，或使热塑性固化体脱水
锰、锡、锌、铜、铅等可溶性盐类	由于各种重金属盐类的存在，固化体硬化时间出现差异，将影响固化体的稳定性或降低固化产物的物理结合力，增加重金属浸出风险
氰化物	氰化物会干扰土壤与粘合剂的结合
砷酸钠、硼酸盐、磷酸盐、碘酸盐、硫化物及碳水化合物	减缓固化或硬化进程，减弱最终固化体的强度
硫酸盐	减缓硬化进程，并导致水泥固化/稳定化产物膨胀或碎裂；对热塑性的固化过程，可造成脱水及再水化，容易导致固化体破裂
酚	高酚含量会导致压缩力明显减弱
煤或褐煤	煤和褐煤会影响固化程序及最终产物的强度
硼酸钠、硫酸钙、重铬酸钾及碳水化合物	硅酸钙和铝酸水合物的形成会阻碍硅酸盐水泥的固化反应

非极性有机物（油脂、芳香烃、多氯联苯）	影响水泥、硅酸盐水泥或有机聚合物的硬化，降低固化体长期的耐久性；对于热塑性固化体，高温将使有机物挥发
极性有机物（醇、酚、有机酸、乙二醇）	高浓度的酚会减弱硬化程度，降低水泥类固化体的短期及长期耐久性；热塑性固化/稳定化将会造成有机物挥发，而乙醇会减弱硅酸盐水泥固化体的硬化
固体有机物（塑料、沥青、树脂）	对尿素甲醛聚合物的形成效果不佳，或许也会对其他聚合物的硬化程度有影响
氧化剂（次氯酸钠、过锰酸钾、硝酸，或重铬酸钾）	对热塑性及有机聚合固化体可能造成破坏，或导致起火燃烧

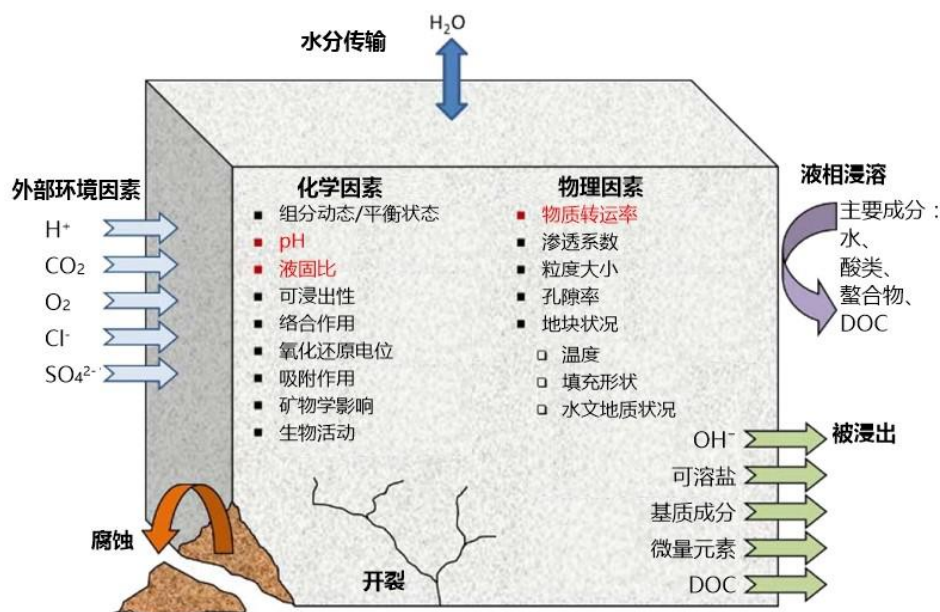


图 4-2 影响水泥类固化/稳定化产物的内部和外部因素概念模型图

4.2.1 内部因素

影响固化/稳定化产物性能的内部物理因素主要包括固化/稳定化产物的单元尺寸、渗透系数、孔隙度等，其中，渗透系数是最重要的内部因素，决定着地下水与固化/稳定化产物接触的方式，比如渗透性高时地下水会穿透和流过固化/稳定化产物的内部，而渗透性低时地下水只是围绕其表面（绕行）流过。

内部化学因素中 pH 对固化/稳定化产物性能的影响最大，因为其既可影响污染物的浸出特性（如通过改变污染物的形态），也可影响固化/稳定化产物的结构性能（如使提供强度的矿物质发生溶解）。pH 的主要影响对象包括：

- ✧ 水泥类固化/稳定化产物的酸中和能力；
- ✧ 无机污染物在固化/稳定化产物中的赋存形态（如离子交换态、吸附态、

在孔隙水中的沉淀态等)；

✧ 吸附有机污染物的有机质（腐殖酸、富里酸等）。

4.2.2 外部因素

外部因素对固化/稳定化产物的影响与固化/稳定化产物在地下放置的位置有关，尤其与地下水位之间的相对位置有关，具体包括：

（1）饱和带水流影响：在饱和带中，地下水会缓慢渗过固化/稳定化产物或从其表面绕行。一般情况下，只要地下水状况保持稳定，固化/稳定化产物的性质基本保持不变，且可根据相关模型预测产物中污染物的浸出特性。

（2）包气带水流影响：在包气带中，固化/稳定化产物主要受到雨水下渗的影响，但这种影响相对于饱和带中地下水流动的影响要小得多，因此固化/稳定化产物在包气带中的耐久性一般比在饱和带中要好一些。包气带中可能对固化/稳定化产物产生影响的主要因素有：

✧ 干-湿交替的影响：干-湿交替可能会导致固化体收缩开裂，但通常不会影响到固化体的整体结构。必要时应对固化体的耐干-湿交替能力进行评估，也可测定干-湿交替对浸出毒性的影响。

✧ 冻-融交替的影响：冷冻条件下固化体中的孔隙水膨胀会产生应力，严重时可导致固化体发生变形或产生破裂，导致浸出毒性升高。

✧ 气体侵蚀反应的影响：在包气带中，由于固化体与土壤气接触，容易发生碳酸化反应和氧化反应，从而使浸出特性发生改变，影响修复效果。

另外，物理性损坏（如破裂和磨损）一般对固化体性能影响较小，并且多由地震活动引起。大的贯通式破裂会使固化体的外部暴露面积略有增加，但这对污染物的固定效果影响较小。不过，必要时也可在修复过程中适当考虑提高固化体的抗震能力。工程质量问题，如设计错误、施工水平低下、质控技术落后等人为因素也会间接影响固化/稳定化产物的各项性能。

4.3 固化/稳定化技术工作流程

固化/稳定化技术的一般工作程序包括：技术适用性评价、方案设计、施工建设、修复效果评估、长期监测与维护等（图 4-3）。具体工作步骤为：首先根据特定地块污染特征及固化/稳定化技术特点进行固化/稳定化技术适用性评价；若技术适用，则可进行方案设计，开展可行性试验研究，确定污染土壤的前处理要

求、粘合剂种类主用量、原位/异位修复设备需求，以及修复成本、时间和效益等性能指标，并采用适当的参数（主要包括固化/稳定化产物的抗压强度、渗透系数和浸出特性等）评价该技术的可行性；若可行性试验研究证明固化/稳定化技术合理可行，则可完成修复方案编制并进入施工建设阶段；施工前要做好现场布局安排和进度安排等工作，施工期间则要做好施工质量控制、二次污染防治、环境监测、健康与安全防护等工作；修复完成后需对固化/稳定化产物进行修复效果评估，符合规定标准的可进行安全处置或资源化再利用，随后进行长期的监测与维护，以保证修复效果持久有效。

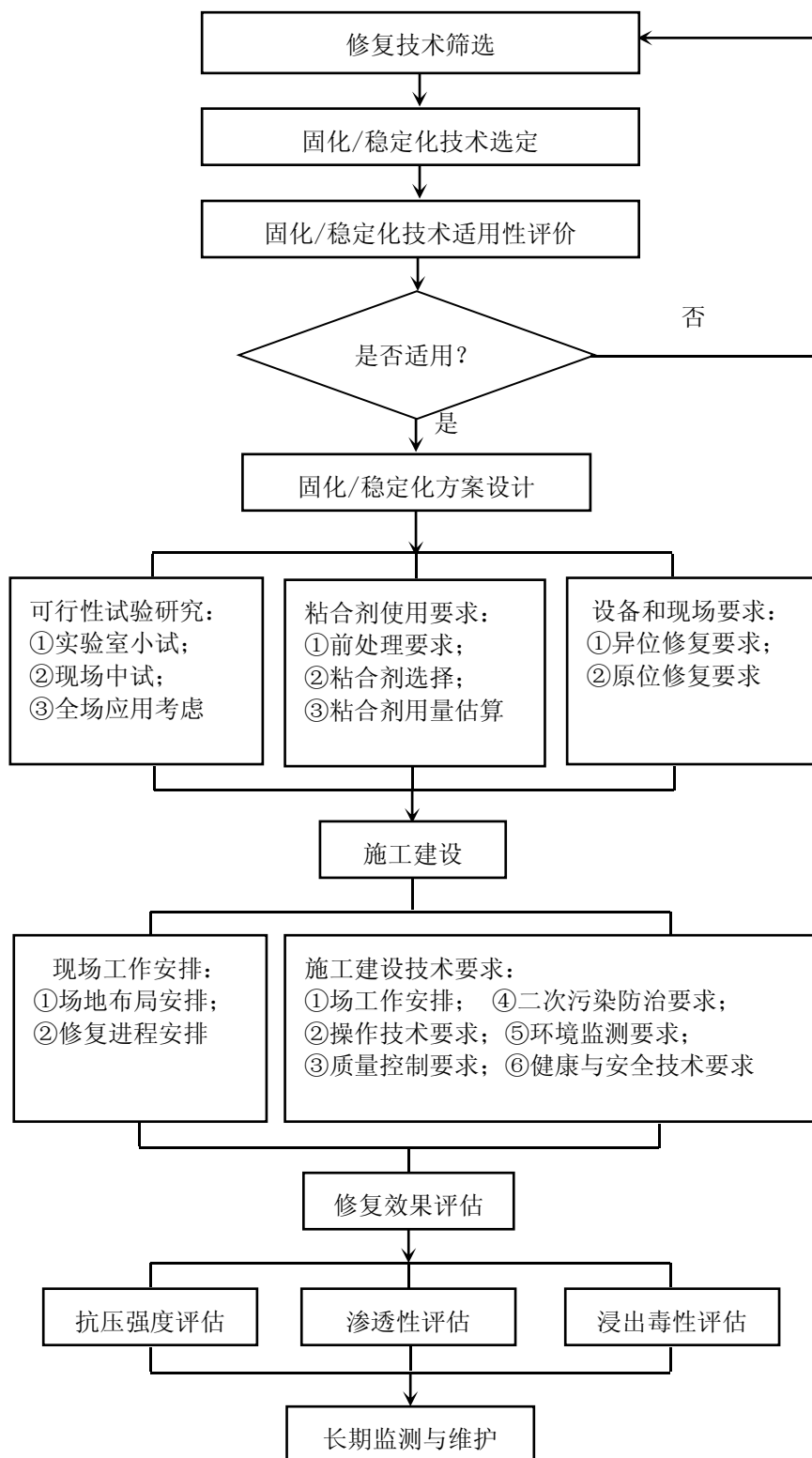


图 4-3 固化/稳定化工作流程

5 固化/稳定化技术适用性评价

确定采用固化/稳定化技术进行污染土壤治理与修复前，应先开展技术适用性评价，尤其要关注影响固化/稳定化技术适用性的关键因素，包括土壤特性、土壤颗粒大小、含水量、重金属浓度、硫酸盐含量、有机物含量、密度、渗透性、自由压缩力等。

固化/稳定化技术适用性评价可参照以下步骤进行：

（1）确认地块污染概况，包括确认地块条件、污染物类型、污染介质的种类，同时应建立地块概念模型，明确修复目标和修复范围，以及需要进行固化/稳定化处理的污染土壤方量等信息。在充分分析各项指标后，综合判断已有的地块信息是否满足启动修复的条件和要求，若无法满足，则需重新确认地块污染概况。确认污染地块概况的技术流程和技术方法可参照《污染地块土壤修复技术导则》（HJ 25.4）执行，确认的主要内容参见表 5-1。

表 5-1 确认地块污染概况的主要内容

污染土壤参数	地块特征
● 污染物种类及其理化特性（物理形态、溶解性、挥发性等） ● 污染物浓度、分布范围 ● 污染物背景浓度 ● 污染土壤方量 ● 土壤岩土性质（含水量、密度、机械强度、粒度分布、有机质含量等）	● 地块污染历史 ● 地质和结构（包括岩性单元的几何形态） ● 水文地质参数（包括水质、地下水位及其季节性变化） ● 含水层相关参数 ● 敏感受体的类型及其与地块的相对位置 ● 污染链相关信息 ● 地块入场条件与可操作性 ● 基础设施布局（建筑物、生活设施、地下构筑物等） ● 土地利用规划（近期或长期规划）及制约条件 ● 生态保护现状 ● 地块考古学价值和意义 ● 废物填埋入场标准

（2）根据地块污染概况、地块概念模型、土地再利用规划和功能属性等综合制定修复策略，包括明确是否采用控制污染源、切断暴露途径、保护敏感受体等方式进行治理与修复；确认现场是否允许原位或异位修复，是否适合采用物理

或化学修复技术等。修复策略制定的技术流程可参照《工业企业污染调查评估与修复技术指南（试行）》执行。

（3）根据修复策略比选并确认修复技术，应考虑污染物处理的可行性、土壤修复的可行性、污染分布范围与深度、修复过程污染物的排放、修复时间要求、运输条件和限制因素，以及修复成本、效益等各种因素。修复技术比选的技术流程可参照《工业企业污染调查评估与修复技术指南（试行）》执行。固化/稳定化技术的适用条件可参见附录 1。

（4）适合采用固化/稳定化技术进行修复的污染物类型见本指南表 2-1。选择固化/稳定化技术进行土壤修复前，必须充分论证其对目标地块的修复潜力。首先明确该技术应是针对某特定地块的最佳修复技术，也可以是针对某种污染物或局部区域的最佳修复技术，或是能够配合其他技术协同修复污染地块的最佳技术。若固化/稳定化技术并非修复某特定地块的最佳可行技术，则应充分考虑和论证其他最佳技术；若所有修复技术均不能满足地块修复目标的要求，则应重新修正或制定更加切合实际的修复目标。

（5）综合各项因素和选定的最佳修复技术，编制总体修复方案。多种修复技术联用时，要根据污染介质类型、污染物特征、地块地质单元结构确定修复流程。固化/稳定化技术应用受到限制时，技术层面上的问题应尽量通过工程技术方法解决。固化/稳定化技术与其他技术联用的常见技术组合包括：

- ✧ 固化/稳定化技术与地表覆盖技术联用；
- ✧ 固化/稳定化技术与防渗阻隔墙（如泥浆墙）或可渗透反应墙技术联用；
- ✧ 洗土法与固化/稳定化技术联用；
- ✧ 热解吸与固化/稳定化技术联用；
- ✧ 生物处理与固化/稳定化技术联用；
- ✧ 固化/稳定化技术与水力控制技术联用；
- ✧ 固化/稳定化技术与监测自然衰减技术联用。

（6）确定使用固化/稳定化技术后，应根据以下情况来判断是否可以进入方案设计阶段，包括：

- ✧ 是否存在严重阻碍固化/稳定化技术使用的限制条件；
- ✧ 是否有证据证明固化/稳定化技术是实现修复目标的最佳技术；
- ✧ 固化/稳定化技术与其他技术联合应用的可能性；

- ✧ 固化/稳定化技术是否可持久解决问题；
- ✧ 与其他技术相比在修复成本上是否相对有利；
- ✧ 已掌握的信息其不确定性水平如何。

(7) 在确定固化/稳定化技术为最佳修复修复技术后，应与管理部門和其他利益相关方进行沟通过与汇报，汇报内容应包括以下要点：

- ✧ 修复方案确定过程介绍及主要目标；
- ✧ 土壤及地块环境特征；
- ✧ 包含所有污染联系的地块概念模型；
- ✧ 修复技术筛选标准和筛选结果；
- ✧ 提出修复方法（采取单独技术还是联合修复技术）。

6 固化/稳定化方案设计要求

固化/稳定化修复方案设计的重点是技术可行性试验研究，即设计并通过试验确定合适的粘合剂、修复装备和施工方法。设计修复方案时，应明确修复目标、职责分工、工作流程、前期准备，以及地块修复工作的实施、监管、效果评估和后期的监测与维护等工作内容，具体包括：

- ✧ 现场准备与施工进度安排计划；
- ✧ 分阶段和按计划实施计划；
- ✧ 修复过程质量管理计划；
- ✧ 固化稳定化产物的处置或资源化再利用计划；
- ✧ 粘合剂的种类确定与用量计划；
- ✧ 选择施工机械和设备的计划；
- ✧ 二次污染防治计划；
- ✧ 环境监测计划；
- ✧ 人员健康与安全防护计划；
- ✧ 修复效果评估计划；
- ✧ 修复完成后的监测与维护计划。

6.1 可行性试验研究技术要求

由于地块条件不同，需进行可行性试验研究确定关键参数与潜在问题。可行

性试验研究的内容与目的主要包括：

- ✧ 确定粘合剂最佳剂量与配比；
- ✧ 预测修复过程中可能出现的各种问题或障碍；
- ✧ 确定施工过程可能对环境产生的影响（如挥发物排放）；
- ✧ 确定土壤的理化特征与均一性；
- ✧ 确定固化/稳定化产物的增容量。

6.1.1 实验室小试

实验室小试应采用现场样品进行试验，对污染土壤及粘合剂的理化特性进行分析，并针对特定参数需求开展试验研究。采集的土壤样品应尽量代表污染地块的整体污染状况，相关采样技术可参照《场地环境调查技术导则》（HJ 25.1）、《场地环境监测技术导则》（HJ 25.2）和《土壤环境监测技术规范》（HJ/T 166）执行，采样量应根据试验内容具体确定，一般不少于 0.04m³。

小试阶段需根据特定污染地块的情况评估和确定粘合剂的用量与配比，同时确定其他可能产生干扰的因素，如地块内存在障碍物，可能发生挥发性污染物释放和扩散等。

实验室小试的目的主要包括：

- ✧ 确定是否需要污染土壤进行前处理；
- ✧ 确定不同粘合剂的修复效果及其能否满足地块特定性能参数的需要；
- ✧ 比对各粘合剂的成本与操作难易度；
- ✧ 明确各种处理方法所得到的固化/稳定化产物其机械强度随时间变化特征；
- ✧ 明确修复过程是否有挥发性污染物扩散的可能；
- ✧ 评估固化/稳定化产物的理化特性、均匀程度、体积变化以及长期性能。

根据固化/稳定化产物的最终处置或资源化利用目的，按照评估固化/稳定化效果的指标和标准，如固化/稳定化产物的物理性能（如密度、黏度）和物理特性（如强度、浸出毒性）等指标，分析和评估实验室小试结果。

6.1.2 现场中试

小试完成后，选择综合效果最佳的技术方案进行现场试验（中试）。现场试验是评估全场范围内粘合剂使用条件和设备性能的重要过程，并可验证小试结果的可靠性。现场中试方案应提前制订，包括制订执行方案、健康与安全防护计划、

选择合理试验方量的计划，以及现场修复设备的安装计划等。

现场中试的目的主要包括：

- ✧ 评估实验室小试结果与使用现场设备时的修复效果是否一致；
- ✧ 明确是否有其他地块因素影响（介质的不均一性、混合效应等）的干扰；
- ✧ 评估实验室小试所确定的性能参数在实际应用时是否能达标；
- ✧ 大规模施工时产出的固化/稳定化产物性能是否能够保持一致。

原位修复的土壤差异性较大，并且修复过程在地表以下，粘合剂性能及应用的精度难以观测，因此要进一步分析的内容包括：

- ✧ 修复单元边界的重合程度（如灌注孔边界的重合）能否使粘合剂充分覆盖目标区域；
- ✧ 修复区域地层理化性质随深度的变化是否会影响到粘合剂的性能；
- ✧ 不同空间区域内修复效果的变化情况，如沿灌注孔半径随距离变化修复效果的变化；
- ✧ 混合过程是否存在污染土壤与粘合剂分离的情况。

异位固化/稳定化修复往往会对清挖出来的土壤进行前处理，如筛分和混匀等，应保证现场前处理的土壤其均匀程度与小试期间土壤的均匀程度保持一致。

6.1.3 全场应用时应考虑的其他因素

在进行固化/稳定化全场应用时，还应考虑管理方面的其他事务，包括：

- ✧ 现场操作设备的大小与型号要求，将土壤与粘合剂充分混合的时间需求；
- ✧ 化学品与材料的贮存与使用规范；
- ✧ 修复效果评估要求，需注意固化体固结强度随时间的变化；
- ✧ 土壤前处理的作业量是否能满足总体修复速度的要求；
- ✧ 提前清理地块杂物、地下构筑物等障碍；
- ✧ 提前估算粘合剂和其他材料的用量，并确保所有材料能及时供应；
- ✧ 质量保证措施。

6.2 粘合剂使用要求

6.2.1 前处理要求

前处理可以改变土壤或污染物的某些原始属性，使性状得到改进或改良，更有利于操作过程和条件控制，从而提升修复效果。土壤固化/稳定化前的前处理

需求和要求，处理方法和处理效果应在可行性试验研究阶段进行确定。

常见前处理方法的功能及可能的局限性参见表 6-1。可根据前处理需求、前处理可行性、待处理介质的体量、可用操作空间、前处理对总体进度的影响、前处理对土壤质地的影响，以及前处理的成本及对人体健康和环境的影响等方面综合考虑和确定前处理必要性和具体内容。

表 6-1 常见前处理方法的功能及其局限性

前处理方法	功能	局限性
筛分	使污染土壤的粒径分布满足设备的操作要求	造成污染土壤的逸散和损失
粉碎	使污染土壤粒径均匀化，提高混合均匀度	粉碎过程会产生扬尘，或使污染物加速挥发
干燥（过滤、干化、离心等）	降低污染土壤含水量和体积，提高处理容量	需要额外处置干燥过程产生的废液
反应剂控水（石灰或其他吸水材料）	通过添加石灰等物质调节污染土壤的含水量，提升固化/稳定化产物的机械强度	放热反应可能导致污染物挥发、产生扬尘，增加处理体积
混匀	提高污染土壤均匀性，使修复效果一致	可能会导致土壤性质发生变化

6.2.2 粘合剂选择

可行性试验研究阶段可先根据土壤物理特性、固化/稳定化产物的处置方式及地块利用规划初步拟定多种经济适用的粘合剂。若存在备选粘合剂过多、测试成本过高或耗时过长等问题时，可采用案例评估或专家咨询的方法缩小粘合剂的选择范围（实示例评估案例可参见附录 4），并充分考虑以下条件进一步筛选和评估粘合剂：

- ✧ 污染物和土壤其他物质（如有机质）是否会干扰粘合剂性能；
- ✧ 土壤含水量是否会影响粘合剂性能；
- ✧ 向土壤添加粘合剂的可操作性；
- ✧ 固化/稳定化产物的化学稳定性或长期固结污染物的性能；
- ✧ 固化/稳定化产物能否达到最终使用时规定的物理性能，如机械强度；
- ✧ 周边环境的影响。

粘合剂可单独或混合使用，并可以使用添加剂（如黏土材料）来提高修复效

果。最常使用的粘合剂为水泥或石灰，有时会加入次级反应剂来提升其性能，如粉煤灰、炉渣等。选择粘合剂时要确保粘合剂性能一致并合格，地块污染物分布差异较大时，可分区使用不同粘合剂进行修复。常见粘合剂种类见附录 2。

6.2.3 添加量估算要求

估算粘合剂添加量时应注意：

（1）可行性试验研究阶段评估粘合剂效果时，需要记录修复前后土壤质地的变化情况，及时反馈分析并调整粘合剂各组分配比、用量和加水量。

（2）向土壤中混合粘合剂时要做到水的渗出量最小化，但也要有足够的注水以保证材料间充分的水化反应，同时也保持介质的物理特性（密度、强度、透水性等）。

（3）由于添加了粘合剂，固化/稳定化产物的体积较原污染土壤的体积会有所增加。异位修复体积增量一般为 30%-130%；原位修复由于材料充分混合、压密，体积增加一般不明显甚至可能减少，这些情况需要在估算添加量时加以注意。

6.3 设备及现场条件要求

固化/稳定化技术配套的处理设备应根据现场条件、技术和经济方面选择，同时考虑质控过程。常见固化/稳定化技术装备见附录 3。在进行设备选择时应综合考虑以下情况：

- ✧ 土壤特性与地面状况（如土地承载量）满足设备正常移动与运作；
- ✧ 当地道路对交通的限制；
- ✧ 设备对拟用粘合剂是否适用；
- ✧ 对最终修复产物是否有特殊要求；
- ✧ 修复设备产生的灰尘对环境、健康、安全方面的影响；
- ✧ 修复设备对可能出现的挥发性污染物的处理能力；
- ✧ 修复前后对地块周边材料的搬运能力。

6.3.1 异位修复要求

异位固化/稳定化的主要作业流程包括污染土壤清挖、筛分、粘合剂添加、混合、固化/稳定化产物的成型与养护。异位固化/稳定化对于浅层污染土壤或大型机械无法进入的地块较为可行，由于异位固化/稳定化对于粘合剂的添加和混合质量有较好的控制，修复效果往往较为理想。异位修复可在现场搭建设备对污染土壤

进行处理，也可将污染土壤运输到地块外的其他场所或设施进行处理。异位修复需开挖并转运污染土壤，因此修复前后都需要有土壤的临时存放场所，且在场内、出场或转移到其他处置或再利用场所的运输过程中，保证土壤运输通畅、扬尘抑制、噪音控制以及人员安全等。异位修复在土壤开挖过程中还需注意有无挥发性化合物或异味物质释放的情况；异位修复可在修复前通过前处理降低污染土壤的不均匀性、提升理化特性与质控效果；应特别注意前处理过程中的筛分处理，需要配合过筛和颗粒大小分类，将过大粒径的颗粒移除，并进行捣碎成较小颗粒后，再次进入作业系统，防止较大颗粒进入搅拌装置损害设备；混合过程中，加入水以及相关固化/稳定化反应试剂，进行搅拌混合，最后变成固化/稳定化产物，在此过程中，亦有可能产生废气，若有，则需进行相关废气的收集与处理；场内异位修复的土壤若回填，土壤的压实程度需满足规定要求（如密实度需满足地面承载力的最低要求）。

6.3.2 原位修复要求

原位固化/稳定化的主要作业流程包含地面开凿、钻孔和粘合剂灌注。原位固化/稳定化利用开凿或钻孔机械将粘合剂与受污染土壤直接混合，可降低污染土壤治理与修复成本，对于深层污染土壤及大范围的治理修复尤为适用。原位固化/稳定化对缺乏土壤暂存空间的地块尤为有利，对因健康和安全问题或者环境问题而不适宜清挖土壤的地块也是一个很好的选择。此外，其还可以减少（但不能完全免除）废料的产生，操作过程噪音一般较小，具有在构（建）建筑物存在的情况下不需要挖掘土壤或控制地下水就能进行固化/稳定化处理的特色与优势。在设计污染土壤原位固化/稳定化修复方案时还应考虑以下几个问题：

- ✧ 处理油砂和粘稠土壤时需要较大的扭力，可能会降低钻机的钻进速度和操作深度；
- ✧ 在某些情况下，尤其是土壤条件（如油砂）需要大量使用添加剂的情况下，固化/稳定化产物的体积可能会发生膨胀；
- ✧ 若固化/稳定化产物的体积膨胀严重影响地形，则会限制该技术的使用；
- ✧ 灌注粘合剂前需对地下的碎石瓦砾和埋埋物等进行清理，以免妨碍操作；
- ✧ 温度过低（低于-12℃）会导致灌浆在注入前就发生冻结（虽然也可通过加热来解决此问题）；
- ✧ 地块过小无法满足设备和搅拌机等的操作需要；

- ◇ 地面承载力须能支撑设备的运行；
- ◇ 灌浆时，配浆车间位置的安放；
- ◇ 是否会影响地下设施（如地基）；
- ◇ 能以浆体的形式供应有效的粘合剂且不会造成输送管道堵塞；
- ◇ 粘合剂浆液能在灌注孔所有深度范围内充分混合，且能应对不同地层理化性质变化的影响；
- ◇ 修复过程的质量控制；
- ◇ 确保灌注孔紧密排列且互相粘连重合，避免出现处理不彻底形成土壤夹层。

6.4 方案确定

基于可行性试验研究与现场试验结果，编制完成固化/稳定化实施方案，可行性试验研究与现场试验结果须详细列入修复方案中，粘合剂配方和修复设备的选择尤为重要，应根据现场试验结果明确施工过程的设施和设备要求。方案应具有可操作性并在固化/稳定化产物的浸出和物理特性等方面达到修复目标的要求。同时，可行性试验研究阶段获得的有关二次污染排放和适用的检验检测方法等结果也应纳入长期监测、修复效果评估、健康和安全等方案内容之中。此外，若地块的整体治理采用的是联合修复的模式，还应考虑固化/稳定化方案与其他修复技术方案的协调与衔接。

7 固化/稳定化施工建设要求

固化/稳定化施工建设过程主要包括现场工作安排、现场施工操作、施工质量控制、二次污染防治、环境监测、健康与安全防护等内容。

7.1 现场工作安排

合理安排现场布局和工作进程可有效避免工期延误、重复劳动和风险事故。施工前应做好前期准备工作，如现场清理、道路修建、防渗区域铺设、排水系统建设等，人员健康与安全防护设备和措施也应提前到位。

7.1.1 地块空间布局安排

地块布局安排应考虑以下需求：

- ✧ 来访车辆和人员接待区；
- ✧ 公共服务区；
- ✧ 材料和设备安全存放区；
- ✧ 危险物质或危险废物贮存隔离区（可参照《危险废物贮存污染控制标准》（GB18596）执行）；
- ✧ 无危害或无污染土壤组分（如大块砾石）存放区；
- ✧ 设备操作（含前处理）区；
- ✧ 现场异位修复工作区；
- ✧ 现场和出场交通路线。

7.1.2 修复进度安排

固化/稳定化修复要根据修复方法以及修复前、修复中、修复后的工作内容与特点，在通盘考虑地块各项活动的基础上，分阶段统筹安排工作进度。进度安排尤其应重点关注以下工作内容的时间节点与时间要求：

- ✧ 人员进场时间；
- ✧ 地块清理和准备工作用时；
- ✧ 设备到场和试运行用时；
- ✧ 安装或建设公共服务设施用时；
- ✧ 实施修复（包括清挖、转运、前处理、混合、回填等）用时；
- ✧ 压实及后处理的工作用时；
- ✧ 固化/稳定化产物的承载力可支撑修复机械或交通工具所需的养护时间；
- ✧ 涉及土壤或固化/稳定化产物出场的运输用时；
- ✧ 有关部门对施工时间段、运输时间段进行限制的用时；
- ✧ 其他环境和气候因素（如低温、雨天等）对工程进度的影响时间。

固化/稳定化处理后产物的机械强度一般会需要一定的时间才逐渐增强。因此，一旦固化/稳定化产物开始固结变硬，需注意后边的施工活动，如装卸作业、邻近修复工事活动、地下设施建设和地基开挖等不可对固化/稳定化产物的结构稳定性造成影响。

7.2 施工过程操作技术要求

固化/稳定化技术的施工过程主要包括粘合剂配制、添加、混合（搅拌）、成

型和养护。

粘合剂可通过加水配制成浆体或糊状物使用，也可以直接以干粉的形式使用。现实工作中以干粉剂添加使用的情况更为多见，但干粉剂的使用一般只能用于浅层原位污染土壤的处理或异位土壤的修复。

混合机械或设备的选用应综合考虑以下因素：污染物的类型、地块条件（如污染土壤的深度和污染区域的形状）、地下是否存在碎石瓦砾和粘稠土壤、地块内部和周边是否存在建（构）筑物、铁道、公共设施、其他构造物和地表水等。

进行原位混合操作时，若土壤污染深度小于 6 m，则应将污染区域划分为网格操作单元后再进行搅拌混合，网格的大小往往取决于以下几个因素，包括设备的横向和纵向作业半径（以便减少需要转移或挪动设备的次数）、混合设备的类型与型号大小、配料设备的泥浆供应范围以及质量控制的采样和检测频次要求等。若土壤的污染深度大于 6 m，则需使用大口径的螺旋钻或组合钻进行原位深层混合，钻头直径及其可抵达的深度就决定了每个操作单元的体积和相应的泥浆体积需求。无论是浅层土壤还是深层土壤的固化/稳定化操作，其总的效率均决定于配料设备的效率和混匀需要的时间。

原位混合的固化/稳定化产物一般留在原地养护，而异位混合的固化/稳定化产物一般要放入固结池或其他模具中，铺平、压实后养护。固化/稳定化产物最终的理化特性不仅与污染土壤有关，还与粘合剂的添加比例有关。

除了使用混合机械和设备，固化/稳定化现场施工过程中可能也会用到包括贮料罐、流量控制仪、搅拌机以及输送泵等配料机械或制浆设备，还可能会使用到如防尘罩等其他辅助设备。

7.3 施工过程质量控制要求

固化/稳定化施工过程需进行质量管理和控制，方案设计应包含质量控制内容，并重点考虑以下影响质量控制的因素：

- ✧ 从业人员的能力和水平；
- ✧ 分项任务承包方（如分析实验室）的能力、资质、和经验；
- ✧ 采样及分析质控样品，如空白样、平行样等；
- ✧ 样品的标记、储存及联运制度；
- ✧ 过程监测详细记录核对；

- ◇ 数据记录与保存;
- ◇ 数据审核与确认;
- ◇ 仪器操作条件发生波动或分析结果超出可接受水平时的应对方案;
- ◇ 汇报制度。

7.3.1 材料与设备质量控制

粘合剂与修复设备的性能、品质、供应、处理与保存应进行质量控制。现场修复使用的粘合剂应与实验室小试使用的粘合剂保持一致。修复设备应为合格产品,设备和粘合剂的使用应遵守相应的操作规程,如《通用硅酸盐水泥》(GB175)、《高强混凝土结构技术规程》(CECS104:99)等,或遵照使用说明使用。

7.3.2 混合过程质量控制

混合过程的质量控制应根据修复机械和设备的操作要求、粘合剂使用要求、前处理工作要求以及固化/稳定化产物的最终用途要求等综合确定。新鲜固化/稳定化产物的混合质控采样频率按照每 400-800m³ 采集 1 个样品进行,或操作单元变换时每个单元至少应采集 1 个混合质控样品;同一工作日内处理的固化/稳定化产物至少应采集 1 个混合质控样品;搅拌或混合设备发生变更时也应采样质控样品。对于最终进入填埋场填埋处理的固化/稳定化产物,其质控检测要求可参考《危险废物填埋污染控制标准》(GB 18598)的入场相关要求进行。固化/稳定化产物的物理性能质量控制也可通过现场制作新鲜样品,采用坍塌试验(如图 7-1 所示)和人为破裂后目测检查(图 7-2)等方法来辅助检验。



图 7-1 新处理样品坍塌试验



图 7-2 团块状固化/稳定化产物的目测检验

（破裂后可见污染物已被成功包埋其中）

此外，异位和原位固化/稳定化修复的质量控制要点也略有不同：

(1) 异位修复的质控要点包括：

- ✧ 准确测量（介质与粘合剂的混合比等，通常采用目测法进行控制）；
- ✧ 监测、采样和称量设备的校正；
- ✧ 混合前和混合后土壤的合规存放；
- ✧ 前处理工作的质量；
- ✧ 施工原材料的质量；
- ✧ 配料设备（原料罐、称量工具、搅拌机/凝聚器等）的安装与运行情况；
- ✧ 粘合剂以及其他材料（包括水）的品质；
- ✧ 粘合剂和其他材料的用量及给料速度；
- ✧ 混合速率或周期；
- ✧ 凝聚物的特性（pH 值、密度、黏性、含水率、稳定性等）；
- ✧ 固化/稳定化产物的压实质量；
- ✧ 工作或环境条件（气温、降水等）的记录情况；
- ✧ 样品和废料的采样、储存、运输及处理情况；
- ✧ 固化/稳定化产物出场处置的记录情况（转运单记录）；
- ✧ 固化/稳定化产物的养护质量；
- ✧ 实验室检测分析质量；
- ✧ 环境监测质量；
- ✧ 人员健康与安全情况。

(2) 原位修复的混合质控要点包括：

- ✧ 准确测量（固化/稳定化产物的位置、深度、厚度，灌注孔的间距、位置，干粉剂的加水量等）；
- ✧ 监测、采样和称量设备的校正；
- ✧ 粘合剂以及其他材料（包括水）的品质；
- ✧ 粘合剂和其他材料的用量及给料速度；
- ✧ 进钻、凝聚的速度；
- ✧ 配料设备（原料罐、称量工具、搅拌机/凝聚器等）的安装与运行情况；
- ✧ 凝聚物质的特性（pH 值、密度、黏性、含水率、稳定性等）；
- ✧ 灌注孔的垂直性；
- ✧ 灌注孔边界的充分重合度；

- ◇ 固化/稳定化产物的养护质量；
- ◇ 工作或环境条件的记录情况（气温、降水等）；
- ◇ 实验室检测分析质量；
- ◇ 环境监测质量；
- ◇ 人员健康与安全情况。

原位修复混合过程中，应使相邻处理单元的边界发生粘连重合，以确保整个污染区域得到充分、彻底的治理与修复（图 7-3）。土壤混合是否均匀，以及处理单元间边界是否重合可通过探测取样（（图 7-4）或剖挖观察（图 7-5）等方法进行检查和验证。

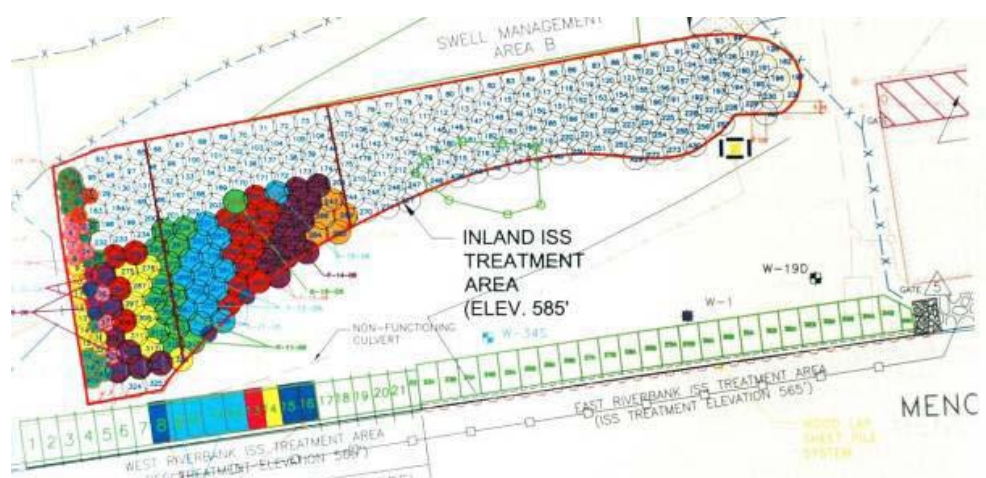


图 7-3 原位固化/稳定化处理单元的边界重合举例



图 7-4 特制的探测取样设备（取样评估混合是否均匀和边界是否重合）



图 7-5 剖挖后观察原位固化/稳定化处理单元边界是否重合的举例说明

混合过程质量控制是保证修复效果全面达标的重要保障，也是决定修复工程成败的关键。一旦发现固化/稳定化产物的修复效果不理想或质量不达标，则需进行重新修复。固化/稳定化产物的重新修复是一个成本昂贵且操作困难的工程，一般会涉及固化/稳定化产物的破碎和前处理，且相比于原来的污染土壤，破碎后的固化/稳定化产物其再固化/稳定化的可处理性相对较差，再修复后的固化/稳定化产物不达标或修复效果不理想的风险会升高。因此，必须严格做好固化/稳定化混合过程的质量控制，保证修复效果稳定达标。

7.4 二次污染防治要求

固化/稳定化修复过程中的每个工作环节都应尽量减少其对环境的影响，遵照国家和地方建设工程施工现场环境保护的相关规定做好环境保护工作，避免对环境造成二次污染。固化/稳定化修复过程二次污染防治的重点包括：

- ✧ 减少对污染土壤或其他污染物质的扰动与移动；
- ✧ 要对使用前的粘合剂进行合理储存或密封保存；
- ✧ 制订污染泄漏防范措施；
- ✧ 控制固/液/气态污染物的无组织排放；
- ✧ 避免靠近河道作业；
- ✧ 做好废物的存放、转运和处理、处置工作；
- ✧ 执行废物减量化、最小化要求；
- ✧ 尽量减少运输活动；
- ✧ 交通运输工具和其他设备、设施应及时清洗，避免交叉污染；
- ✧ 注意保护文物资源和生态环境。

7.5 环境监测要求

环境监测应贯穿整个施工建设阶段，既包括环境污染指标（如修复过程中固/液/气态污染物的无组织排放）的监测，也包括对固化/稳定化修复过程、产物处置方式或资源化再利用的环境条件需求的监测。修复完成后的长期环境监测要求可参见 9.1。

7.5.1 监测方案编制

环境监测方案应与固化/稳定化修复方案同时制定，且监测工作应贯穿修复活动的始终。主要监测内容包括：

- ✧ 修复开始前的本底环境状况监测；
- ✧ 修复过程中针对保护各类受体的监测；
- ✧ 为实施减排措施而进行的基础监测；
- ✧ 为明确固化/稳定化产物资源化再利用情景下可能发生的不利环境条件变化（如水位上升等）而进行的监测；
- ✧ 为判断是否可以终止监测而进行的监测。

修复过程环境监测可参照建设项目施工期环境监测相关技术文件和标准执行，如《建筑施工场界环境噪声排放标准》（GB12523）、《大气污染物综合排放标准》（GB16297）等，具体监测内容视地块情况而定，一般包括：

（1）监测对象：

- ✧ 大气颗粒物监测；

- ✧ 空气中的挥发性污染物监测；
- ✧ 气味监测；
- ✧ 地表水质量监测；
- ✧ 地下水质量和水位监测；
- ✧ 声及振动监测。

(2) 监测点：

- ✧ 修复区内的上风向、下风向区域；
- ✧ 修复区内地表水、地下水的上、下游区域
- ✧ 周边的环境敏感区域。

(3) 监测频率：

根据修复作业周期和时间、实际操作过程环境影响强度、污染物排放特点、周边敏感受体反应情况及地块特定条件等具体确定。

(4) 监测数据异常（如污染物浓度超标）时应启动应急预案，措施包括：

- ✧ 开展重复监测并重新分析数据以确认监测结果的准确性；
- ✧ 增加监测频次；
- ✧ 采取行动控制污染排放；
- ✧ 暂停作业直至影响消除。

7.5.2 监测工作实施

监测工作须由合格的专业人员来负责监督执行，监测内容应与监测计划相符，产生偏离的应有相关记录和说明，尤其发生以下变动的应征得有关部门同意：

- ✧ 改变或替换原定监测点位；
- ✧ 改变监测频次；
- ✧ 采用新技术代替原定监测技术（如采用新型的现场快速检测方法代替传统的实验室分析检测方法）。

7.5.3 监测结果评估

监测结果应与相关标准或预先确定的监测目标进行比对分析，明确达标情况。监测单位应定期向环境管理部门汇报监测结果，报告内容包括：

- ✧ 监测目标；
- ✧ 监测人员与设备；
- ✧ 监测结果（包括日期、时间，以及气候、地面状况等其他观测结果）；

- ◇ 监测结果展示（可通过时间序列图、等值线图等展示）；
- ◇ 结果分析（包括比对评估标准进行核对）；
- ◇ 监测过程中若存在终止监测、变更监测（如变更监测频次）或采取其他行动等情况，应进行文字说明并解释原因。

7.6 健康与安全防护要求

固化/稳定化实施过程操作不当可能会造成人员伤害和环境安全风险，包括物理和化学风险。固化/稳定化异位修复过程的潜在风险见表 7-1。

表 7-1 固化/稳定化异位修复过程的潜在风险

	出现风险的情形	风险类型	保护措施及个人防护装备
物理 风险	在开挖土壤过程中，工作人员可能因重型机械而受伤或死亡	机械设备危害	重型机械安装警报器以警告工作人员；当靠近机械时，确保于机械前方或是操作者视线范围内移动；加强相关人员有关潜在危害以及操作重型机械的相关安全训练
	当挖掘受爆炸性或可燃性物质污染的土壤的时候，可能因机械的金属元件碰撞金属或石头所产生火花，造成起火燃烧的情形；另外，若挖掘过程中毁坏地底之电线或是气体管线，亦可能造成起火、爆炸或是触电的情形	火灾与爆炸	加强相关人员的训练与紧急应变能力；在开挖工作开始前预先定位地下电力设施的位置；使用不会产生火花的金属组件；定时喷洒洒水或泡沫灭火剂于工作区以防止蒸气自燃；操作环境利用测爆器进行监测，如测值达到爆炸下限值的 10% 时，宜停止操作，进入安全位置
	当工作人员进入挖掘区时，可能会面临挖掘墙倒塌的危险；淹水可能导致溺水或感电(有使用电力设施时)的情形	开挖墙倒塌/淹水	在潮湿的工作环境中穿戴救生衣；使开挖墙的坡度至少离墙缘 1.5 米；避免工作人员进入不稳定开挖环境中；开挖围墙至少每 7.5 米提供紧急出口；加强相关人员的训练与紧急应变能力；提供良好的通风设备并在必要时张贴进入狭小空间的相关规定
	在不稳定的土地上操作重型机械，可能造成地面塌陷，造成操作受伤	不稳定的土壤状况	预先评估地块的土壤状况；仅容许受过良好训练的人员操作机械
化	某些反应性化学药剂与污染物	化学药剂与污染	加强人员有关使用特定化学品的

学 风 险	不兼容可能会造成火灾、系统过度加压、环境排放或爆炸	物的不相容性	训练与紧急应变的能力；使用带有自动警报系统的适当的液体输送设备；执行严格的化学品贮存与运作制度；提供有害化学品安全存贮设施
	不明确的有害污染物物理化学性质加上不适当的操作化学品可能会导致系统产生高热或高压，并造成不可控制的化学反应、火灾或爆炸	化学反应	设置标示牌，标示废弃物种类、成份、物理化学基本性质等信息；加强人员贮存与操作化学品的训练与紧急应变的能力；监测注入过程与特定时间点系统温度；提供紧急冲洗器
	处置地点设施不完善所造成的环境安全危害及间接污染土壤及地下水	环境安全危害	设置防止废弃物扬散的措施；按废弃物的特性及处置地点地形地质设置水土保持措施
	工作人员可能接触反应性化学氧化剂；工作人员的皮肤与呼吸系统可能与化学氧化剂或其副产品直接接触	化学氧化剂的使用、贮存、接触与兼容性	适当标示化学品储罐与管线所在位置；建立化学品隔离与防溢装置；建立伙伴制度，尽量避免单人作业；确保工作人员佩带适当的个人防护用具；加强人员有关操作特定化学品的训练与紧急应变的能力；预先熟悉化学物质安全性，并确认氧化剂与其他物质或用品的兼容性

因此，污染地块固化/稳定化修复过程中必须注意保护人体健康和环境安全。固化/稳定化修复过程涉及的人员通常包括：现场施工人员、管理人员、参观和来访人员、社会公众以及地块的使用者等。在施工方案制定与实施过程中，人员健康与安全防护要点包括：

- ✧ 指定健康与安全责任人；
- ✧ 施工前需制定意外或伤害事故汇报制度；
- ✧ 制定现场应急措施，并告知所有工作人员和应急救护人员；
- ✧ 对所有员工提出健康与安全培训要求；
- ✧ 对新员工或地块参观、来访人员进行简单的安全知识培训；
- ✧ 遵守国家和地方安全生产法律法规；
- ✧ 制订工作过程健康与安全计划；
- ✧ 针对可能产生风险的各项活动进行预测与评估。

8 固化/稳定化修复效果评估要求

8.1 修复效果评估内容与技术要求

在制订固化/稳定化修复方案的过程中，还应同时制订修复效果评估计划，并在修复开始前通过资料收集和数据分析等方式预测与评估方案的实施效果和达标能力，修复过程中需对固化/稳定化产物进行抽检以验证修复是否达标，修复结束后还应进行几年至几十年不等的长期效果监测与评估，以保证固化/稳定化产物的稳定达标和持久有效。

修复效果评估工作按执行时间段可分为施工完成后的短期效果评估（1-2年）、中期效果评估（10-30年）和长期效果评估（实际时段一般不超过100年）。

修复效果评估的主要工作内容包括：

- ✧ 评估污染地块内地表水、地下水和空气质量本底状况或起始状态；
- ✧ 评估和明确异位修复过程中污染物浓度高于设定标准的土壤是否已被全部清挖和移除；
- ✧ 评估修复过程的各种条件是否满足对作业参数（pH值、温度、原位修复泥浆的粘稠度、混合速率等）的规定要求；
- ✧ 评估修复过程的污染排放是否达到预先规定的标准要求；
- ✧ 评估固化/稳定化产物中污染物的浸出（通过检测浸出液来评判）是否满足预先规定的浸出标准要求；
- ✧ 评估专门设立的环境监测点位区域污染物瞬时排放浓度是否满足预先规定的标准要求。
- ✧ 评估固化/稳定化产物放置区域地下水位是否长期处于可接受的水位限值以下；
- ✧ 评估下游区域地下水的质量是否长期达标；
- ✧ 按照一定的时间间隔评估固化/稳定化产物中的污染物浸出浓度是否长期符合预先规定的标准。

修复效果评估工作完成后，应及时编制修复效果评估报告，主要内容包括：

- ✧ 地块起始概况（可根据相关资料和报告进行总结）；
- ✧ 清晰阐明地块的修复目标和标准，以及制订修复标准的相关依据；
- ✧ 建立地块修复概念模型，指明修复活动的污染控制方法与目标，并明确

说明修复后是否已达到了预定目标；

- ✧ 参考修复设计方案总结说明与修复相关的各项活动；
- ✧ 详细、清晰说明修复效果评估计划；
- ✧ 详细列举与项目相关的所有单位或个人；
- ✧ 对修复过程相关的资料进行审查，包括环境监测数据、废物联运单等；
- ✧ 认真审核修复期间举行过的各类专家咨询会、评审会，并对专家意见进行总结分析；
- ✧ 审核健康与安全记录报告，明确修复过程是否符合国家和地方安全生产法律法规文件要求；
- ✧ 必要时还应进一步确认修复活动结束后地块是否还有其他残余风险；
- ✧ 基于已掌握的各类数据、资料和结果，综合评估和说明修复活动是否已达到了预先规定的要求，以及达到要求的程度和效果；
- ✧ 对固化/稳定化产物的长期稳定性和长期运行效果进行评估；
- ✧ 提出长期监测与维护要求。

相关的原始数据和关键材料可作为报告的附件附上，未来的长期监测结果也应与修复效果评估报告一同收录保存。

8.2 修复效果评估指标与方法

修复效果评估以固化/稳定化产物能有效控制污染物的释放，从而实现对地下水（或地表水）的保护为主要目标，主要评价指标包括固化/稳定化产物的物理性能（抗压强度）、渗透性能（渗透系数）和浸出毒性。特定条件下，还应评估其抗干-湿性（用试验结果进行评价）、抗冻-融性（用试验结果进行评价）、耐腐蚀性（用试验结果进行评价）和耐热性（导热与不可燃性，用实验结果进行评价）等。

8.2.1 抗压强度评估

固化/稳定化产物的抗压强度可通过无侧限抗压强度试验进行评估。无侧限抗压强度用来表征固化/稳定化产物承受机械压力的能力，其大小与固化/稳定化产物的水化反应程度及耐久性有关，是评价固化/稳定化效果的重要参考指标之一。

固化/稳定化产物的抗压强度应根据其最终用途或接收地的相关要求来确

定。对于一般的危险废物，固化/稳定化产物的无侧限抗压强度在 $0.1\sim0.5\text{MPa}$ 便可；用作建筑材料，需要 $>10\text{MPa}$ ；处理放射性废物产出的固化产物的抗压强度要 $>20\text{MPa}$ ；作卫生填埋处理时，根据《生活垃圾卫生填埋处理技术规范》（GB50869）的相关规定，需要满足无侧限抗压强度 $\geq 50\text{ KPa}$ 的相关规定；作公路路基时，根据《城镇道路工程施工与质量验收规范》（CJJ01）的规定，城市快速路、主干路基层水泥稳定土类材料 7d 无侧限抗压强度为 $3.0\sim4.0\text{MPa}$ ，底基层为 $1.5\sim2.5\text{MPa}$ ；其他等级道路基层为 $2.5\sim3.0\text{MPa}$ ，底基层为 $1.5\sim2.0\text{MPa}$ 。抗压强度检测方法标准可参考国内相关技术规程，如《后锚固法检测混凝土抗压强度技术规程》（JGJ/T 208）、《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》（GB/T17671）、《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》（JTGE51）、《公路工程质量检验评定标准》（JTGF80/1）等。

8.2.2 渗透性能评估

固化/稳定化产物的抗水渗透性能可能过渗透试验来评价。常用的试验方法为《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》（GB/T50082）中的抗水渗透试验方法。由于固化/稳定化产物的渗透系数较小，为了准确且快速测定其渗透系数，一般采用变水头试验法，将固化/稳定化产物密封后压入到抗渗仪的试模中，每隔一定时间增加一定的水压，测定固化/稳定化产物表面的渗水体积。

测定固化/稳定化产物渗透性能的典型装置如图 8-1 所示。



图 8-1 渗透系数测定装置

8.2.3 浸出毒性评估

根据固化/稳定化产物的最终去向与用途，可选择适当的浸出毒性方法对固化/稳定化产物进行浸出毒性评估，评估标准按照固化/稳定化产物接收地的相关要求确定。对于稳定化后原位回填的土壤，其浸出毒性的评估方法可参照《固体废物浸出毒性浸出方法水平振荡法》（HJ 557），评估标准一般采用《地表水环境质量标准》（GB 3838）的Ⅳ类标准；若修复目标地块边界半径 2000 m 范围内存在饮用水源地、集中地下水开采区、涉水风景名胜区和自然保护区等水环境敏感点则执行Ⅲ类标准。对于用于填埋的固体废物，其浸出毒性的评估方法可参照《固体废物浸出毒性浸出方法硫酸硝酸法》（HJ/T299），毒性浸出评估标准可参考《危险废物填埋污染控制标准》（GB 18598）。

固化/稳定化产物长期浸出毒性评估可采用 MINTEQA2、PHREEQC 等热力学模型以及费克扩散模型、缩核模型等进行评估。浸出毒性的评估指标一般为浸出率（ R_n ），指标准比表面积样品每日浸出污染物的量，计算公式（8-1）为：

$$R_n = \frac{a_n / A_o}{(F/V)_m} (cm/d) \quad (\text{公式 8-1})$$

式中， a_n 为第 n 个浸提剂更换期内浸出的污染物质量，g；

A_o 为样品中原有污染物质量，g；

F 为样品暴露出来的面积， cm^2 ；

V 为样品的体积， cm^3 ；

t_n 为第 n 个浸取剂更换期所经历的时间，历时 d 。

固化/稳定化产物的抗干-湿性、抗冻-融性、耐腐蚀性和耐热性等评价可参考国内相关的标准，如《水泥抗硫酸盐浸蚀试验方法》（GB-T 749-2008），或通过试验确定。

8.2.4 增容比评估

由于添加了粘合剂，固化/稳定化产物的体积较原介质的体积会有所增加，可通过计算增容比来描述其体积增量，即危险废物固化后固化体体积与危险废物原体积比，计算公式（8-2）为：

$$C_i = \frac{V_2}{V_1} \quad (\text{公式 8-2})$$

式中， C_i 为增容比；

V_1 为固化前危险废物的体积， m^3 ；

V_2 为固化体体积， m^3 。

增容比是评价固化处理方法和衡量最终成本的一项重要指标，应越低越好。

9 固化/稳定化产物长期监测与维护要求

修复施工完成后，应对固化/稳定化产物进行效果评估与长期监测，并进行有效的维护，以确保修复效果持久有效。监测与维护所需的各项条件应在方案设计阶段根据地块概念模型、固化/稳定化产物处置或再利用方式和接收地的用地规划等来确定。良好的固化/稳定化修复效果可持续上百年，但其间污染物也会缓慢释放，尤其是环境条件会影响长期固定之污染物质的浸出与释放。此外，时间的推移对固化/稳定化产物的影响是无法证明的。因此，为了确保固化/稳定化产物中污染物的稳定达标排放，需对其开展长期监测与维护。

9.1 长期监测

长期监测的总体目标是根据固化/稳定化产物的处置或再利用方式，长期监测固化/稳定化产物中污染物的浸出情况，并按照预先规定的修复目标或相关环境质量标准的要求，评估污染物浸出对周边环境（尤其是水环境）的影响，以保证在预期的时间范围内修复效果持久有效。长期监测的关注重点是固化/稳定化产物对地下水（或地表水）环境的影响。

设计和制订修复方案时应同时编制长期监测方案，确定具体监测方法和实施要求。对于固化/稳定化产物再利用的情况，长期监测的主要目标包括：

- ✧ 验证固化/稳定化产物是否还继续有效；
- ✧ 为实施风险减缓措施提供数据支持；
- ✧ 识别可能威胁固化/稳定化产物再利用的不利条件变化（如地下水位上升）；
- ✧ 为决策是否可终止监测提供数据支持。

9.1.1 长期监测技术要求

长期监测方案的编制可参照 7.5。方案需定期进行审议分析，以确保所确立的目标与方法仍然有效。如果条件允许，修复前与修复期间的监测点位仍然可以保留和继续使用。地下水监测点一般位于固化/稳定化产物处置区域的上游和下

游，但如果固化/稳定化产物的填埋导致地下水流向发生了改变，地下水本身也存在一定程度的污染，以及地块条件也允许的话，应在关注区域适当增加地下水的监测点位布设。地下水长期监测点位的布设原则与要求可参照《地下水环境监测技术规范》（HJ/T 164）执行。

地下水长期监测指标一般包括环境指示参数（如 pH、电导率等）、实施固化/稳定化控制的污染物以及固化/稳定化过程可能引入的其他潜在污染物质。长期监测频率可根据现场特点而定，随着监测时间的延长，根据结果可适当降低监测的频次或缩减监测指标。长期监测的时长通常为 5 年，每半年监测 1 次。

9.1.2 长期监测结果评估

长期监测结果应对照监测目标定期进行分析，根据需要可适当调整和修改监测计划（如变更监测频率），但须征得环境管理部门同意。监测结果应定期（如按年）向环境管理部门报告，报告内容可参见 7.5.3。长期监测报告应与修复效果评估报告合并保存，以便于统一查阅和共同作为是否可以停止监测的参考依据。

要求长期监测持续几百上千年并不现实。因此，在有充足的证据表明不再需要开展长期监测时，可停止长期监测，但前提是必须清楚说明终止监测的标准和达标情况。终止监测的标准一般根据固化/稳定化产物的残余风险来确定，比如固化/稳定化产物中污染物的浸出速率已经足够慢且还有不断变慢的趋势，在足够慢的浸出速率下已不会再对环境造成污染或危害，则监测工作可以终止。否则，监测工作仍需继续进行下去。

9.2 长期维护

固化/稳定化修复完成后，根据固化/稳定化产物的处置或再利用情况，应对固化/稳定化产物进行长期维护。长期维护计划的主要内容包括：

- ✧ 根据固化/稳定化产物的处置方式或再利用用途确定维护目标；
- ✧ 确定固化/稳定化产物的特性；
- ✧ 明确保护措施的效果与规范；
- ✧ 明确土地使用限制要求（如划定禁止开挖或打钻的区域）；
- ✧ 明确需要采取的维护与监测活动；
- ✧ 制订应急预案。

长期维护措施包括：

- ✧ 建设保护系统（如在固化/稳定化产物上方覆土或铺设沥青层），防止固化/稳定产物受到风化的影响；
- ✧ 对固化/稳定化产物进行隔离，避免敏感受体与其发生接触；
- ✧ 限制土地利用避免对固化/稳定化产物造成破坏；
- ✧ 固化/稳定化产物用作建筑、路基等工程材料时，根据工程寿命设计维护时间；
- ✧ 固化/稳定化产物进行回填处理时，根据污染控制要求确定维护时间。

10 附录

附录 1 固化/稳定化技术适用条件分析

评价指标	固化/稳定化技术的适用性		
	较为适用	中等适用性	基本不适用
污染物的可修复性	全部污染物都易于修复时	部分污染物需要进行预处理时	存在难以处理的污染物时
修复深度	<5 m 时	5-20 m 时	>20 m 时
最终修复产物渗透性能	要求低渗透性并能抵抗地块环境影响时	要求有一定渗透性，但该渗透性下地下水流速较慢或地表水淋洗效果较差时	要求的修复产物渗透能力较高时
污染土壤与粘合剂的相容性	污染土壤与拟用粘合剂和修复过程相适应，无预期的干扰效应时	污染土壤需要先进行预处理再与拟用粘合剂和修复过程相适应时	修复设备无法处理污染土壤，或需要特定处理过程时
污染土壤的理化特征一致性状况	质地均匀、类型均一，通过常规方法即可完成修复时	污染土壤理化特征有一定差异，但分级明确并能在修复时解决该问题时	污染土壤理化特征差异大、分选差、不可预测时
地下水位情况	修复体被工程措施包覆或在地下水位以上时	修复体定期受到地下水浸润，修复设计时要考虑地下水问题或地下水不会被影响时	部分/全部修复体位于地下水位以下且地下水对修复体有化学影响/地下水流受到明显影响并可能影响到周边地块
修复效果达标能力	易达标时	实施过程和介质性能检测有良好质控手段时	不可能达标时
预测修复指标的可靠性	对于类似污染土壤有成功案例，对修复体	无类似应用前例，但可以在充分考虑到安全因	无类似应用前例，进行测试的结果变化大，缺

	状况有详细预测计划并且可以充分考虑到安全性因素	素的情况下通过可行性试验预测修复体性能、确定长期测试与监测方法验证其性能	少效果预测的关键性指标，安全性因素不充分
是否需要建设许可	不需要建设许可或已获得的情况下	需要建筑设可，但在许可限期内可完成修复的情况下	需要的建设许可未能被批准，或实际预计工时超过工程限期
地块入场条件及空间限制条件	未发现影响设备进场的因素，大棚及设备有足够空间运行时	大棚及设备可适当安排进场，施工进度可根据空间大小适当调整时	进场条件受限，操作空间不足时
工期方面的限制	计划工期满足管理方要求时	计划工期稍长，但比其他方法要好时	无法按时完成时
机械、设备及材料是否充分	稳定供应时	货源不足但可以按计划及时供应时	现有大棚、设备无法满足地块需求
地块地表状况	无地下设施且能够支撑设备重量时	需要一定措施清理地块但开销不大时	清理措施复杂、用时长、开销大时
污染物对环境的影响风险状况	施工过程对环境无明显影响风险时	可采取一定措施降低风险时	环境影响风险难以管控且会造成严重污染时
地块修复再利用时的兼容程度	修复产物适用于再利用规划时	可针对修复产物特性对再利用工作进行适当修改时	修复产物无法满足再利用规划时
固化/稳定物产物风化风险	固化/稳定物产物被工程盖帽、沥青塑封	固化/稳定物产物被土壤覆盖	固化/稳定物产物直接暴露在地表
修复体耐久程度要求	污染物稳定且不依赖修复体完整性时	污染物在某些（极端）情况下会再次迁移时	当修复体破损时，污染物释放对周边受体产生的风险较大时
对地下水的长期监测要求	对地下水无影响、或有明确调查证明无需监测地下水时	根据风险要求需要对地下水进行监测，但不会因此影响修复目的	有监测要求，但难度大、成本高

附录 2 常见粘合剂举例

(1) 水泥

水泥是一种无机水硬性凝胶材料，经过水化反应后放置一段时间可以形成坚硬的水泥固化体，并能够在浸水环境中保持其强度及稳定性，最常用的即为普通硅酸盐水泥。在水泥的水化过程中，重金属可以通过吸附、pH-沉降、离子交换、并入结晶体等多种方式固定污染物，形成的低渗结构可以阻止污染物流出。

水泥固化在固化/稳定化技术的应用成熟，简单易得，形成的固化体结构稳定、硬度高，可耐受低 pH 或强氧化环境；修复时，可根据修复要求调节用量达到指定修复效果、干化方便。使用时应注意体积膨胀、水化作用放热导致的挥发性污染物释放、有机污染物对修复体固结的影响等问题。常配合使用的添加剂多具有助凝作用，如活性氧化铝。水泥固化不适用于酸性地块，其浸出特性不适用于部分污染物。

(2) 石灰

石灰是一种碱性非水硬性胶凝材料，通常与水泥、粉煤灰、高炉矿渣及其他火山灰材料混用产生波索来反应提高修复效果。石灰有生石灰、熟石灰、石灰乳之分。

生石灰通过与水反应会放热并形成熟石灰，是一种降低介质含水量的稳定剂；介质含水量不足时则需要加水摇匀；熟石灰多由生石灰制得，与水反应时无热量释放，多用于无需水分干燥和控制温度升高的介质修复活动。生石灰、熟石灰均可与粘性土反应提升其承载力、降低塑性、控制体积，有助于对污染土壤进行进一步处理如压实、与其他粘合剂混合等；随着时间延长，石灰可以与粘性土中的黏土成分发生石灰化反应进一步提升土壤强度。石灰对土壤中重金属的影响主要是增加土壤的 pH，促进重金属生成碳酸盐、硅酸盐、氢氧化物沉淀从而固定/稳定化重金属。

除粘性土外，石灰还可稳定各种颗粒状、粘性状或泥浆状的油性土壤；生石灰还可以添加防水涂层来提升与油性土壤的混合效果。另外，生石灰与污染土壤中的水反应时会形成表面积较大的氢氧化钙，提升处理效果，可作为固化/稳定化的前处理手段。

（3）粒化高炉矿渣粉

粒化高炉矿渣粉是由高炉矿渣研磨至玻璃粉状的细粉，是一种慢性水硬性水泥材料，能在数周至数月形成一定强度；通常使用水泥、石灰或其他碱性材料对其进行活化后加速硬化。由于胶结性能强、简单易得，粒化高炉矿渣粉替代水泥广泛应用于混凝土结构（英国年消耗量在 150 万吨），节约了大量成本。

根据目前研究，粒化高炉矿渣粉能够抵抗包括硫酸盐、硫化物等污染物对粘合剂的干扰作用。

（4）粉煤灰

粉煤灰是粉煤的燃烧产物，多为粒状或玻璃粉状，具有火山灰性质，主要成分为 SiO_2 和 Al_2O_3 。粉煤灰一般通过烟煤、无烟煤的炉烧或煤烟的静电或机械沉淀得到。石灰含量较高的粉煤灰有明显的自胶结性，在单用时会大量放热；石灰含量较少的粉煤灰则自胶结性较差。水分含量较大或有石灰、水泥时，粉煤灰会形成较好的胶结性化合物。

粉煤灰通常配合水泥使用，形成的修复体通常比水泥单用时形成的更具持久强度；当粉煤灰中有未燃碳时，还会吸附有机物等特定污染物。

（5）热塑塑料

热塑塑料多用于对污染土壤的塑封处理，常见热塑塑料有沥青、乳化沥青、泡沫沥青、石蜡、聚乙烯和聚丙烯等。根据热塑性原理，热塑塑料基本是对污染土壤进行固化处理，因此形成修复体的物理结构完整性对污染物浸出毒性的影响巨大；另外，沥青质粘合剂可以低温混合污染介质，对干的废弃物使用时会进行加热处理，因此不适用于挥发性污染物处理。

热塑塑料形成的修复产物结构均匀，渗透性差，抗降解能力强，并能抵抗外界环境影响；在储存时，热塑塑料以固化形态存在，占用体积小。在使用热塑塑料时要注意：加热时的着火、爆炸等事故，强氧化盐类或较高初始含水量可能会影响修复产物的长期性能，铁、铝盐会导致修复体过早硬化。

由于较为常见，这里对沥青、乳化沥青、泡沫沥青分别展开描述：

- ✧ 沥青通常不与土壤或污染物反应，因此使用沥青进行土壤固化/稳定化时比较初级的方法即为将污染土壤塑封，断绝污染物的水利接触。使用沥青作为粘合剂时，通常将沥青热溶液与污染土壤浆液混合，土壤中的水分会

蒸发出去并留下沥青和被沥青压实的土壤固体，经过放置散热至常温后会固化。

- ✧ 乳化沥青可在室温下分散在亲水溶液或半液相物质中的细滴沥青混合而成，并通过化学乳化剂稳定制得。这种状况下会使乳剂发生“断裂”，固废中的水分会释放，有机物会与疏水沥青形成连续结构体包覆在固体周围。乳化沥青在氧化或还原条件下均可用，若介质处于极端 pH 条件下则需要预先进行中和处理。
- ✧ 泡沫沥青通过使用特质喷杆向热沥青中注入冷水制得，并使其体积扩大 10-15 倍，混合污染土壤后会形成结合性很强的乳膏状修复产物。

附录 3 常用固化/稳定化技术装备举例

序号	设备名称	功能	使用场景
1	挖掘机	清挖污染土壤	
		添加粘合剂	
		混合和平整	
2	推土机	清挖和平整	
3	搅拌机	混合和搅拌	

4	Allu 铲斗	筛分，破碎，混合和 搅拌	
4	滚筒搅拌机	搅拌	
5	灌浆机	泥浆灌注	
6	喷浆机	喷浆	
7	螺旋钻机	原位混合	

		原位混合	
--	--	------	--

附录 4 案例评估

某污染地块土壤治理修复项目

(1) 项目总览

某污染地块土壤治理修复项目

面积： 3.8 万 m²

历史：1939-2005 年为钢丝绳厂，主要产品为钢丝绳；2005-2015 年废弃最终拆除

主要污染物：铅，主要分布于原生产区域 0-1.5 m

修复体量：为 2.97 万 m³

修复目标值：土壤中铅低于 400 mg•kg⁻¹

修复模式：异位污染源处理修复，修复后产物作建设硬基土方使用

计划用途：居住用地

(2) 项目简介

地块原址的企业某钢丝绳有限公司，是生产电梯钢丝绳的专业公司，年生产规模约 15000 吨。该公司始建于 1939 年，2000 年中英合资成立钢丝绳有限公司，主要产品为钢丝绳，年产量 40000 吨，2005 年破产搬迁，此后未再从事任何生产、经营活动，地块现已拆迁完毕。为响应政府工业布局，而进行了地块调查、评估与修复。

通过前期调查发现，该地块主要污染物为铅，主要分布于距 0-1.5 m 处的土壤中，并且该区域将被用作居住用地进行二次开发，并配套建设一定面积的绿地，风险评估表明居民将直接暴露于高含铅量的土壤地块内。因此设计单位将土壤铅的修复目标确定为低于 400 mg•kg⁻¹、土方量计算为 2.97 万 m³、采用异位污染源处理修复模式。

根据地块特征，修复单位对固化/稳定化技术、土壤植物修复技术、以及土

壤洗脱技术进行了比选评估，包括原理、适用性、修复效率、修复时间等方面并最终确定了固化/稳定化技术；通过可行性试验确定将稳定化产物用作路基使用。

本项目污染土壤固化/稳定化设备采用 ALLU 筛分、破碎、混合设备，该设备可同时对固体材料进行筛分、破碎、搅拌、混合等作业。筛分孔径约为 5-10 cm，筛上大颗粒（主要为大块砂砾和建筑碎砖块）清洁后，用作建材原料资源化利用；向筛分后的土壤中加入一定量的固化剂，并充分混合，含水量较高土壤，采用晾晒风干方式降低土壤含水，固化/稳定化过程严格按照实验参数进行施工，固化稳定试剂添加量为 4%，同时加入 8%水泥、石灰（水泥：石灰=2：1），使用 ALLU 铲斗对土壤进行混合操作，每小时约 60 方的处置规模，经过固化稳定化处置的土壤需要经过一段时间的养护，养护时间约为 24 h，在养护期内底泥避免扰动、碾压或被雨水长时间浸泡。完成修复后，修复产物作建设硬基土方运走使用。

项目验收阶段按照相关规范，每 500m³ 污染土壤固化/稳定化产品采集二个样品（多点采样，混合均匀），浸出液中污染物铅的浓度低于《地下水质量标准》（GB/T14848-93）中Ⅲ类标准限值要求，即金属铅毒性浸出浓度小于 0.05mg/L，即达到预期修复效果。另外检测单位定期通过已建设的监测井对地块地下水进行采样监测，持续时间 8 年，每半年 1 次，检测指标为重金属铅及地下水位。