

附件

《污染土壤修复工程技术规范 固化/稳定化
(征求意见稿)》

编制说明

《污染土壤修复工程技术规范 固化/稳定化》编制组

二〇二二年一月

项目名称：污染土壤修复工程技术规范 固化/稳定化

项目统一编号：2016-54

承担单位：轻工业环境保护研究所

北京高能时代环境技术股份有限公司

上海市环境工程设计科学研究院有限公司

中国环境科学研究院

矿冶科技集团有限公司

编制组主要成员：郝润琴、宋云、吕正勇、李培中、魏丽、李淑彩、郭观林、

宋立杰、王琼

标准所技术管理负责人：姚芝茂

科技与财务司投资处项目管理人：张钦、吕奔

目 录

1. 任务来源.....	1
2. 标准制定必要性.....	1
3. 主要工作过程.....	2
4. 国内外相关标准研究.....	2
5. 同类工程现状调研.....	5
6. 主要技术内容及说明.....	8
7. 标准实施的环境效益与经济技术分析.....	18
8. 标准实施建议.....	18

1. 任务来源

根据原国家环境保护部《关于征集 2016 年度国家环境保护标准计划项目承担单位的通知》（环办函〔2015〕935 号）的要求，由轻工业环境保护研究所作为项目承担单位，北京高能时代环境技术股份有限公司、上海市环境工程设计科学研究院有限公司、中国环境科学研究院、北京矿冶研究总院作为项目协作单位，联合承担《固化/稳定化修复工程技术规范》标准项目的编制工作，项目编号为 2016-54。2020 年 8 月，生态环境部科技与财务司主持召开了该标准征求意见稿专家审查会，依据专家建议将标准名称修改为《污染土壤修复工程技术规范 固化/稳定化》。

2. 标准制定必要性

据 2014 年原环境保护部、国土资源部发布的《全国土壤污染状况调查公报》的调查显示，全国土壤环境状况总体不容乐观，部分地区土壤污染较重，工矿业废弃地土壤环境问题突出。全国土壤总的点位超标率为 16.1%，从污染类型看，以无机型为主，有机型次之，复合型污染比重较小，无机污染物超标点位占全部超标点位的 82.8%。

党和国家高度重视土壤污染防治和污染修复工作。2005 年 12 月，国务院出台了《国务院关于落实科学发展观加强环境保护的决定》（国发〔2005〕39 号），其中指出：“对污染企业搬迁后的原址进行土壤风险评估和修复”，并明确提出“要抓紧拟订有关土壤污染等方面的法律法规草案”。后期陆续出台的《土壤污染行动计划》、《污染地块土壤环境管理办法（试行）》等均对污染土壤修复技术规范早日形成提出了迫切需求。

2019 年 1 月 1 日《土壤污染防治法》实施，要求有风险的地块应进行风险管控和修复。从法律法规的层面上，国家正不断加大污染土壤环境治理力度，不断完善管理制度的建设。

2019 年，生态环境部重新修订了建设用地土壤环境保护系列标准，包括了调查、监测、风险评估和污染土壤修复技术导则。《建设用地土壤修复技术导则》规定了污染土壤修复所遵循的一般性原则、程序和技术要求，主要适用于污染土壤修复可行性研究中修复技术的筛选和修复方案的制定，但是缺乏对土壤修复各专项技术的详细规定。在选定具体的修复技术后，还需要通过各个土壤修复专项技术规范来指导相应的修复技术的设计与实施，例如修复技术方案筛选出固化/稳定化技术后，本标准用于具体指导和规范如何进行固化/稳定化工程设计和施工。

固化/稳定化技术属于污染场地风险管控和修复技术体系中若干技术之一，但作为非去源性技术与传统的修复技术方法存在较大差异。因此本技术规范的制定过程中既要考虑技术本身的针对性和特殊性，又要综合考虑与其他修复技术的统一性，发挥本技术的关键作用，

协调与现有环境监管体系的关系。本标准涉及的范围包括适用条件、工艺设计、工程施工和运行和维护等过程，确保为固化/稳定化工程的主要技术环节提供规范和技术支撑。

3 主要工作过程

(1) 编制组成立

2016 年 1 月，根据原环境保护部下发的《关于开展 2016 年度国家环境保护标准项目实施工作的通知》（环办科技函〔2016〕633 号），轻工业环境保护研究所成立项目编制组，确定参编单位及人员名单。

(2) 开题报告起草与论证

2016 年 1 月，项目立项，签订任务书。

2016 年 11 月，完成标准的开题报告及编制说明的初稿。

2017 年 3 月，原环境保护部科技标准司主持召开了本标准的开题论证会议。

(3) 征求意见稿起草

2017 年 11 月，完成本标准及编制说明的第一次修订。

2020 年 1 月，完成本标准及编制说明的第二次修订。

2020 年 8 月，生态环境部组织专家召开了征求意见稿专家审查会。

4 国内外相关标准研究

4.1 国外相关标准研究发展现状

通过水泥基固化土壤中的污染物已经有几十年的历史了，并已经取得了很多成功的经验，但这些多是基于短期效果（28 天）的论证试验，对于长期的修复效果和环境影响考虑的相对较少。虽然国外对于固化/稳定化技术（简称 S/S 技术）的研究应用相对较多，但是仍缺乏完整的效果评价体系。以美国为例，31 个州的统计结果表明，只有 Illinois、New Hampshire 州具有 S/S 管理办法（regulations），Kansas 州具有管理政策（policy）；同时基本所有的州均无专门的 S/S 专业技术指南。另外，对于评价标准（criteria）更是存在较大的差异，如有的州采用饮用水标准最大允许浓度（MCL）作为 TCLP 浸出参考值，而有的州则用 50/100 倍饮用水标准值作为最大允许浓度。

(1) 英国

英国是应用固化/稳定化技术较早的国家，早在 2004 年 9 月就出台了一个关于固化/稳定化技术的专项技术导则《Guidance on the Use of Stabilization/Solidification for the Treatment

of Contaminated Soil》，同年 11 月出台了一本研究报告《Review of scientific literature on the use of stabilization/solidification for the treatment of contaminated soil, solid waste and sludges》。该导则从固化/稳定化技术的筛选、设计、施工、环境安全保障以及后续长期监测等方面详细阐述了固化/稳定化处理过程中的要求，研究报告则从固化/稳定化的作用机理及其影响因素等方面进行了详细的阐述。2010 年 3 月发布了一项报告，主要阐述固化/稳定化技术的效果评估，侧重于评估以水泥基为主的固化/稳定化剂的长期稳定性。

(2) 美国

1986 年，美国国家环境保护局位于俄亥俄州的实验室曾经出台过一则关于危险废物稳定化/固化的手册《Handbook for Stabilization/Solidification of Hazardous Wastes》（编号为：EPA/540/2-86/001）。该手册主要针对危险废物填埋场地的固化/稳定化提供了一些信息和导则，以此判断危险废物填埋场是否可用稳定化/固化技术来控制污染物的迁移，文件中提供了用于危险废物固化/稳定化处理的药剂和其使用方法。

1993 年，美国国家环境保护局位于华盛顿的办公室出台了一份文件《Technical Resource Document: Solidification/Stabilization and Its Application to Waste Materials》，该文件主要为场地管理者提供选择依据，侧重于用固化/稳定化技术处理危险废物时需要考虑的问题。

1995 年，美国华盛顿的陆军工程部队出台了一本关于可处理性研究的文件，名称为《Treatability Studies for Solidification/Stabilization of Contaminated Material》，该文件主要关注利用固化/稳定化技术处理污染物质时的可处理性研究。

1997 年，美国国家环境保护局出版了一本专著《Innovative Site Remediation Technology: Design and Application, Stabilization/Solidification, Volume 4.》（编号为：EPA 542-B-97-007）。该专著主要侧重于稳定化/固化工艺的设计、应用和施工过程，主要目的是为场地实施稳定化/固化修复提供专业的指导。

1998 年，一个关于污染土壤固化/稳定化的指导说明书《Guide Specification for Construction, Solidification/Stabilization of Contaminated Soil》由美国华盛顿的陆军工程部队发布（编号为 CEGS-02160）。这个指导说明书主要侧重于阐述固化/稳定化技术的相关要求，并用于指导现场实际的修复工作。

ITRC（Interstate Technology & Regulatory Council）2011 年制定了《Development of Performance Specifications for Solidification /Stabilization》。该技术规范为固化/稳定化的指标、修复目标、材料和药剂选择、小试和中试、质量保证和控制及长期管理提供了技术指导。

(3) 荷兰

荷兰一直侧重于方法论的研究，从 1995 年开始，陆续出台了方法 NEN7343（1995 年）、NEN7345（1995 年）、NEN7373（2003 年）、NEN7371（2004 年）和 NEN7375（2004 年）用于评估固化/稳定化长期稳定性效果。NEN7373 为柱浸出试验方法，是 NEN7345 的更新版本，属于直流试验的一种，主要针对粉末及颗粒物料中无机元素的浸出特征。NEN7375 为一种环流试验方法（利用箱体的浸提），相对于 NEN7345 来说重现性更好，且更具普适性，是主要针对块状物料的浸出方法，与 CEN 的方法相比应用范围更广，可用于几何表面极其不规则的物料。

美国《综合环境对策、赔偿及责任法（Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act, CERCLA）》中也有多处涉及到固化/稳定化处理技术的规定。其中 NCP（National Oil and Hazardous Substances Pollution Contingency Plan，国家石油和危险物质污染应急预案）中规定可以采用固化/稳定化等技术处理污染土壤和沉积物以减轻、最小化、稳定、减缓或消除污染物释放带来的人体健康和环境安全风险。其后的 SARA（Superfund Amendment and Reauthorization Act）也强调在不适合清除或填埋的污染场地中，应积极采用创新的原位修复技术。这些原位修复技术必须满足长期、有效地降低污染物的体积、毒性或迁移性等基本要求，必须成本低和实际可操作性强。其中固化/稳定化作为应用相对较广的技术，具有广阔的应用前景。

国外绝大多数的固化/稳定化技术属于污染源控制技术，因此修复后的长期环境监管是保护人体健康和环境安全的必要工作。通常长期环境监管工作包括以下内容：

- 1) 对可能受到影响的环境介质的监测；
- 2) 对制度控制措施落实情况的监督；
- 3) 对工程控制措施的维护与监测；
- 4) 环保管理机构的定期评估。

对于大部分固化/稳定化修复场地，主要的受影响环境介质为地下水。因此美国大多数的固化/稳定化修复场地的长期环境监管主要是针对地下水的监测。根据美国 CERCLA 法规规定，超级基金场地修复后一般需要进行 5 年期的地下水监测评估，第一个 5 年评估期内每季度监测一次，此后可根据实际情况逐步降低监测频率。具体的监测周期和监测频率则需要根据具体场地情况与区域环境特征确定。但是各州对长期监管周期和频率有不同的规定，例如德州规定只需要进行 1 个 5 年的定期评估，而特拉华州则规定只要连续 8 个季度的关注点位达标后即可停止地下水的长期监测。目前，研究机构多借助于预测模型等方式辅助判断监测频率和监测周期（长期监管结束时点）。

4.2 我国相关标准研究发展现状

在目前的固化/稳定化技术实施过程中，国内主要参考国外相关技术和工程经验，大多采用欧美国家的技术规范，尚缺乏适合我国实际情况的专项技术规范。同时在效果评价方面，主要借助于国家现有的固废毒性鉴别与管理办法。

湖南省 2016 年出台的地方标准《重金属污染场地土壤修复标准》（DB43/T 1165-2016）是国内首个明确规定以浸出浓度作为污染土壤修复效果判断的地方性标准，适用于重金属污染土壤的固化/稳定化效果评价。

2018 年 12 月 29 日实施的《污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术导则》（HJ25.5-2018）把固化/稳定化技术归为风险管控工程措施，确定了效果评估方法和长期环境监测要求。

5 同类工程现状调研

近年来，我国重金属污染土壤固化/稳定化工程越来越多，呈快速增长的势头，并已成为主导技术。根据 2008-2016 年国内的污染土壤修复技术的使用情况统计来看，在 117 个案例中固化/稳定化修复技术使用数量为 47 个，占 23%，是仅次于阻隔填埋的应用次数第二多的土壤污染管控和修复技术。此外，固化/稳定化技术通常还与土壤淋洗、矿山生态恢复等技术组合使用。

如果从固化/稳定化技术的分类来看，异位稳定化技术是目前国内外使用的主要方法。它是将污染土壤从最初污染位置挖掘出来，运输至现场或场外特定场所或处理系统中实现与稳定化材料的混合和后续养护。尽管挖掘运输污染土壤增加了处理成本和污染的可能性，但是异位处理能较好地控制固化/稳定化材料的加入方式和混合搅拌方式，使污染土壤与固化/稳定化材料充分混合。我国固化技术和原位技术应用较少，与之相反，水泥基固化技术在欧美等国家占主导，该技术不仅可以稳定化污染物，还可以固化限制污染物的渗出，长期效果更好。近年来，国外随着原位搅拌技术的发展，原位固化/稳定化发展较快，已成为主流技术之一。此外，国外高效的固化/稳定化材料的商业产品较多，形成了产业化。我国在材料研发、应用和产业化方面还相对薄弱。

我国固化/稳定化技术已应用在汞、铅、镉、砷等重金属污染土壤和底泥，并在多环芳烃和农药污染底泥中应用。国外已应用在重金属、多环芳烃、石油烃、有机氯农药和二噁英等有机污染场地。从我国目前污染土壤固化/稳定化项目不完全统计情况来看（表 5-1），固化/稳定化后的土壤采用了填埋处置、原地阻隔和用作路基材料等处置方式。国外典型污染土壤固化/稳定化实施案例统计情况见表 5-2。

表 5-1 我国典型污染土壤固化/稳定化项目案例

项目	污染物	工程内容	处置或再利用技术
广州某含重金属污染土壤治理工程	砷、铜、铅、锌	采用石灰、含铁物质等进行原位固化/稳定化处理,修复土方量 30042 立方米	铺设 HDPE 膜进行阻隔,其上覆 0.5 米土
湖北某含铬污染土壤修复示范工程	六价铬	采用还原性药剂、固化药剂进行异位固化/稳定化处理,修复土方量 171009 立方米	填埋
广东某砷污染场地治理工程	砷	采用改性粘土矿物为主的药剂进行异位固化/稳定化处理,修复土方量 10900 立方米	填埋
上海某公司灯泡厂场地	重金属和多环芳烃	采用专门的稳定化材料进行异位稳定化处理,修复土方量 4344 立方米	稳定化处理后的土壤作为路基材料在路面 1 米以下使用,其铺设厚度为 50 厘米
原沈阳某冶炼厂污染场地治理	铜、锌、铅、镉、汞、砷	采用专门的稳定化材料进行异位固化/稳定化处理,修复土方量 26 万立方米	固化后重污染土壤安全填埋、中度污染土壤稳定化后原地 HDPE 膜封存、轻度污染土壤吸附稳定后覆盖阻隔、粗颗粒土壤淋洗后再利用

表 5-2 国外典型污染土壤固化/稳定化项目案例

场地名称	污染物/污染情况	工程内容	效果
Abex	铅	应用石灰及水泥进行搅拌稳定化处理，处理污染土壤 28354 吨	处理至 TCLP 浸出浓度小于 0.75mg/L
BHAD 铬池	铬，浓度高达 8000mg/kg，以六价铬污染为主	采用多硫化钙、硫酸亚铁作为还原剂，水泥作为固化剂	处理达到 TCLP 浸出浓度小于 0.6 mg/L
CSX Benton 港湾垃圾场	铅	采用水泥作为固化剂后异地填埋，处理面积 28328 平方米	95%的样品符合 TCLP 铅的浸出标准 0.75mg/L
马萨诸塞州 Cambridge	BTEX、PAHs 等	采用水泥和膨润土作为反应剂喷射灌浆原位固化/稳定化	生成 680 根、18 英尺深的浆土柱
印第安纳州 Columbus	木馏油-杂酚油	采用水泥和活性炭进行固化/稳定化处理，处理 12,000 平方英尺的表层区域，深度 3-17 英尺不等的范围	14 天内混合浆的压强满足 50psi 的处理要求
Hoedhaar Lokeren	汞，浓度高达 1000mg/kg	采用零价铁和氢氧化铁与汞化合物进行稳定化处理 后填埋，处理土壤 10000 吨	汞浸出浓度小于 1mg/kg（干重）
Zwevegem	铅、锌、铜、镍，氰化物，痕量镉、铬	采用石灰乳、碱性粉煤灰进行异位稳定化处理后原位回填	满足浸出浓度：砷 0.2mg/L；镉 0.05mg/L；铬 0.5mg/L；铜 1mg/L；汞 0.01mg/L；铅 0.2mg/L；镍 0.4mg/L；锌 5mg/L

6 主要技术内容及说明

6.1 适用范围

本标准针对建设用地污染土壤固化/稳定化工程进行技术规定，可作为该类工程项目设计、施工和运行等的参考依据和技术指导。本标准适用的污染物包括：重金属、类金属和氰化物等无机物及多氯联苯（PCBs）、多环芳烃（PAHs）、石油烃等半挥发性有机物。挥发性有机物和放射性污染土壤的固化/稳定化不在本标准的规定范围。

6.2 规范性引用文件

现行的国家法律法规、建设用地系列土壤生态环境标准、污染物排放治理类的环境标准及相关的行业标准是制定本规范的依据。

环境质量、排放标准、环境影响、污染物毒性浸出方法等引用国家和行业的相关标准。有关施工、安全、职业卫生等方面的技术要求引用国家和行业的相关标准。

6.3 术语和定义

为了便于对规范条文的理解，对本规范中涉及的技术名词在此予以定义。

术语固化/稳定化、原位固化/稳定化、异位固化/稳定化参考了《建设用地土壤污染风险管控和修复术语》（HJ 682-2019）中相关术语进行了定义，术语浸出测试来源于《固体废物浸出毒性浸出方法 翻转法》（GB5086.1-1997），无侧限抗压强度参考了《公路土工试验工程》（JTJ 051-93）。

6.4 技术适用性与二次污染特征

6.4.1 技术适用性

根据国内外实际工程情况，本章节给出了该技术的适用性。固化/稳定化技术是重金属污染土壤修复和风险管控的主导技术，半挥发性有机物污染土壤也有一定比例采用该技术，如国外煤制气厂场地的多环芳烃污染土壤。在污染地块地下空间挖掘或开发利用，土壤会被扰动移位，因此原位固化/稳定化技术不适用，此外，坚硬地层和卵石层不利于注入和搅拌设备的运行，导致原位固化/稳定化难以实施。异位技术适用性比较强，质量控制精准，但要进行土壤挖掘，对于浅层土壤不涉及深基坑开挖时，异位技术更适合。

6.4.2 二次污染特征

原位固化/稳定化技术在工程实施过程中产生的二次污染较小，主要包括溢流浆料和场地清理产生的固体废物、施工扬尘、设备噪声等。相对于其它修复技术，异位固化/稳定化技术产生的二次污染不大，主要是施工扬尘、挖掘和预处理产生的固体废物和设备噪声等。

地块中危险废物主要来自含有毒有害物质的废渣和渣土等。

6.5 总体要求

6.5.1 一般规定

在一般规定中列出了与固化/稳定化工程设计有关的地块地层、土壤特性和污染分布等信息，有的参数在前期的调查、风险评估和修复技术方案中没有涉及到，有的因采样密度低，不足以支撑工程设计，需制定调查计划进行补充调查。

本节提出了固化/稳定化工程设计应遵守的相关法规、标准和管理规定。涉及到的领域涵盖了土壤、固体废物、空气和水有关的生态环境法规、标准和管理规定，以及建筑、配电、给排水和安全等的设计标准。

污染土壤减量化不仅可以减少固化/稳定化土壤的处置量，还可以分质利用，节省工程费用，减量化可以采用筛分和淋洗等技术。

《污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术导则（试行）》(HJ 25.5-2018) 7.2.1.2给出了效果评估标准“风险管控措施下游地下水中污染物持续下降，固化/稳定化后土壤中的污染物浸出浓度应达到接收地地下水用途对应标准值，或不会对地下水造成危害”。HJ 25.5第8.2节明确规定实施风险管控的地块应进行长期环境监测，并规定了地下水长期监测的布点原则和监测频率。固化/稳定化工程一般要求对地下水进行监测，并以关注污染物的检测为主。

异位固化/稳定化土壤处置利用应根据地块所在区域的实际情况，因地制宜，优先进行资源化利用。固化/稳定化土壤不能随意处置和利用，应采取工程等措施进行安全处置和利用，切断暴露路径，避免次生污染和危害，确保人体健康和环境安全。

6.5.2 工程组成

本节界定了原位和异位固化/稳定化的主体工程、辅助工程和配套设施的范围。

6.5.3 总平面布置

固化/稳定化工程平面布置可按主体工程、辅助工程和配套设施的功能进行区划布置。山地和台地等复杂地形及降雨和大风等恶劣气象条件对运输、排水、土壤储存、施工大棚等影响较大，在平面布置上要充分考虑，以减少对工程的影响。平面布置要把噪声、扬尘和大气污染等二次污染源布置在远离居民等敏感点的区域。同时还应有利于安全、施工和运输。

异位固化/稳定化工程场地宜建在污染地块的场区内；如在污染地块外实施时，应对工程的环境影响进行分析评估，避免对环境敏感点产生影响。

6.6 工艺设计

6.6.1 一般规定

目前，国内外在固化/稳定化的材料、药剂和搅拌混合技术方面的研发不断取得新的成

果，考虑到固化/稳定化的长期有效性，设计原则首先应明确采用成熟可靠的技术，且长期风险可控，同时考虑工程费用和二次污染防治，做到费用可控，二次污染可防可治。

本节列出了固化/稳定化工程设计和工艺参数确定的要求。固化/稳定化工艺设计和参数的选取一般应根据污染物和地块特征依靠小试和中试来确定，工程经验可作为设计的参考。

在一般规定中强调了固化/稳定化材料的长期有效性，特别是稳定化作用的长期有效，可以采取测试手段进行评测。绿色环保不仅指材料和药剂的生产过程污染少及产品本身有毒有害物质含量很低，而且使用后对环境友好。

性能检测和效果检测是固化/稳定化工艺调整和采取补救措施的重要依据。

6.6.2 工艺选择

污染土壤固化/稳定化工程通常分为原位和异位两种工艺，异位固化/稳定化可以细分为场地内实施的原地异位和场地外处理的异地异位。国外原位固化/稳定化工程的比例逐年上升，目前基本上原位和异位的比例各占 50%。我国原位固化/稳定化工程数量较少，且还有部分是河道污染土壤治理工程，但原位固化/稳定化是技术发展的趋势，只是目前限于国内的技术水平、设备能力及工程经验，发展较为缓慢。相对于异位固化/稳定化，原位固化/稳定化对场地扰动少，二次污染小，但受限于地下施工障碍物及地层结构对药剂注入和搅拌混合的影响。异位固化/稳定化与原位技术的差别在于污染土壤需要挖掘、预处理，处理后的土壤或固化块需要处置和利用，工艺流程比较复杂，但工艺和质量比较容易控制。

6.6.3 固化/稳定化材料和药剂选择

美国超级基金场地所用的固化/稳定化材料基本上以水泥基固化材料和商品化专利材料为主，其次还有磷酸盐、pH 控制剂、粉煤灰和石灰等。土壤有机污染物一般使用活性炭和有机粘土增强固化技术。

6.6.3.1 固化材料及其基本特性

该类材料主要是水泥类和火山灰（高炉矿渣和粉煤灰）类胶凝材料，高炉矿渣和粉煤灰须由水泥和石灰等引发剂引发产生水化反应。为了提高和改善固化块性能（如：强度和渗透性）需添加外加剂。增添稳定化药剂可以改善污染物毒性浸出效果。为了减少固化块的渗透性和孔隙，可加入填充剂充填孔隙。胶凝材料对汞和有机物的固化效果不佳时，需加入吸附剂等材料强化效果。固化过程所需材料如图 6-1 所示。

(1) 水泥

当水泥与适量的水调和时，发生水化反应，开始形成的是一种可塑性的浆体，具有可加工性。随着时间的推移，浆体逐渐失去了可塑性，变成不能流动的紧密状态，此后浆体的强度逐渐增加，直到最后变成具有相当强度的石状固体。凝结是指水泥浆体从可塑性变成非可塑性的过程；硬化是指浆体强度逐渐提高能抵抗外来作用力的过程。

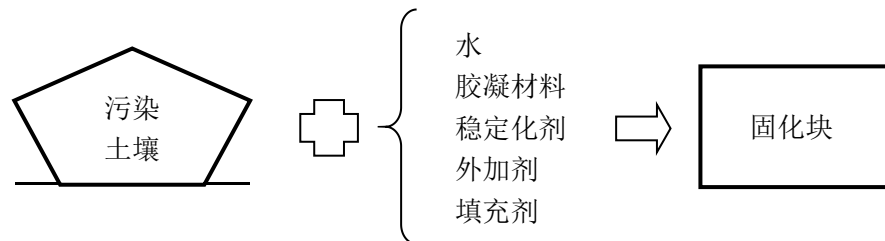
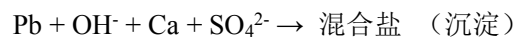


图 6-1 固化过程及所需材料

水泥对有机和无机污染物的固化/稳定化作用机理复杂，主要包括：物理包封、物理吸附、化学吸附、化学结合、化学沉淀、化学络合、离子交换、同位（晶格）取代等。铅被水泥体固结主要有以下三种形式：化学吸附、取代和沉淀。



(2) 粉煤灰

粉煤灰是燃煤电厂和锅炉排出的主要固体废物。粉煤灰的活性主要来自活性 SiO_2 和活性 Al_2O_3 ，在一定碱性条件下产生水化作用。

(3) 高炉矿渣

高炉矿渣是冶炼生铁时从高炉中排出的一种废渣，我国的高炉矿渣主要以粒化高炉矿渣（GGBS）的形式排出。在水泥熟料、石灰、石膏等引发剂的作用下显示出水硬胶凝性能，是优质水泥原料，能提高固化块的致密性及抗冻、抗腐蚀、抗渗性和后期强度，且水化热低。高炉矿渣具有一定的还原性。

(4) 常见胶凝材料组合

主要包括：水泥+粉煤灰、水泥+高炉矿渣、水泥+炉窑灰、石灰+粉煤灰、石灰+高炉矿渣、石灰+炉窑灰、水泥+石灰+粉煤灰、水泥+石灰+高炉矿渣及水泥+石灰+炉窑灰等。

6.6.3.2 稳定化药剂及其基本特性

该类材料同土壤混合后,与土壤中的污染物形成沉淀和共沉淀等低溶解或难溶解的物质,或通过物理和化学吸附固定污染物。与固化相反,稳定化药剂与土壤混合后不形成固化块,可使土壤保持原状,但与土壤污染物结合形成沉淀、吸附或结晶需要几天至几个月。该类材料对原土的理化性质有一定影响。

(1) 碱性材料

碱性材料可将污染土壤的 pH 值调节到碱性,使铅、铬、铜、锌等阳离子重金属形成难溶的氢氧化物沉淀,稳定化效果较好,反应快,但对土壤的理化性质有影响。污染土壤所涉及到的碱性材料包括钙镁的氧化物(如:轻烧氧化镁)、钙镁碳酸盐和工厂碱性固废(如:粉煤灰、碱性高炉矿渣、造纸厂污泥等)。

(2) 含磷材料

含磷材料包括:磷灰石类(如羟基磷灰石和磷矿石)、磷酸盐和磷肥。

该类材料与阳离子重金属形成难溶物质,从而固定重金属,对铅的固定效果较好。该类材料适用的 pH 值范围可以从弱酸到碱性。磷灰石和磷矿石难溶于水,作用慢。磷酸盐和磷肥易溶,作用快。

(3) 含铁材料

含铁材料包括:零价铁、铁盐、针铁矿、赤铁矿、天然或人工施威特曼石(Schwertmannite)、合成羟基氧化铁等铁氧化物。

该类材料对重金属的固定依靠吸附和共沉淀,对砷的稳定化效果较佳,对其他重金属一般。零价铁和亚铁对六价铬有还原稳定作用。

(4) 粘土和沸石

粘土和沸石通过表面吸附作用和阳离子交换固定重金属。

(5) 氧化剂和还原剂

氧化剂可把三价砷氧化成五价砷,形成砷的低毒形态。还原剂用于将六价铬还原成低毒的三价铬。氧化剂和还原剂还能降低土壤中有机污染物的浓度。

6.6.4 小试和中试

小试和中试应选取典型污染土壤进行试验,确定药剂配比、混合等工艺和参数。土质对药剂注入和混合影响比较大,沙土中药剂注入和混合比较容易实现,而粘土则比较困难。典型污染土壤的划分应首先按照污染物种类,再按照污染程度进行细分,污染物种类影响药剂

选取，污染程度影响药剂用量。一般可分为有机污染、重金属污染和复合污染土壤等。

小试的目的就是要初步建立固化/稳定的设计参数，其内容包括：（1）代表土壤样品收集；（2）土壤样品均化处理、土壤理化性质测试、污染物检测；（3）药剂选择、药剂与土壤混合、养护、参数测试；（4）建立药剂配方并进行效果测试；（5）注入和混合测试；（6）实验数据分析和评估；（7）编写小试报告。

现场中试的目的就是要优化小试的工艺参数，补充小试中无法实现的工艺参数测试，测试搅拌混合等设备的适用性等。现场中试宜采用工程设备，按实际工程实施，并达到一定处理规模，本节规定了中试规模。中试内容包括：（1）制定中试方案或计划；（2）试验区污染测试和土壤理化参数测试；（3）筛分等预处理测试，确定筛分工艺；（4）混合测试，验证工程设备的适用性；（5）药剂和工艺效果测试，测定无侧限抗压强度、渗透系数和浸出毒性等相关参数；（6）工艺优化，确定质量控制点；（7）二次污染防治的有效性评估；（8）编写中试报告。

6.6.5 原位固化/稳定化工程

6.6.5.1 场地清理

原位固化/稳定化工程首先要对场地内的建筑垃圾和地下管线等影响施工的障碍物进行探测、清理。清理出来的杂物应清洗表面污染物后处置或利用，清洗水处理后回用。六价铬等污染物会侵入建筑垃圾块内部，需破碎后治理。铬渣及六价铬污染的混凝土和砖块可采用湿法解毒的方式治理，汞污染的建筑垃圾可采用热解吸治理。

6.6.5.2 药剂配置

原位固化/稳定化工程需配套建设固定式和移动式配药装置，固定式配药站可为多个操作单元提供药剂，移动式配药装置可跟随注入或搅拌设备一起移动。浆状材料要保持浆体状态，防止沉淀分层。

6.6.5.3 搅拌/注入

原位搅拌/注入受地层结构影响较大，一般依据中试结果确定搅拌/注入方式及相关设计参数，按污染深度分为浅层搅拌和深层搅拌/注入。

污染较浅的土壤采用浅层搅拌设备混合药剂和土壤效率更高，旋耕机一般可达 0.2-0.5m 的深度，挖掘机 1-2m，浅层搅拌设备（如图 6-1）4-5m。采用浅层搅拌工艺时药剂可直接投加到土壤上进行搅拌，有的设备有专用的药剂投加设施。

污染较深的土壤可使用注入井、压力注入及搅拌等方式混合药剂和土壤。注入井一般不适用于浆状药剂和干粉药剂注入，压力注入（如：高压旋喷）可以使用液体、浆状药剂注入，

一般不适用于干粉注入。搅拌混合可以用于液态和浆状药剂与土壤的混合。我国目前尚没有国外已使用的大型原位搅拌混合设备（如图 6-2），这些设备具有搅拌直径大及搅拌效率高等优点。国内一般采用桩基工程设备，如双轴或三轴搅拌设备（如图 6-3）。水泥基原位固化可采用高压旋喷或搅拌混合设备把浆状胶凝材料和药剂与污染土壤混合在一起，形成的柱体见图 6-4。高压旋喷施工深度宜大于 3m，三轴搅拌施工深度宜大于 6-8m，施工深度较浅时返浆严重。高压旋喷和三轴搅拌施工深度在 18m 内较易实施，但也可分别达到 25m 和 30m 的施工深度。注入井和压力注入适于渗透性好的地层，需在现场进行影响半径测试。药剂注入或搅拌混合区要相互部分重叠，不留药剂注入/搅拌死角，重叠区药剂送达量相对较少，属于固化/稳定化的薄弱区。

原位投加的药剂存在影响地下水 pH 值、电导率和硫酸根等指标变化的可能，造成地下水质量恶化，腐蚀地下结构，因此不能过度添加。



图 6-1 浅层搅拌设备



图 6-2 国外大型搅拌混合设备



图 6-3 三轴搅拌设备



图 6-4 原位固化/稳定化后形成的固化体

6.6.5.4 养护和管理

原位固化/稳定化地上部分容易损失水分，可采用 HDPE 膜等覆盖，减少水分蒸发损失，保证水化反应的继续进行及药剂与污染物的充分接触与反应。

固化增容凸起的部分可结合地形和场地使用推土机平整修形。

6.6.6 异位固化/稳定化

6.6.6.1 土壤挖掘

异位技术主要特征是把污染土壤从地块挖掘出来后再进行治理。在设计中需关注基坑和周边构筑物、道路等的安全，其次是基坑排水和降水。基坑支护、降水应依据相关专业的技术规范和规定实施，并由专业单位设计。

基坑排水和降水因含污染物需设计废水处理设施，处理后的废水达标排放或回用。

6.6.6.2 污染土壤暂存

由于污染物种类和污染程度等因素不同，采用的固化/稳定化药剂、药剂用量和混合方式均有所差别，应按分类处理的原则进行分类堆放储存。污染土壤应堆放在防渗地面并进行苫盖，或存放在大棚或车间以防止扬尘等二次污染。土壤堆放还应防止降水和地表径流侵入。

6.6.6.3 预处理

预处理包括：筛分、破碎和除铁等。预处理一般要把直径 50mm 以上的粗大杂物筛分除去，以保证设备安全可靠运行，杂物中的钢筋等金属物件会损伤设备，可采用除铁器去除。使用颚式破碎机、反击式破碎机和锤式破碎机等破碎砖块、石块和混凝土块，有利于筛分和搅拌混合。为了进一步减量化，可用水力旋流器分离沙土，使重金属等污染物转移到细颗粒中，粗颗粒和石块等清洗干净后利用，细颗粒土壤再进行固化/稳定化处理。六价铬水溶性较好，可采用土壤淋洗除去大部分六价铬，再进行固化/稳定化处理，可减少药剂的使用量。

工程中也常采用筛分斗分批筛分土壤，具有设备简单、可移动和效果好的特点，但单台处理量不高，扬尘较大。

6.6.6.4 搅拌混合

异位固化/稳定化搅拌混合系统通常由土壤输送和计量、搅拌混合、料仓和药剂储存罐、配药、药剂计量和投送及电气和自动控制设备等组成。

搅拌混合遵循分类处理、精准施药的原则，以小试和中试的结果指导药剂配比和搅拌混合设计。

国内固化/稳定化工程大多采用双轴搅拌机和土壤改良机。双轴搅拌机可用于固化/稳定化工程的搅拌，适用于粘土、粉土和沙土的混合搅拌；土壤改良机用于稳定化工程的搅拌，适用粉质粘土、粉土和沙土的搅拌混合，具有搅拌混合能力强和效果好的特点。沙土较易混合，可在保证土壤养护水分的条件下使用干粉药剂，粘土混合搅拌比较困难，可采用湿混。

对于连续加药系统，土壤动态计量应与药剂计量投加精确配合，保证药剂的投加量达到设计要求，同时避免过度使用药剂。搅拌混合系统和药剂投加系统正式运行前需进行试运行，验证混合效果。

连续性设备一般适用于处理土方量大的情景。处理土方量少时，可以采用浅层搅拌设备在搅拌槽分批进行混合搅拌，方便快捷，节省空间。

6.6.6.5 养护

水泥基固化养护要满足水化反应的条件和时间，控制好养护期间的水分、温度和时间等，保证固化块的强度和渗透性要求。本节列出了水泥基固化通常情况下的养护要求，但在满足性能要求的前提下，采取添加外加剂等措施进行调整。

稳定化药剂和污染土壤搅拌混合后，药剂和土壤中污染物接触反应形成沉淀、吸附和结晶等固定化形态需要一定时间，应保持水分养护以促进反应。养护时间可根据试验判断，按目前的工程实践经验需 7 天以上的养护时间才能保证药剂与污染物充分接触和反应。

6.6.7 二次污染防控

本节根据固化/稳定化工程二次污染产生的节点，提出了污染防控的要求。

6.7 主要工艺设备和材料

污染土壤固化/稳定化工程具有一定时间周期。工程开始，设备进场安装运行，工程结束，设备撤离。为此，设备应具有可移动性，安装、拆除快捷。由于使用的化学药剂具有一定的腐蚀性，设备与土壤和药剂的接触部分应具有一定的抗腐蚀性，并具备抗土壤和砂石磨损的性能。

本节给出了我国原位浅层及深层固化/稳定化工程的可用设备，以及异位固化/稳定化工程预处理、搅拌混合的可用设备。工程规模小时，可间歇分批处理。

6.8 检测与过程控制

检测是工艺控制和质量控制的重要保证，通过工艺参数检测和效果检测，及时调整和优化工艺，保证工程质量和修复效果，降低修复成本。本节规定了工艺检测的采样数量要求，采样数量参照了 HJ 25.5 及 ITRC 制定的技术规范的相关要求。检测指标一般按工艺设计要求设置。检测采样一般要做到每日、每批次采样，并加强原位重叠区等薄弱环节的采样。

固化效果主要依据浸出测试和物理测试来评估，稳定化一般仅进行浸出测试。固化应增加强度和渗透系数测试，其它物理测试指标视环境条件和用途等来确定，如：干湿循环和冻融循环（干湿循环和冻融循环会破坏固化块的力学特性），如：降低无侧限抗压强度，并会增加污染物溶出。固化块的渗透系数规定参考 ITRC 所提出的要求。

该节给出了原位和异位固化/稳定化工程工艺参数检测的内容，并列出了过程控制的要点。

6.9 辅助工程

辅助工程是固化/稳定化工程的组成部分。本标准规定了与工程配套的供配电、给排水及消防和采暖通风系统等辅助工程的设计要求和标准。

6.10 劳动安全与职业卫生

固化/稳定化工程安全问题包括：机械伤害、触电和火灾等，还存在有毒有害粉尘/气体和化学品等职业卫生问题。本节规定了安全管理和防护、化学品安全及粉尘和有毒有害气体

防护等安全与职业卫生的技术要求。

6.11 施工

固化/稳定化工程的施工贯穿工程的全过程。本节对施工资质、管理、安装、设备与材料等提出了一般性总体要求，结合固化/稳定化的特点列出了施工组织方案和施工准备的内容，并对原位和异位固化/稳定化施工和设备安装的技术要求进行了规定。

6.12 运行和维护

本章对运行和维护提出了一般规定及人员、运行管理和维护的具体要求。一般规定中对设施的运行、事故应急预案、安全管理、操作规程和台账等提出了要求。具体规定了人员培训内容和运行记录内容。在维护章节中要求建立设备和装置的维护保养计划及设备、电气和仪表的定期检查制度。

7 标准实施的环境效益与经济技术分析

该标准实施后，采用固化/稳定化技术对污染土壤进行处置，可降低污染土壤对人体健康和生态环境的风险，采用该技术处理后的土壤结合后期的再利用指标进行再利用，其环境效益和经济效益都将十分显著。

8 标准实施建议

本标准通过对国内外相关文献的整理与分析、实地调研和咨询，总结近几年来国内外固化/稳定化技术从设计、施工、评估、后期监测等方面的有效经验，经现场实际调研并结合资料整合，完成了本标准的制定。本标准包括了固化/稳定化技术的设计、施工等方面的内容，涉及面广、技术性强。建议在本标准实施过程中，广泛听取和收集各方面的意见与建议，根据实际应用情况，对本标准进行不断的修订和完善，使其实用性和可操作性与时俱进，不断满足环境管理和环保工程建设的需要。