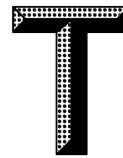


ICS 35.020
CCS P 20



团 体 标 准

T/CSPSTC 134—2024

砷霜冶炼砷及伴生重金属污染地块 风险管控与修复集成技术规范

Integrated technical specification for risk control and remediation of
arsenic and associated heavy metal pollution sites in arsenic smelting

2024-07-25 发布

2024-09-30 实施

中国科技产业化促进会 发布
中国标准出版社 出版

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 基本原则和 workflow	2
4.1 基本原则	2
4.2 workflow	3
5 风险管控及治理修复技术选择	4
5.1 一般规定	4
5.2 基于不同污染介质的技术选择	4
5.3 集成技术	4
6 制定治理方案	6
6.1 技术筛选与可行性评估	6
6.2 治理方案比选	6
6.3 制订配套的环境管理计划	7
6.4 编制治理方案	7
7 治理工程实施	7
7.1 工程设计和施工	7
7.2 环境监理	8
8 修复效果评估	9
9 后期监测和档案管理	9
9.1 监测对象	9
9.2 监测要求	9
9.3 档案管理	9
附录 A (资料性) 砷及伴生重金属常用固化/稳定化药剂	10
附录 B (资料性) 砷及伴生重金属常用淋洗剂	11
附录 C (资料性) 砷及伴生重金属污染地块修复常用植物	12
附录 D (资料性) 人工湿地常用植物	13
附录 E (资料性) 污染土壤及地下水修复常用技术	14
参考文献	17

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中节能铁汉生态环境股份有限公司提出。

本文件由中国科技产业化促进会归口。

本文件起草单位：中节能铁汉生态环境股份有限公司、北京科技大学、大连理工大学、天津大学、中铝环保生态技术(湖南)有限公司、桂润环境科技股份有限公司、四川古叙科技咨询服务有限公司、标准联合咨询中心股份公司。

本文件主要起草人：杜林峰、王月玲、裴福云、傅平丰、沈彦、马德刚、刘庆岭、罗程、贾永锋、涂方祥、陈伟元、吴胜春、王少锋、张余亮、王密、王晓飞、邓威、薛天利、殷郊、张晓峰、卢成绪。

砷霜冶炼砷及伴生重金属污染地块 风险管控与修复集成技术规范

1 范围

本文件规定了砷霜冶炼砷及伴生重金属污染地块风险管控与修复集成技术需要遵循的技术要求和达到的标准。

本文件适用于废弃和已关闭砷霜冶炼区及渣库等因砷霜冶炼造成的地块土壤、地表水和地下水重金属污染的风险管控与修复。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

- GB 3838 地表水环境质量标准
- GB 8978 污水综合排放标准
- GB 12348 工业企业厂界环境噪声排放标准
- GB/T 14848 地下水质量标准
- GB 18598 危险废物填埋污染控制标准
- GB 18599 一般工业固体废物贮存和填埋污染控制标准
- GB/T 30760 水泥窑协同处置固体废物技术规范
- GB/T 31962 污水排入城镇下水道水质标准
- GB 36600 土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)
- HJ 25.4 建设用地土壤修复技术导则
- HJ 25.5 污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术导则(试行)
- HJ 25.6 污染地块地下水修复和风险管控技术导则
- HJ 1090 砷渣稳定化处置工程技术规范
- HJ 2015 水污染治理工程技术导则

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

砷及伴生重金属污染 arsenic and its associated heavy metal pollution

砷霜冶炼过程产生的含砷废渣、土壤污染、地表水污染及地下水污染,这些污染中有时还伴生有超标的铅、镉、铜、锌等重金属元素。

3.2

风险管控 risk control

实施工程控制或监测监控措施阻止土壤、地表水和地下水中污染物扩散对周边环境造成污染或阻断污染物暴露途径以确保暴露人群的健康风险可接受,以及实施制度控制措施限制土地使用功能和阻

止敏感受体接触污染介质,避免对未来受体造成危害的行为。

3.3

生态修复 ecological remediation

以生态学为指导,生物修复为基础,结合各种物理修复、化学修复以及工程技术措施,通过优化组合,保护土壤、地表水和地下水的生态功能,同时达到最佳的污染治理效果和最低耗费的一种综合的修复污染环境的方法。

3.4

修复集成技术 integrated remediation technology

按照一定的技术原理或功能目的,将两种或两种以上的单项污染修复技术通过有机重组而获得的对污染地块具有整体修复功能的新技术的方法。

注:集成修复技术可以实现单个技术实现不了的技术目的。

3.5

多级复合淋洗技术 multi-stage composite leaching technology

利用不同淋洗液对特定污染物的溶解性差异,通过逐级淋洗的方式使目标污染物从土壤中有效去除的技术。

3.6

物理-化学拦截 physico-chemical interception

一种结合了物理拦截和化学处理原理的地表水处理方法,它通过物理手段去除废水中的大颗粒杂质和悬浮物,然后通过化学药剂与废水中的有害物质发生化学反应,将其转化为无害物质,物理拦截与化学拦截相互结合、共同作用。

3.7

生态拦截 ecological interception

通过生态拦截带、生态沟、人工湿地等生物工程措施,对污染地块中的污染物进行截留和拦截,防止其进入水体或进一步扩散。这些设施通过物理、化学和生物等多种机制,对污染物质进行吸附、转化和降解,最终实现污染物的无害化处理和环境修复的方法。

3.8

分区分级修复 partitioned and graded remediation

根据地块污染的空间分布和污染程度,将受污染区域划分为不同的区域或级别,并针对每个区域或级别采取相应的治理技术和措施。

3.9

水土协同治理 integrated water and soil management

对污染地块进行治理时,综合考虑土壤和地表水、地下水之间的相互作用和相互影响,采取一系列技术和措施,对土壤和地表水、地下水进行同步、协调的治理的一种综合性的环境治理策略。

3.10

模块化吸附填料 modular adsorbent filler

一种具有特定结构和形状的填料单元,其内部或表面用来吸附目标污染物,模块化设计的目的是使吸附填料在安装、维护和更换时更加便捷,降低操作成本。

4 基本原则和 workflows

4.1 基本原则

4.1.1 科学规范性

综合考虑污染地块土地利用类型、修复目标、修复时间和修复成本等因素,采用科学的方法制定修复技术方案。修复技术的目标是降低或阻断砷及伴生重金属的迁移,消除对周边环境造成的污染,修复

工作的开展应与现行法律法规规定和相关环保标准相一致。

4.1.2 安全性

治理技术应具有人身安全性和环境安全性,选择的技术不会对施工人员、周边群众的健康产生危害;治理技术不会产生二次污染。要充分考虑治理过程对周边生态环境的影响,工程不会对周边生态系统造成破坏和不利影响。

4.1.3 可达性

治理技术应满足技术层面的可达性和实施层面的可达性,即选用的技术具有较高的成熟度和可操作性,能够达到预期的修复目标;治理技术需要在经济上可行,且技术的实施宜考虑到地方利益相关者的意见和接受度,保证治理工作能够顺利进行。

4.1.4 绿色可持续性

综合考虑气候、地块条件、技术、时间因素、设备材料等,从修复技术的选择,到设计、实施的过程充分考虑能源消耗、废气排放、水资源利用对土地环境的影响,践行绿色可持续修复理念。

4.1.5 因地制宜

根据地块的污染状况、工程地质条件、气象因素、污染物种类和浓度、修复成本和未来地块用途等因素综合考虑,制定有针对性的修复方案,并在实施过程中灵活调整策略,以保证修复工作的有效性和高效性。

4.2 工作流程

砒霜冶炼砷及伴生重金属污染地块风险管控与修复工作流程应符合相关法律法规以及 HJ 25.4 的基本要求,修复过程应包括编制修复方案、修复实施、修复效果评估、后期监测等环节。工作流程见图 1。

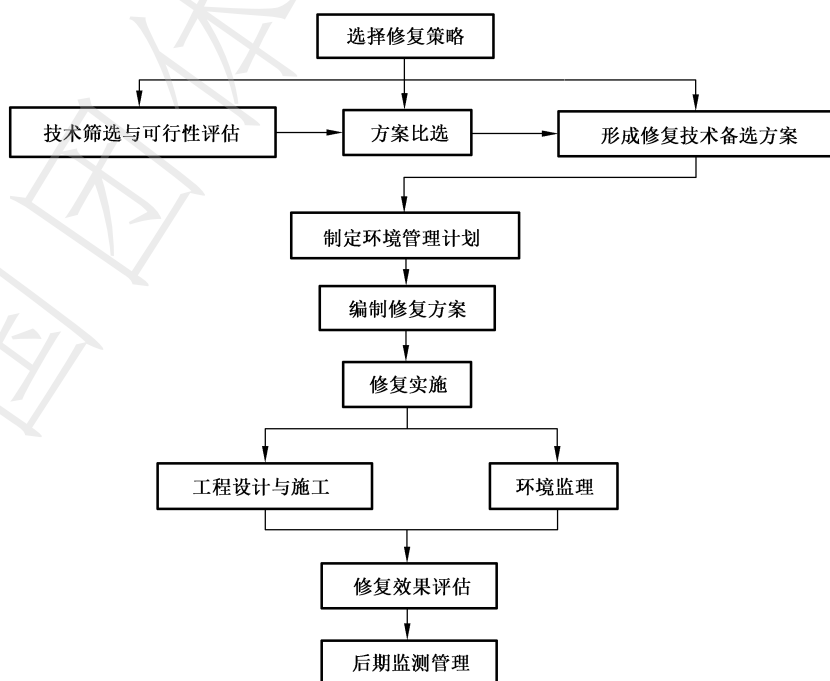


图 1 砒霜冶炼砷及伴生重金属污染地块风险管控与修复工作流程

5 风险管控及治理修复技术选择

5.1 一般规定

5.1.1 砷霜冶炼污染地块中的重金属污染以砷为主,同时伴生铅、镉、铜、锌等元素中的一种或多种。砷与伴生重金属元素存在赋存形态上的差异。砷霜冶炼污染地块中的砷以无机态砷为主,无机砷通常以含氧阴离子的形式存在于环境中,环境中的重金属铅、镉、铜、锌等污染物通常以阳离子形式存在,在治理中宜考虑阴阳离子的协同性。

5.1.2 砷霜冶炼污染地块中的污染介质包括砷霜冶炼废渣、污染的土壤、地表水和地下水。

5.2 基于不同污染介质的技术选择

5.2.1 废渣治理技术

砷霜冶炼污染地块的废渣主要来源于冶炼过程。

- a) 对于具备经济回收价值的含砷废渣可采用资源化方式对其中的重金属进行收回。
- b) 对于不具备经济回收价值且属于危险废物的废渣、经回收处理后浸出毒性仍不符合 GB 18599 的废渣,按 HJ 1090 进行稳定化处置后执行符合 GB 18598 的要求。
- c) 对于废渣浸出毒性符合一般工业固体废物贮存和填埋污染控制标准的,参照 GB 18599 采用固化/稳定化和填埋的方式进行处理。

5.2.2 污染土壤治理技术

5.2.2.1 砷霜冶炼污染地块土壤砷及伴生重金属污染根据地块特征条件、修复目标和修复要求,综合考虑砷及伴生重金属的浓度特征、技术适用性、修复效果和时间成本选择固化/稳定化、异位淋洗、水泥窑协同处置等治理技术。

5.2.2.2 使用固化/稳定化宜考虑药剂对地块土体增容的影响,稳定化药剂宜同时兼顾砷及伴生重金属铅、镉、铜、锌等的离子特性差异,常用固化/稳定化药剂见附录 A。异位淋洗宜考虑砷及伴生重金属在不同 pH 值条件下的迁移能力,选用复合淋洗剂、采用多级复合淋洗的处理方式,常用淋洗剂见附录 B。水泥窑协同处置中污染土壤应满足 GB/T 30760 关于入窑物料重金属最大允许投加量的要求,处置产生的烟尘属于含砷危险废物的,需进行后处理。砷及伴生重金属污染地块修复涉及种植植物的,修复常用植物见附录 C。

5.2.3 污染地表水治理技术

针对砷霜冶炼砷及伴生重金属污染地块中地表水的治理,采用物理-化学拦截、生态拦截、人工湿地等方式对地表径流中的重金属污染物拦截、沉淀和固定。人工湿地常用植物见附录 D。

5.2.4 污染地下水治理技术

对于需要进行污染地下水修复的砷霜冶炼地块,参照 HJ 25.6 开展修复。具体的技术选择宜综合考虑污染程度、修复目标以及经济成本等因素。污染土壤及地下水修复常用技术见附录 E。

5.3 集成技术

5.3.1 一般规定

针对地块的工程地质条件、降水量、污染程度和传输方式,可通过集成技术构建砷污染地块水土协同治理的阻控-稳定-修复一体化技术。

5.3.2 适用范围

适用于污染面积大,存在冶炼废渣和污染土壤的砷霜冶炼污染地块,具体技术可根据地块实际情况选择。

5.3.3 技术原理

根据分区分级修复、水土协同治理的理念,首先对地块污染废渣和污染土壤进行固化/稳定化处理,将污染元素转化为不活泼形态,降低毒害程度。针对高浓度废渣和污染土,经固化/稳定化处理并符合相关标准后入填埋场安全填埋;对离地表较近、污染浓度经治理后有望达标的污染土壤,考虑到土壤的生态性及后期地表种植覆绿的需要,进行稳定化处理,利用吸附、沉淀、生成络合物中的一种或多种机理,降低污染物迁移性和生物有效性。其次对修复区内表层土壤施用交联剂,抑制土壤侵蚀和水土流失,减少地表水对污染物的携带迁移。依据地形在地块中间隔设置生态拦截带,生态拦截带采用植生袋构件,袋内填装稳定化修复材料与种植土混合物,每两组生态袋之间种植功能型植物。地表径流经生态拦截带后汇集到生态沟,引入拦截体进行物理-化学拦截,拦截体包括进、出水墙体和填料区,填料区放置两级模块化吸附填料,分别吸附砷及伴生重金属。地表径流经拦截填料吸附处理后进入人工湿地,进行再次拦截吸附和湿地植物吸附促沉。

5.3.4 技术特点

集成技术的技术特点如下所示。

- a) 固化/稳定化:
 - 1) 固化/稳定化技术实施过程中,可根据地块特性选用单一或混合的黏结剂或稳定剂;
 - 2) 固化/稳定化技术实施前需要对土壤的理化性质和污染物的浓度进行详细检测分析;
 - 3) 固化/稳定化技术的成本和运行费用较低,适用性较强,修复时间一般为中短期。
- b) 安全填埋:
 - 1) 污染土壤的挖掘和运输过程需要采取必要的防护措施,防止污染土壤的遗撒和泄漏;
 - 2) 填埋场周边需设置监测井,对地下水水质进行监控;
 - 3) 填埋场需要定期进行检查和维护,确保防渗系统不被破坏。
- c) 生态拦截带:
 - 1) 适用于 $0\text{ m} < \text{地表高差}(h) \leq 10\text{ m}$ 的地块;
 - 2) 生态拦截带布设方式和密度可根据地块实际情况设计;
 - 3) 生态拦截带常与耐重金属功能型植物种植相结合;
 - 4) 生态拦截带填充材料主要包括种植土、稳定化吸附材料、草种等。
- d) 拦截体:
 - 1) 拦截体是将地下水可渗透反应墙技术改良应用于地表水,适用于污染地表水收集处理;
 - 2) 拦截体通过设置模块化吸附填料区,方便替换吸附材料,提高拦截设施使用年限;
 - 3) 拦截体采用串联两级吸附区,将砷和伴生重金属分开吸附,提高吸附效率;
 - 4) 拦截体的进水墙体由透水砖砌成,出水墙体由无孔实心砖砌成,水经填料吸附反应后溢流翻墙进入下一级湿地系统。
- e) 人工湿地:
 - 1) 人工湿地系统对污染物具有较强的吸附和降解能力;
 - 2) 人工湿地系统具有滞留污染物的生态环境效益,同时具有较强的观赏性;
 - 3) 人工湿地在维护过程中,要定期进行去淤,防止因阻塞导致的处理效果和运行寿命降低。

5.3.5 技术路线

砷霜冶炼砷及伴生重金属污染地块修复技术集成路线见图 2。

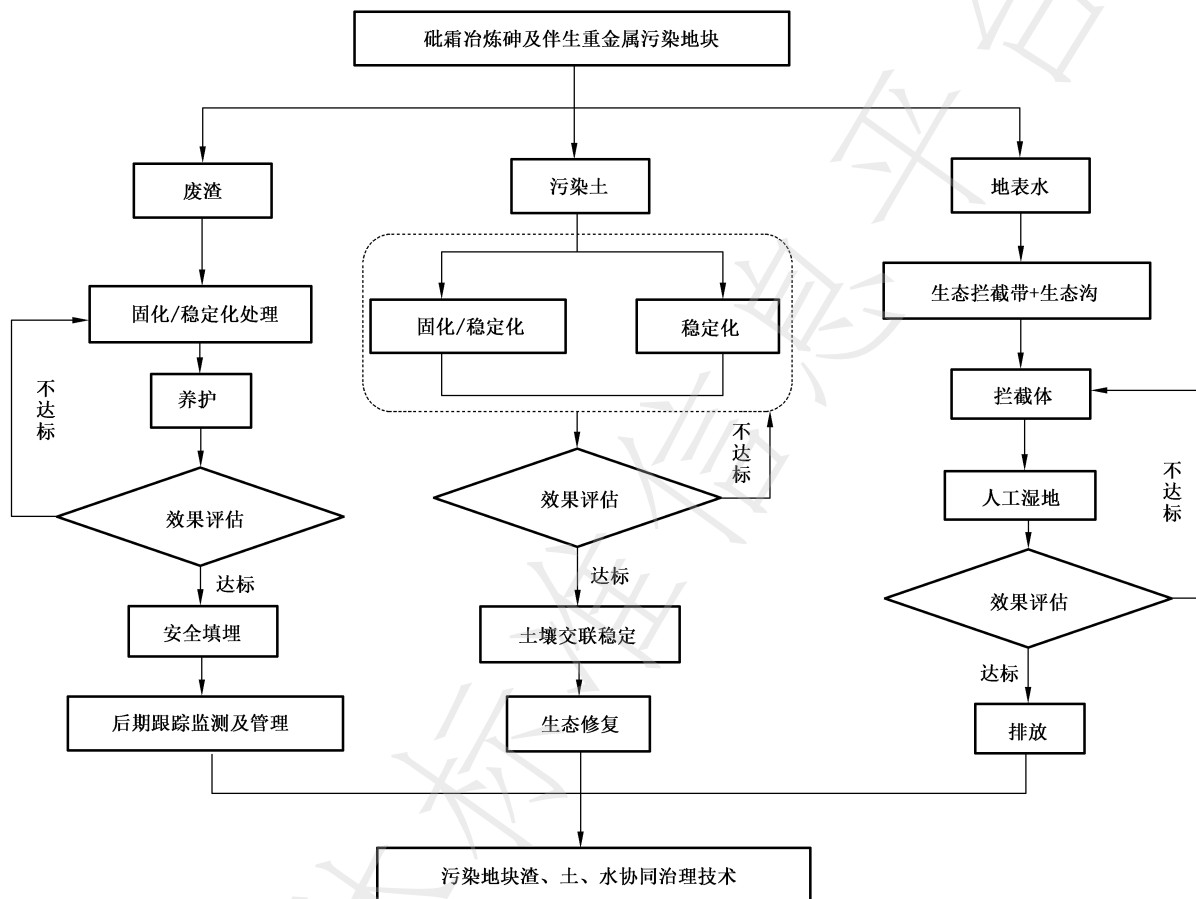


图 2 砷霜冶炼砷及伴生重金属污染地块修复技术集成路线

6 制定治理方案

6.1 技术筛选与可行性评估

通过修复技术筛选,找出适用于目标地块的潜在可行技术,并根据需要进行相应的技术可行性试验与评估,以确定可行技术。技术筛选宜考虑地块修复总体思路、修复工艺流程及相应的工程量。修复技术的工艺参数应包括药剂投加量或比例、设备处理能力、每批次处理所需时间、处理条件、能耗、设备占地面积或作业区面积等。土壤修复的工程量应涵盖污染土壤需要修复的面积、深度、土方量,同时宜考虑修复过程中开挖、围堵等辅助工程的工程量,还宜考虑土壤修复过程中受污染水体和固体废物等的无害化处理处置的工程量。

6.2 治理方案比选

通过各种可行技术合理组合,形成能够实现修复总体目标的潜在可行的治理技术备选方案。在综合考虑治理时间、经济效益、社会效益、环境效益等指标情况下进行方案比选,确定适合目标地块的最佳治理方案。

6.3 制订配套的环境管理计划

参照 HJ 25.4 制订与修复工程配套的环境监测计划和环境应急安全计划,为目标地块修复工程的环境监管提供指导,防止修复过程中的二次污染。

6.4 编制治理方案

根据前期的技术工作分析编制修复方案,方案宜全面准确地呈现项目信息和全部工作内容,对后续的工程设计和施工发挥指导作用。

7 治理工程实施

7.1 工程设计和施工

7.1.1 一般规定

7.1.1.1 污染地块土壤修复工程设计和施工宜本着因地制宜、科学合理的原则,选用成熟可靠、经济适用的技术,并考虑节能、安全、操作简便等方面的因素。

7.1.1.2 污染地块土壤修复设计和施工应符合国家和行业相关程序及管理文件的要求,设计和施工单位应具有国家相应的设计和施工资质。

7.1.1.3 施工单位编制施工组织设计,选择适用的施工机械,结合建设条件,对标段划分、施工期限做出合乎实际的安排。

7.1.1.4 污染土壤挖掘应编制专项方案,深基坑开挖专项方案应明确施工计划,满足施工安全保障措施的相关要求。

7.1.1.5 工程废水处理设计应按照 HJ 2015 的规定进行,地表水排放应符合 GB 3838、GB 8978、GB/T 31962 及相关行业和地方标准的要求;地下水排放应符合 GB 8978、GB/T 14848、GB/T 31962 及相关行业和地方标准的要求。

7.1.1.6 土壤修复工程噪声控制应满足 GB 12348 的要求。

7.1.2 技术集成设计和施工要点

砷霜冶炼砷及伴生重金属污染地块的修复宜基于地块污染特点、土壤特征、地块水文地质条件、区域气象气候条件、地下构筑物或埋藏物分布、周围敏感点及分布等相关资料,同时符合技术选择和应用的要点。

a) 固化/稳定化:

- 1) 固化剂、稳定剂宜选择来源丰富、价廉易得的材料,同时不能带来二次污染;
- 2) 固化过程中宜采用材料和能量消耗低的工艺,增容率要低;应对固化块的无侧限抗压强度、渗透系数和耐久性等指标进行测试,固化块的无侧限抗压强度应 >0.35 MPa,渗透系数 $\leq 1 \times 10^{-7}$ cm/s;
- 3) 固化/稳定化药剂施用中,浅层污染土壤可采用挖掘机、旋耕机或专用浅层搅拌机等设备混合;深层污染土壤可采用高压注入或螺旋搅拌的方式进行混合。

b) 安全填埋:

- 1) 砷渣和污染土壤安全填埋前应经预处理达到 GB 18598 的要求后入填埋场;
- 2) 填埋场及附属设施的建设、填埋场的运行管理以及填埋场的污染控制应符合 GB 18598 的要求;
- 3) 进入填埋场的废渣和污染土壤的含水率应满足 GB 18598 的要求。

- c) 生态拦截带：
 - 1) 生态拦截带沿地块垂直坡向位置布设；
 - 2) 生态拦截带所用植生袋及构件的规格、参数要求应在设计方案中做出要求；
 - 3) 对于土质疏松的坡地，在设计时宜考虑坡面荷载，配合土工格室、柔性防护网等防护措施一起使用；
 - 4) 生态拦截带所用植生袋中装填材料及配比参数等应在设计方案中做出要求；
 - 5) 生态植草沟的宽度根据排水量确定，通常取值为 50 cm~150 cm；深度取值为 20 cm~30 cm；
 - 6) 生态植草沟断面边坡坡比 $\leq 1:3$ ，纵坡坡度取值 1%~4%，纵坡坡度取值 $>4\%$ 时应设计卵石消能设施。
- d) 拦截体：
 - 1) 地表径流进入拦截体前应先设计沉砂池去除大颗粒杂质；
 - 2) 拦截体进水墙体高度大于出水墙体高度，拦截体内的拦截填料可替换，拦截体底部需进行防渗处理；
 - 3) 拦截填料的选择考虑经济性、稳定性、环境友好性、水力性能、反应速率和粒度均匀性等因素；
 - 4) 拦截体的设计宜考虑收集的地表水在拦截体内有足够的水力停留时间。
- e) 人工湿地：
 - 1) 人工湿地宜选择自然坡度为 0%~3%的洼地或塘，以及未利用土地；
 - 2) 人工湿地宜不受洪水、潮水或内涝的威胁，且不影响行洪安全；
 - 3) 人工湿地底面和侧面应进行防渗处理，防渗层的渗透系数应不大于 10^{-8} m/s；
 - 4) 人工湿地基质选择宜本着就近取材的原则，所选基质应达到设计要求的粒径范围，并且具有吸附砷及伴生重金属的功能；
 - 5) 人工湿地种植土壤的质地宜为松软黏土或壤土，厚度 20 cm~40 cm 为易，渗透系数 6.9×10^{-8} m/s~ 9.7×10^{-7} m/s；
 - 6) 湿地植物种植密度可根据植物种类与工程要求调整，挺水植物的种植密度宜为 9 株/m²~25 株/m²，浮水植物和沉水植物的种植密度均宜为 3 株/m²~9 株/m²。

7.2 环境监理

7.2.1 一般规定

环境监理的主要工作内容是监督修复工程是否满足环境保护的要求，主要分为修复工程设计阶段、修复工程施工准备阶段和修复工程施工阶段 3 个阶段的工作。

7.2.2 修复工程设计阶段

收集地块调查评估、地块污染修复方案、修复工程施工设计等基础资料，对修复工程中的环保措施和环保设施设计文件进行审核，关注修复工程的施工位置和异位修复外运土壤去向，审核修复过程中水、大气、噪声、固体废物等二次污染处理措施的全面性和处理设施的合理性，必要的后期管理措施的考虑。

7.2.3 修复工程施工准备阶段

了解具体施工程序及各阶段的环境保护目标，参与修复工程设计方案的技术审核，确定环境监理工作重点，协助业主建立完善的环保责任体系，建立有效的沟通方式等，并编制地块修复环境监理细则。

7.2.4 修复工程施工阶段

核实修复工程是否与修复实施方案相符,环保设施是否落实,是否建立事故应急体系和环境管理制度;监督环境保护工程和措施,监督环保工程进度;检查和监测施工过程中产生的水、气、声、渣排放,施工影响区域应达到规定的环境质量标准;对场内运输污染土壤和污水的车辆密闭性、运输过程进行环境监理;对场内修复工程相关措施(如止水帷幕与施工降水措施等)、抽提装置和废水处理设备安装进行监督管理;施工过程中基坑开挖和支护等是否按有关专项施工方案要求进行;对异位处置过程,包括储存库及处理场地地面防渗措施的落实和监控;检查污染土壤储存场地、处置设施的尾气排放设施和监测设施是否完备,确认各项条件是否符合环境要求;检查必要的后期管理和长期监测井设置;根据施工环境影响情况,组织环境监测,行使环境监理监督权;向施工单位发出环境监理工作指示,并检查环境监理指令的执行情况;协助建设单位处理环境突发事故及环境重大隐患;编写环境监理月报、半年报、年报和专项报告。

8 修复效果评估

风险管控及修复施工完成后,对地块应开展风险管控和修复技术措施的效果评估,评估流程应符合 HJ 25.5、HJ 25.6 的要求,评估结果应满足技术方案的修复目标要求。

9 后期监测和档案管理

9.1 监测对象

9.1.1 对于采用风险管控的地块,需要进行长期的监管。

9.1.2 对于修复后土壤中污染物浓度未达到 GB 36600 用地筛选值、地表水中污染物浓度未达到 GB 3838 中地表水水域环境功能和保护目标的地块、地下水中污染物浓度未达到 GB/T 14848 中地下水使用功能对应标准值的地块,需要进行后续环境监测。

9.2 监测要求

9.2.1 长期监测宜 1 年~2 年开展一次,可根据实际情况进行调整。

9.2.2 监测管理的采样、制备、分析、评价等程序步骤应符合相关标准。

9.2.3 为保证监测数据的准确可靠,应对监测全过程进行质量保证和质量控制。

9.2.4 除具体的监测操作方法外,还应对监测对象实施制度控制,例如限制地块使用方式、限制地下水利用方式、通知和公告地块潜在风险、制定限制进入或使用条例等。

9.3 档案管理

9.3.1 项目前期,应按照相关规定要求留存纸质及电子档案(项目立项、批复、设计、施工、监理、效果评估)等相关的档案材料。

9.3.2 后期监测管理期间,应建立档案记录制度,记录监测数据与维护情况并及时归档。

附录 A

(资料性)

砷及伴生重金属常用固化/稳定化药剂

砷及伴生重金属常用固化/稳定化药剂见表 A.1。

表 A.1 砷及伴生重金属常用固化/稳定化药剂

污染物质	常用修复药剂类型	可行性评估
砷	铁盐、铁氧化物、零价铁、磷酸盐、硅酸盐、腐殖质、生物炭等	参照 HJ 25.4 执行
伴生重金属	沸石、膨润土、凹凸棒土、海泡石、高岭土、铁粉、氧化钙、过磷酸钙、生物炭、腐殖酸等	

附 录 B

(资料性)

砷及伴生重金属常用淋洗剂

砷及伴生重金属常用淋洗剂见表 B.1。

表 B.1 砷及伴生重金属常用淋洗剂

污染物质	常用修复药剂类型	可行性评估
砷及伴生重金属	无机淋洗剂:水(H ₂ O)、酸(HNO ₃ 、HCl、H ₂ SO ₄ 等)、碱(NaOH、KOH等); 人工螯合剂:乙二胺四乙酸(EDTA)、乙二胺二琥珀酸(EDDS)、聚天冬氨酸(PASP)、谷氨酸二乙酸四钠(GLDA)等; 天然有机酸:柠檬酸、草酸、酒石酸等; 表面活性剂:化学/生物表面活性剂等	参照 HJ 25.4 执行

附 录 C

(资料性)

砷及伴生重金属污染地块修复常用植物

砷及伴生重金属污染地块修复常用植物见表 C.1。

表 C.1 砷及伴生重金属污染地块修复常用植物

植物种类	植物名称
草本	蜈蚣草、小飞扬草、长毛委陵菜、孔雀草、锦葵、鱼腥草、香根草、肾蕨、井栏边草、地肤、皇竹草、苔草、狗牙根
灌木	芒麻、大叶女贞、金丝梅、车桑子、鬼吹箫
乔木	盐肤木、马尾松、杨树、大桉、桉木、桑树
注：建议优选项目当地优势乡土植物种。	

附 录 D
(资料性)
人工湿地常用植物

人工湿地常用植物见表 D.1。

表 D.1 人工湿地常用植物

植物种类	植物名称
挺水植物	菖蒲、灯芯草、芦苇、蒲草、荸荠、莲、水芹、水葱、茭白、香蒲、千屈菜、水麦冬、风车草
浮水植物	凤眼莲、浮萍、睡莲
沉水植物	伊乐藻、茨藻、金鱼藻、黑藻

附录 E
(资料性)
污染土壤及地下水修复常用技术

污染土壤及地下水修复常用技术见表 E.1。

表 E.1 污染土壤及地下水修复常用技术

技术名称	技术原理	适用性	局限性	成熟性	技术要求
安全填埋技术	阻隔填埋是将污染土壤挖掘，运输至填埋场进行掩埋覆盖，采用防渗、封顶等配套措施防止土壤中污染物扩散的处理方法。安全填埋不能降低土壤中污染物本身的毒性和体积，但可以减少污染物的暴露及迁移	可用来最终处置各类污染土壤，适用于低含水率的污染土壤或处理规模过大而其他修复技术难以实施的污染区域。目前广泛应用于矿山废渣处置	需大面积填埋场；污染物未被处理，只是转移位置，存在二次污染风险；挥发性污染物难以密闭填埋	技术成熟	对属于一般工业固废的神废渣，以及填埋场的选址、建设、其附属设施的建设、填埋场的运行管理和污染控制参照 GB 18599 的要求； 对含量等级属于危废的神废渣，其入场废物，以及填埋场的选址、建设、其附属设施的建设、填埋场的运行管理和污染控制参照 GB 18598 填埋物入场要求，不满足要求的废物需经预处理后方可入场填埋
固化/稳定化技术	将污染土壤与固化剂或稳定剂混合，使污染物实现物理封存或发生化学反应形成固体沉淀物，降低污染物的迁移性和生物有效性	广泛适用于处理各类重金属污染的土壤	不适用于挥发性有机污染物的处理；固化处理后的土壤通常丧失其生态作用，需要考虑纳场所	技术成熟	固化剂、稳定剂选择来源丰富、价廉易得的材料； 固化过程中材料和能量消耗低，增容率低； 固化过程容易操作； 对于总量较高的神渣和神污染土壤，处理后进行安全填埋处置，处理后含神废渣及土壤固化体的重金属浸出毒性参照 GB 18598 的限制标准
异位淋洗技术	借助能够促进土壤环境中污染物溶解或迁移作用的溶剂，通过水力学方式机械地悬浮或搅动土壤颗粒，使污染物与土壤颗粒分离	适用于渗透系数较大的沙地、砂砾土壤和沉积土，对渗透系数大于 10^{-3} cm/s 的土壤处理效果较好	不适用于黏粒含量过高的土壤，黏土含量 25% 以上时，不宜采用该技术	技术成熟	修复工程运行状况根据运行效果检测、二次污染检测及淋洗设备运行状况检测进行分析； 修复工程的场址宜建在污染地块的厂区内，或根据自然条件、地理位置、周边敏感区域等另行选择，远离居民区等敏感点； 淋洗废水处理后排放至公共污水处理系统的，检测指标参照 GB 8978、GB/T 31962； 淋洗出料富含超高度重金属的污染废渣按设计要求异地处置

表 E.1 污染土壤及地下水修复常用技术 (续)

技术名称	技术原理	适用性	局限性	成熟性	技术要求
资源化利用	含砷废渣的资源化利用一般采用酸、碱或盐浸等湿法处理,将砷从含砷废渣中分离出来,再制成不同产品进行回收	可用于多种含砷废渣的资源化处理,砷的回收率高,对环境友好	酸浸法对生产装置防腐要求高,成本较高;盐浸法工艺流程复杂;碱浸法中间反应较多,导致产物的纯度偏低	技术较成熟	资源化利用技术处置后的废渣,经鉴别属于一般工业固废的,参照 GB 18599 的要求进行贮存、填埋;属于危险废物的,参照 GB 18598 的方法处理;对锌、铅、铜等有价金属的资源化利用参照 GB/T 41012 中的方法;需要增设相应的环保设施,处置过程中产生的二次污染物参照相关环保或行业标准的要求
水泥窑协同处置	将满足或经过预处理后满足入窑要求的土壤投入水泥窑,在进行水泥熟料生产的同时实现对污染土壤无害化处置的技术	适用于重金属、半挥发性和难挥发性有机污染物	在进入水泥窑之前,污染土壤一般先进行预处理,对污染土壤中的各组分和污染物等进行详细检测	技术较成熟	该技术不能处置放射性废物、铬渣、爆炸物及反应性废物,入窑废物中汞、砷、镉、铜、铅、镉、锌等重金属的投加量参照 HJ 662 的要求;水泥窑单线设计熟料生产规模不小于 2 000 t/d,对于工期较短的砷污染渣土项目不适用于采用水泥回转窑进行协同处置;水泥窑协同处置技术污染物排放参照 GB 4915、GB 30485
可渗透反应墙	在地下水污染源的下游开挖沟槽,安置充填着反应介质的墙体,流经的地下水与墙中的介质发生物理、化学和生物反应,使地下水中的污染物得以阻隔、固定、吸附或降解	主要用于石油烃、氯代烃和重金属等的处理,适用于渗透性较好的孔隙、裂隙和岩溶含水层	该技术对深层污染的实施难度较大;反应墙的渗透性可能随污染物的沉积而降低;设置长期观测井监控处理效果	国外广泛应用,国内已有工程应用	反应介质的粒径宜保证反应格栅的孔隙度和渗透系数大于含水层介质,反应介质环保安全,反应过程中不应产生有毒有害副产物;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;漏斗—导水门结构的宽度主要由污染物羽流的尺寸决定,一般是可渗透反应墙的 1.2 倍~1.5 倍,漏斗—导水门式结构同时污染物羽流宽度的 1.2 倍~1.5 倍,漏斗—导水门数量取决于隔水漏斗与导水门的比率及导水门的数量;可渗透反应墙体的高度根据不透水层或弱透水层的埋深和厚度决定,底端嵌入不透水层至少 0.6 m,顶端需高于地下水最高水位

表 E.1 污染土壤及地下水修复常用技术 (续)

技术名称	技术原理	适用性	局限性	成熟性	技术要求
抽出处理	在污染地块布设一定数量的抽水井,抽取污染地下水至地表,然后对污水进行处理	主要用于去除地下水中溶解的污染物和浮于潜水面上的油类污染物	处理后会出现拖尾现象,残留在土壤孔隙中的污染物难以去除,地质的不均一性和渗透系数都会影响处理效果	技术成熟	地质的不均一性对处理的效果影响很大,渗透系数小于 10 cm/s~5 cm/s 的地块,处理效果不明显; 抽水井井管的内径要求不小于 110 mm,以满足预计抽水量、安装水泵等要求,可依据实际需求增大; 监测井井管的内径要求不小于 50 mm,以满足洗井和采样要求的口径为准,其他监测井建设要求参照 HJ 164 执行

参 考 文 献

- [1] GB 4915 水泥工业大气污染物排放标准
 - [2] GB 18597 危险废物贮存污染控制标准
 - [3] GB 30485 水泥窑协同处置固体废物污染控制标准
 - [4] GB/T 33072 含砷废渣的处理处置技术规范
 - [5] GB/T 41012 含有色金属固体废物回收利用技术规范
 - [6] HJ 25.2 建设用地土壤污染风险管控和修复监测技术导则
 - [7] HJ 25.3 建设用地土壤污染风险评估技术导则
 - [8] HJ 164 地下水环境监测技术规范
 - [9] HJ/T 166 土壤环境监测技术规范
 - [10] HJ 651 矿山生态环境保护与恢复治理技术规范(试行)
 - [11] HJ 662 水泥窑协同处置固体废物环境保护技术规范
 - [12] 任全进,徐鹏,张超,等.湿地应用型植物概述[M].南京:东南大学出版社,2023.
 - [13] 吴玲.湿地植物与景观[M].北京:中国林业出版社,2010.
 - [14] 陈永华,吴晓芙.人工湿地植物配置与管理[M].北京:中国林业出版社,2012.
-