



《铬污染场地原位修复技术指南 矿物—电
化学还原稳定法》（征求意见稿）
编制说明

《铬污染场地原位修复技术指南 矿物—电化学还原稳定法》

编制组

2023年10月7日

目 次

一、工作简况	1
1 任务来源	1
2 协作单位	1
3 制定背景	1
4 起草过程	2
5 标准主要起草人及其所做工作	3
二、标准编制原则和确定主要内容的论据	4
1 标准编制原则	4
2 主要内容及其确定依据	4
三、试验验证的分析、综述报告，技术经济论证，预期的经济效益、社会效益和生态效益	10
1 试验验证的分析、综述报告	10
2 技术经济论证	11
3 预期的经济效益、社会效益和生态效益	11
四、与国际、国外同类标准技术内容的对比情况，或者与测试的国外样品、样机的有关数据对比情况	12
五、以国际标准为基础的起草情况，以及是否合规引用或者采用国际国外标准，并说明未采用国际标准的原因	13
六、与有关法律、行政法规及相关标准的关系	13
七、重大分歧意见的处理经过和依据	14
八、涉及专利的有关说明	14
九、实施标准的要求，以及组织措施、技术措施、过渡期和实施日期的建议等措施建议	14
十、其他应予说明的事项	16

《铬污染场地原位修复技术指南 矿物—电化学还原稳定法》编制说明

一、工作简况

1 任务来源

本任务来源于 2019 年北京大学承担的科技部重点研发计划项目“铬渣遗留场地土壤强化生物修复技术与装备”（项目编号：2019YFC1805900），主编单位北京大学作为课题承担单位负责《铬污染场地矿物质强化微生物及日光燃料电池治理技术与装备示范验证》（课题编号：2019YFC1805901）研究工作。该任务针对铬污染场地，研发矿物—电化学还原稳定法原位修复技术与装备，开展试验示范，为国家铬污染场地风险管控和修复治理等提供科技支撑服务。为了进一步将项目研究成果和工程经验进行转化、推广，结合项目任务和当前铬污染场地修复治理的需求，提出编制本技术指南。

2 协作单位

根据中华环保联合会《关于征集“固危废及土壤污染治理团体标准项目”的通知》（中环联字〔2021〕81号）的要求，由北京大学作为项目承担单位，湖南师范大学作为项目协作单位，联合承担《铬污染场地原位修复技术指南 矿物—电化学还原稳定法》标准项目的编制工作。

3 制定背景

我国为铬盐生产和消费大国，由此产生的铬渣堆放和铬盐厂遗留场地分布较广泛，造成土壤和地下水铬污染问题长期存在。再加上我国地域辽阔，场地土质和地下水特征差异显著，使得不同场地铬污染

物迁移转化规律复杂多样，传统修复技术远不能满足铬污染场地土壤和地下水防治需求，导致我国场地铬污染问题长期得不到有效解决。近年来，多个单位采用多种技术对场地铬污染实施工程防治，由于工程技术适用性较差，防治效果不佳，亟待开发共性治理关键技术和装备。

4 起草过程

2022年9月，北京大学在北京组织召开科技部重点研发项目《铬渣遗留场地土壤强化生物修复技术与装备》内部会议，提出《铬污染场地原位修复技术指南 矿物—电化学还原稳定法》的编制工作；

2022年10月，北京大学在河南新乡召开《铬污染场地原位修复技术指南 矿物—电化学还原稳定法》团体标准启动会，明确由北京大学作为标准承担单位、湖南师范大学作为标准协作单位，并成立标准编制组；

2022年11月，标准编制组在线上召开《铬污染场地原位修复技术指南 矿物—电化学还原稳定法》团体标准讨论会，确定了标准的编写框架与核心内容；

2023年3月，标准编制组在河南新乡召开《铬污染场地原位修复技术指南 矿物—电化学还原稳定法》团体标准讨论会，参编单位对标准初稿进行讨论并提出修改意见；

2023年6月，标准编制组在北京召开《铬污染场地原位修复技术指南 矿物—电化学还原稳定法》团体标准讨论会，参编单位基本同意标准初稿的框架与内容，并进一步提出优化建议；

2023年7月，标准编制组在北京召开《铬污染场地原位修复技术指南 矿物—电化学还原稳定法》团体标准讨论会，参编单位一致同意标准初稿内容并在会后形成草案稿；

2023年8月，中华环保联合会组织专家进行立项评审，专家组一致通过《铬污染场地原位修复技术指南 矿物—电化学还原稳定法》标准立项；

2023年9月，中华环保联合会组织专家针对标准草案稿召开技术审查会，标准编制组根据评审意见修改并形成《铬污染场地原位修复技术指南 矿物—电化学还原稳定法》征求意见稿。标准内容包括：范围、规范性引用文件、术语和定义、总体要求、前期准备、工艺设计、工程实施及运行与管理；

送审稿、报批稿等后续流程将在中华环保联合会组织下按期有序进行。

5 标准主要起草人及其所做工作

本标准主要起草人为鲁安怀、丁竑瑞、姬翔、周川野、易立文。

起草人鲁安怀提出技术原理，明确技术研发路径，为技术从实验室开发到现场应用制定时间表。

起草人丁竑瑞负责试验设计，主要包括从小试、中试到示范工程的系列试验方案及施工方案的设计。

起草人姬翔负责该技术成果在现场的应用转化工作，主要包括材料购买、设备组装及调试、电极单元拼接与下井、采样分析等工作。

起草人周川野负责标准编制相关内容，主要包括国内外相关技术

的调研、技术主要内容的梳理及标准编制过程中相关文件的撰写。

起草人易立文在标准文件编制过程中协助收集相关资料并协助修改标准文件。

二、标准编制原则和确定主要内容的论据

1 标准编制原则

《铬污染场地原位修复技术指南 矿物—电化学还原稳定法》的制订基本原则：

本标准按照 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》的要求进行编写；

符合相关法律、法规和有关规定，在编制过程中充分考虑技术内容的科学性、适用性和可操作性；

坚持问题导向，充分考虑我国铬污染土壤修复以及修复后用地规划等方面的现实问题，提出矿物—电化学还原稳定法原位修复的问题解决思路。

2 主要内容及其确定依据

2.1 第4章总体要求

4.1 主要规定了矿物—电化学还原稳定法原位修复技术的总体原则。应用矿物—电化学还原稳定法原位修复技术坚持绿色低碳、科学性、统筹性、规范性、可行性、针对性、安全性的原则，以符合国家对于土壤、地下水修复的方针政策。

4.2 主要规定了矿物—电化学还原稳定法原位修复技术的选择原则。该修复技术可单独使用，也可配合其它六价铬修复技术使用，在

铬污染浓度较低时，宜联用其它适用于中低浓度铬污染场地的原位修复技术。

4.3 主要规定了矿物—电化学还原稳定法原位修复启动前的考察要求。宜在修复启动前着重收集待修复区域土壤\地下水的酸碱度、电导率及含水率等相关资料。酸碱度、电导率及含水率等参数影响该技术的参数设计。

4.4 主要规定了修复过程中电极井与监测井建设原则。电极井与监测井建设应遵循HJ 164 相关规定。

4.5 主要规定了矿物—电化学还原稳定法原位修复的技术参数确定原则。矿物—电化学还原稳定法原位修复的技术参数宜通过小试、中试来确定。

4.6 主要规定了修复过程中材料使用、技术施工等要求。材料的选择使用不应造成二次污染，施工及修复过程应采取必要的污染防治措施，并符合HJ 25.4 及HJ 25.6 的规定。

4.7 主要规定了修复过程中劳动安全和职业卫生的要求。涉及到的劳动安全和职业卫生应符合GB/T 12801 的规定。

4.8 主要规定了修复过程中电气设备安装、使用、维修要求。相关操作应符合GB/T 13869 相关规定以确保施工人员安全。

2.2 第 5 章前期准备

5.1 主要规定了核查资料信息的着重点。

5.2 主要规定了采样及分析的参考标准和分析内容。

5.3 主要规定了施工前的注意事项。

5.4 主要规定了修复前污染源的处理要求。

2.3 第6章工艺设计

6.1 节是工艺设计的一般规定。宜通过小试、中试等方式确定矿物—电化学还原稳定法的技术参数和设计内容。对于含水率低于 10% 的铬污染土壤，可通过滴灌、覆膜、添加生物炭的方式来增加土壤导电性和物质传输能力，扩大电极井的有效半径。

6.2 节内容是矿物材料的选择与预处理的要求。

6.2.1 主要规定了矿物材料的选择要求。对矿物材料的选择要求如电子供给能力、磁性及有效还原成分比例做了说明，并给出推荐选择的矿物原材料。

6.2.2 主要规定了矿物材料的预处理要求。矿物材料应综合考虑强化还原固定六价铬的效果、颗粒团聚性、经济适用性；考虑到可能出现矿物材料堵塞电极井的情况，指南中给出了应对措施。

6.3 节内容是电极单元设计原则。

6.3.1 主要内容是载体的选择要求。包括载体的要求、载体加工的规定和载体管制作的规定。

6.3.2 主要规定了电极带的选择要求。电极带具有良好导电性与耐腐蚀性是确保电化学修复体系能稳定运行；对于具有导电性的矿物材料，作为电极带涂层是为了提高电极表面六价铬的还原固定效率。

6.3.3 主要规定了电极单元的组装要求。电极带与载体应以螺旋缠绕的方式连接，以保证牢固性；同时规定了电极单元内部应为后续安装传感器预留空间。

6.4 节内容是电源系统选择要求。为符合国家绿色低碳的土壤/地下水修复方针政策，推荐使用太阳能电源系统。与常规供电系统相比，

需增加可调直流稳压电源模块。

6.5 节内容是在线监测系统的组成要求。在线监测系统宜包含电导率、含水率、酸碱度及氧化还原电位传感器；数据采集仪；户外监控器；物联网模块。修复过程中，会根据监测的各参数变化对技术参数作出调整。

6.6 节内容是电极井与监测井设计原则。电极井与监测井布设应契合污染物分布特征。

6.6.1 主要规定了电极井设计原则。

6.6.1.1 对电极井纵向剖面图及电极带结构进行了图示说明。

6.6.1.2 主要规定了电极井空间分布要求，并进行了图示说明。

6.6.1.3 主要规定了电极井的间距要求。间距应根据场地含水率、导电率来确定。

6.6.1.4 主要规定了电极井深度要求。

6.6.1.5 主要规定了矿物材料添加量确定的步骤。

6.6.1.6 主要规定了电势梯度及电流控制的要求。

6.6.2 主要规定了监测井设计原则。

6.6.2.1 主要规定了监测井空间分布的要求。根据污染场地水文地质条件与污染情况，合理设置以满足HJ 25.2、HJ 25.6 相关标准。

6.6.2.2 主要规定了监测井深度要求。

2.4 第 7 章工程实施

7.1 说明了电极井成井时，矿物材料的填充方式。

7.2 说明了应在修复启动前做好户外防水配电柜、电源系统相关设备组件的安装及调试工作。

7.3 说明了应根据电极井空间分布在现场合理布设线缆。施工前应了解地下是否有其它设施，如管道、电缆、水源等。

7.4 说明了现场电极单元的制作过程，给出了电极单元下井时的建议。

7.5 说明了传感器应随电极单元同步下井，做好在线监测控制系统的调试工作。

7.6 说明了修复启动时电极单元应按电极井空间分布设计接入可调直流稳压电源正负极。

2.5 第 8 章运行与管理

8.1 主要规定了矿物—电化学还原稳定法原位修复系统的维护时间原则。运行初期应多次检查各装置运行情况。

8.2 主要规定了电极井及电极带的检查修补原则。对于钻井深度大于含水层埋藏深度的电极井，宜每 2-3 个月将电极单元抽出以检查载体间连接有无松动，若有应及时固定或替换载体；同时宜检查电极带有无严重腐蚀或破损，若有应更换电极带或用导电材料修补破损位置。

8.3 主要规定了电极单元的矿物材料更换原则。若六价铬修复速率在未达到修复目标值前明显放缓，可将内置于电极单元的矿物材料取出更换。

8.4 主要规定了矿物—电化学还原稳定法原位修复系统的开关原则。当六价铬浓度不可检测或是低于修复目标值时，可暂时关闭矿物—电化学还原稳定法原位修复系统。

8.5 主要规定了矿物—电化学还原稳定法原位修复系统的拆除原则。确定六价铬污染无明显反弹后可将电极单元拆除，后续可再多次使用。

8.6 主要规定了过程监测的要求。包括监测参数、监测点位、监测频次、监测系统。

8.6.1 修复过程中监测参数包括：总铬、六价铬、电导率、酸碱度、氧化还原电位、温湿度等。电导率酸碱度、氧化还原电位、温湿度等通过在线监测控制系统记录，总铬、六价铬应现场采样后尽快送实验室测试分析。此外，可根据实际需求监测水质总硬度、溶解氧等其他参数的变化。

8.6.2 土壤与地下水的原位监测点位不宜小于最深的修复深度，取样深度间隔可参考HJ 25.2 及HJ 25.6 相关标准。

8.6.3 总铬、六价铬的监测在修复开始后第 1 个月内应至少进行 3 次，分别在第 1 周、第 2 周、第 4 周进行监测，随后可按月间隔开展取样监测。可根据实际需要适当加密监测频次。

8.6.4 电导率、酸碱度、氧化还原电位、温湿度等数据可通过在线监测控制系统实时监测。结合总铬、六价铬等监测数据可选择调整修复技术参数或补充矿物材料。在环境参数没有较大波动下，确保六价铬下降趋势总体稳定。

8.7 主要规定了效果评估的要求，包括修复终点值判定、评估标准、评估方法与长期监测频次。

8.7.1 土壤/土壤渗滤液/地下水修复终点以修复方案中的修复目

标值来判定，同时符合HJ 25.5、HJ 25.6的相关规定。

8.7.2 土壤/土壤渗滤液/地下水中六价铬含量达到修复终点后且稳定后，可进行修复效果评估。采样持续时间、频次、布点数量及位置等可参照HJ 25.2、HJ 25.5、HJ 25.6相关标准执行。

8.7.3 对土壤样品采取蒸馏水提取水溶态、乙酸提取弱酸溶态、过氧化氢和乙酸铵提取可氧化态、盐酸-硝酸-氢氟酸-高氯酸提取残渣态，以分析六价铬修复稳定性。具体方法可参照BCR法和Tessier提取法。

8.7.4 修复完成后长期监测可 1-2 年开展一次。

三、试验验证的分析、综述报告，技术经济论证，预期的经济效益、社会效益和生态效益

1 试验验证的分析、综述报告

本标准相关技术经实验室小试、原位放大中试及现场示范工程验证，主要验证试验包括：溶液或土壤中的六价铬在矿物—电化学还原法处理下，其六价铬及总铬浓度在固定监测点位随时间的变化；矿物材料在反应前后其化学成分、晶体结构及表面形貌等变化；污染介质中新生成的含铬物相的成分及结构表征。以上测试分析涉及紫外可见分光光度计、电感耦合等离子发射光谱、X射线衍射仪、拉曼光谱及环境扫描电子显微镜等测试分析仪器。在实验室小试阶段，研究了不同电势梯度、不同矿物材料填加量及矿物材料不同的填充位置下，矿物—电化学法对不同浓度铬污染溶液或模拟土壤中铬的处理效果。在原位放大中试阶段，设立了若干反应池，施加电势梯度为小试试验中

最佳条件；矿物材料添加量为小试试验中最试验添加量。在现场示范工程阶段，于湖南和河南等地铬污染场地开展现场污染治理工程建设，现场工艺参数参照小试、中试最佳试验条件制定。

以上小试、中试及现场示范工程均展现出良好的铬修复效果，为标准的发布实施奠定了必要基础。

2 技术经济论证

本标准在使用矿物—电化学法原位修复铬污染场地提供了基本框架，包括电极井的布设、矿物材料的选择与处理、载体的选择、电极材料的选择及相关参数的设定。

本标准目的是对应用矿物—电化学法原位修复铬污染场地进行规范，考虑到铬污染场地治理现状与未来发展需求，该标准技术具有广阔应用前景。

本标准具有一定经济效益，矿物材料相比传统化学试剂的成本偏低或持平，太阳能供电绿色环保且经济适用性随着使用周期长度的增长而增长，矿物—电化学系统相比传统电动修复或化学修复成本更加可控。

3 预期的经济效益、社会效益和生态效益

本标准规定了铬污染场地矿物—电化学还原稳定法原位修复的总体要求、工艺设计、工程实施及监测与效果评估等技术内容。本标准的实施能够有效规范矿物—电化学还原稳定法原位修复技术在铬污染场地治理行业的应用，并指导行业运行实践。

四、与国际、国外同类标准技术内容的对比情况，或者与测试的国外样品、样机的有关数据对比情况

国外铬污染相关标准在风险管控基准值和限值方面做出了详细的规定。美国于 1986 年建立了污染土壤人体健康风险评估技术方法，通过毒理效应和暴露模型等评估污染物的致癌和非致癌健康风险，推算了土壤中三价铬和六价铬的管制值。同时，国外对不同产品中六价铬进行了非常严格的限制，2014 年 3 月欧盟委员会发布的第 301/2014 号文件中明确规定了皮革产品中六价铬的限值，如与皮肤直接接触的皮革类产品中六价铬的最高浓度为 3 mg/kg。2018 年加拿大《联邦环境质量指南》的水质指南中提出保护水生生物免受六价铬不良影响的浓度为 5 µg/L。以上标准对铬污染场地风险评估及后续修复效果监测具有一定的参考意义。

此外，针对铬污染原位修复国外也制定了相关技术指南。美国环境保护署提出的《铬污染土壤和地下水的原位处理-技术资源指南》汇集了有关铬污染地下水/土壤的原位处理和控制的技術，包括地球化学固定、可渗透性反应墙（PRBs）和反应带、增强提取、电动力学、生物修复、自然衰减和植物修复等，详细描述了每个技术优缺点、状态、性能和成本等，并进行了对比总结。联邦修复技术圆桌会议提出《原位化学还原》介绍了几种广泛应用的化学还原技术，包括原位化学还原与生物联合修复技术、原位生物地球化学转化技术、原位催化还原脱氯技术、原位氧化还原技术等，对技术应用中土壤混合的机械设计、成本和实际应用相关因素等信息进行了介绍。美国环境保护

署固体废物与应急反应技术创新办公室提出的《金属污染土壤原位处理的最新进展》总结了电动修复技术、原位植物修复技术、土壤淋洗、原位固定/稳定化技术现状，分析了每种方法的效果、成本以及适用的现场条件，为污染场地修复措施的选择提供参考。但是，目前国外专门针对矿物—电化学还原稳定法原位修复铬污染场地的相关技术标准仍然缺乏。

五、以国际标准为基础的起草情况，以及是否合规引用或者采用国际国外标准，并说明未采用国际标准的原因

本团体标准未以国际标准为基础起草，因无一致的技术标准。对相关标准信息检索，检索关键词“电化学修复”、“矿物修复”未发现相关国家标准、行业标准及地方标准，检索关键词“electrochemical remediation”、“mineral remediation”未发现相关国际及国外标准。

六、与有关法律、行政法规及相关标准的关系

与本标准技术规范制定相关的标准文件主要有：GB/T 12801《生产过程安全卫生要求总则》、GB/T 13869《用电安全导则》、GB/T 31852《铬渣处理处置规范》、HJ 25.1《建设用地土壤污染状况调查技术导则》、HJ 25.2《建设用地土壤污染风险管控和修复监测技术导则》、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》、HJ 25.6《污染地块地下水修复和风险管控技术导则》、HJ 164《地下水环境监测技术规范》、HJ 613《土壤 干物质和水分的测定 重量法》、HJ 802《土壤 电导率的测定 电极法》、HJ/T 166《土壤环境监测技术规范》。本标准在制定时主要结

合国内外实际应用案例，并与以上各标准和规范的共性要求保持一致，针对铬污染场地矿物强化电化学原位修复技术的具体问题做出切实可行的规定和指南。

本标准总体要求中基本原则引用了 HJ 25.1《建设用地土壤污染状况调查技术导则》、HJ 25.4《建设用地土壤修复技术导则》和 HJ 25.6《污染地块地下水修复和风险管控技术导则》，电极井及监测井建设引用了 HJ 164《地下水环境监测技术规范》的规定，劳动安全和职业卫生引用了 GB/T 12801《生产过程安全卫生要求总则》的规定，电气设备安装、使用、维修参考了 GB/T 13869 相关规定。

本标准工艺设计章节中样品的采集及相应的测试分析方法参照了 HJ/T 166《土壤环境监测技术规范》、HJ 613《土壤 干物质和水分的测定 重量法》、HJ 802《土壤 电导率的测定 电极法》。电极井与监测井建设参考了 HJ 164《地下水环境监测技术规范》、HJ 25.2《建设用地土壤污染风险管控和修复监测技术导则》、HJ 25.6《污染地块地下水修复和风险管控技术导则》。

本标准运行与管理章节中对内置于电极单元中被更换的矿物材料的处置主要参照 GB/T 31852《铬渣处理处置规范》。

七、重大分歧意见的处理经过和依据

本标准项目未发生重大分歧意见。

八、涉及专利的有关说明

本标准项目未发现有关知识产权问题。

九、实施标准的要求，以及组织措施、技术措施、过渡

期和实施日期的建议等措施建议

该标准适用于大多数铬污染场地，尤其适用于渗透性较差、其它技术难以适用的铬污染场地。该标准适用于各个浓度的铬污染场地，但在低浓度铬污染情况下修复速率可能较慢，此时宜联用其它修复技术如微生物修复。实施该标准前，应核查污染地块污染源，确保污染源被清除或阻断。该标准中的技术主要受场地电导率与含水率影响，标准实施时应按技术指南中工艺设计部分的要求合理布设电极井及调节电压电流，必要时可通过添加生物炭、滴灌、覆膜等方式来增加场地电导率与含水率。该标准实施过程中具体涉及到钻井、矿物材料的选择与处理、电极单元部分的制作与下井、电源系统及在线监测系统的搭建，尤其要注意矿物材料的选择与处理应符合工艺设计规定。

该标准实施过程中，确立项目首席，统揽全局。同时扁平化管理按工作需求成立若干小组。小组长带领成员定期调研现场情况，做好相关记录并分析可能的技术风险、市场风险及政策风险，并在后续的内部研讨会上向项目首席汇报，探讨技术应用优化措施，确保标准项目的顺利推进。

该标准使用太阳能电源以减少能源消耗；提前制作载体减轻现场劳动强度、提高生产效率；电化学修复系统使用低压直流电保障施工人员安全；矿物材料选择无毒无害不造成二次污染，且使用环保材料进行分装避免填充过程中矿物颗粒吸入人体。

本标准过渡期自技术指南发布之日起，持续至协会指定的过渡期结束日期。过渡期内相关组织与个体应积极参与，逐步适应新技术指

南的要求，并将其整合到正在进行或即将进行的铬污染场地修复实践中。在适应过程中，相关组织或个体应审查并更新其原位修复工作流程、方法和计划，如有必要应更新或升级设备、工具及材料，以满足该标准技术要求。待相关组织或个人基本适应该标准后，确定标准实施日期。

十、其他应予说明的事项

无。

