团　体　标　准

《有色金属冶炼污染场地修复过程污染综合防控技术指南》编制说明

（征求意见稿）

目 录

1 标准编制背景 1

1.1任务来源及意义 1

1.2 项目承担单位 2

1.3 项目范围及主要内容 3

1.4 编制过程 4

2 标准编制的必要性 4

3 场地修复技术和污染防控状况 7

3.1 有色金属冶炼场地污染地块修复技术状况 7

3.2有色金属冶炼场地修复过程污染防控技术状况 16

3.3有色金属冶炼场地修复过程污染治理技术状况 26

3.4有色金属冶炼场地修复过程污染防控和治理技术发展分析 29

4 编制依据、原则和方法 46

4.1 编制依据 46

4.2 编制原则 46

4.3 编制方法 48

5 主要技术内容 49

5.1修复过程污染产生与预防 49

5.2 修复过程污染治理 50

5.3 污染治理可行技术 50

5.4 修复过程污染治理技术发展 51

6 实施本标准的成本和效益分析 51

6.1 本标准实施成本分析 51

6.2 实施效益简要分析 51

6.3 相关说明 52

7 对本标准实施的相关建议 52

7.1标准执行 52

7.2 标准完善 52

7.3 其他建议 53

1 标准编制背景

1.1 任务来源及意义

根据《中华人民共和国土壤污染防治法》企业生产需要“实施风险管控、修复活动中产生的废水、废气和固体废物，应当按照规定进行处理、处置，并达到相关环境保护标准”。

《工矿用地土壤环境管理办法（试行）》把有色金属冶炼被列为土壤环境污染重点监管行业之一。作为重点监管行业，有色金属冶炼场地的污染问题亟需引起重视，目前国家还没有专门针对有色冶炼行业场地污染地块修复综合防控治理的技术体系、行业规范和行业指南等一系列指导性技术文件。

因此针对有色金属冶炼场地修复及其综合防控的工程实践和研究课题，行业专家建议可结合研究工作编制行业（协会）标准，中国瑞林工程技术股份有限公司于2120年4月向有色金属工业协会、全国有色金属标准化委员会申报了《有色金属冶炼场地污染土壤修复综合防控技术指南》（以下简称“指南”，作为有色金属协会团体标准，以填补我国有色金属工业污染土壤稳定化、淋洗分离修复污染综合控制标准的空白，使之既具有行业特色，又与国家、地方土壤修复工程建设和污染控制标准充分衔接，不仅在我国以重金属为主要特征的工业场地污染修复起到示范和支撑作用，对有色金属工业贯彻落实党中央生态文明建设总体部署和习近平总书记新时代生态文明思想，保障有色金属冶炼企业场地及周边的生态环境安全和相关区域绿色发展起到推动作用。

2020年8月，全国有色金属标准化技术委员会批准了该“指南”立项，项目编号为2020-42-T/CNIA。全国有色金属标准化技术委员会重金属分委会于2020年10月17日~18日在南昌市组织召开了“指南”编制的任务落实会，确定了“指南”编制任务。

“指南”以有色金属冶炼场地污染特征，针对现有常用的稳定化、淋洗分离修复技术在实施过程中的污染综合防控技术方法、措施，进行系统归纳形成指导性文件。“指南”制订颁布后，不仅有利于规范修复过程及其污染防控，提高修复的环境安全。同时，还可以作为行业监管、风险评价提供技术支撑，必将为我国其他工矿企业污染场地修复过程污染综合防控起到借鉴的作用。

1.2 项目承担单位

1.2.1中国瑞林工程技术股份有限公司

牵头单位：中国瑞林工程技术股份有限公司，是有色金属工业行业技术咨询、设计总承包骨干单位，2000年前直接隶属于有色金属行业主管部门甲级事业单位，现改制为国资监管股权多样性股份制企业，长期从事土壤重金属污染修复的技术研发、工程和咨询服务建有江西省土壤重金属污染治理与改良工程研究中心，具有丰富的重金属污染场地修复工程经验，承担技术方案确定和工程管理，主持和参编《铜冶炼工艺设计规范》、《有色金属工业环境保护工程设计规范》、《铜镍钴工业污染物排放标准》等72项国家、行业标准规范。组建了冶金工程领域国家级工程技术中心1个，省级工程技术中心2个，重点实验室1个，形成了一批具有自主知识产权的优势技术和创新技术。《有色金属工业污染场地环境修复关键技术开发与应用》获2019年度中国有色金属工业协会科技成果二等奖，2016年至2019年开展了环境修复工程和相关修复技术开发和研究工作，承担了江铜贵溪冶炼厂渣场综合治理、赣州大余钴钨冶炼废弃场地污染治理、云南驰宏锌锗股份会泽分公司大渣场污染综合防控工程等咨询、设计、EPC及相关技术开发研究。

2018年中国瑞林工程技术股份有限公司与永清环保股份有限公司等单位合作申报了国家重点研发计划课题《中南地区冶炼场地污染综合防控及再开发安全利用技术集成与综合应用示范》（2018YFC1802705），其中中国瑞林工程技术股份有限公司主要牵头中南地区冶炼场地污染综合防控及再开发安全利用技术集成。目前已经完成大部分技术成果，有些中间成果已经通过跟踪专家预审。

1.2.2 矿冶科技集团有限公司

矿冶科技集团有限公司（原北京矿冶研究总院）是隶属于国务院国资委管理的中央企业，属国家首批创新型企业，是我国以矿冶科学与工程技术为主的规模最大的综合性研究与设计机构。在采矿、选矿、有色金属冶金、工艺矿物学、磁性材料、工业炸药、选矿设备、环境工程、表面工程技术及相关材料等研究领域具备国家领先水平。共获得国家和省部级科技成果奖 1100 余项，授权专利和制订国家及行业标准 1100 余项；《中南地区冶炼场地污染综合防控及再开发安全利用技术集成与综合应用示范》（2018YFC1802705）课题实施跟踪专家组牵头单位，目前正在编制废弃渣场污染综合治理技术指南等行业标准。

1.2.3 永清环保股份有限公司

永清环保股份有限公司长期从事土壤重金属污染修复的技术研发、工程和咨询服务，是全国第一批土壤重金属修复技术重点推广示范单位。已完成60余个重金属场地污染修复工程。在国内率先完成3个示范区耕地修复。自主研发的“重金属污染土壤离子矿化稳定化技术”被列入国家重点环境保护实用技术，已成功应用于包括国家示范项目在内的数十项修复工程。主要承担工程示范及验收、管控。《中南地区冶炼场地污染综合防控及再开发安全利用技术集成与综合应用示范》（2018YFC1802705）课题牵头单位，承担包括修复模式集成和综合示范等工作，包括株洲冶炼厂遗留场地（清水塘厂址）等多个有色金属冶炼废弃场地污染修复和开发利用。

1.3 项目范围及主要内容

1.3.1范围

本标准提出了有色金属冶炼污染地块稳定化和淋洗分离修复技术的工艺过程及对应修复过程中的污染综合防控技术。

部分稀有色金属冶炼场地伴有放射性元素，本文件不适用于场地放射性污染修复的防控，放射性污染修复综合防控应按照国家辐射污染控制的有关规定执行。

1.3.2 主要内容

本文件包括前言、引言、范围、规范性引用文件、术语和定义、场地分类及修复过程污染产生、污染防控、污染治理可行技术、环境监测和环境管理措施，相关附录（有色金属冶炼场地类别、分级修复技术清单、污染扩散阻控技术、稳定化/淋洗修复综合防控体系图等）。

（1）场地分类：针对有色金属矿物种类和冶炼工艺不同分为轻有色金属冶炼、重有色金属冶炼、稀有金属冶炼制造三类；重度污染风险场地、中度污染风险场地和轻度污染风险场地三级。明确各类场地对应可选择的修复模式、修复技术和修复过程污染防控技术。

（2）稳定化/淋洗修复过程产污节点和污染预防：针对有色金属冶炼场地修复常用技术，提出了稳定化、淋洗分离修复技术典型工艺流程及排污节点。其中包括原位/异位稳定化、淋洗修复及污染阻隔的典型工艺技术，分列其修复全过程的排污节点和污染预防控制措施。

（3）稳定化/淋洗修复过程污染治理可行技术：主要针对土壤预处理、原位/异位稳定化和淋洗分离修复工程、阻隔工程施工的粉尘、废气、废水、噪声污染治理技术工艺和控制指标。

（4）稳定化/淋洗修复过程环境监控：污染监测和管理控制措施，包括监测项目、频率和制度。

本文件附录等相关的其他内容。

1.4 编制过程

全国有色金属标准化技术委员会重金属分委会于2020年10月17日~18日在南昌市组织召开了“指南”编制的任务落实会暨编制组第一次工作会议，参加会议的有全国有色金属标准化技术委员会重金属分委会、中国瑞林工程技术股份有限公司、矿冶科技集团有限公司、永清环保股份有限公司的代表和相关人员。会议形成了纪要，明确了本指南的主要内容大纲和编制组成员、工作分工、编制工作进度等。

会后编制组对本文件的内容进行了细化分工，明确了工作成果提交时间。

2020年11月20日各成员提交了完成“指南”（征求意见稿）初稿， 2020年12月23日牵头单位在湖南长沙浏阳开发区永清环保公司组织编制组成员和特邀专家（名单附后）召开了编制组第二次工作会议暨“指南”（征求意见稿）讨论会，基本通过并确定了“指南”（征求意见稿）及修改建议（会议纪要见附件）， 2020年12月23日~29日，编制组进一步完善了“指南”征求意见稿，2020年12月31日编制组完成了征求意见稿及编制说明，报送全国有色金属标准化技术委员会重金属分委会挂网征求全国相关部门、单位和个人意见，同时书面征求有色金属行业重点企业、重点地区政府主管部门意见。

2 标准编制的必要性

2005年4月至2013年12月，我国开展了首次全国土壤污染状况调查。全国土壤环境状况总体不容乐观，部分地区土壤污染较重，耕地土壤环境质量堪忧，工矿企业的废弃地土壤环境问题突出，特别是有色金属冶炼、化学工业、矿山企业工业场地及周边土壤污染比较特出。工矿业、农业等人为活动以及土壤环境背景值高是造成土壤污染或超标的主要原因。全国土壤总的超标率为16.1%，其中轻微、轻度、中度和重度污染点位比例分别为11.2%、2.3%、1.5%和1.1%。污染类型以无机型为主，有

机型次之，复合型污染比重较小，无机污染物超标点位数占全部超标点位的82.8%。从污染分布情况看，南方土壤污染重于北方；长江三角洲、珠江三角洲、东北老工业基地等部分区域土壤污染问题较为突出，西南、中南地区土壤重金属超标范围较大；镉、汞、砷、铅4种无机污染物含量分布呈现从西北到东南、从东北到西南方向逐渐升高的态势。重点污染场地：在调查的690家重污染企业用地及周边的5846个土壤点位中，超标点位占36.3%，主要涉及黑色金属、有色金属、皮革制品、造纸、石油煤炭、化工医药、化纤橡塑、矿物制品、金属制品、电力等行业。在调查的81块工业废弃地的775个土壤点位中，超标点位占34.9%，主要污染物为锌、汞、铅、铬、砷和多环芳烃，主要涉及化工业、矿业、冶金业等行业。在调查的146家工业园区的2523个土壤点位中，超标点位占29.4%。其中，金属冶炼类工业园区及其周边土壤主要污染物为镉、铅、铜、砷和锌，化工类园区及周边土壤的主要污染物为多环芳烃。

由于冶炼场地重金属污染体系呈现土壤 - 地下水系统在构成上的特殊性和污染物迁移转化的途径多样性，使得冶炼场地系统的污染与其他环境体系的污染相比有很大的不同。

1）隐蔽性和滞后性。

冶炼场地污染物往往要通过对土壤样品化验和依附生物的残留检测，其污染后果仅能通过附近相关与无关的土壤和地下水水质、动物和人类健康长期对应比照。因此，从产生污染到出现问题通常会滞后很长时间，往往要通过对土壤和生物样品进行分析化验检测，甚至通过研究对人畜健康状况的影响后才能确定。

2）积累性和不可逆性。

污染物在土壤介质中不容易迁移、扩散和稀释，因此容易在污染场地中不断积累而超标、污染。重金属对土壤的污染基本上是一个不可逆过程。

3）危害的严重性和难治理性。

由于场地土壤与地表附着物、降水、地下水等自然因素及周边社会关系的限制，污染场地在治理方面存在很多未知的难题，治理成本高。

4）场地污染缺乏统一的处理技术。

根据《中华人民共和国土壤污染防治法》、《工矿用地土壤环境管理办法（试行）》的规定和要求，有色金属冶炼被列为土壤环境污染重点监管行业之一。企业生产需要“实施风险管控、修复活动中产生的废水、废气和固体废物，应当按照规定进行处理、处置，并达到相关环境保护标准”。“风险管控、修复活动完成后，

需要实施后期管理的，土壤污染责任人应当按照要求实施后期管理”。

目前，土壤重金属污染工程治理技术主要有：

①原位修复技术：适用于轻度或污染较深的场地土壤修复工程技术，；原位淋洗技术—通过注入淋洗水再把其抽取脱出重金属后就地循环淋洗，必要时用特定溶剂注入土壤中洗脱出重金属污染物。此外原位修复还有采用生物修复—利用微生物、植物和动物将土壤、地下水中的危险污染物降解、吸收或者富集的生物工程技术系统或电动修复技术—通过在包含污染土壤的电解池两侧施加直流电压形成电池梯度，土壤中的污染物质通过电转移、电渗流或电泳的途径被带到位于电解池两级处理室中并通过进一步处理从而实现污染土壤样品的减污。

②异位修复技术：适用于中、重度或污染土层较浅的土壤治理工程技术，如快速修复稳定化—通过机械、人工等手段，使污染土壤离开原位置（与其他低含量土拌合稀释）、处理（稳定化、化学法或电动法等去除重金属），或者利用（直接作为配料或者生产建筑材料）、处置（安全填埋或外运安全处置），同时修复合格的土壤或客土回填至原污染土壤清挖基坑；化学或生物淋洗—该技术适用于水利传导系数大于10^{-3} cm/s的土壤，先挖出受污染土壤，用特定溶剂注入土壤中洗脱出污染物，再将含污染物的废水进行处理，淋洗达标的土壤回填至原基坑或再利用处置；热处理—通过加热方式，将一些具有挥发性的重金属如汞、砷等从土壤中解吸出来，或者进行热固定等；固化/稳定化—物理上隔离污染物或将污染物转化成化学性质不活泼态，需要在土壤中加入化学试剂或化学材料，处理达标的土壤可运至填埋场安全填埋，或作为建筑材料的生产原料。

③ 调整土地使用规划和用途：在场地利用环境风险可控的条件下，因地制宜变更土地使用方式或用途，减少治理工程投资和人力、物力的浪费。

上述修复技术是目前国内外广泛采用的场地修复技术，而且基本成熟可靠。

但是如何在工程应用中快速选择最具优势的技术或技术组合，目前仍然众说纷纭，没有统一的方法或标准，**特别是修复过程中污染预防、治理和扩散控制没有得到普遍重视。**

重金属冶炼场地的土壤重金属污染治理目前仍然存在一些问题，主要有：

1）目前我国在土壤治理与修复的舆论方面过热，但缺少治理资金来源或者资金不足，工程实践经验积累和技术储备少，**场地修复技术及修复过程的污染控制缺乏行业规范**；

2）大多数土壤治理工程项目责任方和受害方（土地使用方或治理监管方）利益不能达成一致，前期调研不充分，**治理目标不明确或者不切实际，造成治理边界和工程数量不明确，修复治理效果大打折扣**，影响项目实施整体质量；

3）**修复药剂长效性不明确**，总体价格偏高，造成修复成本居高不下，二次污染风险不可控制；

4）实施内容与治理目标关联性差，**场地修复示范工程推广性、可复制性差**，缺少高效多功能的集成装备，设备的国产化程度很低；

5）**技术路线和现场实际结合不够**（缺少验证），治理工程的技术可行性和经济合理性没有进行充分论证，造成工程浪费或者难以达到预定效果；

6）**缺少施工过程检验指标、监督体系和后评估指标体系**，难以保障质量和效果。

根据《中华人民共和国土壤污染防治法》、《工矿用地土壤环境管理办法（试行）》的规定和要求，有色金属冶炼被列为土壤环境污染重点监管行业之一。企业生产需要“实施风险管控、修复活动中产生的废水、废气和固体废物，应当按照规定进行处理、处置，并达到相关环境保护标准”。“风险管控、修复活动完成后，需要实施后期管理的，土壤污染责任人应当按照要求实施后期管理”。

从上述土壤污染调查情况看，作为被列为我国重金属污染重点监管的有色金属行业，有色金属冶炼场地的污染问题亟需引起重视，目前国家还没有专门针对有色冶炼行业场地污染防控治理以及场地安全再开发利用的技术体系、行业规范和行业标准等一系列行业指导性纲领技术文件。因此，开展有色金属冶炼场地污染修复技术开发和安全再利用技术标准的研究和制订，对场地污染调查和修复综合防控，以及修复后污染场地的安全再开发等，提高有色冶炼污染场地治理的有效性和长久性，促进有色金属冶炼可持续发展和生态文明建设，具有紧迫的必需性。

因此，制订《有色金属冶炼污染场地的修复综合防控技术指南》，是有色金属冶炼污染场地修复及其污染防控技术标准体系重要组成部分，可为有色金属冶炼污染场地修复过程的污染防控提供技术支撑。

3 场地修复技术和污染防控状况

3.1 有色金属冶炼场地污染地块修复技术状况

土壤修复技术在发达国家已有几十年历史，英国作为工业革命的发源地，从20世纪中期就开始制定污染控制和管理的法规，并展开土壤改良和修复研究。作为最早提出利用超富集植物清除土壤重金属污染的国家之一，目前英国开发出多种耐重金属污染的草本植物用于土壤修复，并已经通过材料库的形式逐步开始商业化进程。在日本，土壤修复也是现代农业的重要组成部分，1970年版本的《农用地土壤污染防治法》就已将铜、镉等金属指定为特定有害物质。美国的《土壤保护法》颁布于1930年，《棕色地块法》颁布于1990年，对工厂搬迁后遗留的受污染土地的治理进行了规范。现有技术关于土壤重金属污染物的研究，国外始于20世纪60~70年代，欧美二次工业革命后，随着工业化和城市化发展的步伐，粗放的环境安全管理模式、无序的工业废水排放或泄漏及矿渣的堆放，对各国土壤造成严重污染。在土壤修复产业发展初期，世界各国纷纷通过立法等手段，防治土壤污染。

a.美国： 1980 年 12 月，美国颁布《综合环境反应、赔偿与责任法》（又称《超级基金法》），填补了美国土壤污染防治的法律空白，同时创设了“超级基金”，首次用联邦资金保障在无法确定责任主体或责任主体无力承担污染场地治理费用时的土壤污染治理。

b.加拿大：加拿大联邦层面设立了加拿大环境部长理事会，制定统一的技术指南，各省和地区负责制定各自的通用标准和基于场地的修复指南； 1989 年，建立了“国家污染场地修复计划”，包含土壤和水体环境质量标准指南。 2005 年，建立了“联邦污染场地行动计划”。

c.荷兰： 1987 年荷兰《土壤保护法》生效，是欧盟成员国中最先制定土壤保护专门立法的国家，明确历史性污染和新污染分别对待； 2008 年《土壤质量法令》生效，建立了新的土壤质量标准框架。

d.日本： 1970 年，制定了《农用地土壤污染防治法》； 2002 年，制定了用于管理城市工业场地土壤污染的《土壤污染对策法》； 2009 年，对《土壤污染对策法》进行了修订。

随土壤修复立法，拉动了土壤修复产业发展，从目前世界土壤修复产业发展阶段看，美国、加拿大、西欧、日本等发达国家已经进入成熟期，中东欧处于成长期，印度、中东、非洲以及东盟国家正处于孕育起步期。

我国在1983年对主要类型的土壤环境容量做过初步研究，提出研究土壤重金属的生态效应、临界含量地带性分异规律和分区等。目前，重金属污染土壤修复技术

的基本原理主要有固化作用和活化作用，围绕这两个方面，已相应提出了物理、化学和生物修复技术。目前国内外应用于实际治理工程并得到推广的有色金属冶炼污染场地修复技术主要包括异位快速修复技术、水泥窑协同处置利用技术、原位修复技术。其中异位修复技术主要包括固化/稳定化技术、化学氧化/还原技术、污染物洗脱技术、热脱附技术等；原位修复技术主要包括原位固定/稳定化填埋技术、原位化学氧化/还原技术、植物修复技术、阻隔技术、电动修复技术、微生物淋滤技术等。具体技术原理说明如下：

3.1.1异位修复技术

1）异位稳定化修复技术

原理：向污染土壤中添加稳定化剂，经充分混合，使其与污染介质、污染物发生物理、化学作用，将污染土壤固封为结构完整的具有低渗透性的固化体，或将污染物转化为成化学性质不活泼态，降低污染物在环境中的迁移和扩散。

化学稳定化处理主要通过在土壤中施加改性药剂，经氧化还原反应、矿化作用和沉淀反应，将不稳定重金属形态转化为化学性质稳定、迁移性弱、无害或毒性较低的重金属单质或化合物，将其稳定在自然环境中，不再被雨水浸出和植物根系所吸收。

修复工程技术路线和施工流程主要包括污染土壤挖掘、土壤预处理（含水量控制、粒径控制和pH值调节）、粉状或液体药剂添加、与污染土壤均匀搅拌处理、养护反应、场内阻隔回填或外运安全处置或资源化利用、场地验收等环节。

根据污染物不同类型及其污染程度需要添加不同剂量、不同种类的稳定剂；场地施工条件、药剂添加配比和剂量、土壤污染深度、挖掘难易程度、短驳距离长短等都会影响修复成本。据美国EPA 数据显示，对于小型场地(1000 立方码〔cy〕，约合765 m^3)处理成本约为160-245 美元/ m^3，对于大型场地(50000cy，约合38228 m^3)处理成本约为90-190 美元/ m^3；国内一般为500-1500 元/m^3。

2）异位化学氧化/还原技术

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

化学还原可处理重金属类（如六价铬等）、化学氧化处理三价砷，异位化学还

原或氧化不适用于1万吨以上重金属污染土壤的修复。

3）异位土壤淋洗修复技术

原理：污染物主要集中分布于较小的土壤颗粒上，异位土壤淋洗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。通过洗脱处理，可以有效地减少污染土壤的处理量，实现减量化。

不宜用于土壤细粒（粘/粉粒）含量高于25%的土壤。

4）异位热脱附技术

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

适用于处理汞污染土壤。

5）水泥窑协同处理利用技术

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、固化处理土壤中污染物。

不宜用于汞、砷、铅等易挥发的重金属污染较重的土壤。

上述4）、5）技术不属于本文件范围。

3.1.2 原位修复技术

原位修复技术指对未挖掘的土壤进行治理的过程，对土壤没有太大扰动。其优点是比较经济有效，就地对污染物进行降解和减毒。无需建设昂贵的修复场所基础设施和清挖运输工程，操作维护较简单。此外，原位修复技术可以对深层次土壤污染进行修复。缺点是控制处理过程中产生的“三废”比较困难。

1）原位固定/稳定化技术

原理：通过一定的机械力在原位向土壤介质中添加固化剂/稳定剂，在充分混合的基础上，使其与污染介质、污染物发生物理、化学作用，将污染土壤固封为结构完整的具有低渗透系数的固化体，或将污染物转化为化学性质不活泼形态，降低污染物在环境中的迁移和扩散。

常用的还原剂一般为低毒、无二次污染，包括连二亚硫酸钠、亚硫酸氢钠、硫酸亚铁、多硫化钙、二价铁、零价铁等。

2）原位快速化学氧化/还原技术

原理：通过向土壤或地下水的污染区域注入氧化剂或还原剂，通过氧化或还原作用，使土壤或地下水中的污染物转化为无毒或相对毒性较小的物质。常见的氧化剂包括高锰酸盐、过氧化氢、芬顿试剂、过硫酸盐和臭氧。常见的还原剂包括连二亚硫酸钠、亚硫酸氢钠、硫酸亚铁、多硫化钙、二价铁、零价铁等。化学还原可处理重金属类（如六价铬）。

3）土壤植物修复技术

原理：利用植物进行提取、根际滤除、挥发和固定等方式移除，转变和破坏土壤中的污染物质，使污染土壤恢复其正常功能。

植物修复是利用某些植物可以忍耐或超量吸收积累一种或多种化学元素的特性，利用植物及其根际微生物通过提取、根际滤除、挥发和固定等方式降解、转变或移除重金属等毒性污染物，将其转化为无毒物质。或利用植物在生长过程中对环境中的某些污染物的吸收、降解、过滤和固定等特性来净化重金属、农药等污染，使污染土壤恢复其正常功能。该处理方法适用于重金属（镉、铅、镍、铜、锌、钴、锰、铬、汞等）、砷化合物以及特定的有机污染物。

4）土壤阻隔填埋技术

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（或垂直墙）阻断场地内土壤中污染物迁移扩散的途径，使污染土壤和四周环境隔离，避免污染物和人体接触和随土壤水迁移进入对人体和周围环境。

该技术适用于处理防渗措施不完善、对周边环境污染不严重、且不增加新污染源的渣场等废弃场地污染修复。

5）电动力学修复技术

原理：通过电化学和电动力学的复合作用驱动污染物富集到电极区，再进行集中处理或分离的过程。即在污染土壤两侧插入电极，并加上低压直流电场，在低强度直流电的作用下，土壤中的污染物通过电迁移、电渗流和电泳作用向电极方向运动，到达电极附近的污染物则可以通过电镀、离子交换或收集回收等方法被去除。

以上固化、填埋、电动修复技术不属于本文件内容。

3.1.3 修复技术应用及发展

1）我国重金属污染场地修复技术应用情况

据相关资料统计，我国实施的重金属污染场地土壤修复技术应用情况见下图：

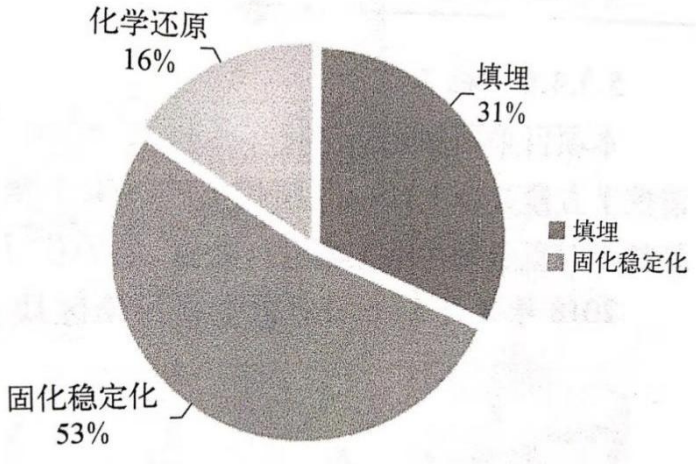


图3-1 我国重金属污染场地土壤修复技术应用情况

由图3-1可见，往年我国重金属类污染土壤以固化、稳定化及化学还原为主，占69%。由于污染土壤数量大，热脱附、水泥窑协同处理费用较高，目前占比较低。

2）修复技术发展

针对不同污染物及其分布，采用单一修复技术难以达到修复目标。近年来通过采用化学、物理、生物联合修复技术实现整个污染场地的经济有效修复。

其中微生物淋滤修复技术可利用自然界中某些微生物与土壤中重金属发生直接或间接作用，通过氧化、还原、络合等反应将土壤中重金属分离、提取出来的一种技术。

重金属在土壤中以不同形态存在，一般可分为交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机态、残渣态，其中前两种形态的重金属迁移能力较强且生物有效性较高，更易对动植物造成危害。微生物在淋滤过程中可通过代谢活动改变重金属形态，达到去除或转化的目的，主要包括酸解络合、氧化还原剂甲基化和去甲基化作用。微生物淋滤修复技术需要配套物理或电化学阻隔技术，防止淋滤液泄漏对地下水污染。

在条件许可的情况下，就近采用水泥窑协同处理利用污染土壤，不仅可以消除污染，还把污染土壤变为资源化。但水泥窑协同处理量受限，而且对汞、镉、铅、砷等污染不适宜。

因此，经济的土壤化学淋洗、生物修复是发展趋势。

3.1.4 国外场地修复技术

据美国数据统计，其 2002 年至 2005 年的污染场地土壤修复中，使用原位修复技术的占所有污染源修复项目的 60%，且这一比重呈现快速上升的趋势，这主要是因为原位修复技术不需要挖运土壤，修复成本相对较低。而在原位修复项目中，30%以上采用土壤气相抽提技术，多相萃取也逐渐获得更多的使用。

据欧洲环境署统计，欧洲原位和异位处理的比重大致相当。然而在实际施工中，欧洲的场地土壤污染是以原位生物处理技术应用最多。而由于欧洲各国具体土壤污染以及土壤质地不同等因素，各国所采用的具体土壤修复技术有所不同。

1）化学稳定化处理

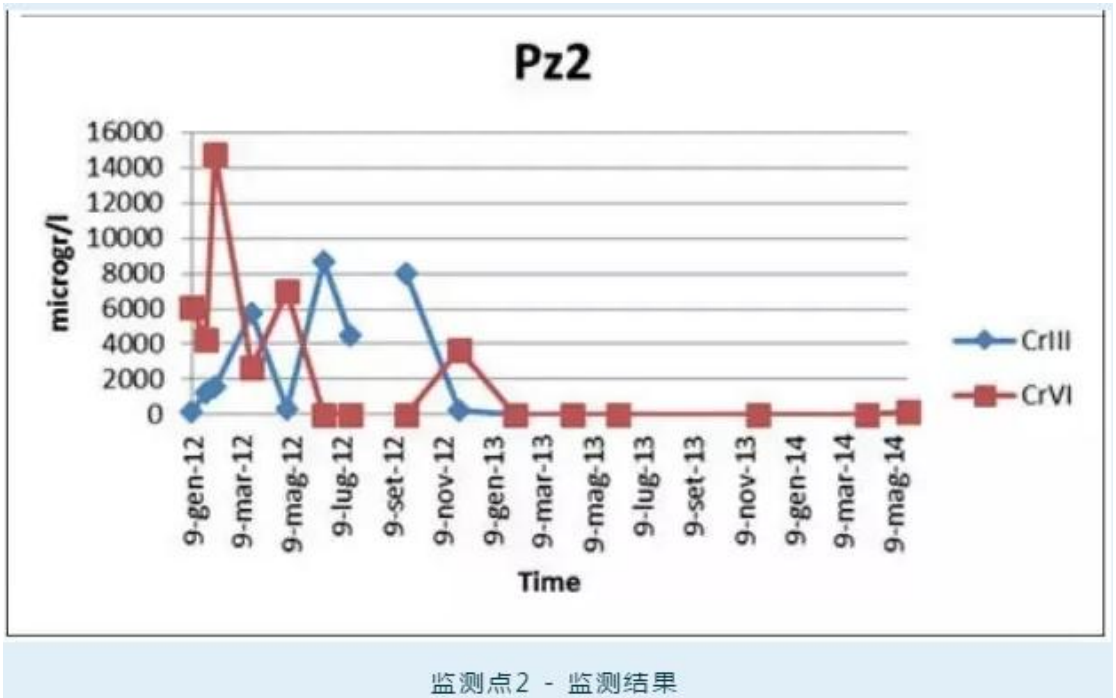
Regenesis公司的重金属修复化学药剂MRC通过原位固定（沉淀和/或吸附到土壤颗粒）从地下水中去除溶解的六价铬等重金属，MRC由有机硫化合物组成，该有机硫酯嵌入聚乳酸基质中，形成粘稠液体，该药剂被注入地下水层后，酯键通过水解和微生物酶促作用裂解，有机硫化合物（活性金属固定剂）以可控的方式逐渐释放，为有机硫化合物还原固定重金属创造了最佳条件。同时MRC在反应过程中还以类似的方式释放出乳酸，为土壤及地下水中天然存在的微生物提供碳源，从而能够达到加速生物原位降解氯代烃的速率。该药剂通常通过注入井、注射点直接推入、与土壤直接混合等方式进行施药。

应用案例：

某废弃电镀厂场地位于意大利北部某工业区，早期为印刷和防治工业生产用转子进行电镀。工业生产中使用的铬酸盐溶液在电镀过程中深入厂区土壤及表层地下水层。经进一步土壤取样检测结果显示，该厂区饱和带中六价铬含量最高达700mg/kg，总铬达770mg/kg。为了高效、经济地治理该场地土壤和地下水中的铬污染，当地组织决定采用MRC对该场地进行修复。该场地地质为泥质砾石与粘土混合地质，总处理面积约1000m^2，深度为10m。Regenesis在修复区域内安装了两组注入井屏障，每一屏障中分别安装5个嵌套式注入井，嵌套式注入井以约4m的间隔安装，每口井由3个立管组成。这三个立管分别为钱管（8~13m）、中管（14~19m）和深管（20~25m），用于应对不同地下水位情况。安装完成后，Regenesis对注射井内的淤泥进行了清理。在随后的的药剂注射过程中，由于注射时地下水位约在地表下15m处，最终采取了中管和深管进行注射。

图3-2 淋洗修复淋洗液注入井照片

处理效果：药剂注入后约60天左右，监测结果显示六价铬浓度降至检测浓度（5ug/L）以下，同时三价铬浓度增加，说明六价铬被有效还原。药剂注入后约13个月左右，地下水中六价铬浓度降低了59%至99%，而三价铬浓度随着沉淀作用愈加明显由最初的增加趋势逐渐转为不断减少。污染物浓度监测结果如下：



监测点2 - 监测结果

图3-3 淋洗效果实测数据变化图

2）重金属植物修复技术

Delta Remediation公司总部位于加拿大阿尔伯塔声埃德蒙顿市，是一家专门从事土壤和水中有毒有机污染物、氯化物和重金属污染修复的生物技术公司，

Delta与加拿大西蒙弗雷泽大学（SFU）深入合作的植物修复技术PhytoLogix，可为客户提供特定植物品种来富集并去除重金属污染。Phytologix是一种生态友好、经济有效的重金属污染土壤修复技术，该技术通过非侵入性植物来固定和去除土壤和地下水中的重金属，不需要额外的化学物质，也不需要去除和掩埋受污染的土壤，被广泛应用于采矿和其他工业污染场地的修复，技术易于实施和维护。

应用案例：新泽西州特伦顿（Trenton）某受铅污染地区有40%的地块铅浓度超过400mg/kg，7%的地块铅浓度超过1000mg/kg。Delta采用芸苔属植物对该地区铅污染土壤进行修复，经过三次芸苔属植物收获后，整个地区铅浓度大幅度下降，完全消除了浓度超过1000mg/kg的情况，400mg/kg以上铅浓度的地块比例由40%降低到了28%，该地种植的芸苔属植物吸收并在其组织中积累了0.3%的铅金属。从深至18英寸的土壤中去除了约20~30ppm的铅金属。

3）重金属污染土壤淋洗系统

ART Engineering LLC（ART）是一家专门从事土壤淋洗等土壤修复的技术公司。ART的核心团队在采矿和矿物加工场地污染修复方面拥有25年以上的项目实施经验。ART使用的土壤冲淋洗涤系统是基于最初在矿物加工和采矿工业中发展起来的标准物

理和化学分离过程。这类技术已广泛应用于由重金属、有机污染物和放射性污染物所造成的土壤污染修复。ART的土壤淋洗系统包括（但不限于）多种技术组合：土壤分离、密度分离（金属去除）、洗涤、浮选和表面活性剂清洗。在某些情况下，可以使用酸、碱和络合剂，通过化学萃取的方式去除土壤中的污染物。ART的土壤淋洗法最适用于含25%以下细粒（小于400目或38微米）的土壤和沉积物，可有效去除铅、汞、砷、铬、铜、镍、镉等重金属剂有机污染物。

应用案例

隶属于King of Prussia（KOP）技术公司的修复场地位于美国新泽西州温斯洛镇。该基地位于皮涅兰国家保护区内，占地约10英亩。毗邻新泽西州温斯洛野生动物保护区。KOP公司于1970年购买了这块土地，用于经营一个工业金属废物回收中心。随后该回收中心被废弃，由于场地土壤沉积了大量的重金属污染物，该场地在1985年被列入美国超级基金优先项目清单。1990年，政府决定对该场地进行修复，并在修复要求中指定采用土壤淋洗技术。ART在1991年对该场地进行了可行性研究，确定土壤淋洗对该场地的适用性。针对该项目，ART设计并制造了一台处理能力为25吨/小时的土壤淋洗装置。ART将该装置在现场进行安装后，先以1000吨污染土壤进行了试运行。试验运行获得了成功，处理后的土壤中的污染物浓度远低于修复要求中规定的数值。

表3-1　KOP公司工业金属废物回收中心地块淋洗修复效果

污染物	处理前土壤中污染物浓度mg/kg	平均浓度mg/kg	
		修复标准	处理后污染物浓度
镍	300-3500	1935	25
铬	500-5500	483	73
铜	800-8500	3571	110

3.2有色金属冶炼场地修复过程污染防控技术状况

3.2.1 各类修复模式的污染防控

修复模式需要结合环境条件选择，修复方案中选择适用的修复模式，主要是预防修复过程的扬尘、气（酸气、恶臭）、污水的污染。

目前选择场地修复模式一般是基于下列修复过程的二次污染防控：

从土壤污染（包括粉尘、挥发性有害气体和淋溶水）的扩散和影响范围考虑，原位修复优于异位修复，在环境条件许可的情况下，尽可能选用原位修复模式。

从对周边环境影响时间角度，快速稳定化或淋溶、隔离修复模式，更容易得到支持，修复过程与周边矛盾和环境风险相对较小。

中污染风险以上场地或地下水资源敏感区，原位修复时需要采取阻隔等防止污染地下水的措施，并在土壤修复的同时适度进行地下水修复。

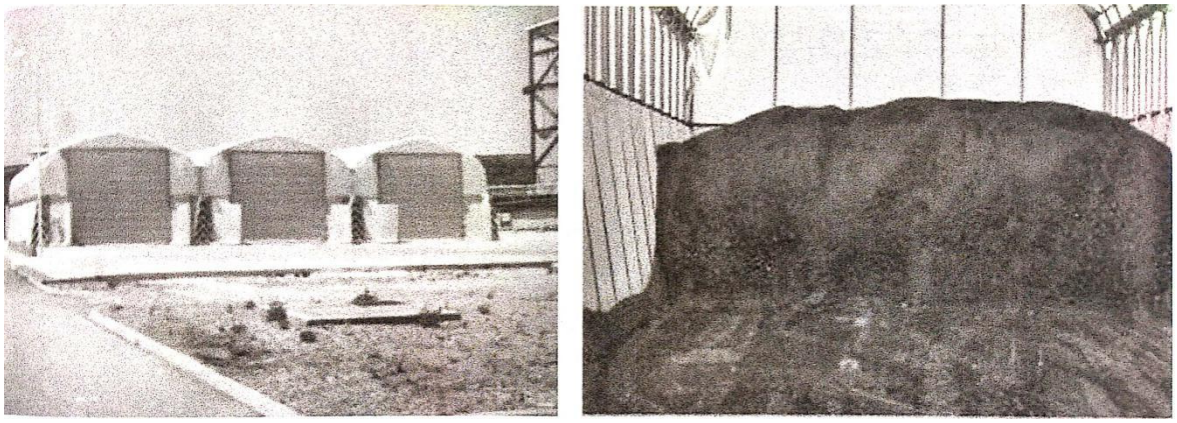
除了淋洗修复、异地稳定化修复之外，其余原位稳定化、植物改良修复，均需要实行污染跟踪监控措施。

场地修复过程的固体废物，一般按类进行综合利用或者无害化处置。

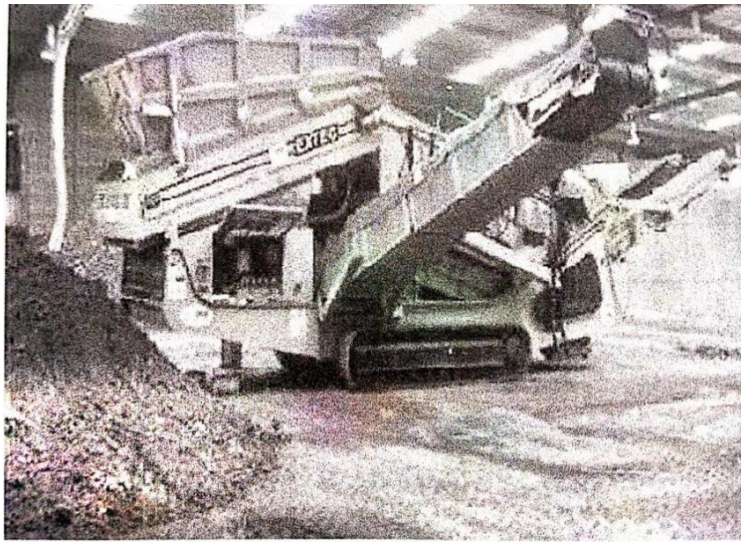
3.2.2 修复工艺的污染防控

3.2.2.1 土壤预处理工艺的污染防控

一般采用修复大棚、封闭式抽风净化粉尘、挥发性有害物控制，也防止雨淋使污染物扩散。常用修复大棚见下图：



常用土壤修复大棚



土壤破碎、筛分一体机

图3-4　土壤预处理大棚及设备

3.2.2.2 稳定化处理工艺的污染防控

稳定化处理一般采用混合反应设备，使稳定剂与土壤中污染物反应生成难溶解、低毒性物质。在设备中反应可以保证药剂合理利用，不会过量，同时不会外泄产生污染。

图3-5　土壤稳定化设备系统

3.2.2.3 淋洗处理工艺的污染防控

淋洗修复一般在有淋洗液收集、循环的设备、场地中进行，防止淋洗液流失污染，同时防止雨水进入淋洗液系统，保持其不被稀释浪费。

淋洗液一般需要配备处理回用系统，减少污染物排放。

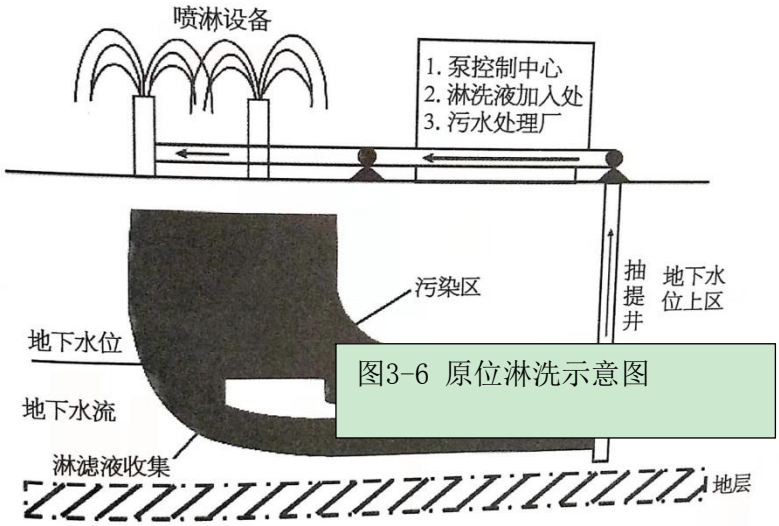


图3-6 原位淋洗示意图

图 7－4　原位化学淋洗技术

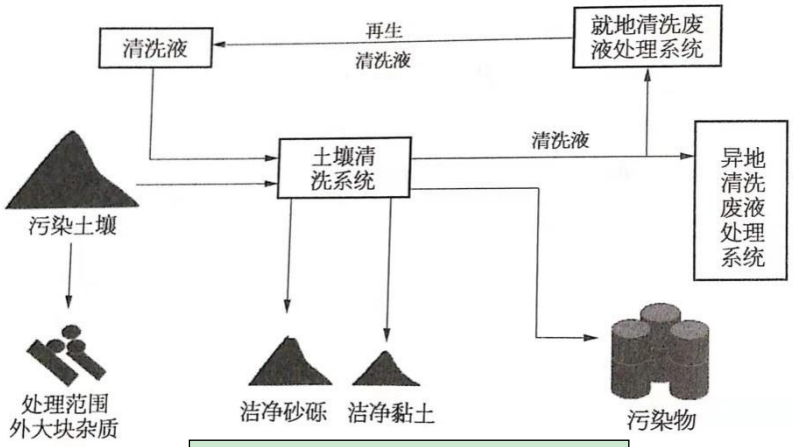


图3-7 异位淋洗工艺示意图

化学淋洗技术有多种实现途径，包括原位修复、异位修复，其中原位修复较异位修复实际操作性强，成本低，但难以控制。化学淋洗技术可以去除土壤中大量的重金属污染物，有着广泛的应用前景。在化学淋洗修复实践中，应综合土壤质地特征、污染物类型、污染程度及污染物在土壤中的分布规律等因素选择适宜

的淋洗剂及修复方式。美国应用淋洗法成功地治理了8种重金属污染物的土壤。在日本神通川地区的农业工程技术应用当中，这种方法修复重金属比较彻底。我国关于土壤淋洗修复尚处于实验室研究阶段，而可规模化应用的土壤淋洗技术及成套设备研制相对落后，有待进一步的提高和完善。

卫泽斌等研究了化学淋洗和深层土壤固定联合技术修复重金属污染土壤，利用化学淋洗污染土壤并在深层土壤添加固定剂进行盆栽试验。采用混合剂（MC）对取自广东省乐昌市某铅锌矿废水污染的水稻田土壤（每盆5kg）进行缓慢淋洗，收集淋出液并混合，记为淋出液I。40d后用蒸馏水对污染土壤继续进行淋洗，收集淋出液并混合，记为淋出液II。将两种淋出液经过不同固定剂处理深层土壤（5kg下层土壤和不同的固定剂）且收集水样。下层土壤取自华南农业大学校园20cm以下的酸性赤红壤，与乐昌污染污染稻田底土性质类似，土壤置于塑料盆中，底部有孔可供水流出。

固定剂设置4个处理：①对照，不加固定剂；②CaO,加入7.5gCaO；③$FeCl_3$,加入1LpH=8的0.55mg/L的$FeCl_3$；④$FeCl_3$+CaO,加入7.5gCaO和1LpH=8的0.55mg/L的$FeCl_3$,每个处理3次重复。结果如表3-2所列。

表3-2　不同固定剂处理的深层土壤对表层土壤第一次淋出液的固定效果

项目	COD	Zn	Cd	Pb
表层淋出液/（mg/L）	*2093*	10.02	0.0147	25.*20*
深层固定后/（mg/L）				
CK（无固定剂）	578±99c	1.946±0.435b	0.0056±0.0008b	8.000±1.*673b*
CaO	1475±50a	4.516±0.095a	0.0098±0.0002a	*18.14±0.7314a*
$FeCl_3$（碱性）	218±26b	0.3012±0.1232c	0.0025±0.0003c	5.*522±0.570b*
$FeCl_3$（碱性）+ CaO	1672±49b	4.515±0.200a	0.0101± 0.0006a	*18.21 ±0.25a*
深层固定去除率/%				
CK（无固定剂）	71.61	80.58	62.13	*68.26*
CaO	28.*53*	54.92	33.56	*26.*96
$FcCl_3$（碱性）	89.28	96.99	82.99	78.09
$FeCl_3$（碱性）+ CaO	18.00	54.94	31.29	27.75

备注：不同小写字母代表多重比较重大差异显著性，带不同小写字母的平均值间在P＜0.05水平有显著差异；去除率（%）=（固定前重金属浓度-固定后重金属浓度）/固定前重金属浓度

*100%。

经过不同固定剂处理的深层土壤后，COD和重金属含量都明显降低。淋出液I经过碱性$FeCl_3$处理的深层土壤后，淋出液污染物浓度为最低，其中Zn、Cd浓度低于地下水质量HI类标准。CaO和$FeCl_3$（碱性）+CaO处理的去除率相当，均明显低于无固定剂处理的深层土壤。见表3-3。

表3-3　不同固定剂处理的深层土壤对表层土壤蒸馏水淋出液II的固定效果

项目	Zn	Cd	Pb
表层淋出液/（mg/L）	0.4731	0.0025	0.0356
深层固定后/（ mg/L）			
CK（无固定剂）	0.2681±0.0457ab	0.0019±0.0002ab	0.2375±0.0551ab
CaO	0.2850±0.0337a	0.0024 ±0.0001a	0.5717±0.1345a
$FeCl_3$（碱性）	0.1837±0.0187bc	0.0015±0.0003b	0.0267±0.0089b
$FeCl_3$（碱性）+CaO	0.1014±0.0049c	0.0015±0.0002b	0.2315±0.0502ab

注：表中带不同小写字母的平均值间在 P＜0.05 水平有显著差异。

第一次淋洗试验 40d 后用蒸馏水水淋洗污染土壤，可作为模拟降雨，水的下渗会对下层土壤固定的重金属产生淋洗作用，检验其固定作用的稳定性。结果表明，经不同固定剂处理的深层土壤，淋出液 Zn、Cd 浓度都低于固定前，且均低于地下水质量 III 类标准。但 Pb 只有经碱性 $FeCl_3$处理后的深层土壤低于固定前，低于地下水质量 III 类标准，其余的处理都高于固定前，可能是固定的 Pb 又被解吸出来。

用混合试剂对耕作层污染土壤进行淋洗，降低耕作层土壤重金属；淋出的重金属可以被固定剂处理的深层土壤固定，固定的重金属很少被后期的降水等再淋洗出来能控制对地下水污染风险，实现重金属污染土壤的修复和安全利用。

化学淋洗技术的优势和应用限制见表 3-4。

表 3-4　　化学淋洗技术的优势和应用限制

技术	优势	应用限制
原位化学淋洗技术	操作简便、成本低、处理量大、见效快等优点，适用于大面积、重度污染场地的治理	存在二次污染风险
	适用于多孔隙、易渗透土壤，特别适用于轻质土和砂质土	对渗透系数很低的土壤效果不好
	适合金属、具有低辛醇/水分配系数的有机化合物、羟基类化合物、低分子量醇类和羟基酸类等污染物	不适用于非水溶性液态污染物，如强烈吸 附于土的呋喃类化合物、极易挥发的有机物以及石棉等
异位化学淋洗	适用于各种类型污染物的治理，如重金属、放	不适用于强吸附性、极易挥发

技术	射性元素，以及许多有机物，包括TPH、易挥发有机物、PCBs以及PAHs等	的物质
	适用于污染物集中于大粒级土颗粒上的情况，沙砾、砂和细砂以及相似土壤组成中的污染物更容易处理	含有25%~30%黏粒的污染土不建议采用这项技术
	既有灵活方便、淋洗技术的装备通常是可运输的，可随时随地搭建、拆卸、改装的，有利于技术推广	产生的废液处理难度大

3.2.2.4 阻隔工艺污染防控

阻隔工艺一般采用水平覆盖和垂直防渗墙隔离工艺，多应用于现有生产场地和废弃渣场封场修复。在阻隔过程一般采用喷雾、洒水、抽水处理等方式分别防控粉尘、径流和地下水污染。

3.2.3 修复材料防控

合适的修复材料不仅能够保证达到修复目标，还可以避免二次污染，减小环境风险。

3.2.3.1稳定剂污染风险防控

土壤重金属稳定剂一般选用调整土壤酸碱度、能够与重金属反应生成难溶物质的氧化钙、氧化镁、磷酸盐、硫化物、腐殖酸；或者可改变重金属价态毒性的还原物质如纳米铁粉可把六价铬还原为低毒的三价铬，或氧化剂如双氧水可把高毒的三价砷氧化为低毒的五价等，对环境的二次污染风险小。

表3-5　零价铁稳定剂适用的污染物去除

类型	污染物
甲烷氯代物	CCl_4、氯仿($CHCl_3$)、CH_2Cl_2、CH_3Cl
氯代苯	C_6CL_6、五氯苯(C_6HCl_5)、四氯苯($C_6H_2Cl_4$)、三氯苯($C_6H_3Cl_3$)、二氯苯($C_6H_4Cl_2$)、C_6H_5Cl
其他氯代芳烃	PCB_5、Dioxin、C_6HCl_5O
三卤甲烷	三溴甲烷、一溴二氯甲烷
氯代乙烯	C_2C1_4、C_2HCl_3、C_2C1_4、C_2H_3C1
其他有机污染物	N-二甲基亚硝胺($C_2H_6N_2O$)、TNT、杀虫剂、DDT、林丹
有机染料	酸性橙、酸性红、金莲橙
重金属	Hg、Ni、Ag、Cd

无机阴离子	重铬酸盐、MnO_4^-、NO_3^-
Fe^{2+}、Fe、硫化物、硫化硫酸钠、硼氢化钠	TCE、硝基芳香化合物、硝氮、重金属、PAH_S等
NO_2^-、铁锰催化剂	石油烃、酚、醇、酮、羧酸、氨基化合物、酯、醛、氯苯、二氯甲烷、氯乙烯等
淀粉、蔗糖、甲醇等污染物	脂肪炷和芳香类有机化合物、硝氮、硝基芳香化合物、醚、含氮磷化物等
碱性物资、PO_4^{3--}、铁锰化合物物料、层状硅酸盐矿物和有机质等	Cr、Cd、Hg、As、Pb、Cu、Ni及混合重金属

3.2.3.2 淋洗液污染风险防控

用于土壤修复的淋洗液需要易溶于水、酸等物质，原位淋洗液可在自然条件下能够衰减，比如盐酸、硫酸等。

淋洗剂是包含化学冲洗助剂的溶液，具有增溶、乳化效果，或改变污染物的化学性质。提高污染土中污染物的溶解性和在液相中的可迁移性，是实施该技术的关键。到目前为止.化学淋洗技术主要围绕着用表面活性剂处理有机污染，用螯合剂或酸处理重金属污染。

常用的淋洗剂有：

1）无机淋洗剂

酸、碱、盐等无机化合物相对其他淋洗剂具有成本较低，效果好，作用速度快等优点。其作用机制主要是通过酸解、络合或离子交换作用来破坏土与重金属形成的络合物，从而 将重金属交换解吸下来，进而从土中溶出。

酸淋洗剂一般对重金属的去除效果好,但其使用带来的负面影响也是相当严重。由于重金属的溶解主要受pH值影响，通常pH值小于3或4时，大部分重金属才以离子形态存在，但过高的酸度会严重地破坏土的理化性质及其结构。

2）螯合剂

常用的螯合剂大致可分为人工螯合剂和天然螯合剂两类，人工螯合剂包括：乙二胺四乙酸(EDTA)、羟乙基乙二胺三乙酸(HEDTA)、二乙基三乙酸(NTA)、乙二醇双四乙酸(EGTA)、乙二胺二乙酸(EDDHA)、环己烷二胺四乙酸(CDTA)等。天然有机螯台剂包括：柠檬酸($C_6H_8O_7$)、苹果酸($C_4H_6O_5$)、丙二酸($C_3H_4O_4$)、乙酸、组氨酸以及其他类型天然有机物质等。

螯合剂的作用机理是首先通过螯合作用,将吸附在土颗粒及胶体表而重金属离子解吸下来，然后利用自身的螯合作用和重金属离子形成强的螯合体从而分离出来。如EDTA等人工合成的有机螯合剂能在很宽的pH范围内与大部分金属，特别是过渡金属形成稳定的复合物，不仅能解吸被土吸附的金属,也能溶解不溶性的金属化合物,业已证明EDTA是有效的螯合提取剂。

3）表面活性剂

表面活性剂分为非离子型、阴离子、阳离子、非离子混合以及生物表面活性剂等类型。表面活性剂是用增加疏水性有机物的溶解度、生物可利用性、离子交换、吸附及配合等作用对污染环境进行修复。在重金属存在的情况下，表面活性剂本身在土中的吸附较弱。因此，表明活性剂已被用作去除重金属的助剂。

3.2.3.3 生物

土壤中微生物生长对重金属形态变化产生影响，部分微生物对某些重金属化学状态产生影响。

植物根、叶、果实对部分重金属有富集作用，或者抗拒作用，需要根据土壤、地下水污染物类别和修复目标，选择适用的植物种植。

表3-6　植物对重金属污染物的富集能力

金属	植物种类	超积累含量(mg/kg)	金属	植物种类	超积累含量(mg/kg)
Cd	天蓝遏蓝菜	1800	Mn	粗脉叶澳洲坚果	51800
Cu	高山甘薯	12300	Ni	九节属	47500
Co	星香草	10200	Zn	天蓝遏蓝菜	51600
Pb	圆叶遏蓝菜	8200			

3.2.3.4 阻隔材料

a)水平阻隔材料：

1)天然黏土：粘土塑性指数应＞10%，粒径应在0.075- 4.74mm之间，至少含有20%细粉，含砂砾量应＜10%，不应含有直径＞30mm的土粒。

2)人工合成材料：人工衬层材料应具有化学兼容性、耐久性、耐热性、高强度、低渗透率、易维护、无二次污染的材料。若采用高密度聚乙烯膜，其渗透系数必须≤1.0×10^{-12}cm/s。

3）钠基膨润土，膨润土是一种蒙脱石为主要矿物成分的粘土岩，渗透系数一般为10^{-9}cm/s级别。

钠基膨润土的技术要求见下表：

表3-7　天然钠基膨润土性能指标表

蒙脱石含量（%）	膨胀倍数（ml/g）	胶质价（ml/15g）	吸水率（%）	膨润（ml/2g）	比粘度
≥70	≥30	≥400	≥500-600	≥20	≥1.19±0.02

4)固定剂：CaO、$FeCl_3$等。

b)垂直阻隔墙

1）塑性墙：采用带有专用连接锁的高密度聚乙烯（HDPE）膜作为主防渗体，底部铺设膨润土垫（GCL），上部回填优质粘土。HDPE膜的渗透系数k≤10^{-13}cm/s。

垂直铺膜垂直防渗体的主要材料包括高密度聚乙烯（HDPE）土工膜、HDPE连接锁、钠基膨润土。

① HDPE土工膜

HDPE土工膜主要包括光面HDPE膜和糙面HDPE膜（单、双面），具体参数根据防渗系数、水文地质情况等场地条件进行设计。

HDPE土工膜必须选用TR400原生PE树脂材料制造而成。树脂含有约97.5%的聚乙烯，2.5%的碳黑和微量的抗氧化及热稳定剂，禁止使用其它添加剂、填料和膨胀剂。

② HDPE连接锁

本工程采用“互锁式”连接锁，其技术要求如下：

连接锁为HDPE材质，锁壁厚度≥4.75mm；

连接锁应采用“三腔”互锁方式，互锁后的高度约为31.75mm；

互锁后连接锁的抗拉强度≥4000kPa。

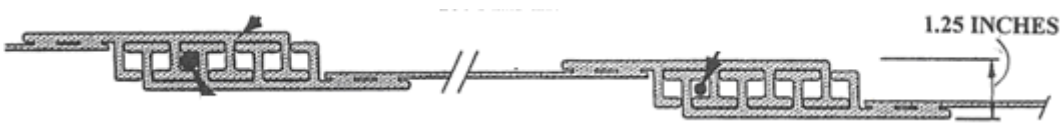


图3-8 “互锁式”连接锁示意图

③ 钠基膨润土：性能要求见表3-7。

c)刚性墙：

1)水泥土搅拌桩隔水屏障

水泥土搅拌桩隔水屏障，是以水泥系材料为固化剂，通过搅拌机械采用喷浆施工将固化剂和地基土强行搅拌，形成连续搭接的水泥土隔离墙。当采取挖除异位修复时，通过加厚水泥土隔离墙厚度形成重力式挡土墙，可对深度不大于5m的基坑提供安全防护。若在水泥土搅拌桩内插入型钢，则可形成SMW工法桩维护结构，作为深度大于5m的污染物清挖基坑的维护结构。

2)钢板桩隔水屏障

钢板桩是一种带企口或钳口的热轧(冷弯)型钢常用的有U形的拉森III.IV型钢板桩,靠企口或钳口相互连接咬合,形成连续的钢板桩围护结构，用来挡土或止水。当采取挖除异位修复方式时,还可根据情况与支撑体系联合，为基坑提供安全防护。

3)高压旋喷桩隔水屏障

高压旋喷桩隔水屏障是在静压灌浆的基础上,利用射流作用切割掺搅地层•改变原地 层的结构和组成，同时灌入水泥浆或复合浆形成凝结体，借以达到防渗的目的。

d)渗透墙

采用支护网格墙，内填活性炭、硅藻土等，国内还没有工程实践。多用于地下水修复见3.3.4相关说明。

3.3有色金属冶炼场地修复过程污染治理技术状况

3.3.1 冶炼污染场地修复过程污染物特征

有色金属冶炼及相关过程产生的有害物质进入土壤，致使某种有害成分的含量明显高于土壤原有含量，从而对生物、水体、空气和人体健康产生危害风险的现象。按照矿物特征：

轻有色金属冶炼场地修复过程污染特征主要为颗粒物、氟化物、酸碱物质、噪声等。

重有色金属冶炼场地修复过程污染特征主要为颗粒物、有毒重金属及其化合物、砷及其化合物、氟化物、酸碱物质、噪声等。

稀有色金属冶炼场地修复过程污染特征主要为颗粒物、有毒重金属及其化合物、砷及其化合物、氯化物、酸碱物质、噪声、辐射等。

3.3.2 冶炼污染场地修复废气治理技术

a）异味气体防控措施。土方开挖阶段，可能有少许异味产生。针对此情况，现场会采取喷洒气味抑制剂等相应措施，降低消除现场异味，避免异味扩散。操作过程中要对场地周边环境进行监测。对于现场施工技术人员，通过配发符合防护要求的活性炭面罩进行防护，防止人员直接吸入。开挖出的土壤转运至处置区及预处理大棚，预处理大棚安装尾气处理,经过脉冲除尘、活性炭吸附将大棚内的污染物处理,达标排放。

b）扬尘防控措施。施工车辆场内行驶时按照规定道路行驶，内部道路进行湿式清扫。露天物品进行苫盖，同时对出场车辆进行清洗除尘。对于细粉状药剂，在搬运使用过程中动作轻缓，避免扬尘的产生。现场洒水车定期不定期进行洒水作业，同时根据现场实际情况增加作业班次。坚决配合相关防尘部门做好现场防尘工作。现场道路运输车辆严禁抛洒滴漏,发现遗撒立刻清理。

半干法工艺的处置效果良好，费用较低，但工艺控制比较严格，宜采用自动化系统。

土壤干燥、破碎处理过程其中重金属可能以气态或颗粒态形式存在于烟气中。气化温度较高的重金属及其化合物在烟气降温过程中凝结成粒状物质，然后被除尘设备收集去除；气化温度较低的重金属元素无法充分凝结，但颗粒表面的催化作用可能使其转化成气化温度较高、较易凝结的金属氧化物或氯化物，从而被除尘设备收集去除；超细气态存在的重金属颗粒物质，将被吸附于飞灰上或被喷入的活性炭粉末吸附而被除尘设备一并收集去除。活性炭粉末可以吸附烟气中呈气态的重金属元素及其化合物的超细颗粒，聚集后被除尘设备 一并收集去除。

c)稳定化或淋洗修复土壤处理过程粉尘治理，可采用喷淋降尘，当土壤风干后破碎过程含尘气体需要采用布袋除尘。

3.3.3 冶炼污染场地修复废水治理技术

a)含重金属的废水（包括初期雨水）应分类收集、考虑有价金属回收，并优先考虑回用。处理工艺可采用物化法（沉淀法、气浮法、吸附法、离子交换法、蒸发结晶法），化学法（石灰法、高密度泥浆法、硫化法、铁盐-石灰法、电化学法、生物制剂法），生物法（微生物法、其他生物方法），膜分离法（超滤膜系统、纳滤

膜、反渗透系统膜、离子交换膜电渗析法）。

b)含重金属的废水处理一方面要进行酸碱中和，另一方面要将废水中的有机物去除掉，然后再将含重金属浓度高的废液进行蒸发处理。具体处理过程如下：

1）酸碱中和及 fenton 氧化：利用废酸碱互相调节 pH 值至 2~3，加入双氧水与硫酸亚铁进行 fenton 氧化、絮凝去除污染物。

2）絮凝沉淀：利用废碱液将氧化后废液的 pH 值回调至 8～9，然后投加重金属捕捉剂 DTCR、絮凝剂 PAC 及助凝剂 PAM 进行絮凝沉淀反应，进一步去除重金属及悬浮物等。压滤：将絮凝沉淀后的混合物输送入压滤机进行压滤，压滤液去送入蒸发器进行蒸发处理，压滤污泥按危险废物进行进一步处置。

采用除盐处理时，需要对浓盐水进行蒸发结晶处理，结晶盐需要作为危险废物堆存在刚性填埋库。

蒸发器（蒸发器有釜式蒸发器、单效蒸发器、多效蒸发器、蒸汽压缩喷射蒸发器 TVR、机械蒸汽再压缩蒸发器 MVR 等）进行蒸发和结晶（结晶设备宜采用结晶槽、蒸发结晶器、真空结晶器、连续式敞口搅拌结晶器和循环式结晶器等）。

表 3-8　物化处理效果（单位：%）

	COD_{cr}	BOD_5	SS	总镉	六价铬	总锌	总铅
去除率	80	85	70~80	95	95	90	90

c)土壤修复过程产生的含油废水

单独收集先隔油再与有机废水经废水调节池提升泵提升送物化反应处理装置，加入所需药剂经过多级反应完成后与生活污水一并进入综合调节池，采用物理、化学预处理去除无机杂质、垃圾等，调整 pH 值满足生物处理要求后，进入膜生物法即 MBR 系统、出水消毒处理，去除 COD、氨氮等污染物，超低排放时深度处理一般增加采用活性炭吸附过滤处理

3.3.4 冶炼污染场地修复地下水治理技术

a）抽出处理

在污染场地内抽取被污染的地下水送污水处理设备，按照其污染物性质，分别采用化学中和沉淀、氧化、还原、絮凝、过滤、吸附、反渗透等技术处理，使之达到利用或排放的要求。

一般情况下，采用中和、氧化、絮凝沉淀即可达到处理要求后再回灌到场地地下水。

b）渗透墙（格栅）截污

可渗透反应墙(permeable reactive barrier，PRB)是近年来新兴起来的用于原位去除地下水及土壤中污染组分的方法。美国环保署(USEPA)1998年发行的《污染物修复的PRB技术》手册将PRB定义为：在地下安置活性材料墙体以便拦截污染羽状体，使污染羽状体通过反应介质后，其污染物能转化为环境接受的另一种形式，从而实现使污染物浓度达到环境标准的目标。目前国内污染场地地下水修复采用渗透墙工程应用还鲜有报道，美国在场地修复中有采用该技术的案例。

1995年，一个由细铁粉充当反应介质的渗透性反应墙在美国纽约实施，用于修复受含氯的挥发性有机物污染的地下水，这个项目进行了长达两年的连续监测，包括水位测量，示踪试验，现场流速测定、水质指标等方面。实验表明，含氯挥发性有机物降解水平与实验室预期基本吻合，其次，碳酸盐沉淀大部分发生在铁矿区。整个试验中，最困难的地方在于准确测定地下水通过PR8的流速。这对于实验产生较大的困扰。

可渗透反应墙技术存在的问题主要有以下几点：

⑴ 渗透墙阻力不能改变地下水流场和流通量；

⑵ 反应材料堵塞、失活、失效的控制及更替方法；

⑶ 需要满足多种污染物截留或改变其性质，即其填充物需要多功能，运行维护需要精细化。

⑷废弃填充物再生过程和污染物的最终处置需要配套。

3.3.5 冶炼污染场地修复噪声治理技术

工程应用中，场地修复过程噪声治理主要依靠对动力设备、风机安装排气消声装置、隔声罩等；土壤破碎、筛分、搅拌施工区一般采取围挡，在场地边界设置实体围墙，采取上述综合治理措施后可减小噪声等级20分贝以上。

3.4有色金属冶炼场地修复过程污染防控和治理技术发展分析

3.4.1 污染土壤资源化利用

在条件许可情况下，中度和重度污染风险土壤通过制砖进行利用或者由水泥窑协同处置；轻度污染土壤可采用改良后利用或稀释混合方式进行利用。

3.4.2 就地浓缩隔离填埋处置

在经济和技术条件受限制时，一般可采取在低污染风险区（非敏感，受控区）设置暂存库集中堆存隔离或者按照标准设置填埋库处置。

3.4.3 开发移动式一体化修复设备

满足土壤预处理、药剂制备添加和各项污染物有效反应的土壤和地下水修复成套系列设备，满足不同修复规模的原位和异位修复。

3.4.4 开发高性能低成本低风险修复药剂

针对有色金属冶炼厂场地污染特征，开发靶向和广谱修复的长效，且能够适应当地环境温度、酸碱度变化或可调节土壤酸碱度的系列新型复合药剂，同时对土壤和地下水不会产生复合污染或再生污染。

3.4.5 结合电渗析技术开发适应有色金属冶炼污染场地修复的渗透墙技术

有色金属冶炼场地污染特征主要是电导率增加，因此，可对应开发电渗析、渗透墙新技术，对富集的污染物附加化学淋洗与稳定化技术联合应用于土壤和地下水综合修复方法，达到提高土壤稳定化修复的可靠性、成效安全性。

3.5典型修复工程案例介绍

3.5.1 赣州某钴冶炼污染场地修复

3.5.1.1.项目简述

赣州某冶炼厂原为中央企业，60年代后先后转制为省属、市属地方企业，占地面积约123702平方米，距章江河岸不足 500 米，主要生产碳酸钴、银锭、镍、铜、铅等产品。该公司在2004年12月与香港某公司合资建设了该冶炼厂，并于2006年3月起投入生产，主要使用加拿大进口的银钴矿作为生产原料，提炼金属钴。2009年因废水渗漏引发“1·9”汞超标事件后被责令关闭。厂区留有大量重金属成分复杂的冶炼废渣，主要成分有类金属砷、银、钴、铬、铜、汞、锌、镍、镉、铅、硫化物等，其主要来源于三个阶段：一是20世纪50年代建厂～70年代，采用火法炼锡，炼锡后的大量废渣堆积于厂区内的山坑，主要污染物是铅、铜、硫化物等。二是20世纪70年代后～2004年，以进口摩洛哥高砷钴矿为主要原料，采用火法脱砷、脱硫炼钴工艺提取金、银，冶炼后的废渣同样堆积在厂区内的山坑，主要污染物是砷、铅、硫化物等。三是2004～009年，主要使用加拿大进口的银钴矿作为生产原料，提炼金属钴。采用水法脱硫、脱砷炼钴提取银，回收镍、铜。提炼后的含有重金属汞、类

金属砷、硫化物等污染废渣未执行“三防”（防水、防渗、防流）要求，随意堆放，直接简易填埋于山坑，主要污染物是汞、砷、硫化物等。 厂区污水排放系统、收集设施及污水处理池也破损严重，大量废渣未经处理随意堆放，导致废渣内重金属元素、类金属砷等随雨水冲刷进入地表水进而流入河道，严重污染地表水和河流水质，危及下游居民饮用水和其他生物的健康安全。

厂区地形地貌：主厂区建在南面沟谷与北面沟谷之间的山梁上，山梁走向约70°，山梁东面（下部）宽大、西面（上部）狭小；山梁自然坡度15～20°厂区中心高程约195米，山梁与东面沟谷高差5～8米，与北面沟谷高差 10～15米，山梁至两侧沟谷自然坡度约25～30°，两侧沟谷均为U型谷，坡降度不大，北面沟谷有长年溪流，长度约250～300米；南面沟谷较北面沟谷更短，现已被人工填埋，长度约150～200米。场地原始地貌属丘陵岗埠山坡地段。现有地面地形起伏较大。钻孔标高范围178.148~204.183 m，相对高差约26.035 m。场地西、南、北侧为低山，西侧两条冲沟在场地交汇，东侧为章河一、二阶地。自然土壤为褐黄壤，阶地分布黄土状粉土，冲沟地带分布粘质粉土和粉砂，下伏基岩为砂岩。

厂区场地岩土层：①杂填土为强透水性，渗透系数建议值为1.0×10^{-2}cm/s；②-1层粉质粘土为弱透水性，渗透系数建议值为2.0×10^{-5}cm/s；③-1层残积土为弱透水性，渗透系数建议值为5.0×10^{-5}cm/s；③-2层圆砾为强透水性，渗透系数建议值为1.0×10^{-2}cm/s；④层强风化变质砂岩为中等透水性，透水率建议值为17.5Lu；⑤层中风化变质砂岩为弱透水性，透水率建议值为1.2Lu。

场地历史使用情况：根据对原厂的生产工艺、原辅材料、产品、污染物排放特征和处理处置方式的分析，“场地调查与风险评估报告”认为该场地生产过程可能涉及金属类、有机类和无机类三大类污染物污染。通过对该场地历史使用情况分析及主要特征污染物的识别，场地内潜在污染物主要是生产中所涉及的重金属（类金属）、硫化物及堆放燃烧过程中产生的有机污染物。具体如下：

（1）重金属（类金属）：锑 Sb、砷 As、铍 Be、镉 Cd、铬 Cr、钴 Co、铜 Cu、铅Pb、镍 Ni、锡 Sn、锌 Zn、汞 Hg、硒 Se、银 Ag、钛 Ti、钨 W、铊 Tl；

（2）有机物：总石油烃（TPH）、挥发性有机污染物（VOCs）及半挥发性有机污染物（SVOCs）；

（3）其他潜在污染物：石棉、硫化物。

以上三个阶段的污染可能的迁移途径和造成的污染结果为：

（1）该场地在生产过程中原辅材料使用时的遗洒、产品的生产，废气、废水的排放会对场区内土壤从表层到深层产生不同程度的污染，也可能通过纵向迁移污染地下水。

（2）场区内原辅材料以及固体废物的堆放会对场地内土壤和地下水造成污染。

（3）场区内的冶炼车间、除尘车间、爬山烟道、包装车间等建筑废弃物存在一定的重金属污染。

（4）废水的下渗、雨水的冲刷等因素会对周边的土壤和地下水造成污染。

（5）周边农田的灌溉，废气的排放和烟尘的沉降会对周边的土壤和地下水造成污染。

3.5.1.2.场地调查情况

赣州某环境监测站于2011年9月对本项目周边地表水、地下水和土壤进行了环境质量现状监测。

2011年2月，县城郊断面水质重金属汞超标0.7倍。2012年3月5日，检测砷超标32.4倍，金属元素汞超标1.7倍。 地下水调查结果为：本项目所在地周围地下水中除砷指标外均低于《地下水质量标准》（GB/T 14848-93）中的Ⅲ类水要求。位于下游的地下水中砷严重超标，超准指数为24400。

土壤调查结果：对照《土壤环境质量标准》GB15618-1995中Ⅱ级标准（pH6.5），厂区内外土壤已受到了严重的重金属污染，除了铅之外，其余七项指标均超标，超标率最小的为铬，污染指数为 1.226；超标率最大的为砷，污染指数达120。

场地内的冶炼炉车间、电炉车间、破碎和运输车间，原辅材料堆放地周边、渣库和砷灰库周边、沉降室周边、烟道周边、废水排放区及周边、场地东北至章江以及西面山沟内的土壤和地下水都存在不同程度的污染问题。

3.5.1.3.场地修复技术

根据场地内土壤和废渣的污染浓度分布及埋深，废渣全部清除治理，根据污染土壤 40 倍的测算，污染土壤主要分布在 0～3m，污染土壤开挖深度由 1m到 3m（地下水位以上）不等。

对场地内属于危险固废的砷灰、污水池底泥、烟道灰等进行清理，委托有资质的单位进行安全填埋处理或综合利用；场地内属于一般工业固废的钴冶炼渣等和表层重度污染土壤（污染物浓度大于 40倍修复目标）全部清出，采取固化/稳定化处理技术进行处理，处理后的废渣和土壤在场地内的低洼地进行填埋；污染物浓度小

于 40 倍修复目标的超标土壤采取环保隔离+生态封闭处理。

针对本项目特点，地下水流向为西向东排泄，环保隔离区为围绕污染区设置一个闭合圈，从地下水渗流的角度而言，上游侧主要是阻止隔离区以外地下水渗入，下游阻止隔止隔离区内污染水外渗，因此，针对本项目提揭露的地层特性，考虑施工的可行性，在上游侧约365m拟采取帷幕灌浆形成防渗墙，下游地下水排泄方向通过上部设置混凝土塑性防渗墙+下部基岩帷幕灌浆的方式形成组合防渗墙，长度为488m，垂直防渗墙总长度为853m。

本技术方案确定垂直隔离防渗墙沿隔离线布置，结合地层相对不透水层条件，其中靠近西侧上游地下水来水方向的垂直防渗墙深度为地表以下平均约13m，深入强风化岩层不少于3m，以阻止地下水渗入为目的相关参数如下：

（1）灌浆孔：钻孔钻机要求采用回转式岩芯钻机、金刚石或硬质合金钻头。注浆孔要求清水钻进，灌浆孔的孔径为75mm，不变径钻完全孔。本项目设计灌浆孔间距为1.5m，双排，交错布置。

（2）灌浆材料：在注浆起始标高处严格止水，以保证注浆质量。注浆段钻完后进行压水试验，探明其岩层透水率。注浆前应捞净岩粉，视岩层遇水后性能考虑是否进行洗孔工作。灌浆水泥采用不低于42.5的新鲜硅酸盐水泥，其细度要求通过4900孔/厘米，余量不超过5%，为了确保水泥质量，施工单位应建立切实可行的检验保管制度，水泥从出厂到使用时间不超过40天，水泥在施工现场存放的时间不超过12小时，当发现水泥有受潮结块现象时，应经检验合格后方可使用。

（3）灌浆水灰比（重量比）：采用 5:1， 3:1， 2:1， 1:1， 0.8:1， 0.6（或0.5）:1六个比级，开始采用5:1水泥浆，逐级变浓，直至结束。当灌浆压力保持不变，注入率持续减少时，或当注入率不变而压力持续升高时，不得改变水灰比；当某一比级浆液的注入量已达300L以上或灌注时间已达1小时，而灌浆压力和注入率均无改变时，应改浓一级；当注入率大于30L/min时，可根据具体情况越级变浓；在设计压力下，当注入率不大于1L/min，延续60min，即可结束。

（4）灌浆结束和封孔：采用压力灌浆封孔法，当全孔灌浆完毕后，将灌浆塞塞在孔口，灌入水灰比为0.5:1的浓浆，灌浆压力不小于0.3MPa（或全孔段平均灌浆压力），当注入率不大于1L/min时，延续30min停止。

（5）灌浆效果检查标准：单孔注浆后扫孔进行压水试验q≤1Lu，检查孔压水试验q≤2Lu。现场应做好注浆试验及正式施工阶段的注浆孔施工、压水试验、注浆段

划分及注浆成果（浆液浓度、耗量、注浆压力等）记录和资料整理工作，发现问题及时处理。注浆试验结束后，应该编制试验报告，并提交设计院，以便进一步优化注浆参数，按评审后的参数进行正式施工。

（6）灌浆过程可遵循《水工建筑物水泥灌浆施工技术规范》（SL62-2014）进行。

环保隔离区下游是本项目能否起到效果的重中之中，由上至下的地层分别为杂填土、粉土、圆砾、强风化变质砂岩、中风化变质砂岩。因此，在下游地下水出口方向约488m的长度范围内，均采取塑性防渗墙+帷幕灌浆的方式的垂直防渗墙进行阻隔，具体如下：

①塑性混凝土防渗墙：塑性混凝土包含由水泥、水、骨料和膨润土组成的混合物，与传统混凝土相比，具有低渗透系数和优异的破坏延展性。通过机械开挖成槽的方式，泥浆护壁，要求深入强风化变质砂岩不少于2m，平均深入地表以下约13m，低于探明的重度污染土壤污染范围5m，墙厚0.6m，膨润土含量在10～20%（具体实施时应先实验确定），渗透系数等级要求为10-6cm/s量级。

②帷幕灌浆垂直防渗墙：在塑性混凝土施工完成后，设计对帷幕前后进行帷幕灌浆进行加强，帷幕灌浆深度在从地表以下约12m（与塑性混凝土防渗墙衔接）开始起灌，至地表以下18.5m终孔（深入中风化岩层不小于2m）。

灌浆孔的孔径为75mm，不变径钻完全孔。本项目设计灌浆孔间距为1.5m，双排，在塑性混凝土防渗墙前后交错布置。

3.5.2 贵溪某渣场污染场地修复

铜冶炼是贵溪市重金属污染物贡献的主要行业，在铜冶炼过程中，铅、汞、镉、铬和类金属砷等会随“三废”排放，对环境、生态造成严重污染和破坏，企业在当地生态环境部门支持下持续升级改造环境治理工程。2010 年开始实施的九牛岗土壤修复项目，本着“先控源头，再减存量”的思路，建设了渣场综合整治工程、水库综合治理及原灌区另辟清洁水源工程，对企业周边三个自然村进行搬迁、土壤修复工程等，从解决当时地方最为棘手的重金属污染问题着手，重点关注的是冶炼废渣治理、重金属污染土壤修复及水源地治理等。 除上述主要重金属污染源外，由于历史原因，当地曾经小选矿厂林立，原料主要为大量的外购含铜废料、低品位铜矿等，加工后产生大量含重金属的再选尾矿。2007年，当地政府进行了综合整治，关闭了15 家非法选矿厂，并对其产生的废渣进行全面覆土。由于填埋过程中未做任何环保

措施，仍存在重大环境安全隐患。在企业老渣场综合治理、新渣场建设、九牛岗土壤修复等多项重金属污染防治工程完成后，该历史遗留废渣则成为了贵溪市最主要的重金属污染源。

经现状监测，废渣场周边蒋家和李家的土壤中重金属含量超过了《土壤环境 质量标准》（GB15618-1995)二级标准，主要超标因子为铜和镉。2008 年南昌大学的学者对项目场址附近苏门村的土壤、植物和人体中重金属的分布特征及其污染进行评价，当地将近50%居民的镉含量值超过了参考范围，已受镉污染。修复工程包括废渣覆土等，避免废渣的扬尘和含重金属废水地表漫流对周边土壤污染的风险。 废渣场南部有信江流过，最小直线距离约为 4.2km。废渣场地表径流与信江水体联系不大。 经监测，除苏家门监测点位地下水 pH 略超标外，废渣场周边地下水质量可达到《地下水质量标准》（GB/T14848-93）III 类标准。根据废渣对周边环境的污染路径分析，本项目历史遗留废渣重金属污染问题 仍亟待进行重点治理。

废渣场属低岗地形，地势较平缓，总体为东、西高，中部低，西面最高标高 63.74m，最低标高约 55.00m，地形坡度 5°左右。废渣场处在南北向沟谷内，周边山体山坡植被不发育，大部分为中风化砂岩组成的秃坡。调查区西侧有一长方 形水塘，长约 85m，宽约 55m，面积约 4675m^2，为采石形成的积水塘。

根据已有场地勘察资料及区域地质资料，废渣场区域范围内地层相对简单， 主要为第四系松散层（Q）和白垩系上统南雄组（K_2n）砂岩。由老至新分述如下：（1）白垩系上统南雄组（K2n） 分布于废渣场东、西面，为砂岩，岩层总体走向南东 105°～106°，倾向 南、南南西，倾角 16°～25°，局部岩层走向 10°～35°，倾向北、北西，倾 角 8 °～2 0°，呈巨厚层状产出，厚度大于 2457m，属软岩类。 （2）第四系松散层（Q） 根据成因类型可分为第四系残坡积层（Qel+dl）和第四系人工堆积层（Q4ml）： ①第四系残坡积层（Qel+dl） 分布于废渣场沟谷及缓坡地带，总体呈南北向分布，其岩性为粉质粘土、粉 土，厚度一般 0.5～3.0m。②第四系人工填土层（Q4ml） 9 主要分布于废渣场中部，为新近人工堆积，按成份不同可分为素填土和杂填 土(含冶炼废渣)，总层厚 0.60～9.60m，中夹冶炼废渣，其层厚 0.20～2.20m。 2、各岩土层工程地质特征 （1）素填土：主要分布在废渣场的表层，为新近人工堆积，层厚 0.30～2.00m 不等。褐黄、褐红及及砖红色，主要由强风化砂岩碎块、碎屑及粉土组成，结构 松散，厚薄不均，承载力低而不均。其承载力特征值小于 80kPa。 （2）杂填土：分布在整个废渣场，为新近人工堆积，

层厚 0.60～7.50m 不 等。褐、黑褐、黄褐及褐黄等杂色，主要由粉土及砼块、砖块、卵石、木屑、破 布、塑料类等建筑生活垃圾和少量冶炼废渣组成，冶炼废渣呈粉粒和砂粒状混于 其中，成分复杂，结构松散，承载力低而不均。其承载力特征值小于 70kPa。 （3）冶炼废渣：断续或透镜体状分布在废渣场内，层厚 0.20～2.2m 不等。 黑褐色，呈粉粒和砂粒状，局部呈角砾状，松散，湿。冶炼废渣多数呈粉粒状， 少数呈砂粒状，局部呈角砾状，湿密度 1.73～1.82g/cm^3，干密度 1.18～1.45g/cm^3，比重 2.73～2.80。 （4）粉质粘土、粉土：分布在沟谷及缓坡地带，层厚 1.00～2.40m 不等。 呈密实状，标准贯入试验 4 次，最大值 6 击，最小值 4 击，平均值 4.8 击，承载 力特征值 110kPa。其承载力按分布部位的不同，有较大的差异，分布在沟谷底 部的粉土层承载力特征值 80kPa 左右，分布在缓坡地带粉土层承载力特征值 110kPa 左右。 （5）砂岩：按风化程度可分为全、强及中风化 3 层： ①全风化砂岩：岩质松软，岩芯呈土状，局部呈碎块状，遇水易软 化，层 厚 0.60～3.30m 不等。标准贯入试验 4 次，最大值 9 击，最小值 8 击，平均值 8.5 击，承载力特征值 140kPa。 ②强风化砂岩：风化裂隙较发育，岩质软弱破碎，岩芯呈碎块状，局部呈土 状，碎块手折易断，遇水较易软化，失水较易崩解，层厚 0.50～3.50m 不等。重 型圆锥动力触探试验 9 次，最大值 19 击，最小值 10 击，平均值 8.5 击，标准值 10.8 击，承载力特征值 340kPa。 ③中风化砂岩：砂状结构，巨厚层状构造，主要矿物成份为砂质长石、石英 及云母，泥铁质胶结。裂隙不发育，岩质较硬，岩芯完整，岩芯以长柱状和柱状 为主，均为机械断裂，岩块锤击声哑易碎，厚一般大于 15m。根据室内岩石抗压 强度试验结果资料，其单轴饱和抗压强度 8.59～13.80MPa，平均值 11.73MPa， 标准值 10.21MPa。承载力特征值 2200kPa。根据 2009 年版《岩土工程勘察规范》 （GK50021-2001）标准分类：中风化砂岩属软岩类，岩体完整，岩体基本质量等 级为 IV 级。

根据前期可研成果资料，废渣场按照《工业固体废物采样制样技术规范》(HJ/T20-1998)进行取样，包括表层土、再选尾矿、底层渣土混合物及渗沥液等，测试渗沥液重金属含量，判断废渣的性质。 （1）采样位置 采用棋盘型布点法，采样布点图见图 4-1。设置 16 个采样点（A～P)，共计 80 个样品，足量取样并分装。A 点样品自上至下编号分别为 A1、A2、A3、A4、 A5，B 点样品自上至下编号分别为 B1、B2、B3、B4、B5，C-P 点样品依此类推进行编号。

设计采用原址异位处置方式，采用平地型、凹坑隔离处置场。设计隔离区填 埋

场位于整个废渣场地的西南部，为长方形，呈南北向展布，南北长 190m，东 西宽 173m，占地面积 32870m^2。设计北部坑底最低点 52.40m，设计南部底最低点 为 49.00m，坑底倾向南，南北纵向长 171.10m，坑底坡率 2%，渗沥液流向南。 东西两端向坑底中轴线倾斜，坡率 2%，东西向坑底宽 163.90m。边坡坡率为 1:1.5，其中南侧边坡设二级坡，每级坡高 3.50m，中间平台宽度 2.00m。设计填埋场南 北两端封场地面起始点标高为 56.00m。封场地面最高标高为 57.00m，位于南北 向中部分界处，并设置宽 2.00m 的马道，封场坡面分别倾向南北两侧。设计库容 18.3549 万方，满足堆填要求。

隔离区工程主要工程单元包括： 1、土石方工程 （1）首先清理基底杂物，清理完毕后进行整平和找坡，坡向下游的比降不 21 为 2%，底部防渗层两侧向中央坡度为 2%，形成整体由北坡向南的趋势，同时进 行场地平整为防渗结构层的铺设提供前提。 （2）该区域东、西两侧为基岩区，石方开挖如采用爆破方式开挖时，应严 格控制爆破用药量。同时按设计要求修整边坡以利于防渗层的铺设，边坡坡比为 1:1.5。 2、防渗工程 废渣为Ⅱ类一般固体废弃物，参照 2013 年版《一般工业固体废物贮存、处 置污染控制标准》（GB18599－2001）第 6.2.1 条：当天然基础层的渗透系数大于 1.0×10^{-7}cm/s 时，应采用天然或人工材料构筑防渗层，防渗层的厚度应相当于 渗透系数 1.0×10^{-7}cm/s 和厚度 1.5m 的粘土层的防渗性能。根据场地工程勘察成 果报告资料，隔离区由上至下各岩土层分布为废渣、粉土、全风化砂岩、强风化 砂岩、中风化砂岩。清除废渣至设计标高大部分是强风化或中风化砂岩，渗透系 数均不满足 1.0×10^{-7}cm/s，因此，必须采取防渗层。 设计采用人工材料衬层作为隔离区防渗层。因 HDPE 膜和 GCL 衬垫均较薄， 可以减少堆填库容的消耗，具有经济优势（可有较多的空间用来堆填）和环境优 势（减少堆填同量的废物对土地消耗）。对场地平整边坡要求不高，施工简单方 便，无须特别的安装设备，施工工期短，人工衬垫的质量保证步骤比压实粘土衬 垫要简单得多。设计防渗结构层如下： （1）基底防渗设计（自上而下） ①废渣堆体; ②200g/m^2有纺土工布一层; ③0.50m 厚卵石导流层（内设渗沥液收集管）； ④600g/m^2无纺土工布一层; ⑤1.5mm 厚 HDPE 膜一层； ⑥4800g/m^2膨润土垫（GCL）； ⑦压实地基。 （2）边坡防渗设计（自上而下） ①废渣堆体； ②0.30m 厚袋装砂保护层（场区边坡缓冲层，避免废渣堆填过程中对边坡防 渗结构层造成破坏）； ③600g/m^2无纺土工布一层； ④1.5mm 厚 HDPE 膜一层； ⑤4800g/m^2膨润土垫（GCL）； ⑥边坡修整。

（3）封场防渗设计（自上而下） ①20cm 营养土层，表层植草； ②45cm 厚防渗粘土； ③1400g/m²土工复合排水网； ④1.0mm 厚 HDPE 膜一层； ⑤0.50m 厚回填土；⑥废渣压实、修整。 防渗材料的铺设：HDPE 膜的搭接一般采用热熔焊方式，由加热喷头插在搭 接缝中向前移动，边压紧边焊接，通常应遵循下列原则：1）使接缝数量最少， 并且主缝应平行于拉应力大的方向（即垂直等高线）；2）接缝应避免在坡面和底 面的结合部，以及地下水集排水管的正上方等处；3）应避免“+”形接缝，宜采 用错缝搭接。 防渗膜的锚固：防渗膜按低位向高位延伸的原则铺设，在填埋场坡顶、二级 边坡平台设置锚固沟，以防止因为重力的作用向坑底滑落。

隔离区渗沥液系统包括场底渗沥液卵石导流系统和渗沥液收集导排系统。 （1）卵石导流系统 场底渗沥液收集需敷设厚度不小于 0.5m 的卵石层，卵石粒径为 15-50mm， 按上细下粗的原则进行铺设，构成反滤层，以便于将废渣体内的渗沥液导入导排 管。 （2）场底渗沥液收集导排系统 渗沥液收集导排系统由 1 条主管和 18 条鱼骨状支管组成，采用 DN315HDPE 多孔管。渗沥液经导排主管汇流至隔离区南侧最低点，最终汇入渗沥液收集池， 泵抽排入铜产业循环经济基地的污水管网至污水处理站进行处理。主管以约 2% 的坡度坡向南方向，在主管的两侧均匀设置支管，与主管的夹角为 60°，支管 坡度不小于 2%，坡向主管。隔离区渗沥导排系统平面图见附图 03-2。 4、场底渗水导排工程 由于隔离区的库底采用了水平防渗措施，为了防止地表侧向渗水对防渗膜的 顶托而使膜受破坏，须将其及时有序导出填埋库区外，以使其与膜保持一定的距 离。设计在水平防渗膜底下设置渗水导排系统，以保证防渗结构层的安全。 在隔离区防渗层下设置碎石导排层，中央位置设置收集主盲沟，沿主盲沟隔 一定距离设置一些拦截支盲沟。导排系统由 1 条主盲沟、14 条鱼骨状支盲沟以 及 1 条环场底周边盲沟组成。盲沟中央低处埋设 DN200HDPE 多孔管，盲沟铺设卵 （碎）石（d=15～50mm），外包 200g/m²无纺土工布。主沟设计纵坡约 2%，支沟 的设计纵坡不小于 2%。隔离区场底渗水最终汇入渗沥液收集池，泵抽排入铜产 业循环经济基地的污水管网至污水处理站进行处理。在四周地面标高以下的区域作业时，自卸汽车由临时作业道路至隔离区底 部，临时作业道路随废物堆体的不断抬高而自然埋入填埋体，随着废物堆体的堆 高，重新调整布置临时作业道路。 库区摊铺采用平面堆积法，由挖掘机在作业面上将卸下的废物摊铺开，并向纵深方向推开、逐渐推进，分层碾压，来回碾压 3 次，每次碾压履带轨迹要盖过上次履带轨迹的 3/4，直至形成新的作业面。作业面高度为 2m。 为了减少废渣填

埋渗沥液的产生量，避免雨水直接进入废物堆体，在废物堆 体上采用 0.5-1.0mm 的高密度聚乙烯膜（HDPE）搭接覆盖，对填埋区表面进行全 面覆盖，作业时再揭开部分覆盖膜进行填埋作业。边坡较长时间不进行下一步填 埋作业的区域可采用粘土结合 HDPE 膜进行中间覆盖。对覆盖膜应进行压重，防 止风吹开。

当清挖废渣堆填完成后，对堆体顶面及边坡进行封场，以防止废物堆体直接暴露和雨水进行堆体内。南北两端封场地面起始点标高为 56.00m。封场地面最 高标高为 57.00m，位于南北向中部分界处，并设置宽 2.00m 的马道，封场坡面 分别倾向南北两侧。设计按照《水土保持综合治理技术规范》（GB/T 16453.1— 2008）确定封场后的顶面坡度为 1.0%。封场要求严格按照 2013 年版《一般工业 固体废物贮存、处置场污染控制标准》（GB18599-2001）中 8.3.1 要求执行。 封场结构层为在平整碾压后的废渣堆体上铺设一层不小于 50cm 厚的回填 土，该部分回填土可采用场地剥离的表层覆土，其上铺设 1.0mm 厚的 HDPE 土工 膜以及复合土工排水网（1400g/m^2），之后再铺设 45cm 厚粘土层，并采用机械压 实，压实度不小于 0.95，压实后粘土层的饱和渗透系数 k≤1.0×10^{-7}cm/s。粘土 层之上为 20cm 厚的植被覆盖层，可采用天然营养土，以利植物生长。 同时，对封场后的处置场及时种植草皮（或撒播草籽），以免覆盖土的裸露， 防止水土流失。

3.5.3 株洲某污染场地采用原位治理技术应用范例

3.5.3.1.项目简述

工程背景:项目原址位于株洲市某老工业区，治理面积176.28亩，土方量为35340m^3，修复后场地规划作为道路用地。

污染情况：主要目标污染物为pH值、Pb、Cd、As，重金属污染浓度最高分别为3.64mg/L、3.7mg/L和180mg/L，修复深度最高达5m。

治理目标：采用《固体废物毒性浸出方法水平振荡法》（HJ557-2010），目标污染物的浸出液浓度不高于《污水综合排放标准》（GB8978-1996）中最高允许排放浓度值。

治理条件：土壤岩性为杂填土，层顶埋深0.00-7.10米，层厚1.30-12.70米。场地主要为上层滞水与孔隙型潜水两中类型。上层滞水：主要赋存于填土中，水位浅，水量较少，上层滞水受大气降水及地表水补给，以蒸发的形式排泄，旱季多干枯。孔隙型潜水：赋存于圆砾层中。

3.5.3.2.关键技术与参数

治理技术：原位固化/稳定化技术，采用高压旋喷的方式。

关键设备：旋喷钻孔一体机、高压注浆泵、空气压缩机、药剂配制罐。

关键参数：高压旋喷工艺上可分为双重管和三重管法，关键技术参数如下：

表3-9　某冶炼场地原位固化、稳定化修复主要技术参数

参数名称	设计要求以及参考值	备注
旋喷影响范围	有效影响半径不低于0.8m	重点参数，保证设计桩间全覆盖
药剂投加量	三管水泥：90～100kg/m^3	药剂使用量上限，按设计高压电线区域采用双管法，其他区域采用三管法
	双管水泥：70～80kg/m^3	
	药剂：30～50kg/m^3	
小试药剂投加量	废渣质量的0.5%、14%及54%	水泥与无机硫基复合药剂的比例详见小试报告
药剂溶液	三管压力0.2～1.0MPa，双管压力20～30MPa	重点参数，压力影响治理范围、流量影响药剂溶液中水的添加比例
	流量100～150L/min	
高压水	压力20～40MPa	主要切割搅拌作用
	流量100～150L/min	
压缩空气	压力0.6～0.8MPa	提高切割搅拌效果
	气量0.5～2.0m3/min	
提速	5～25cm/min	控制施工速度
转速	10～20r/min	影响旋喷效果

3.5.3.3.工艺流程与说明

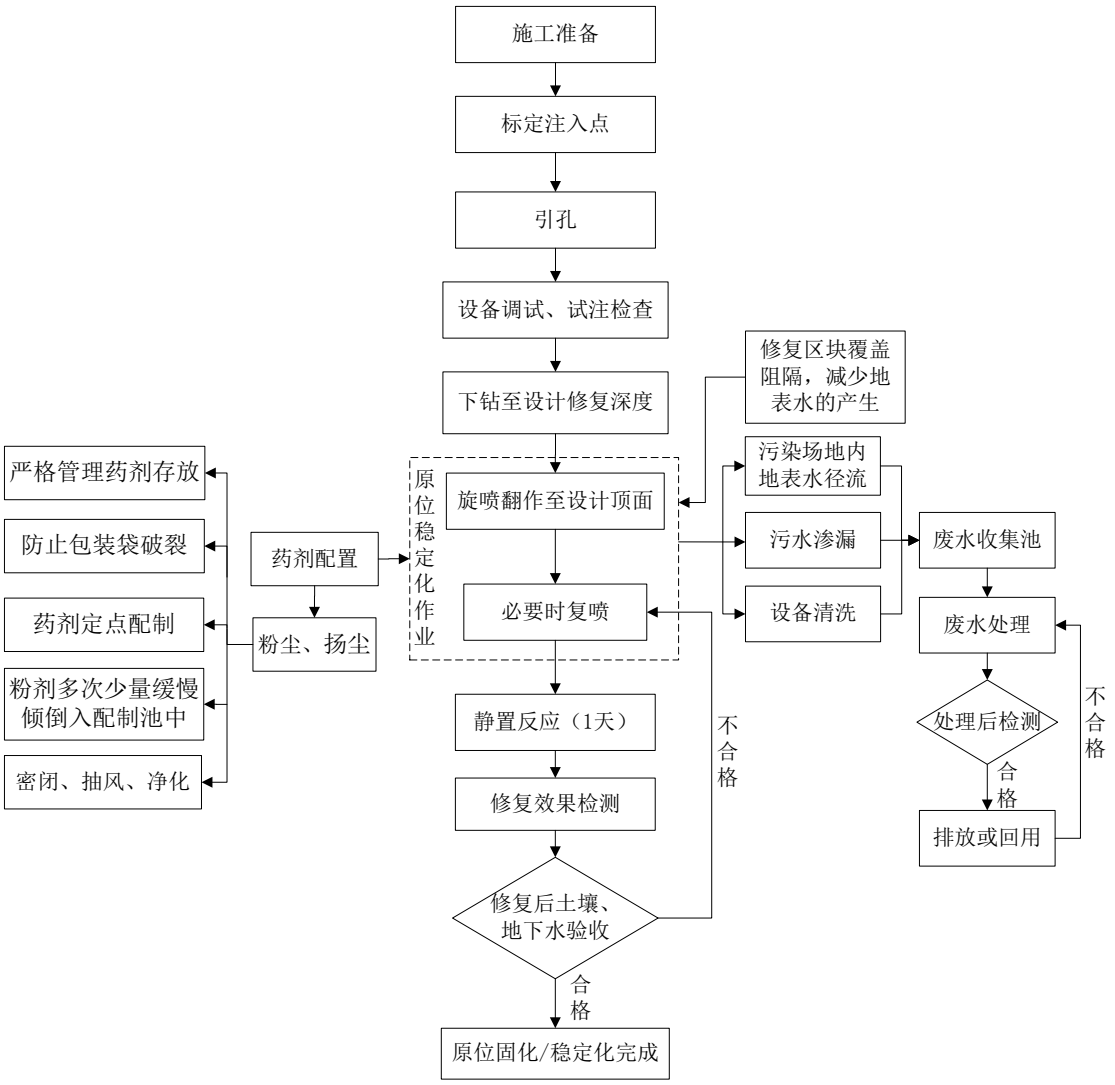


图3-9 施工工艺流程与污染产生节点防控图

工艺说明：

施工准备：工程实施前完成场地平整压实,清除地上、地下的一切障碍物，做好地表水截/排，确保场地内无积水。

标定注入点：测量定位和定点放线，确定各污染区域钻孔点位置和深度，确保钻机位置准确到位，对不符和垂直度要求的钻杆进行调整，直到钻杆的垂直度达到要求。

引孔、调试和试验：钻机就位后根据布设的点位先行施工导孔，终孔深度和孔径满足设计要求，保证不塌孔。钻机导孔的点位偏差不大于50mm，成孔的垂直度不大于1.5%。喷旋机在已成孔前定位，检查全系统工作是否正常，检查有无漏水、压力能否达到施工要求，高压泥浆泵是否正常。通过小试试验和中试试验结果，确定药剂相关设计参数。

药剂配置：固化/稳定化药剂浆液采用普通硅酸盐水泥P.C32.5和无机硫基复合药剂。搅拌灰浆时，为了保证浆液浓度，应当采用二次搅拌配制浆液，即在第一只搅拌桶中按确定的水灰比配制并搅拌水泥浆液，搅拌3-5分钟后放入第二只搅拌桶中待用。禁止采用一只搅拌桶，一边配浆一边抽浆，否则难以控制浆液水灰比。在实际施工时，还可以使用比重计随时测量浆液比重。

高压旋喷作业：将带有特殊喷嘴的注浆管（钻杆），通过钻孔插到土层预设的点位和深度，喷嘴喷射出药剂的同时向上提升，提升过程中应检查浆液的流量、喷射压力、提升速度等，并做好施工记录。高压泵和压缩空气的复合喷射流体切削破坏土层结构，高压液流对土壤进行切割后随即搅拌，达到药剂与受污染土壤的充分混合。

3.5．4 修复过程污染防控

3.5.4.1废气、粉尘防控

a）废气

全部设备机械使用满足国家第三阶段排放标准。

b）扬尘

作业现场采取全封闭的围挡以减少扬尘扩散。

场内运输采用专用密闭式车辆，并在场地设置了车辆冲洗装置，运输车辆进、出场地必须冲洗并限速行驶。

施工区配备洒水车一辆，正常情况下每日洒水两次，异常时增加到3-4次。

严格管理药剂存放，防治包装破裂，粉剂多次少量缓慢导入配置池中等。

3.5.3.4.2清洗废水、地面径流控制

对水环境影响较小，主要为一些生产污水、生活污水、清洗废水等，均收集至废水收集池进行处理。

a）生产污水

原位稳定化/固化治理本身不产生废水，施工前沿治理地块周围设置好雨水截流系统进行雨污分流。

修复区覆盖，减少地表径流；现场引流集中收集至废水池。

b）清洗废水

施工设备及车辆的清洗废水循环利用，定期外排一部分废水，外排废水经自吸罐车抽取送污水处理系统处理处置。

c）生活污水

施工期间人员集中，施工队伍的日常生活产生的生活污水，主要以悬浮物BOD、COD和油类物质为主。

3.5.4.3地下水污染防控

本项目不涉及地下水修复，实际施工中在场地周边布设监测井，在施工前、施工中、施工后都进行地下水取样，实施监控地下水水质情况，确保施工过程不造成地下水污染。

3.5.4.4噪声控制

施工过程中使用的车辆、稳定化处理设备工作产生的机械声音等都是噪声污染源。实际施工过程中，往往会涉及多种机械同时工作，各种噪声源辐射相互叠加，噪声级将更高，辐射范围亦更大。

施工时，需合理安排施工时间，采取降噪措施，削减噪声声源强度，机械配备消音装置，保证白天夜间场界噪声达标，现场噪声定期检测。

3.5.5 养护和验收

静置养护：高压旋喷作业后，药剂需要静置反应一段时间，反应养护时间设为1天，在反应养护过程中确保场地土壤不被扰动。

检测和验收：原位固化/稳定化治理后进行自检，并由第三方单位检测修复区域中目标污染物浓度，以确定修复效果。如自检存在局部区域未达标，需对未达标区域进行补充注射修复，根据检测结果配制药剂进行复喷，直到治理至目标值。验收合格后即可结束原位固化/稳定化修复施工，做好退场工作。

验收结论：修复土壤按照《固体废物浸出毒性浸出方法水平振荡法》（HJ557-2010）进行浸出实验，Pb、Cd、As污染物浸出浓度选择《污水综合排放标准》（GB8978-1996）中最高允许排放浓度值，即Pb≤1.0mg/L，Cd≤0.1mg/L，As≤0.5mg/L，pH处于6~9范围内。经固化稳定化处理后，达到修复效果，满足设计要求。工程资料已严格按照监理单位的资料报审程序和文件整理规范要求进行资料收集及整理，各项资料齐全，符合要求。

3.5.6 二次污染防治监测结果

按照国家有关环境监测技术规范，实施单位组织开展了该项目修复中环境质量现状监测工作，本项目旋喷作业、固化/稳定化等过程中严格落实二次污染治理控制措施。监测结果如下：

1）无组织废气：场地原位治理本身不产生扬尘，扬尘主要来源于场地道路运输，通过采取有效措施，确保日平均达到环境空气质量标准（GB3095-2012）的二级标准，环境空气TSP达标。

2）地表水：地表水满足《地表水环境质量标准》（GB3838-2002）表1中III类标准相关要求。

3）生产废水：生产废水满足《污水综合排放标准》（GB8978-1996）一级标准方可排放，超标废水经自吸罐车抽取送至项目当地符合要求的污水处理系统处理。

4）地下水：本项目不涉及地下水修复，施工过程未造成地下水污染。

5）噪声：施工场界噪声满足《建筑施工场界环境噪声排放标准》（GB12523-2011）相关要求。

表3-10 环境空气监测结果（2019年10月）

采样点位	采样时间	气象条件	总悬浮颗粒物（TSP）mg/m^3
场地中心1#	2019.10.28	24.2℃晴 西北风1.6m/s 气压101.5KPa 湿度40%	0.126
下风向2#			0.133
运输道路南侧3#			0.134
运输道路西侧4#			0.152
《环境空气质量标准》（GB3095-2012）表2中二级排放限值			0.3

表3-11 地表水监测结果（2019年10月）

采样点位	采样时间	pH值 无量纲	COD mg/L	Pb mg/L	Cd mg/L	As mg/L
入湾口	2019.10.28	7.29	16	0.007	0.0038	0.0036
《地表水环境质量标准》（GB3838-2002）表1中III类标准		6-9	20	0.05	0.005	0.05

表3-12 地下水监测结果（2019年10月）

采样点位	监测时间	水位	pH值 无量纲	Pb mg/L	Cd mg/L	As mg/L
监测井1#	2019.10.28	5.5m	7.03	＜0.001	0.0003	0.0043
监测井2#		5.5m	7.61	0.004	0.0023	0.0086
监测井3#		3.0m	7.12	0.002	0.0002	0.0094
监测井4#		3.0m	6.58	＜0.001	0.0002	0.0051
《地下水质量标准》GBT14848-2017 表1中III类标准限值			6.5-8.5	0.01	0.005	0.01

表3-12 噪声监测结果（2019年10月）

监测日期	监测点位	昼间 （dB）	夜间 （dB）
2019.10.28	场界东外1m	58.7	50.2
	场界南外1m	56.6	45.4

	场界西外1m	59.4	46.9
	场界北外1m	60.1	48.7
《建筑施工场界环境噪声排放标准》（GB12523-2011）		70	55

表3-13 环境监测结果统计

监测类别	监测指标	执行标准		监测频率	监测结果
无组织废气	TSP	《环境空气质量标准》（GB3095-2012）表2中二级排放限值	TSP,0.3mg/m^3	每月1次，4点位	达标
地表水	pH值、COD、Pb、Cd、As	《地表水环境质量标准》（GB3838-2002）表1中III类标准	pH值，6-9；COD，20mg/L；Pb，0.05mg/L；Cd，0.005mg/L；As，0.05mg/L	每月1次，1点位	达标
污水	pH值、Pb、Cd、As	《污水综合排放标准》（GB8978-1996）一级标准	pH值，6-9；Pb，1.0mg/L；Cd，0.1mg/L；As，0.5mg/L	需要时	超标废水均外送处置
地下水	pH值、Pb、Cd、As	《地下水质量标准》GBT14848-2017表1中III类标准限值	pH值，6.5-8.5；Pb，0.01mg/L；Cd，0.005mg/L；As，0.01mg/L	施工前、施工中、施工后各1次，4点位	达标
厂界噪声	L_{Aeq}	《建筑施工场界环境噪声排放标准》（GB12523-2011）	昼间：70dB；夜间55dB	每月2次，4点位	达标

4 编制依据、原则和方法

4.1 编制依据

2018年8月31日，十三届全国人大常委会第五次会议全票通过了土壤污染防治法，自2019年1月1日起施行,企业生产需要“实施风险管控、修复活动中产生的废水、废气和固体废物，应当按照规定进行处理、处置，并达到相关环境保护标准”。 国务院国发〔2016〕31号文《国务院关于印发土壤污染防治行动计划的通知》，要求到2020年，土壤污染防治法律法规体系基本建立。

生态环境部作为我国土壤污染防治的主管部门，在2019年先后颁布了《建设用地土壤污染风险管控和修复术语》（HJ 682—2019 代替HJ 682-2014），《建设用地土壤污染状况调查技术导则》（HJ 25.1-2019），《建设用地土壤污染风险管控和修复监测技术导则》（HJ 25.2-2019），《建设用地土壤污染风险评估技术导则》（HJ 25.3-2019），《建设用地土壤修复技术导则》（HJ 25.4-2019），及《地下水污染防治实施方案》（环土壤〔2019〕25号），《污染地块地下水修复和风险管控技术导则》（HJ 25.6-2019）等标准规范。但是有关部门目前还没有制订针对稳定化、淋洗分离及阻隔技术修复过程污染综合防控的技术标准。

有色金属冶炼作为工矿企业土壤污染防治重点监管行业，冶炼场地的污染问题亟需引起重视，开展有色金属冶炼污染场地修复技术研究，制定行业性污染土壤修复系列技术标准，提高有色冶炼污染场地治理的有效性和可靠性，有必要一方面对污染土壤进行修复治理，另一方面在修复治理过程中防止产生新污染。行业专家建议可结合国家重点研发计划课题《中南地区冶炼场地污染综合防控及再开发安全利用技术集成与综合应用示范》（2018YFC1802705）的研究工作及应用实践成果，编制行业（协会）标准，我单位于2020年4月向有色金属工业协会、全国有色金属标准化技术委员会申报了《有色金属冶炼场地污染土壤修复综合防控技术指南》（以下简称“指南”，作为有色金属协会团体标准，以填补我国有色金属工业污染土壤稳定化、淋洗分离修复过程二次污染防控技术标准的空白，使之既具有行业特色，又与国家、地方土壤修复工程建设和污染控制环境标准充分衔接。

2020年8月，全国有色金属标准化技术委员会批准了该“指南”立项，项目编号为2020-42-T/CNIA。

4.2 编制原则

有色金属冶炼土壤污染以酸性含重金属颗粒烟气污染雨水、酸性含重金属废水、废渣淋溶污水污染为主要特征，包括无机酸性或碱性物质、氟化物、氰化物、有机萃取剂等污染，修复方式以原位阻隔、淋洗修复为主、异位稳定化填埋修复为辅，修复过程主要污染风险为对地下水污染、环境空气污染和噪声污染。综上所述，本文件编制原则如下：

1）针对有色金属冶炼场地污染特征在修复过程中综合防控，坚持以先进、成熟、有效修复示范工程为基础，使之具有可操作性。

2）从修复模式、修复技术及药剂选择进行污染防控实现源头控制，到实施过程中污染治理和监测监控管理，形成系统化的污染综合防控技术。

3）对修复过程各排污节点提出系统识别，合理选择污染预防控制和有效治理技术措施。

4）既以稳定化、淋洗分离修复工艺，也对相关的土壤预处理、场地污染扩散阻隔、植物修复工程提出相关的污染防控措施。

5）与现行国家、行业相关法规、标准衔接，以满足法规和场地修复项目风险评估确定的环境保护目标要求

4.3 编制方法

本文件编制过程采取了调研、专家咨询、工程应用研究和系统评价结合的方法。

a) 调查研究

通过专项课题研究，查阅国内外关于土壤修复，特别以中南地区有色金属冶炼场地污染修复的技术文献资料，形成修复前、修复中和修复后综合防控技术集成。通过对典型有色金属冶炼废弃场地稳定化、淋洗修复过程污染物产生环节、污染扩散阻隔和污染物防治控制手段等资料。提出冶炼场地污染修复及污染控制可行技术清单。

b)专家咨询

针对有色金属冶炼场地修复中存在的环境问题以及所筛选预防和治理技术的集成，通过典型工程的专家评审，课题组讨论，行业专家函审等方式，归纳、提炼形成相对可复制推广、有应用成效的适合于有色金属冶炼场地稳定化、淋洗修复技术的综合防控体系。

b) 工程应用总结

选取高温熔融玻璃化处理作为钨冶炼固体废物的无害化、减量化和资源化处理方法，并通过科学的试验研究和充分的生产试运行验证技术的可行性。

c) 系统集成

在保证可行技术达到预期效果和满足相关环境保护要求，兼顾有色金属冶炼行业的污染物特征、场地特点、修复和监控方式、经济成本等因素，优化综合防控技术条件。

5 主要技术内容

5.1范围

由于目前我国有色金属冶炼工业场地以重金属污染为主要特征，局部重污染地块土壤采用的修复技术以稳定化填埋、改良监控为主，淋溶、阻隔监控在工业堆浸场地已经成功应用，其在土壤修复过程污染防控可以借鉴应用。

因辐射防护专业性强，在常用有色金属冶炼污染场地也很少遇到，而水泥窑协同处置污染土壤或者玻璃化的污染防控标准已经由生态环境部颁布了相关标准，相关污染监控比较成熟。因此，本文件不包含上述范围。

5.2 规范性引用文件

本文件列出了直接引用其相关条文及主要含义、要求的现行标准。

5.3 术语及定义

为了更好理解本文件，列出主要术语及其定义，国家、行业标准相同的术语除本文件指明限制的定义外可从其定义，没有或者不同的术语以本文件为准。

5.4 场地分类修复及污染产生

以有色金属类别、污染特征进行了分类，便于筛选修复技术。

根据不同有色金属类别、场地污染特征类别、明确修复模式和修复工艺流程及其污染产生节点，为修复过程中次生及二次污染的综合预防和控制提供支撑条件。

5.5修复过程污染防控

5.5.1土壤修复工程施工进场污染防控

施工队伍和设备材料进场需要修筑临时道路、平整施工场地，包括土壤开挖、运输和平整过程，主要采用挖掘机、推土机、铲装机作业。污染场地开挖、装卸、运输、堆存污染物（土壤及附着物）等过程次生土壤中释放气体、粉尘及设备排放尾气和噪声等污染物，需要对使用的设备，如挖机和运输车辆应保养，防止排气和噪声超标，开挖前对土壤进行洒水，开挖时在作业面需喷雾，车辆、机械离场应清洗防止夹带泥土进入道路产生扬尘。场地基坑污水和初期雨水含矿物油、泥沙等，不能直接排入地表水体，应该设置混凝反应、沉清及过滤池等净化处理。

场地修复过程造成土壤扰动，容易被雨水冲刷，应采取扰动面覆盖、围挡等水土保持措施。

土壤挖掘、输送，污染阻隔工程施工等过程，泥土含水率需要控制，减少粉尘产生及噪声排放；土壤堆存场地不能暴露堆放减少扬尘和雨水淋溶；设备和场地清洗废水含有泥浆、土壤污染物等，应收集处理，防止污染地表水体。

5.5.2 修复过程的破碎、筛分、化学反应、养护和检验等工序污染预防措施包括配料、加料口密闭、吸风除尘净化，堆放场地清扫前需要定时喷雾洒水减少粉尘，搅拌设备的轴承、电机定期维护降低设备噪声。

5.5.3 退场污染防控

修复队伍和设备退场、质保期维护、污染监测过程会产生粉尘、污水、固体废物、噪声等污染，需要采用喷雾洒水、污水收集处理、固体废物分类利用或处置、消声隔声等措施防止对周边环境影响。

5.6 修复过程污染治理

5.6.1 破碎、筛分、干燥、脱附过程污染治理：

土壤破碎、筛分、干燥、脱附过程释放气体和粉尘一般先采用布袋除尘再进活性炭吸附除臭处理，或者直接采用洗涤塔喷淋、除雾、除尘、除臭处理。

设备噪声采用隔声罩治理。

设备清洗废水、场地清洗水采用中和、絮凝沉淀、过滤处理，必要时增加生物化学、氧化还原、吸附或膜过滤等深度处理。

5.6.2 稳定化和淋洗修复过程污染治理

药剂投加反应过程产生的挥发性有害气体（异味、恶臭等）、气溶胶、颗粒和土壤稳定化、淋洗过程释放挥发性有害气体采用化学洗涤塔净化，可满足环保要求。

淋洗废水一般采用物理、化学和生化处理后循环利用，排放时一定要达到当地环保要求。

噪声治理措施以对高噪声设备采用隔声罩方式为主进行治理。

试剂制备过程产生的挥发性有害气体、气溶胶，采用化学洗涤塔净化， 槽罐清洗废水采用中和、混凝沉淀、过滤等措施处理，以满足环保要求。

5.7 修复过程污染治理可行技术

5.7.1 含尘气体污染治理可行技术

露点以上含尘气体采用布袋除尘比较经济、合理。

露点以下由于容易堵塞过滤材料，采用洗涤方式比较可行。

5.7.2 含酸性、恶臭(氨、硫化氢)气体污染治理可行技术

化学洗涤、催化反应净化技术可达到环保要求。

5.7.3 废水污染治理可行技术

化学中和、重金属捕集、混凝沉淀等技术可达到排放标准。

过滤、吸附、膜分离等处理技术可达到回用或特别排放要求。

5.8 污染监测和综合管控

5.8.1 修复过程污染监测

修复过程污染监测是防治污染的重要手段，包括对修复地块的空气质量监测、地表水水质监测、地下水水质监测、环境噪声监测。一般需要进行三次取样监测，启动前、全部启动后和修复后各不少于一次，发现异常情况需要补充监测。一般修复前可选择性监测，修复中监测需要按照风险环评要求进行监测，修复后监测可与竣工监测同步进行。

5.8.2 修复过程环境管理

主要包括修复工程的物料堆存、围挡管理、修复过程密闭喷水等粉尘控制、废气和废水治理措施维护、固体废物排放处置登记管理和施工噪声控制管理、施工过程的环境监理和环境监测跟踪记录等。

修复过程环境管理的好坏，影响修复工程质量，也对修复过程污染防控有效性实施监督和管理，一方面需要有管理制度，另一方面需要监督检查和考核，才能起到环境管理的作用。

5.8.3 修复过程应急措施

修复过程应设置安全应急措施主要针对污染场地污染物清理过程防泄漏、雨淋措施，药剂配置和添加等过程对泄漏药剂收集利用或处理，对操作人员需要配备安全卫生防护用品、穿戴及相关应急救援措施等应急管控措施。

6 实施本标准的成本和效益分析

6.1 本标准实施成本分析

本文件仅作为有色金属冶炼场地修复过程污染防控的方案编制、实施操作、监督管理的技术参考资料，没有强制性功能，不具有执法依据。因此，其没有监督、执行等实施成本。

6.2 实施效益简要分析

6.2.1 环境效益

1）由于国家和国际上没有与本文件相同或针对场地修复的污染综合防控标准或指南，因此其对重点监控的有色金属冶炼工业场地修复过程中污染防控具有指导作用。

2）本文件与国家、行业现有标准完全对接，没有超越或附加限制要求，体现在合理利用自然条件消减、节点防控监控，因此，执行过程主要体现间接、长远的生态环境正效益。

3）实施本指南不仅可以促进有色金属冶炼行业污染场地修复在制订修复方案时，为预防和控制修复过程二次污染，需要合理选择修复模式、修复技术、设备、材料，还需要配备修复过程污染治理设施，以达到在修复过程中发生污染事件。

6.2.2 社会效益

1）本文件实施，可推动我国工业污染场地修复的技术、装备、管控等主要环节实现全面系统化发展。

2）由于国家和行业目前主要颁布实施了场地修复的环境调查、风险评估、修复技术指南、修复导则等，还没有制订颁布修复过程污染综合防控技术指南、导则等标准，本文件会起到示范、借鉴作用，为场地修复标准体系完整性提供了支撑。

3）本文件通过在有色金属冶炼行业应用，在实践过程中其经验也会对其他类似工业场地修复过程污染防控起到借鉴作用。

6.3 相关说明

稳定化、淋洗修复和辅助的污染隔离技术是目前有色金属冶炼场地污染修复普遍采用的技术，由于国家和行业目前还没有出台修复过程污染控制标准，因此本文件不仅对有色金属冶炼行业场地修复污染综合防控具有指导作用，也对国内外同类工程污染综合防控具有参考借鉴作用，为贯彻习近平生态文明思想，落实党中央生态文明建设要求具有积极的现实意义。

7 对本标准实施的相关建议

7.1 标准执行

本文件是针对有色金属冶炼场地稳定化或淋洗修复过程的污染综合防控指导性技术规范，适用于该类场地修复方案编制、评审及环境风险评价时参考使用，不具有强制性要求。

7.2 标准完善

本标准中所列可行技术是根据当前有色冶炼场地修复技术的应用情况推荐确定的。在实施过程中，要结合国家、地方污染地块修复要求的变化、政策调整以及新型技术发展情况，及时对相应污染防控和治理技术进行修订和更新。

7.3 其他建议

本文件是在收集国内外相关文件，结合有色金属冶炼场地修复典型案例调研和总结的基础上编制，难免存在代表性不足的问题。如管理部门和应用单位、研究人员对本标准有合理的意见或者建议，可向标准管理部门、主要起草单位提供相关材料，适时启动对本文件进行修改完善，可更新版本或发布修改单。