

# 原位阻隔技术在遗留污染场地治理中的应用

刘安富<sup>1</sup> 张修磊<sup>2</sup> 乔雄彪<sup>1</sup> 刘慧芳<sup>1</sup>

(1. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038; 2. 潍坊市水利建筑设计研究院有限公司, 山东 潍坊 261205)

**[摘要]** 结合实际工程案例,总结了原位阻隔技术在遗留污染场地治理中的应用经验,主要涉及治理目标确定、总体技术方案的比选、垂直防渗系统的建立、封场技术等。场地修复目标的确定和技术路线的选择应以风险评估结论为基础,并综合考虑土地利用规划、修复时间、修复成本等因素。生态阻离区的划定应尽可能封存控制绝大部分污染土壤,减小污染土壤开挖量;垂直防渗墙结构形式应综合考虑墙体渗透性要求、地层岩土性质、施工成本、作业空间等因素综合确定,墙体渗透系数应达到 $10^{-7}$  cm/s数量级,垂直防渗墙底部进入相对不透水层的深度不小于2 m,可同步采取帷幕灌浆、地下水抽提方式。

**[关键词]** 污染场地修复; 风险管控; 原位阻隔; 垂直防渗; 地下水; 土地污染; 帷幕灌浆; 危险固废

**[中图分类号]** TF843 **[文献标志码]** B **[文章编号]** 1008-5122(2021)03-0051-05

**DOI:** 10.19610/j.cnki.cn11-4011/tf.2021.03.013

## Application of in-Situ Barrier Technology in the Treatment of Remaining Contaminated Sites

LIU An-fu, ZHANG Xiu-lei, QIAO Xiong-bi, LIU Hui-fang

**Abstract:** Combined with practical engineering cases, the application experience of in-situ barrier technology in the treatment of contaminated sites was summarized, mainly involving the determination of treatment objectives, the comparison and selection of overall technical schemes, the establishment of vertical seepage control system, and field closure technology. The determination of site restoration objectives and the selection of technical routes should be based on the conclusion of risk assessment, and the factors such as land use planning, restoration time and restoration cost should be comprehensively considered. The delineation of ecological isolation area should seal and control the vast majority of contaminated soil as much as possible, and reduce the excavation amount of contaminated soil. The structure form of vertical cut-off wall should comprehensively consider the permeability requirements of the wall, the rock and soil properties of the stratum, the construction cost and the working space. The permeability coefficient of the wall should reach the order of  $10^{-7}$  cm/s. The depth of the bottom of the vertical cut-off wall entering the relative impervious layer was not less than 2 m, and the curtain grouting and groundwater extraction can be adopted simultaneously.

**Key words:** contaminated site restoration; risk control; in-situ blocking; vertical barrier; groundwater; land pollution; curtain grouting; hazardous solid waste

**[收稿日期]** 2021-01-27

**[作者简介]** 刘安富(1984—),男,山东聊城人,硕士,工程师,从事土壤修复、矿山修复、流域水环境治理等技术工作。

**[引用格式]** 刘安富,张修磊,乔雄彪,等. 原位阻隔技术在遗留污染场地治理中的应用[J]. 有色冶金节能,2021,37(3):51-55.

## 0 前言

目前污染场地<sup>[1]</sup>治理模式主要有场地修复、风险管控及两者的组合。场地修复是指彻底清除场地内的污染源,消除污染源对外界环境的影响;风险管控是通过工程措施将污染对外界环境的影响控制在

安全范围内,并辅以长期跟踪监测。原位处置技术是污染场地治理中应用较广泛的风险管控措施,主要应用于不宜大范围开挖的污染土壤或固废、老旧垃圾填埋场整治、尾矿库防治、煤矸石山治理等领域。本文结合实际工程案例,总结了原位阻隔技术在污染场地治理中的应用经验,以期同类工程实施提供借鉴参考。

## 1 项目概况

南方某冶炼厂位于章江上游河畔,距离河岸直线距离 200 m,占地面积约 12 万 m<sup>2</sup>,场地现状如图 1 所示。该冶炼厂始建于 20 世纪 50 年代,于 2009 年废弃,采用火法冶炼工艺,主要产品为三氧化二砷、钴系产品、金锭、银锭,副产品为镍、铜等。由于冶炼工艺水平落后,环保意识薄弱,冶炼废渣在厂区内长期无组织堆积,加之冶炼厂废弃后无人管理,雨水长期冲刷,厂区土壤及地下水受到大范围污染,严重威胁周边居民健康,影响章江下游水质安全。

经前期场地环境调查,场地的污染包括遗留危废和第Ⅱ类一般工业固废,主要污染因子为重金属砷、镉、镍和铅。遗留危险固废方量约 180 m<sup>3</sup>,主要是砷灰、烟道灰及污水池沉积多年的底泥;第Ⅱ类一般工业固废为冶炼废渣,方量约 4 000 m<sup>3</sup>。污染土壤约 40 万 m<sup>3</sup>,主要分布在地表下 1~3 m,局部深 8 m,污染土壤的砷含量最高达 37 800 mg/kg。

为了防控场地污染扩散,保障周边居民身体健康以及章江下游水质安全,针对该冶炼厂搬迁遗留污染场地开展治理工作十分必要紧迫。



图 1 场地现状图

## 2 项目修复目标

### 2.1 土壤及废渣修复目标

场地土地利用的规划为景观绿化用地,治理项目将其修复后开发为郊野公园。按照《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 36600—2018)规定,本场地属于第二类建设用

地<sup>[2]</sup>。项目风险评估确定场地的目标污染物<sup>[2]</sup>为砷、镉、镍和铅。基于风险评估值并综合考虑当地社会经济环境状况、土地利用规划、施工成本及实施周期等因素,最终确定的项目修复目标见表 1。

表 1 污染土壤及废渣修复目标值 mg/kg

关注污染物	风险评估值	筛选值	修复目标值
砷	50.00	60.00	50.00
镉	25.75	65.00	25.75
镍	96.56	900.00	96.56
铅	311.00	800.00	311.00

GB 36600—2018 要求当风险评估值小于筛选值时,修复目标取筛选值,但本项目是 2015 年完成的技术方案,而 GB 36600—2018 于 2018 年才发布,不过即使如此,项目修复目标值也是符合 GB 36600—2018 的规定。

### 2.2 危险固废处置目标

本场地遗留的危险固废采用专用危废吨袋打包后在场地内安全暂存,防渗标准参照《危险废物贮存污染控制标准》(GB 18597—2001)<sup>[3]</sup>执行,待赣州市危废中心建成后再外运进行安全处置。

### 2.3 地下水控制目标

地下水污染源于地表污染废渣和土壤<sup>[4]</sup>,根据环保规范处置污染废渣和土壤,隔离地下水与污染废渣和土壤的水力联系,间接控制和减轻地下水污染,并开展长期监测,实时预警。

### 2.4 场地生态恢复目标

按照土地利用规划,本场地为景观绿化用地,本项目将其修复后开发为郊野公园,重构生态景观,美化环境防治水土流失的同时,也娱乐周边居民。

## 3 项目技术路线

本项目技术路线的选取以场地调查和风险评估结果为基础,以实现修复目标为宗旨,本着“无害化、减量化、资源化”的基本原则,结合污染场地特征条件、目标污染物污染状况和迁移特性,并综合考虑场地空间、实施周期、施工成本等因素。

经方案比选(表 2),最终确定方案 3——场地内原位封存阻隔为项目总体技术路线,其技术流程如图 2 所示,典型工程做法如图 3 所示。该技术路线的核心是垂直隔离墙的底部要进入相对不透水层,形成垂向防渗,顶部则规范化封场,形成水平防渗,将污染土壤与外界环境隔离,最终实现污染场地管控目的。

表2 总体技术路线方案比选

序号	方案	技术路线	优点	缺点
方案1	场地外异位填埋阻隔	在场地外新建填埋场,将场地内的污染固废及土壤开挖外运作填埋处置	彻底消除场地污染	1) 场地内开挖范围广且量大,二次污染防治压力大。 2) 需场外选址新建填埋场,占用土地资源,可能造成新的污染。 3) 运输沿途发生遗撒,造成污染扩散。 4) 投资约9 000万元,造价高。
方案2	场地内异位集中填埋阻隔	在场地内新建填埋场,将场地内的污染固废及土壤开挖并集中封存隔离	污染防治效果相对稳定可靠	1) 没有彻底消除场地内污染。 2) 场地内开挖范围广且量大,二次污染防治压力大。 3) 投资约7 000万元,造价较高。
方案3	场地内原位封存阻隔	在场地内规划隔离区,将场地内的污染固废及土壤就地封存阻隔	污染防治效果相对稳定可靠;投资约5 000万元,造价低	1) 没有彻底消除场地内污染。 2) 需要定期抽排处理隔离区内积存的污水。

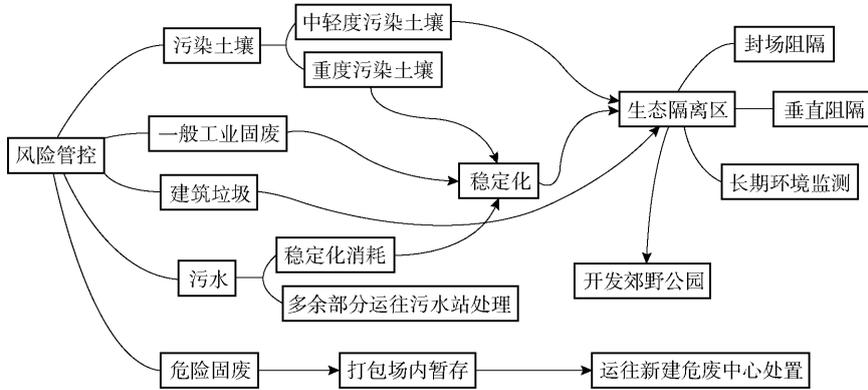


图2 原位封存阻隔工艺技术流程图

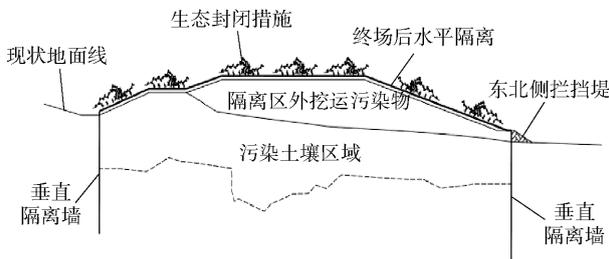


图3 原位封存阻隔工程典型做法

## 4 工程技术方案

### 4.1 水文地质概况

#### 4.1.1 地形地貌

冶炼厂主厂区建在走向约70°的山梁上,山梁

南侧与北侧均为沟谷,东侧(下部)宽大,西侧(上部)狭小;山梁自然坡度为15°~20°,山梁至两侧沟谷自然坡度为25°~30°,两侧沟谷均为U型谷,坡度不大;山梁最低高程处与东侧章江的平均高差为10 m。

#### 4.1.2 地表水

地表水的补给方式主要为大气降水,雨季时雨水沿着场地两侧山沟向东汇入章江。

#### 4.1.3 地下水

地下水主要为第四系松散岩类的孔隙水及基岩裂隙水,岩层本身不富水,主要靠大气降水及地表水入渗补给。

#### 4.1.4 垂直防渗墙轴线下卧岩土层渗透性

垂直防渗墙轴线下卧岩土层渗透性见表3。

表3 垂直防渗墙走向轴线下卧岩土层渗透性

岩土层名称	杂填土	粉质粘土	残积土	圆砾	强风化变质砂岩	中风化变质砂岩
渗透系数/cm·s <sup>-1</sup>	1.0 × 10 <sup>-2</sup> ~ 3.0 × 10 <sup>-2</sup>	1.5 × 10 <sup>-5</sup> ~ 2.9 × 10 <sup>-5</sup>	2.6 × 10 <sup>-5</sup> ~ 5.3 × 10 <sup>-5</sup>	6.0 × 10 <sup>-2</sup> ~ 9.0 × 10 <sup>-2</sup>	3.4 × 10 <sup>-4</sup> ~ 4.4 × 10 <sup>-4</sup>	1.1 × 10 <sup>-5</sup> ~ 3.3 × 10 <sup>-5</sup>
平均厚度/m	2.62	4.45	6.51	2.08	6.91	未揭穿

## 4.2 环保隔离区范围

环保隔离区范围的确定主要考虑以下几点:1) 隔离区应覆盖大部分被污染的土壤,特别是重度、中度污染土壤;2) 隔离区内能够形成一定的库容,用以堆存隔离区外开挖的污染物;3) 不影响南侧沟谷的行洪要求;4) 便于施工。

结合以上几点,综合考虑场地调查报告中污染土壤的空间分布情况,以砷的污染分布范围确定隔离区边界(图4),最终确定的环保隔离区面积为42 455 m<sup>2</sup>,周长为852 m,可直接封存污染土壤约30万m<sup>3</sup>,占污染土壤总方量的3/4,最大限度地减少污染土壤开挖,防控二次污染扩散,节省工程投资。

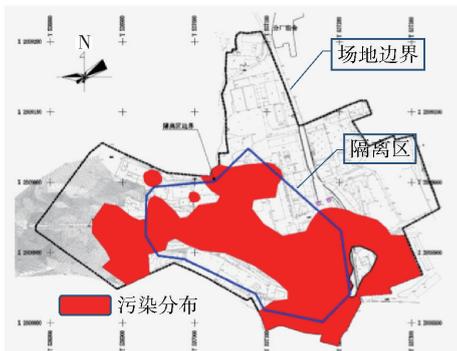


图4 生态隔离区边界范围

## 4.3 垂直防渗系统

垂直防渗系统应综合考虑场地水文、工程地质等条件,利用场地下方的不透水或弱透水层和相对独立的水文地质单元等条件,在场地四周或上游使

用防渗、防污性能良好的材料施工,形成垂向的帷幕或墙体将污染源封闭,使污染源与外界环境隔离,以阻止污染物进入周围土壤和水体,并防止地下水 and 地表水进入场地内,从而达到控制污染物扩散的效果<sup>[5]</sup>。

本项目下伏岩土层的渗透系数基本在 $10^{-4} \sim 10^{-5}$  cm/s量级,岩土层属于弱透水岩层,不具备形成含水层的条件,为本项目采用垂直隔离技术控制污染源扩散提供了有利条件。综合考虑墙体渗透性要求、地层岩土性质、施工成本等因素,经方案比选(表4),垂直防渗墙采用“塑性混凝土防渗墙+帷幕灌浆”方案,设计结构如图5所示。其中塑性混凝土防渗墙平均深度为10 m,底部进入相对不透水层的深度不小于2 m<sup>[6]</sup>;帷幕灌浆深度为5 m,可进一步降低相对不透水层的渗透性。此外,为了避免地下水外溢,在隔离区下游垂直防渗墙内侧设置3口渗滤液抽提井,其底部通过排渗盲沟相连通,在抽提井内设置液位泵。当隔离区内部水位高于外部水位时,即启动抽提井液位泵降低隔离区的内部水位,始终保持内部水位低于外部水位。

塑性混凝土防渗墙的设计厚度为60 cm,材料配比为水泥:砂子:石子:粘土:膨润土:水=135:640:920:145:70:280,施工前应进行验证试验,要求成墙渗透系数达到 $10^{-7}$  cm/s数量级,密度达 $19 \sim 21$  kN/m<sup>3</sup>,弹模值在200~1 000 MPa,28 d抗压强度大于2 MPa。

表4 垂直防渗墙结构形式方案比选

防渗技术	经济深度/m	渗透系数/cm·s <sup>-1</sup>	适用地层	方案比选
塑性混凝土防渗墙	40	$10^{-7}$ 数量级	一般地层均可,包括岩石地层等	防渗满足要求;造价适中
帷幕灌浆	100	$10^{-6}$ 数量级	岩石裂隙填充封闭	上部土层不适用
水泥搅拌桩防渗墙	20	$10^{-7}$ 数量级	壤土、砂土、粘土等	下部岩石层不适用
高压喷射灌浆防渗墙	25	$10^{-6}$ 数量级	砂类土、粘性土、黄土和淤泥等	下部岩石层不适用
垂直铺膜防渗体	30	$10^{-11}$ 数量级	壤土、砂土、粘土等	造价高;幅间密封可靠性难以保障

## 4.4 封场系统

场地拆除产生的建筑垃圾、稳定化处理后的重度污染土壤,以及隔离区外部的中、轻度污染土壤合计约18万m<sup>3</sup>,全部运往隔离区填埋,然后进行规范化封场<sup>[7]</sup>,封场结构如图6所示。隔离区外围开挖造成的基坑回填洁净土覆盖。

## 5 治理效果

目前项目已于2019年完工,工程建设投资约

5 000万元,地下水监测结果表明场地污染得到了有效控制。修复后的场地被建设为郊野公园(图7),恢复植被在防止水土流失的同时,重构生态景观,美化周边环境,娱乐周边居民。

## 6 结论

原位阻隔技术在污染场地治理修复中应用广泛,本文结合实际工程案例,总结了相关应用经验,主要得到以下结论:

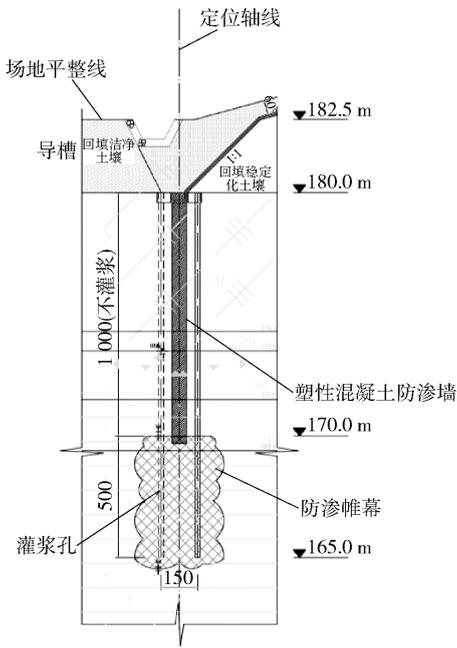


图5 “塑性混凝土防渗墙+帷幕灌浆”设计结构图

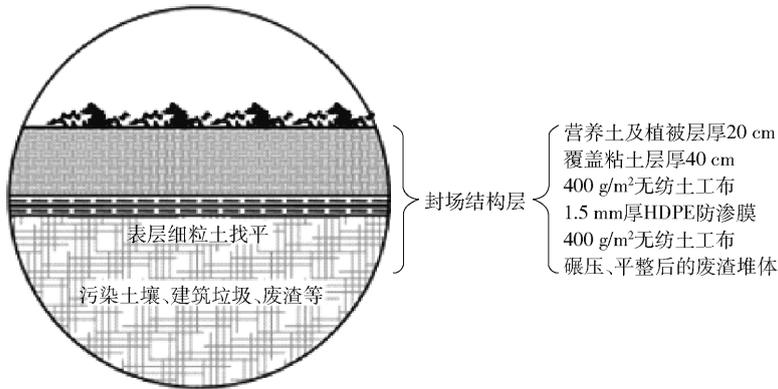


图6 封场结构图



图7 郊野公园效果图

[参考文献]

[1] 中华人民共和国生态环境部. 污染场地术语; HJ 682—2019[S]. 北京: 中国环境出版集团.  
 [2] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. 土壤环境质量

1) 场地修复目标的确定应以风险评估结论为基础, 并综合考虑土地利用规划、修复时间、修复成本等因素。

2) 生态阻隔区的划定应尽可能封存控制绝大部分污染土壤, 减小污染土壤开挖量, 防控开挖过程中二次污染。

3) 垂直防渗墙结构形式应综合考虑墙体渗透性要求、地层岩土性质、施工成本、作业空间等因素综合确定。垂直防渗墙作为环保工程地下水污染防治系统核心措施时, 墙体渗透系数应达到  $10^{-7}$  cm/s 数量级, 可以同步采取地下水抽提措施进一步加强防控效果。垂直防渗墙底部进入相对不透水层的深度应通过渗流计算确定, 一般建议不小于 2 m, 可以通过帷幕灌浆方式进一步降低相对不透水层的渗透性。

4) 利用封场后的场地进行景观公园开发利用时, 要确保防渗结构层的安全而不被破坏。

建设用地土壤污染风险管控标准(试行); GB 36600—2018[S]. 北京: 中国标准出版社.  
 [3] 国家环境保护总局. 危险废物贮存污染控制标准; GB 18597—2001[S]. 北京: 中国环境出版社.  
 [4] 生态环境部. 污染地块地下水修复和风险管控技术导则; HJ 25.6—2019[S]. 北京: 中国环境出版社.  
 [5] 钱学德, 朱伟, 徐洁青, 等. 填埋场和污染场地防污屏障设计与施工[M]. 北京: 科学出版社, 2017.  
 [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 生活垃圾卫生填埋场岩土工程技术规范; CJJ 176—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社.  
 [7] 国家环境保护总局. 一般工业固体废物贮存、处置场污染控制标准; GB 18599—2001[S]. 北京: 中国环境科学出版社.