

废弃矿井酸性涌水治理技术指南

Acid mine drainage treatment in abandoned mines

(征求意见稿)

XXXX—XX—XX 发布

XXXX—XX—XX 实施

四川省生态环境厅
四川省市场监督管理局

发布

目 次

前 言	II
1 适用范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 工作程序	3
5 修复与风险管控目标及范围确定	5
6 污染修复与风险管控技术筛选	6
7 编制修复与风险管控技术方案	7
8 修复与风险管控工程建设运行与监测	9
9 污染修复与风险管控效果评估	10
附录 A（资料性）地下水污染源头预防技术	14
附录 B（资料性）地下水污染过程阻控技术	16
附录 C（资料性）地下水污染末端治理技术	18
附录 D（资料性）技术方案编制提纲	22
附录 E（资料性）概念模型涉及信息及其作用	24
参考文献	25

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。

本文件由四川省生态环境厅提出并归口。

本文件起草单位：四川省生态环境科学研究院、生态环境部土壤与农业农村生态环境监管技术中心、成都理工大学。

本文件主要起草人：XX、XX、XX。

废弃矿井酸性涌水治理技术指南

1 范围

本文件提供了废弃矿井酸性涌水污染修复与风险管控的工作程序、目标值确定、技术筛选、方案制定、效果评估、环境监管等。

本文件适用于废弃矿井酸性涌水治理所需开展的地下水修复与风险管控工作。

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 5084 农田灌溉水质标准
GB 20426 煤炭工业污染物排放标准
GB/T 14848 地下水质量标准
HJ 2.3 环境影响评价技术导则 地表水环境
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 91.1 污水监测技术规范
HJ 91.2 地表水环境质量监测技术规范
HJ 168 环境监测分析方法标准制定技术导则
HJ 298 危险废物鉴别技术规范
HJ 493 水质样品的保存和管理技术规定
DZ/T 0285 矿山帷幕注浆规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本指南。

3.1

矿井 mine

由于矿产资源地下开采而形成的竖井、斜井、平硐等矿山井筒的统称。

[来源：废弃井封井回填技术指南（试行），术语与定义1.4，有修改]

3.2

矿井涌水 mine inflow water

在矿山开采过程中，从岩层、裂隙、老空区等进入矿井的地下水、地表水及大气降水等的总称。

3.3

废弃矿井 abandoned mine

因资源枯竭、政策调整、非法开采被取缔、采矿权到期未续等各种原因，不再进行生产经营活动，被放弃使用的矿井。

3.4

地下水污染羽 groundwater contaminant plume

污染物随地下水移动从污染源向周边移动和扩散时所形成的污染区域。

[来源：HJ 25.6-2019，术语与定义3.1]

3.5

酸性矿山排水 acid mine drainage (AMD)

含硫或硫化物的矿石和矿山废料暴露在空气中氧化产生的排水，通常呈酸性，含高浓度硫酸盐和重（类）金属。

[来源：EPA《矿山废物管理》（1991），health and environmental concerns]

3.6

地下水污染治理 groundwater remediation

采用物理、化学或生物的方法，降解、吸附、转移或阻隔地下水中的污染物，将有毒有害的污染物转化为无害物质，或使其浓度降低到可接受水平，或阻断其暴露途径，满足相应的地下水环境功能或使用功能的过程。

[来源：HJ 25.6-2019，术语与定义3.2，有修改]

3.7

地下水风险管控 groundwater risk control

采取修复技术、工程控制和制度控制措施等，阻断地下水污染物暴露途径，阻止地下水污染扩散，防止对周边人体健康和生态受体产生影响的过程。

[来源：HJ 25.6-2019，术语与定义3.3]

3.8

地下水修复目标值 groundwater remediation value

由废弃矿井涌水及周边地下水调查或风险评估确定的目标污染物对人体健康和生态受体不产生直接或潜在危害，或不具有环境风险时，所确定的目标污染物的浓度限值。

[来源：HJ 25.6-2019，术语与定义3.6，有修改]

3.9

地下水风险控制值 groundwater risk control value

阻断地下水污染物暴露途径，阻止地下水污染扩散，防止对人体健康和生态受体产生影响所确定的目标污染物浓度限值。

[来源：HJ 25.6-2019，术语与定义3.7，有修改]

3.10

制度控制 institutional control

通过制定和实施条例、准则、规章或制度，减少或阻止人群对污染物的暴露，防范和杜绝地下水污染可能带来的风险和危害，利用管理手段控制污染潜在风险。

[来源：HJ 25.6-2019，术语与定义3.10，有修改]

3.11

工程控制 engineering control

采用阻隔、堵截、覆盖等工程措施，控制污染物迁移或阻断污染物暴露途径，降低和消除地下水污染对人体健康和生态受体的风险。

[来源：HJ 25.6-2019，术语与定义3.11，有修改]

3.12

修复极限 remediation asymptotic condition

修复工程进入拖尾期后，在现有的技术水平、合理的时间和资金投入条件下，继续进行修复仍难以达到修复目标的情况。

[来源：HJ 25.6-2019，术语与定义3.12]

4 工作程序

废弃矿井酸性涌水治理工作程序见图 1。

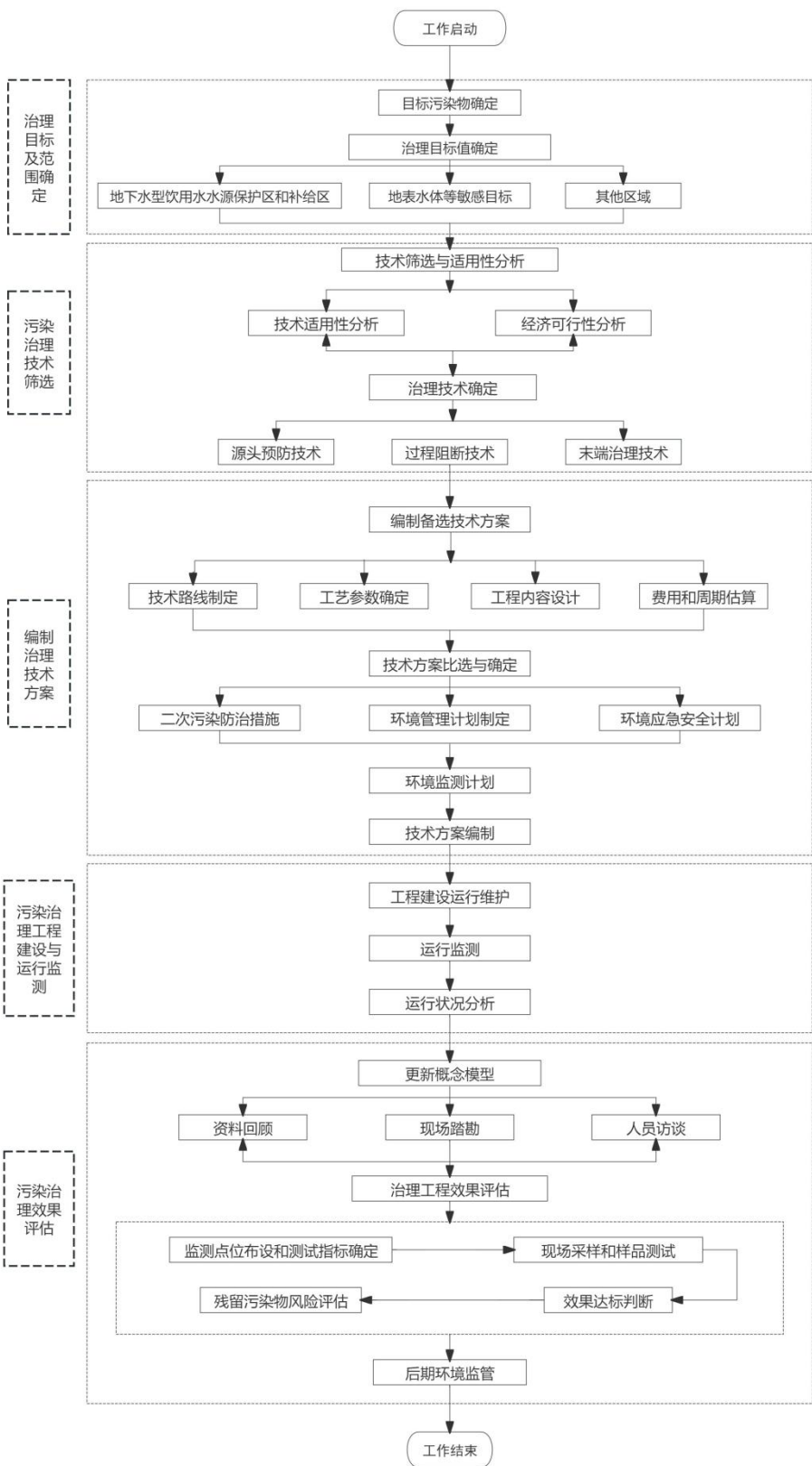


图1 废弃矿井酸性涌水治理工作程序图

5 治理目标及范围确定

5.1 目标污染物确定

5.1.1 开展废弃矿井酸性涌水及周边地下水环境状况调查与风险评估，查明周边敏感目标、矿区地质、水文地质条件、矿山类型、矿种、开采方式等。

5.1.2 根据废弃矿井酸性涌水及周边地下水环境状况调查与风险评估结果、周边敏感受体特征、区域地下水使用功能、地质背景、矿井开采历史、历史开采工艺等因素确定特征污染物。

5.1.3 当特征污染物对周边环境或人体健康构成风险或具有潜在风险时，作为修复或风险管控的目标污染物。

5.2 确定目标值

5.2.1 饮用水水源

5.2.1.1 若废弃矿井酸性涌水影响的下游区域涉及饮用水水源时，以集中式饮用水水源准保护区（或补给区）或分散式饮用水水源水质达到 GB 3838 或 GB/T 14848 中 III 类标准限值作为修复目标值。

5.2.1.2 当废弃矿井酸性涌水影响区域或地下水污染羽包括集中式地下水型饮用水水源（包括已建成的在用、备用和应急水源，在建或规划的地下水型饮用水源）保护区及补给区时，要同步制定风险管控目标。

5.2.1.3 对于 GB 3838 或 GB/T 14848 未涉及的目标污染物，按照饮用地下水的暴露途径计算地下水风险控制值作为修复目标值，风险控制值按照《地下水污染健康风险评估工作指南》（环办土壤函〔2019〕770 号）确定。

5.2.1.4 当根据 5.2.1.1 和 5.2.1.2 所确定的修复目标值低于环境背景值时，可选择背景值作为修复目标值。

5.2.2 其他地表水体

5.2.2.1 当废弃矿井酸性涌水影响到除饮用水水源以外的其他地表水体时，结合地表水体功能要求确定修复目标值。

5.2.2.2 当废弃矿井酸性涌水影响的下游区域涉及地表水环境考核断面时，以考核断面的水质考核要求确定修复目标值。

5.2.2.3 确定修复目标值时，需充分考虑矿井涌水与地表水体混合段的长度。

5.2.2.4 对于 GB 3838 未涉及的目标污染物，可参考欧盟（EU）、世界卫生组织（WHO）及美国环境保护署（US EPA）发布的相关地表水质量标准。

5.2.3 其他区域

5.2.3.1 若废弃矿井酸性涌水污染区域或地下水污染羽包括具有工业或农业用水等使用功能的区域，根据区域水质功能要求（GB/T 14848 或 GB5084）确定修复目标值。对于已有 GB/T 14848 或 GB5084 中未涉及的目标污染物，采用风险评估的方法计算风险控制值作为修复目标值，风险控制值按照《地下水污染健康风险评估工作指南》（环办土壤函〔2019〕770 号）确定。

5.2.3.2 对于不具有工业或农业用水等使用功能的地下水污染区域，采用风险评估的方法计算风险控制值作为修复目标值，风险控制值按照《地下水污染健康风险评估工作指南》（环办土壤函〔2019〕770 号）确定。

5.2.3.3 当选择相关标准或采用风险评估的方法确定分修复目标值低于地下水环境背景值时，可选择背景值作为修复目标值。

5.3 其他要求

5.3.1 当经评估认为按当前所有可行的技术方案实施后均无法达到 5.2 提出的修复目标值时，允许制定地下水风险管控目标作为地下水修复的阶段目标。

5.3.2 采用风险评估方法确定地下水修复目标值时，要同步制定风险管控目标。

5.4 确定治理范围

将地下水中目标污染物浓度超出治理目标值的空间范围作为地下水污染治理的范围。

6 污染治理技术筛选

6.1 技术筛选与适用性分析

各项技术实施前需开展技术适用性和经济可行性分析，需充分考虑建设成本和后期运维成本。当评估结果表明该技术不适宜时，可继续筛选其他适宜的治理技术。

6.1.1 技术适用性分析

评估废弃矿井区域地质条件、水文地质条件、污染特征、施工条件等，分析备选技术的适用性，重点分析各技术工程应用的适用性。常用的废弃矿井酸性涌水地下水污染治理技术适用性见表 1 所示。

表1 常用废弃矿井酸性涌水地下水污染治理技术适用性

类型	治理技术名称	适用条件	备注
源头预防	清水疏排	适用于地表水集中补给矿井，地表河流、湖泊、大气降水及岩溶水补给采空区的优势通道明确，可在渗流区段上游建立地表排水、导水工程设施，从而减少对采空区的入渗补给的情况。	需配套其他措施，不作单一措施使用。
	清污分流	适用于已经查明采空区及矿井涌水导流通道，采用清污分流可显著减少矿井涌水量的情况。	需预测采空区塌陷对封堵部位的影响程度。
过程阻断	封堵阻隔	适用于废弃矿井巷道基本未坍塌，裂隙较少，封堵后可大幅减少矿井涌水量，并在矿井中形成厌氧环境的情况。	需具备注浆施工条件
	止水帷幕	适用于阻止矿井涌水进入周边清洁水体中的情况。可构建水平或垂直阻隔帷幕。	应用较广
	可渗透反应格栅（PRB）	适用于受污染含水层渗透性较差、埋深较浅的情况。	需具备施工条件
末端治理	中和沉淀	适用于处理高铁、锰废水，对排除的酸性涌水通过加碱中和，以及沉淀处理，去除污染物，适用范围较广，但运行成本较高。	应用广泛，需日常维护管理。
	石灰石沟渠	适用于在地形坡度>20%的沟谷中处理酸性矿井涌水，可依地势建设，常用多级跌水曝气方式，成本低廉，动力损耗小。但废水流量较大时会出现药剂（石灰石）溶解速率过慢、容易钝化、堆积和移动。	对地形有一定要求

6.1.2 经济可行性分析

6.1.2.1 评估各项技术投入使用所需前期费用、材料费用、施工费用、监测和运行维护费用，要求经

济合理。

6.1.2.2 前期费用包括技术投入前开展地质调查与测绘、施工设计、模拟预测等费用。

6.1.2.3 材料费用主要为各项技术所需反应、充填、封堵等所需材料的购置费和加工费。

6.1.2.4 施工费用取决于各备选技术方案，主要包括劳务费、设备租赁费、燃料动力费等。主要由场地条件、物料运输条件、施工技术、设施设备等因素确定。

6.1.2.5 为了验证技术有效性，需要对矿井涌水及矿井周边地下水水质开展周期性监测，所需采样检测费用由检测指标、监测井数量、采样频次、分析测试要求等因素确定。

6.1.2.6 运行维护费用主要包括技术投入运行期间所需人员、动力、材料、设备及废弃物处理处置等产生的费用。

6.2 治理技术确定

在技术适用性和经济可行性分析的基础上，以高效、低成本实现废弃矿井酸性涌水治理为目的，确定最优的一种或多种技术联用作为治理方案选项。主要分为源头防控技术、过程阻断技术和末端治理技术。

6.2.1 源头防控技术

该类技术通过对酸性矿井涌水的地表集中补给通道、地层裂隙和溶隙等优势导水通道的注浆封堵、矿井补给水的清污分流，有效减少涌水量。常用的源头预防技术见附录 A。其中，注浆封堵工程宜参考《矿山帷幕注浆规范》（DZ/T 0285）。

6.2.2 过程阻断技术

通过对矿井进行封隔回填，减少或避免涌水的排出，封堵厚度宜根据涌水压力进行相关计算确定。常用的过程阻断技术见附录 B。封井回填宜参考《废弃井封井回填技术指南（试行）》（环办土壤函〔2020〕72号）。

6.2.3 末端治理技术

通过对酸性矿井涌水的处理，使其达到相应的水质标准。末端治理技术包括石灰石沟渠、中和沉淀技术、人工湿地等。常用的末端治理技术见附录 C。

7 编制技术方案

7.1 编制备选技术方案

7.1.1 技术路线制定

7.1.1.1 根据废弃矿井涌水及周边地下水环境状况调查、水文地质调查和风险评估结果，确定风险管控与修复目标，筛选并确定技术路线。

7.1.1.2 技术路线要求反映出废弃矿井酸性涌水治理的总体思路、技术方法和工艺流程等。

7.1.1.3 可通过对国内外现有治理技术方案的优化比选，确定一种或多种技术联用，因地制宜制定技术路线。

7.1.2 工艺参数确定

7.1.2.1 根据技术路线，结合目标污染物类型和浓度，备选技术成熟度、效率、成本，以及环境风险等，采用对比分析、矩阵评分和类比等方法分析比较各备选技术的优缺点，筛选出一种或多种修复或

风险管控技术。

7.1.2.2 针对确定的修复技术，选择性开展实验室小试、现场中试及模拟分析。在小试和中试的基础上，基于地下水水流模型和溶质运移模型评估修复或风险管控技术的实施效果，并根据模拟分析预测结果对工艺参数进行调整优化。

7.1.3 工程内容设计

7.1.3.1 根据技术路线，按照确定的技术方案，结合工艺流程和参数，估算工程量。包括矿井涌水修复方量、治理工程量以及修复工程中受污染土壤、水体、大气、固体废物等处理工程量。

7.1.3.2 矿井涌水修复方量根据矿井涌水水量和水质监测结果，考虑极丰水期（水量最大）、极枯水期（水量最小）矿井涌水量和污染物浓度变化，结合矿井周围水文地质特征，进行定量估算或数学模型模拟。

7.1.4 费用和周期估算

7.1.4.1 费用估算根据废弃矿井酸性涌水治理工程量确定。费用估算包括建设费用、运行费用、监测费用和咨询费用等。

7.1.4.2 周期估算根据工程量、工程设计、建设和运行时间、效果评估和后期环境监管要求等因素确定。

7.1.5 备选技术方案编制

7.1.5.1 根据水文地质条件、污染现状、修复和风险管控目标、技术路线、工艺参数、工程量、费用和周期等，编制不少于 2 套的备选技术方案。

7.1.5.2 备选方案要满足修复与风险管控目标要求，符合相关法律法规，且经济合理、技术可行。

7.2 技术方案比选与确定

方案比选主要包括以下内容：

a) 主要技术指标：结合矿井涌水污染特征、修复与风险管控目标，从符合法律法规、短期和长期效果、时间、成本和施工建设的环境影响等方面，比较不同备选技术方案主要技术的可操作性、有效性、合理性。

b) 工程费用：根据废弃矿井涌水治理的工程量，估算并比较不同备选技术方案费用，比较不同备选技术方案产生费用的合理性。

c) 环境及健康安全：综合比较不同备选技术方案工程实施产生的环境影响，以及对现场施工人员和周边人群健康的健康影响等。

7.3 环境管理计划制定

7.3.1 二次污染防治措施

对施工和运行过程造成的地下水、土壤、地表水、大气和固体废物等二次污染，要制定防治措施，并分析论证技术可行性、经济合理性、稳定运行和达标排放的可靠性。

7.3.2 环境监测计划

7.3.2.1 环境监测计划包括工程实施过程中的环境监理和二次污染监控中的环境监测。环境监测计划根据确定的技术方案、污染特征、治理修复过程中可能产生的污染物和废弃矿井所处区域环境条件制定。

7.3.2.2 对矿井涌水的水质和水量、处理后的排水水质进行持续监测，处理后的排水水质要达到相应排放要求。

7.3.2.3 对工程实施过程中产生的残余废弃物参照 HJ 298 开展属性鉴别，若鉴别为危险废物，按照《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》《危险废物转移管理办法》等相关要求进行处置。残余废弃物主要包括修复过程中处理酸性涌水时使用的化学药剂残余物、废弃反应材料、含重金属的废水处理污泥等。

7.3.3 环境应急安全计划

为确保废弃矿井涌水治理工程施工人员、周边人群和环境敏感受体的安全，根据国家和地方环境应急相关法律法规、标准规范编制环境应急安全计划，内容包括安全问题识别、预防措施、突发事故应急措施、安全防护设备和安全防护培训等。

7.4 技术方案编制

技术方案根据废弃矿井所处区域水文地质条件、矿井涌水污染特征和工程特点，参见附录 D 编制。

8 建设运行与监测

8.1 工程建设运行维护

8.1.1 工程建设运行维护方案包括系统建设运行管理、设备操作、设备检修与维护保养及安全运行管理制度建立等内容。

8.1.2 当涉及修复药剂、工程控制材料和二次污染物处理药剂及材料等使用时，工程建设运行维护方案宜包括对药剂和材料进场检测、试验、储存、使用的管理等内容。

8.1.3 工程建设运行维护内容包括但不限于：

a) 对设备设施建设运行进行记录，包括设备设施安装与运行、计量仪器仪表读数及材料使用情况等，记录应及时、准确、完整。

b) 对设备设施建设运行过程中可能产生环境事故的单元进行定期检查。设备设施运行不正常时，及时检修、更换或调整。

c) 对设备设施进行维护保养，包括设备清洁、润滑及保养、易损件的更换等。

d) 对进场的药剂和材料进行检测、试验、登记，对药剂和材料的储存、使用进行管理。

8.1.4 落实工程建设过程中的质控工作，保障安全、质量、进度、成本等目标的全面实现。

8.2 运行监测

8.2.1 监测点位布设

8.2.1.1 根据矿井所在区域地质与水文地质条件、矿井涌水情况、地下水污染特征和采用的修复技术，进行修复监测井的布设。监测井位置、数量需满足污染羽特征刻画、工程运行状况分析的监测要求。

8.2.1.2 根据矿井所在区域地质与水文地质条件、矿井涌水情况、地下水污染特征和采用的风险管控技术，进行风险管控监测井的布设。监测井位置、数量需满足风险管控工程运行状况分析的监测要求。

8.2.1.3 若废弃矿井涌水影响到周边地表水体，根据矿井涌水情况、地表水污染特征等同步布设地表水监测断面，监测要求宜参照 HJ 91.1 和 HJ 91.2 执行。

8.2.2 监测指标

工程运行期间需对地下水水位、水质、工程性能指标和二次污染物等进行监测，具体包括：

- a) 地下水水位和水质：包括地下水水位和目标污染物浓度等。
- b) 工程性能指标：根据使用的工程控制措施，确定需要监测的工程性能指标。如阻隔墙技术可通过监测墙体地下水流向上游和下游的地下水水位、目标污染物浓度等判断工程控制运行状况。
- c) 二次污染物：包括施工和运行过程中在地下水、土壤、地表水、环境空气中产生的二次污染物。
- d) 其他监测指标，如地表河流流量及水质、矿井涌水水量及水质等。

8.2.3 监测频次

- 8.2.3.1 工程运行阶段根据目标污染物浓度变化特征分为工程运行初期、运行稳定期、运行后期。
- 8.2.3.2 目标污染物浓度在工程运行初期呈剧烈变化或波动情形，在运行稳定期持续下降，在运行后期持续达到或低于修复目标值，或达到修复极限。
- 8.2.3.3 运行初期，宜采用较高的监测频次，运行稳定期及运行后期可适当降低监测频次。工程运行初期原则上监测频次为 2 次/月；运行稳定期原则上监测频次为 1 次/月；运行后期原则上监测频次为每季度 1 次，两个批次之间间隔不得少于 1 个月。
- 8.2.3.4 当出现风险管控或修复效果低于预期、局部区域防治失效以及污染扩散等不利情况时，可适当提高监测频次。

8.2.4 趋势监测

- 8.2.4.1 获取工程运行监测数据后宜及时进行趋势预测，可对 8.2.2 中全部或部分监测指标进行趋势预测，趋势预测可采用图表、数值模拟或统计学等方法。
- 8.2.4.2 污染趋势预测图中包括最大污染深度以上岩性结构及水文地质特征、主要污染源及主要污染物特征、主要污染物在水土介质中的分布特征等。
- 8.2.4.3 进行数值模拟时，包括模型计算区网格剖分图、水文地质参数分区图、初始渗流场和拟合渗流场图、观测点水头和污染物浓度拟合曲线图及误差情况图，预测浓度的时间变化曲线等。

8.3 运行状况分析

根据地下水监测数据与趋势预测结果开展工程运行状况分析。包括分析工程运行阶段的技术有效性、目标可达性、经济可行性等，判断技术方案、工程设计、工程实施和运行有无调整和优化的必要。

9 污染修复与风险管控效果评估

9.1 更新概念模型

9.1.1 资料回顾

- 9.1.1.1 在效果评估工作开展以前，收集矿井所在区域地下水污染治理相关资料。
- 9.1.1.2 资料清单主要包括废弃矿井涌水及周边地下水环境状况调查报告、风险评估报告、风险管控与修复技术方案、工程实施方案、工程设计资料、施工组织设计资料、工程建设与运行过程中监测数据、监理报告和相关资料、工程竣工报告、施工管理文件等。
- 9.1.1.3 资料回顾要点主要包括地下水污染治理工程概况及环保措施落实情况。工程概况包括工程范围及目标、工程设计和实施情况、工期和运行监测数据等。主要通过分析工程建设和实施过程中二次污染物排放和防治情况回顾环保措施落实情况。

9.1.2 现场踏勘

- 9.1.2.1 开展现场踏勘工作，了解废弃矿井酸性涌水污染修复与风险管控工程实施情况、环境保护措

施落实情况。

9.1.2.2 调查人员可通过照片、视频、录音、文字等方式，记录现场踏勘情况。

9.1.3 人员访谈

9.1.3.1 开展人员访谈工作，对废弃矿井酸性涌水污染修复与风险管控工程实施情况、环境保护措施落实情况进行全面了解。

9.1.3.2 访谈对象包括前期调查及风险评估单位、工程方案编制单位、监理单位、工程施工单位等参与人员。

9.1.4 更新概念模型

9.1.4.1 在资料回顾、现场踏勘、人员访谈的基础上，掌握废弃矿井酸性涌水污染修复与风险管控工程情况，结合区域地质与水文地质条件、污染物空间分布、风险管控与修复技术特点、工程设施布局等，对概念模型进行更新，完善污染修复与风险管控工程实施后的概念模型。

9.1.4.2 概念模型一般包括以下信息：

a) 地下水污染修复与风险管控工程概况。包括工程工期、修复管控范围、修复管控目标、技术工艺设计参数、工程运行监测数据、工艺调整和运行优化、药剂添加量等情况。

b) 关注污染物情况。目标污染物原始浓度及修复与风险管控过程中的浓度变化、中间产物产生情况、潜在二次污染区域及二次污染物排放和风险管控与修复情况、污染物空间分布特征的变化。

c) 地质与水文地质情况。关注矿山地质与水文地质条件，以及工程设施运行前后地质和水文地质条件的变化，运行过程是否存在优先流路径等。

d) 潜在受体与周边环境情况。分析工程结束后污染介质与敏感受体的相对位置关系，以及敏感受体的关键暴露途径等。

9.1.4.3 概念模型可用文字、图、表等方式表达，作为效果评估范围、点位布设、采样频次确定等工作依据。

9.1.4.4 概念模型涉及信息及其作用见附录 E。

9.2 效果评估

参照 HJ 25.5、HJ 25.6、GB/T 14848、GB 3838 和 GB 20426 等相关标准内容，对废弃矿井涌水污染修复与风险管控工作开展效果评估。

9.2.1 效果评估范围

效果评估范围根据不同污染修复与风险管控措施的特点确定，原则上包括修复管控范围的上游、内部和下游，以及工程实施可能涉及的二次污染区域。

9.2.2 采样持续时间和频次

9.2.2.1 地下水采样频次根据废弃矿井所在区域地质与水文地质条件、修复与风险管控技术确定，如水力梯度、渗透系数、季节变化和其他因素等。

9.2.2.2 地表水采样频次根据废弃矿井所在地区的降雨和水文条件以及工程特点确定。采样时宜避开降雨时段以及降雨刚刚结束的时段。

9.2.2.3 地下水和地表水污染修复效果评估阶段，针对污染物指标至少采集 8 个批次的样品，采样持续时间至少为 1 年。

9.2.2.4 地下水和地表水污染风险管控效果评估阶段，针对污染物指标至少采集 4 个批次的样品，采样持续时间至少为 1 年。

9.2.2.5 原则上采样频次为每季度 1 次，两个批次之间间隔不得少于 1 个月。对于涌水量和污染物浓度变化较大的矿井，可适当提高采样频次。

9.2.3 布点数量与位置

9.2.3.1 原则上修复效果评估范围上游至少设置 1 个对照监测点，内部至少设置 3 个监测点，下游至少设置 2 个监测点，可根据修复工程特点合理调整。同时在可能涉及的二次污染区域设置监测点。

9.2.3.2 上游对照监测点宜设置在污染羽上游，反映区域地下水质量。内部监测点宜设置在污染羽内部，反映修复过程中污染羽浓度变化情况。下游监测点宜设置在地下水污染羽边界的位置。当周边存在敏感受体时，宜在污染羽边缘和受体之间设置监测井。

9.2.3.3 原则上修复效果评估范围内部监测井设置网格不宜大于 80m×80m，可根据修复工程特点合理调整。

9.2.3.4 地下水采样点宜优先设置在修复设施运行薄弱区、地质与水文地质条件不利区域等。

9.2.3.5 可充分利用前期调查阶段设置的监测井，现有监测井宜符合修复效果评估采样条件，能满足污染羽特征刻画和工程运行状况分析的监测要求。

9.2.3.6 若评估范围涉及地表水体，在出水断面设置采样点位，断面形状要满足流量测定的要求。

9.2.4 检测指标

9.2.4.1 地下水检测指标为修复技术方案中确定的目标污染物。

9.2.4.2 地表水检测指标包括测定目标污染物和采样时段的地表水流量。

9.2.4.3 采样加入化学药剂进行治理修复时，检测指标还包括产生的二次污染物。原则上二次污染物指标根据修复技术方案中的可行性分析结果和地下水修复工程运行监测结果确定。

9.2.4.4 必要时可增加地下水常规指标、修复设施运行参数等作为修复效果评估的依据。

9.2.5 现场采样与实验室检测

9.2.5.1 地下水样品采集、保存与流转参照 HJ 164 执行。地表水样品采集、保存与流转参照 HJ 91.2、HJ 493 执行。

9.2.5.2 检测分析方法优先选用国家或行业标准方法，尚无国家或行业标准分析测试方法时，可选用行业推荐分析测试方法或等效分析测试方法，并参照 HJ 168 进行方法确认和验证。

9.2.6 风险管控效果达标判断

9.2.6.1 风险管控效果达标判断主要包括对工程性能指标、污染物指标的达标判断。可增加辅助指标帮助达标判断。

9.2.6.2 风险管控工程性能指标宜满足设计要求或不影响预期效果。工程性能指标包括风险管控设施如阻隔墙、防渗层等的抗压强度、渗透性能、阻隔性能、工程设施连续性与完整性等。

9.2.6.3 风险管控措施下游地下水中污染指标浓度宜满足持续下降，受矿井涌水影响的地下水下游区域目标污染物污染羽持续性缩小。污染指标包括土壤、地下水和地表水等环境介质中的目标污染物。

9.2.6.4 辅助指标包括地下水水位、地下水流速、地球化学参数等。

9.2.6.5 若工程性能指标和污染物指标均达到评估标准，则判断风险管控达到预期效果，可对风险管控措施继续开展运行和维护。

9.2.6.6 若工程性能指标或污染物指标未达到评估标准，则判断风险管控未达到预期效果，对风险管控措施进行优化或调整。

9.2.7 修复效果达标判断

9.2.7.1 原则上每口地下水监测井、每个地表水监测断面中的检测指标均持续稳定达标，方可认为达到修复效果。若未达到修复效果，宜对未达标区域开展补充修复。

9.2.7.2 可采用趋势分析进行持续稳定达标判断：

a) 水中污染物浓度呈现稳态或者下降趋势，可判断达到修复效果；

b) 水中污染物浓度呈现上升趋势，则判断未达到修复效果。

9.2.7.3 在 95%的置信水平下，趋势线斜率显著大于 0，说明污染物浓度呈现上升趋势；若趋势线斜率显著小于 0，说明污染物浓度呈现下降趋势；若趋势线斜率与 0 没有显著差异，说明污染物浓度呈现稳态。

9.2.7.4 同时满足下列条件的情况下，可判断地下水修复达到极限：

a) 概念模型清晰，污染羽及其周边监测断面、监测井可充分反映修复工程实施情况和客观评估修复效果。

b) 至少有 1 年的月度监测数据显示地下水中污染物浓度超过修复目标且保持稳定或无下降趋势。

c) 通过概念模型和监测数据可说明现有修复技术继续实施不能达到预期目标的主要原因。

d) 现有工程设计合理，并在实施过程中得到有效的操作和足够的维护。

e) 进一步可行性研究表明不存在适用于本地区的其他修复技术。

9.2.8 残留污染物风险评估

9.2.8.1 对于地下水修复，若目标污染物浓度未达到评估标准，但判断地下水已达到修复极限，可在实施风险管控措施的前提下，对残留污染物进行风险评估。

9.2.8.2 残留污染物风险评估包括以下工作内容：

a) 更新概念模型：掌握修复后废弃矿井评估范围内地质与水文地质条件、污染物空间分布、潜在暴露途径、敏感受体等，考虑风险管控措施设置情况，更新概念模型，可参照《地下水污染模拟预测评估工作指南》（环办土壤函〔2019〕770 号）执行。

b) 分析残留污染物环境风险：修复工程停止后至少 1 年且有 8 个批次的监测数据表明地下水污染羽，以及地表水监测断面中的污染物浓度降低或趋于稳定，污染羽范围逐渐缩减，或地下水中污染物存在自然衰减。

c) 开展人体健康风险评估：残留污染物人体健康风险评估可参照《地下水污染健康风险评估工作指南》（环办土壤函〔2019〕770 号）执行，相关参数根据概念模型取值。

9.2.8.3 若残留污染物对环境和受体产生的风险可接受，则认为达到修复效果；若残留污染物对环境和受体产生的风险不可接受，则需对现有风险管控措施进行优化或提出新的风险管控措施。

9.3 后期环境监管

9.3.1 根据修复与风险管控效果评估结论，实施风险管控的区域，原则上需开展后期环境监管。

9.3.2 风险管控期间的环境监管方式包括环境监测与制度控制。

9.3.3 环境监测的采样点为效果评估阶段使用的地表水及地下水采样点。

9.3.4 环境监测采样频次不低于每季度 1 次，两个批次之间间隔不得少于 1 个月，一直持续到达到修复效果，结束风险管控为止。

9.3.5 修复与风险管控结束后，宜建立环境监测长效机制，监测频次原则上不低于 1 年 2 次。

9.3.6 环境监管单位对监测数据及信息公开内容的真实性和准确性负责。

9.3.7 制度控制包括限制废弃矿井所在地土地利用方式、限制地下水或地表水利用方式、通知和公告废弃矿井所在地潜在风险、制定限制进入或使用条例等方式，多种制度控制方式可同时利用。

附录 A

(资料性)

地下水污染源预防技术

A.1 清水疏排技术

通过地面调查、示踪试验、地球物理勘探等方法，寻找和确定地表水集中补给矿井的优势通道，并通过地表通道封堵或渗漏区防渗改造，或对地层裂隙和溶隙的注浆封堵，阻断地表河流、湖泊、大气降水及岩溶水补给采空区的优势通道（图A.1）。同时可在集中渗流区段上游建立地表排水、导水工程设施，减少对采空区的入渗补给，从而减少酸性矿井涌水的排放。

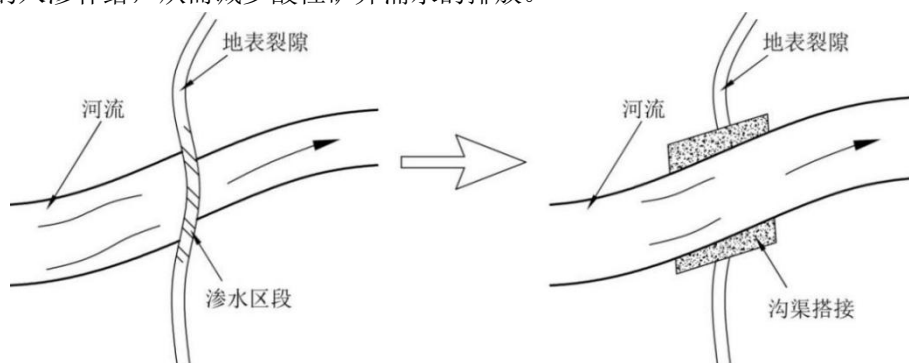


图 A.1 (a) 地表溪流导排减量示意图

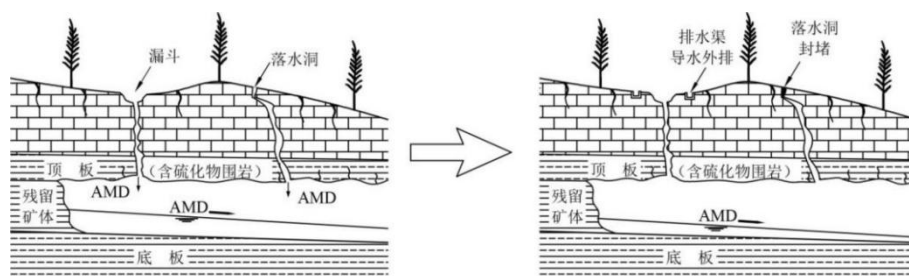


图 A.1 (b) 地表岩溶通道导排、封堵示意图

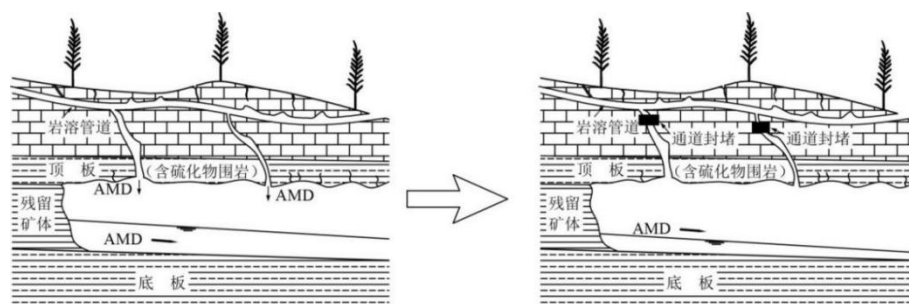


图 A.1 (c) 地下岩溶管道及含水层封堵减量示意图

A. 2 清污分流技术

通过对矿井中的局部封堵和导流，使渗入巷道或采空区尚未被污染的地下水沿不含矿的巷道直接外排，以减少污水的产生量。采用这种技术应当预测采空区塌陷对封堵部位的影响程度，因为塌陷会形成新的导水通道，使矿井水有可能重新进入含矿部位。

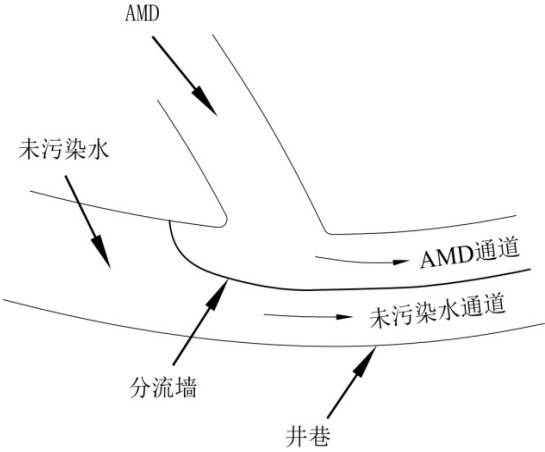


图 A. 2 巷道内清污分流技术示意图

附录 B

(资料性)

地下水污染过程阻控技术

B.1 采空区和废弃巷道封堵技术

由于采空区残留矿柱、顶底板围岩中含硫化物的氧化作用极易产生酸性矿井涌水，可通过在采空区中充填石灰石、白云石等碱性物料（可优先利用碱性废渣等），持续释放碱性物质，以提高矿井水pH值，同时覆盖采空区顶底板进一步抑制含硫矿物氧化（图B.1）。此外，可通过投加硫酸盐还原菌、硫还原菌或铁还原菌种（以及维持细菌新陈代谢相应的碳源）的方式抑制黄铁矿的氧化，控制酸性涌水的产生。

同时，也可在废水流经巷道中充填碱性材料（石灰石和白云石等）和还原介质（有机质等），进一步中和废水的pH值，减少巷道中的含氧量，构建厌氧环境，并在井口建设液封系统，增加废水在厌氧环境中的水力停留时间，强化硫酸盐还原作用，促进废水中溶解性重金属与次生硫化物矿物形成沉淀（图B.2）。

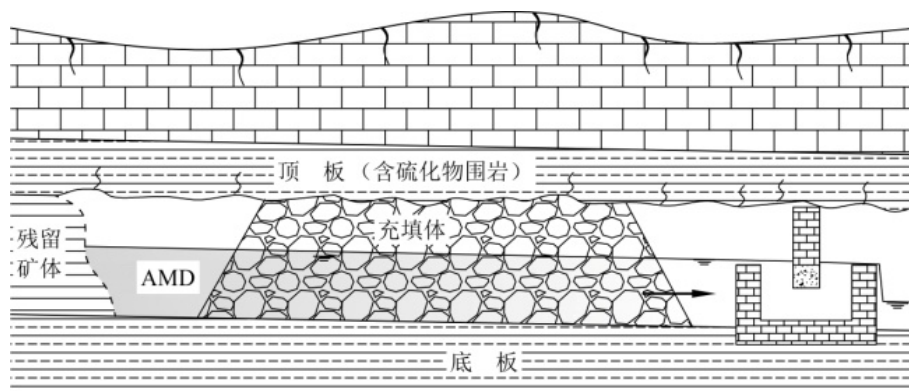


图 B.1 采空区充填及巷道封堵示意图

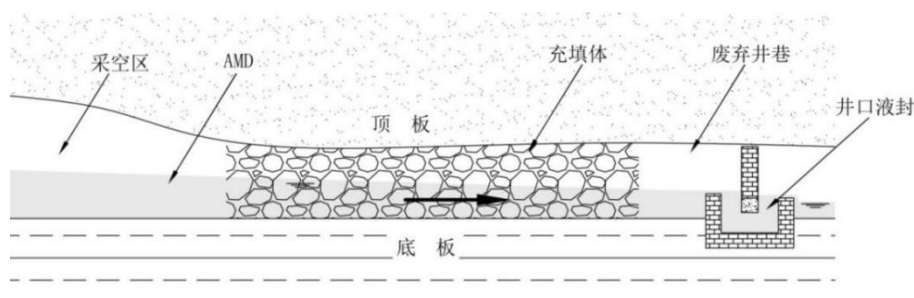


图 B.2 废弃巷道充填及巷道封堵示意图

B.2 多级反应串联耦合井巷填充技术

充分利用巷道空间，在改性碳酸盐岩为主要充填材料（产碱提升pH值）的系统中将改性石灰石、凹凸棒土、铁粉、活性炭和基质包等多种吸附材料进行耦合串联布置，而较低的水流速度与较长的水力停留时间有利于延长水岩反应时间，同时有利于固体颗粒的沉降和吸附作用的发生，使水中溶解性污染物

被充填材料所吸附，转化后形成的固体颗粒易于沉淀在材料表面，从而达到废水中污染物在井巷中净化的目的。

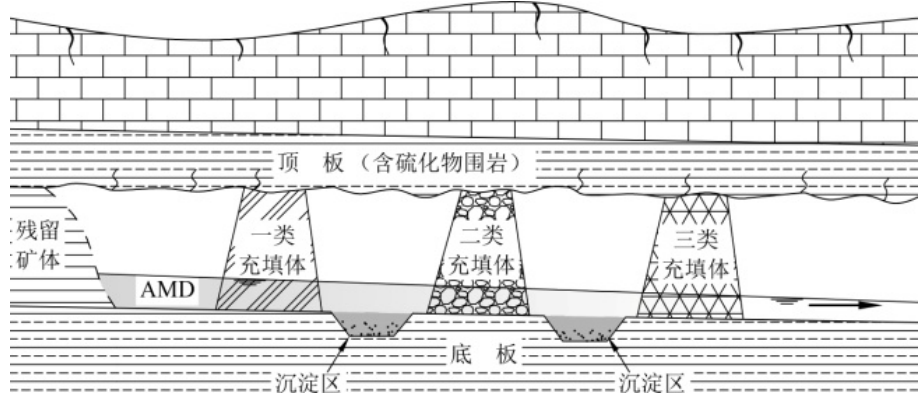


图 B.3 多级反应串联耦合井巷填充技术示意图

B.3 止水帷幕构建技术

构建止水帷幕技术（图B.4）主要用于限制地下废水从受污染井巷及采空区混入周围清洁水体。通过钻孔或开挖沟渠填入不同类型的阻控材料，构建防渗墙，如土-膨润土泥浆防渗墙、水泥-膨润土泥浆防渗墙、复合泥浆墙、土拌墙和塑性混凝土防渗墙。防渗墙用土-膨润土、水泥-膨润土、粉煤灰、矿渣粉、粘土等混合料回填。

井巷中矿井水在流动过程中可能会通过底板破裂带污染地下深层含水层，可构建防渗底板或注入防渗材料（水泥-膨润土泥浆等）构建水平阻控帷幕阻止矿井水向下层扩散。

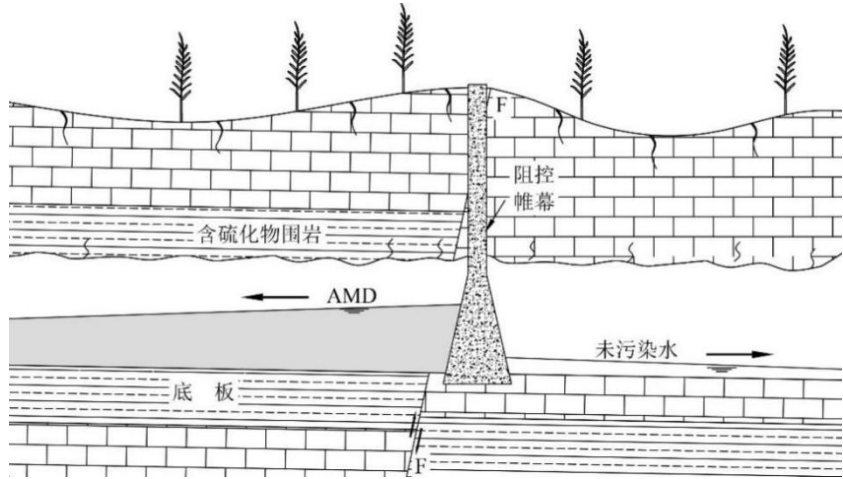


图 B.4 止水帷幕构建技术示意图

附录 C

(资料性)

地下水污染末端治理技术

C.1 缺氧石灰石沟渠

缺氧石灰石沟渠 (Anoxic Limestone Drains, ALDs) 的主体为填充石灰石的沟渠, 上方覆盖塑料薄膜和粘土以隔绝空气。在低溶解氧和高二氧化碳条件下, 石灰石与酸性矿井涌水接触时, 可产生碱度提高水体pH值。为防止金属氢氧化物沉淀覆盖在石灰石表面, 阻碍石灰石溶解, 进水中溶解氧 (DO)、 Fe^{3+} 和 Al^{3+} 浓度需低于 1mg/L 。为保证石灰石的溶解速率, 系统水力停留时间需设置 15h 以上。为进一步减少系统中的溶解氧, 可在缺氧石灰石沟渠前端串联一个除氧池, 以去除酸性矿山排水中的溶解氧。缺氧石灰石沟渠操作简单, 运行成本低, 通常作为酸性矿山排水的预处理技术而被广泛应用, 示意图如图C.1所示。

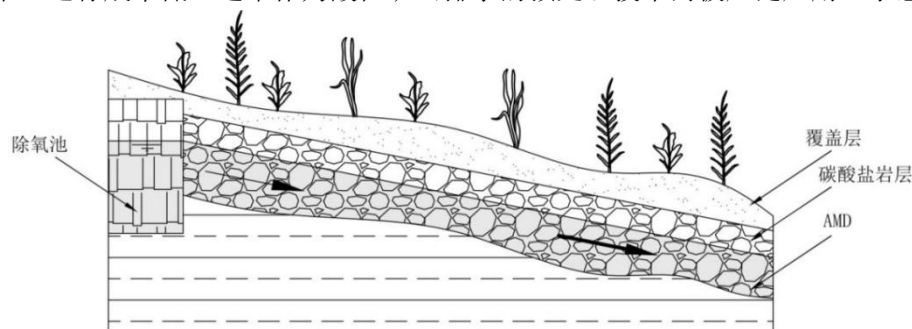


图 C.1 缺氧石灰沟渠技术示意图

C.2 好氧石灰石沟渠

好氧石灰沟渠 (Open Limestone Drains, OLDs) 是填满石灰石的露天沟渠, 用于处理含氧酸性矿井水。设计时沟渠需具有 20° 以上坡度, 以保证酸性矿井涌水在沟渠中的动能足够将生成的氢氧化物沉淀以悬浮的状态带入后续沉淀池。实际应用时通常将好氧石灰石沟渠设置在半坡上, 借助坡度使水流获得较高的动能, 如图C.2所示。

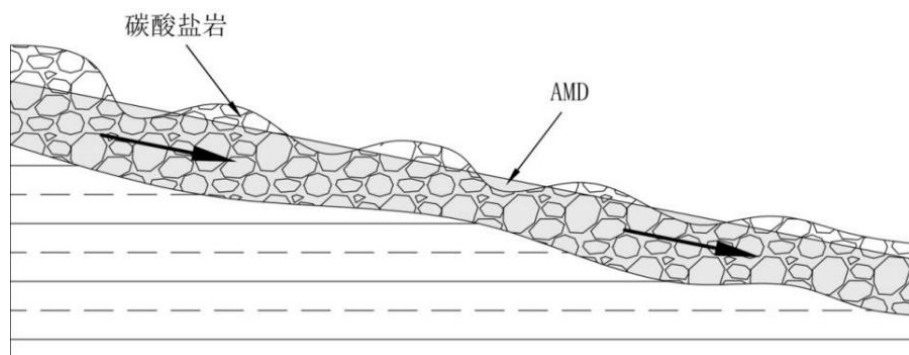


图 C.2 好氧石灰沟渠技术示意图

C.3 石灰石导流井

石灰石导流井（Limestone Diversion Wells, LDW）主体为一个垂直的金属或水泥的圆柱体水池，直径1.5~1.8m，深2~2.5m，填充砂粒大小的石灰石。酸性矿井涌水通过管道引入导流井，然后在井中与石灰石接触，流速需能够使石灰石颗粒充分搅动（水头压力至少为2.5m），通过石灰石溶解产生碱度，而水解和中和反应产生的金属絮凝物随水流冲出系统。

C.4 石灰石砂系统

石灰石砂处理系统（Limestone Sand, LS）通过向河流中加入砂砾大小的石灰石，利用河流的冲刷作用将石灰石砂冲刷至下游重新分布并中和酸度的一种技术。虽然石灰石表面会产生铁、铝的沉淀物，但水流能搅动并冲刷石灰石，以保持石灰石表面的高反应活性。若能持续添加石灰石砂，该技术在流域治理上比其他被动处理技术更具成本效益。

C.5 连续产碱系统技术

连续产碱系统（Successive alkalinity-producing systems, SAPS）最上层为1~3m的水层，中间是0.5~1m的有机层，底部为0.5~1m的石灰石层。水层能为系统冲洗提供一定的水头，有机层能为微生物提供营养物质以促进硫酸盐还原菌生长，石灰石层能有效地产生碱度。系统从上部进水，底部出水，并保留有一定的水位高度。由于酸性矿井涌水与石灰石接触前先经过有机层消耗氧气，因此进入石灰石层时处于缺氧状态，能有效减少 Fe^{3+} 在石灰石层的沉淀，出水通过一系列穿孔排水管输送到好氧湿地或沉淀池中，促使金属沉淀。连续产碱系统适宜处理溶解氧为2~5mg/L、净酸度300~500mg/L（碳酸钙当量）的高重金属酸性矿井涌水，如图C.3所示。

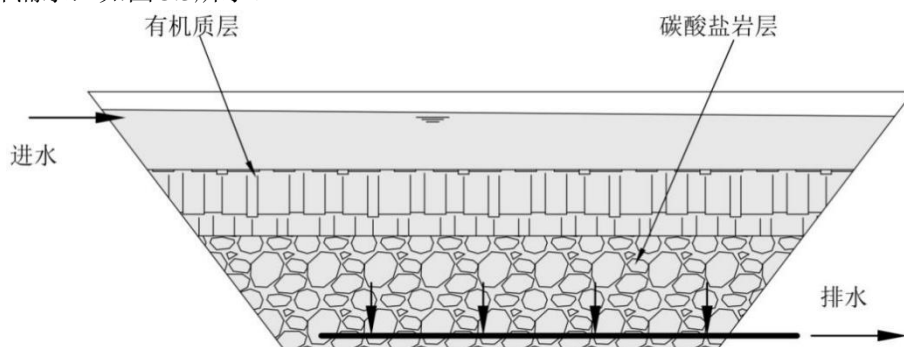


图 C.3 连续产碱系统示意图

C.6 硫酸盐还原生物反应器

硫酸盐还原生物反应器（Sulfate-reducing bacteria bioreactor, SRB）是在有机碳源存在的前提下，利用硫酸盐还原菌（SRB）还原硫酸根，生成硫化氢和碳酸盐碱度，提高酸性矿井涌水pH值，硫化氢可与重金属离子生成金属硫化物沉淀。硫酸盐还原生物反应器施工简便，维护和管理费用较少，相比传统碳循环处理技术产生的生物污泥量和温室气体更少；但硫酸盐还原菌最适pH值大于5，因此在反应基质中通常需补充石灰石提高系统碱度，如图C.4所示。

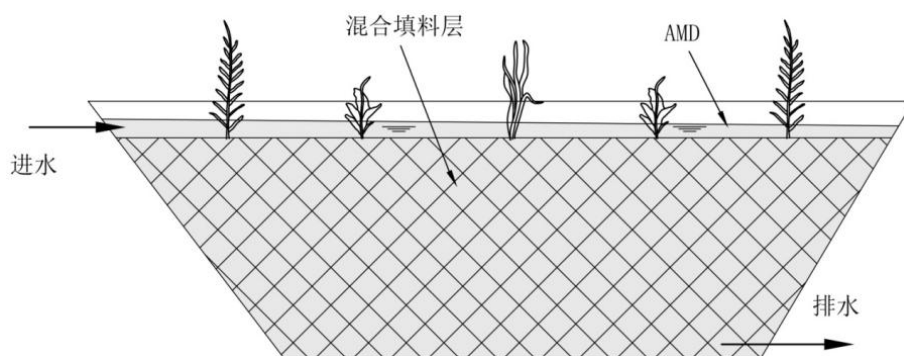


图 C.4 硫酸盐还原生物反应器示意图

C.7 人工湿地

人工湿地由基质、水生植物、微生物、土壤及特有的水文条件构成，通过这些构成组分的协同作用净化酸性矿井涌水。

厌氧人工湿地的水深通常大于 30cm，底部铺设厚度 50cm 的有机材料（如蘑菇堆肥、锯末、稻草和粪肥等），也可以与石灰石混合，增加碱度。系统中的碱度主要由石灰石溶解和硫酸盐还原菌还原作用产生。厌氧人工湿地适合处理酸性矿井涌水，处理机制包括表层微生物的好氧生化作用、底层微生物的厌氧生化作用、植物的吸收作用及基质的吸附和过滤作用（图 C.5）。人工湿地整体建造、运行和管理等成本低，主要是基于天然物质和自然的物理化学、生物化学过程，无需持续的化学品投入，并可提供直接和间接的经济和环境效益。

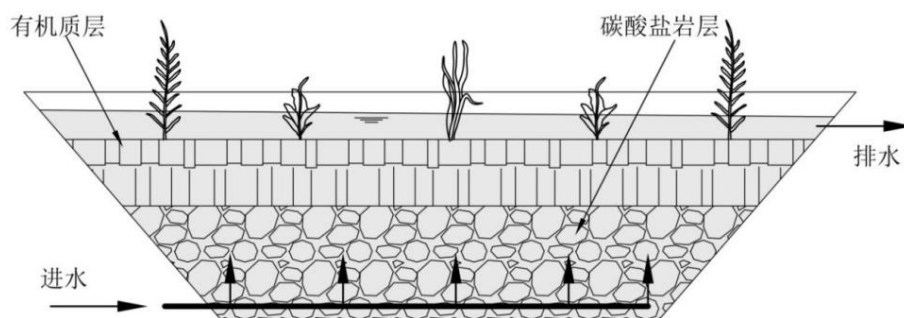


图 C.5 厌氧湿地示意图

C.8 中和沉淀技术

AMD中和沉淀技术是酸性矿井涌水处理应用较广的一项技术。它主要采取投加碱性物质提高废水pH值，通过后进行复氧曝气促进 Fe^{2+} 转化为 Fe^{3+} ，加速 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 的形成，并在沉淀池前投加絮凝剂，使 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 等可沉物在沉淀池内沉淀而去除，沉淀后的处理水在锰砂滤池内由 Mn^{2+} 向 MnO_2 转化，实现Fe、Mn的达标排放，如图C.6所示。

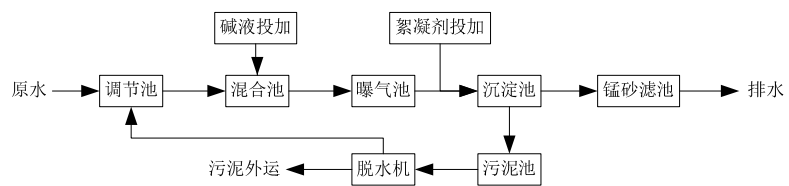


图 C.6 AMD 中和沉淀技术示意图

附 录 D
(资料性)
技术方案编制提纲

- 1 总论
 - 1.1 任务由来
 - 1.2 编制依据
 - 1.3 编制内容
- 2 工作依据
 - 2.1 法律法规
 - 2.2 标准规范
 - 2.3 项目文件
- 3 问题识别
 - 3.1 所在区域概况
 - 3.2 自然条件概况
 - 3.3 社会概况
 - 3.4 水文地质条件
 - 3.5 地下水污染概况
 - 3.6 项目实施必要性分析
- 4 风险管控与修复目标
 - 4.1 目标污染物
 - 4.2 修复目标
 - 4.3 风险管控目标及范围
- 5 技术筛选
 - 5.1 技术简述
 - 5.2 技术可行性评估
- 6 技术方案设计
 - 6.1 技术路线
 - 6.2 技术工艺参数

- 6.3 工程量估算
- 6.4 工程费用估算
- 6.5 方案比选
- 6.6 环境管理计划
- 7 工程建设运行和监测
 - 7.1 建设运行维护方案
 - 7.2 运行监测方案
 - 7.3 趋势预测及运行状况分析
- 8 效果评估
 - 8.1 概念模型更新
 - 8.2 效果评估监测
 - 8.3 环境监管计划
- 9 成本效益分析
 - 9.1 成本费用
 - 9.2 环境效益、经济效益、社会效益

附录 E

(资料性)

概念模型涉及信息及其作用

表 E.1 概念模型涉及信息及其作用表

概念模型涉及信息	在修复效果评估中的作用
地理位置	掌握背景情况
开采历史	掌握背景情况
调查评估活动	掌握背景情况
地质与水文地质情况	采样点设置
污染物分布情况	掌握污染情况
目标污染物、修复管控目标	明确评估指标和标准
修复管控范围	确定评估对象和范围
地下水污染羽	确定评估对象和范围
修复管控方式及工艺	制定效果评估方案
修复管控实施方案有无变更及变更情况	制定效果评估方案
施工进度	确定效果评估采样时间
修复设施平面布置	采样点设置
修复系统运行监测计划及已有监测数据	采样频次及采样点设置
目标污染物浓度变化情况	采样频次及采样点设置
监测井位置及结构	判断是否可供效果评估采样使用
二次污染排放记录及监测报告	辅助资料
修复管控实施涉及的单位和机构	辅助资料

注：包括但不限于表格中所列资料信息。

参考文献

- [1] 生态环境部办公厅. 地下水环境状况调查评价工作指南//关于印发《地下水环境状况调查评价工作指南》等4项技术文件的通知:环办土壤〔2019〕770号[Z].2019-09-29.
- [2] 生态环境部办公厅. 地下水污染健康风险评估工作指南//关于印发《地下水环境状况调查评价工作指南》等4项技术文件的通知:环办土壤〔2019〕770号[Z].2019-09-29.
- [3] 生态环境部办公厅. 地下水污染模拟预测评估工作指南//关于印发《地下水环境状况调查评价工作指南》等4项技术文件的通知:环办土壤〔2019〕770号[Z].2019-09-29.
- [4] 生态环境部办公厅. 废弃井封井回填技术指南(试行)//关于印发《地下水污染源防渗技术指南(试行)》和《废弃井封井回填技术指南(试行)》的通知:环办土壤〔2020〕72号[Z].2020-02-20.
- [5] 生态环境部办公厅. 地下水污染源防渗技术指南(试行)//关于印发《地下水污染源防渗技术指南(试行)》和《废弃井封井回填技术指南(试行)》的通知:环办土壤〔2020〕72号[Z]. 2020-02-20.
- [6] 全国自然资源与国土空间规划标准化技术委员会. GB/T 14157-2023 水文地质术语[S]. 北京:中国标准出版社, 2023.
- [7] 中华人民共和国环境保护部. HJ 610-2016 环境影响评价技术导则 地下水环境[S]. 北京:中国环境科学出版社, 2016.
- [8] 生态环境部土壤生态环境司,生态环境部土壤与农业农村生态环境监管技术中心,生态环境部南京环境科学研究所.地下水污染风险管控与修复技术手册[M]. 北京:中国环境出版集团, 2021:41-190.
- [9] 生态环境部土壤生态环境司. 污染地块地下水修复与风险管控技术导则:HJ25. 6-2019[S]. 北京:中国环境出版集团, 2019:1-27.
- [10] 生态环境部土壤生态环境司. 污染地块风险管控与土壤修复技术导则:HJ25. 5-2018[S]. 北京:中国环境出版集团, 2018:1-15.
- [11] 湖南省环境治理行业协会. 煤矿矿井涌水末端治理技术指南:T/HAEPCI50-2023[S/OL]. 2023:1-10. <https://www.ttbz.org.cn/Pdfs/Index/?ftype=st&pms=82787>.

