|  |  |
| --- | --- |
| ICS |  |
| CCS |  |

|  |
| --- |
| DB42 |

湖北省地方标准

DB42/T XXXX—2025

湖北省废弃矿山地下水污染风险管控

和修复技术指南

Technical guidelines for risk management and control and remediation technologies of groundwater contamination in abandoned mines

2025 - XX - XX发布

2025 - XX - XX实施

湖北省市场监督管理局  发布

目次

[前言 II](#_Toc202449208)

[1 范围 1](#_Toc202449209)

[2 规范性引用文件 1](#_Toc202449210)

[3 术语和定义 1](#_Toc202449211)

[4 指导原则 2](#_Toc202449212)

[5 工作内容和流程 2](#_Toc202449213)

[6 风险管控与修复目标确定 4](#_Toc202449214)

[7 污染防治技术筛选 4](#_Toc202449215)

[8 污染防治技术方案制定 8](#_Toc202449216)

[9 防治工程建设运行和监测 11](#_Toc202449217)

[10 污染防治效果评估 12](#_Toc202449218)

[附录A （资料性） 矿山地下水污染源头预防技术 17](#_Toc202449219)

[附录B （资料性） 矿山地下水污染过程阻断技术 19](#_Toc202449220)

[附录C （资料性） 矿山地下水污染源头预防技术 22](#_Toc202449221)

[附录D （资料性） 技术方案编制提纲 26](#_Toc202449222)

1. 前言

为贯彻落实《地下水管理条例》《中共中央 国务院关于深入打好污染防治攻坚战的意见》《“十四五”土壤、地下水和农村生态环境保护规划》等文件要求，推进关闭矿山地下水污染防治工作，规范地下水污染风险管控或修复治理技术应用，指南编制组通过广泛调查研究，认真总结实践经验，参考国内现行相关标准、指南和规程，并在广泛征求意见的基础上，制定了本指南。

本文件由湖北省生态环境厅提出并归口。

本文件主要起草单位：湖北省生态环境科学研究院（省生态环境工程评估中心）、生态环境部土壤与农业农村生态环境监管技术中心、中冶南方都市环保工程技术股份有限公司、湖北省地质局水文地质工程地质大队、成都理工大学、贵州大学、中国科学院南京土壤研究所、中国地质调查局水文地质环境地质调查中心、中国矿业大学、中国地质大学（武汉）、南京大学、中国地质科学院岩溶地质研究所、河北地质大学。

本文件主要起草人：向罗京、张强、徐栋……

本文件实施应用中的疑问，可咨询湖北省生态环境厅，联系电话：027-87167225；对本文件的有关修改意见建议请反馈至湖北省生态环境科学研究院（省生态环境工程评估中心），联系电话：027- 87885717，邮箱：hky\_trs@163.com。

湖北省废弃矿山地下水污染风险管控和修复技术指南

* 1. 范围

本指南规定了关闭矿山地下水污染防治的总则、工作内容和流程、风险管控或修复目标值确定、污染防治技术筛选、污染防治技术方案制定、防治工程建设运行和监测与污染防治效果评估的技术要求。

本指南适用于关闭矿山地下水污染需开展风险管控或修复治理工作的情形。

* 1. 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/T 14848 地下水质量标准

GB 3838 地表水环境质量标准

GB 20426 煤炭工业污染物排放标准

GB 50027 供水水文地质勘察规范

HJ 610 环境影响评价技术导则 地下水环境

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 338 饮用水水源保护区划分技术规范

HJ 493 水质 样品的保存和管理技术规定

HJ 652 矿山生态环境保护与恢复治理方案（规划）编制规范（试行）

HJ/T 91 地表水和污水监测技术规范

MT/T 633 地下水动态长期观测技术规范

MT/T 1091 煤矿床水文地质、工程地质及环境地质勘查评价标准

MT/T 1022 废弃矿井地下水污染监测布网技术规范

地下水环境状况调查评价工作指南 （环办土壤函〔2019〕770号）

地下水污染模拟预测评估工作指南 （环办土壤函〔2019〕770号）

地下水污染健康风险评估工作指南 （环办土壤函〔2019〕770号）

废弃井封井回填技术指南（试行）（环办土壤函〔2020〕72号）

地下水污染源防渗技术指南（试行）（环办土壤函〔2020〕72号）

* 1. 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

矿坑水Mine Water

流入露天矿坑或井下巷道中的各种水，统称为矿坑水。

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。

酸性矿山排水Acid Mine Drainage

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。

* 1. 指导原则
     1. 科学性原则

综合考虑矿区的水文地质条件、污染物类型、污染特征、技术适用条件等，通过科学合理的技术筛选与设计，规范矿山地下水污染防治工作的开展。

* + 1. 可行性原则

综合考虑矿山开采区水文地质条件和污染物特性，因地制宜制定地下水污染防治技术方案，开展防治工程建设运行和过程监测。

* + 1. 安全性原则

矿山地下水污染防治工作方案制订和实施时，应确保工程实施安全，防止对施工人员、周边人群健康以及生态环境产生二次污染。

* + 1. 经济性原则

在保障矿山地下水污染防治效果的前提下，综合考虑建设、运行和监测等费用，优先选择治理效果好、成本低的工艺。

* 1. 工作内容和流程
     1. 工作内容
        1. 风险管控与修复目标确定

审核矿山前期调查资料与风险评估报告，明确需要开展风险管控或修复的地下水污染范围，以及处理或修复后，地下水及处理后的排水需要达到的水质目标值，确定需要达到的风险管控与修复目标。

* + - 1. 污染防治技术筛选

根据矿山地下水污染风险管控或修复目标，结合矿区水文地质条件、污染特征和防治要求等，筛选合适的地下水污染防治技术，包括源头预防与防控技术、过程截获与阻控技术和末端治理技术，必要时可开展试验验证。

* + - 1. 污染防治技术方案制订

在技术筛选的基础上，编制形成技术可行、经济合理的矿山地下水污染防治技术方案，主要包括技术路线、工艺参数、工程量、费用和周期等。

* + - 1. 工程建设运行与监测

根据关闭矿山地下水污染防治技术方案开展地下水污染防治工程建设、运行与监测。

* + - 1. 污染防治效果评估

关闭矿山地下水污染防治工程实施后，应制定污染风险防控效果评估方案，通过采样和监测，评估是否达到风险管控或修复目标，并根据效果评估结果提出后期环境监管的建议。

* + 1. 工作流程

本指南的工作流程见图1。

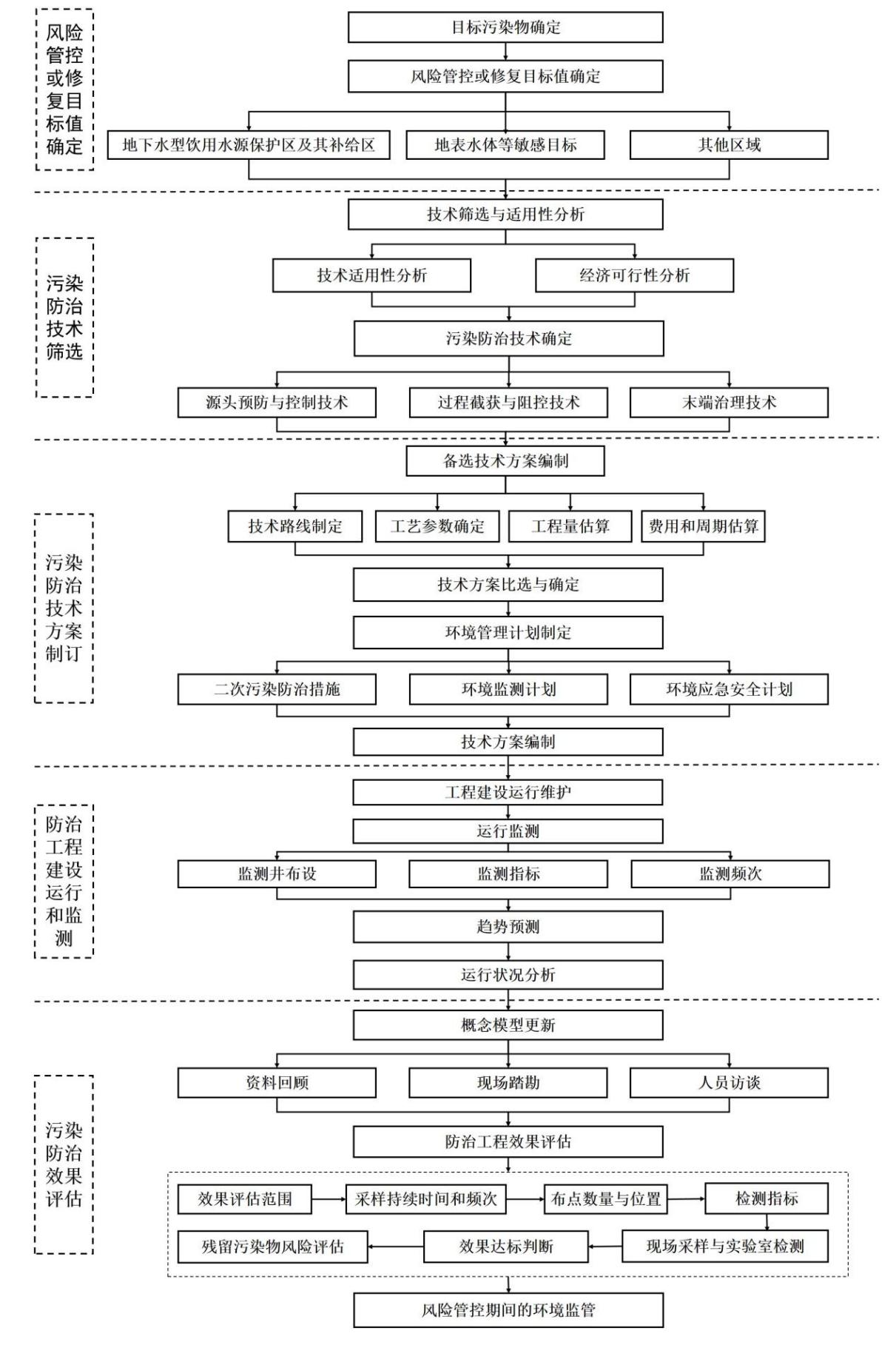


图1 关闭矿山地下水污染防治工作流程图

* 1. 风险管控与修复目标确定
     1. 目标污染物确定
        1. 根据前期关闭矿山地下水环境状况调查、风险评估、受体特征、地下水使用功能和地质因素等，确定矿山地下水的特征污染物。
        2. 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，应作为风险管控或修复的目标污染物。
     2. 修复目标值确定
        1. 若关闭矿山地下水污染影响到集中式地下水型饮用水源（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）保护区及补给径流区，应以这些区域的水质满足GB/T 14848中Ⅲ类标准作为健康与环境风险评估的目标。
        2. 对于GB/T 14848未涉及的目标污染物，根据《地下水污染健康风险评估工作指南》（环办土壤函〔2019〕770号），按照饮用地下水的暴露途径计算地下水健康风险评估风险控制值。采用风险评估计算修复目标值时，单种污染物可接受的非致癌危害商为1，可接受的致癌风险水平为10-6。
        3. 若关闭矿山位于地表水体等敏感目标补给区，根据地表水等敏感目标的水质要求，确定矿山地下水健康与环境风险评估计算的水质目标。水质目标参照GB3838或其他标准确定，对于国内标准未涉及的污染物，可参考欧盟、世界卫生组织及美国环境保护署发布的相关标准确定。矿井涌水处理后的排水水质可参考GB 20426或其他相关排放标准。
        4. 若关闭矿山地下水污染影响到具有工业和农业用水等使用功能的区域，根据其水质功能要求（参考GB/T 14848、GB 3838或GB 5084），确定关闭矿山地下水风险评估计算的水质目标。对于已有标准未涉及的目标污染物，根据《地下水污染健康风险评估工作指南》（环办土壤函〔2019〕770号文），采用地下水健康风险评估方法计算地下水风险评估风险控制值。
        5. 对于地下水无使用功能的区域，可选择地下水环境背景值作为修复目标值。
     3. 风险管控目标确定
        1. 当关闭矿山地下水污染影响到集中式地下水型饮用水源（包括已建成的在用、备用、应急水源，在建和规划的水源）保护区及补给区（补给区优先采用已划定的准保护区）时，应同步制定风险管控目标，目标至少包括阻断地下水污染物暴露途径，阻止污染扩散的内容。
        2. 经修复技术经济评估，无法达到6.2提出的地下水修复目标值，应制定地下水风险管控目标作为地下水修复的阶段目标。
        3. 当矿山地下水污染修复目标值为采用风险评估方法确定，而不是直接采用水质标准时，应制定风险管控目标。
     4. 地下水修复和风险管控范围确定

将地下水中目标污染物浓度超出修复目标值的空间范围作为地下水修复和风险管控的范围。

* 1. 污染防治技术筛选
     1. 技术适用性分析

根据目标矿山地质、水文地质、污染特征及施工条件，定性分析待选技术的适用性，常用的矿山地下水污染防治技术按所处的地下水径流位置可分为三类：源头预防与控制技术、过程截获与阻控技术，以及末端治理技术。方案编制过程中应根据三类技术的特点进行优化组合。各项技术适用性见表1所示。

表1 常用关闭矿山地下水污染防治技术及适用性

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **类别** | **防治技术** | **适用性** | **局限性** | **实施案例** |
| 源头预防 | 补给源阻隔技术 | 适用于地表水集中补给矿井或地表河流、湖泊、大气降水及岩溶补给采空区的优势通道明确，在渗流区段上游建立地表排水、导水工程设施，可减少对采空区的入渗补给的情况。 | 不能作为单一治理措施，需配套其他措施，并且落实日常巡查管护经费和相关人员。 | 广元市朝天区关口煤矿4号井口涌水量最大为2160立方米/天，通过对井内岩溶裂隙发育带通道进行注浆截流，阻断降雨进入煤层产生水岩作用，实现源头减量。 |
| 矿井巷道清污分流技术 | 适用于已经查明矿区采空区及矿井水导流通道，采用清污分流可减少污染矿井水量的情况。 | 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。 | 湖南娄底试点项目通过对清水补给区和关键通道进行注浆封堵，完成封堵补给通道2处，实现约70%水量的消减。 |
| 封场阻隔技术 | 适用于矿区裸露地表的产污废渣堆场的治理，对其封场阻隔可减少受雨水淋溶产生的废水。 | 有潜在渗漏和二次污染风险，用于大面积治理费用高。 | 浙江丽水遂昌黄铁矿试点项目针对废石渣堆场采用防渗覆盖减少降雨入渗量，消减废水产生量。 |
| 过程阻断 | 可渗透反应格栅（PRB）修复技术 | 适用于受污染含水层渗透性较差，埋深较浅的情况。 | 反应介质易失效和阻塞，需要定期更换或采取补救措施，处理费用高。 | 天津某垃圾填埋场地下水氨氮污染修复项目污染物主要分布于粉质黏土和粉土潜水含水层，含水层层底埋深6-7米。该项目选用漏斗式PRB技术，通过充填赤铁矿、秸秆碎屑等反应介质，去除地下水中的氨氮。 |
| 厌氧环境构建技术 | 适用于采空区或废弃巷道经过改造可以形成厌氧环境的情况。 | 可能存在异位渗水，需重点关注井口渗水情况。 | 广元市朝天区关口煤矿2号井口涌水量约为100立方米/天，针对井口采取封隔回填抑制氧化反应，矿井内水质pH逐步从酸性上升为弱碱性，铁含量明显降低。 |
| 多级反应串联耦合井巷填充技术 | 适用于采空区或废弃巷道结构稳定，人员和设备可以安全地在其中施工的情况。 | 施工过程中安全风险较大，密闭空间作业规范要求多。 | 贵州三都县锑矿锑污染风险管控项目，采用以改性碳酸盐岩为主要充填材料，结合多种吸附材料进行耦合串联布置。在较低的水流流速与较长的水力停留时间的情况下，使得废水中锑污染在井巷道中净化。 |
| 污染阻控帷幕构建技术 | 适用于各种污染物质的扩散阻隔，其材料应具有良好的稳定性，地下水中的污染物不会显著劣化阻隔材料的性能。 | 阻隔材料存在抗腐蚀性差，抗变形能力弱等情况。 | 内蒙古某尾矿库硫酸盐污染修复项目，通过在反应区两侧修建止水帷幕，控制地下水流向反应区。 |
| 末端治理 | 缺氧石灰石沟渠 | 适用于水中溶解氧、Fe3+和Al3+浓度均低于1mg/L的情况，可作为湿地处理系统的预处理技术。 | 当水中溶解氧、Fe3+和Al3+浓度分别大于1mg/L，氧化作用就会发生，形Fe(OH)3和Al(OH)3沉淀会对石灰石颗粒形成包裹作用，并堵塞系统的正常运行。 | 美国东部一些场地通过建设缺氧石灰石沟渠处理矿山酸性废水，所用石灰石在8吨到6930吨之间，系统水力停留时间多集中在20到100小时，运行时间为3到9年。 |
| 好氧石灰沟渠 | 适于在地形坡度>20%的沟谷中处理含氧酸性矿井水。 | 当废水流量较大时系统会出现石灰石溶解速率过慢、容易钝化、堆积和移动。 | 美国东部某地下采矿场酸性废水处理采用好氧石灰石沟渠，坡度为15%，酸度去除效率为75.8g/d/t。 |
| 连续产碱系统 | 适用于处理各种类型的矿山酸性废水，尤其是含有高SO42-、高Fe2+的废水。 | 该技术对Mn的去除效果较差。 | 美国科罗拉多州Summitville矿区对连续产碱系统的处理效果进行了监测，其中对Fe2+去除率达到64%，而对Mn2+去除率仅为11%。通过对美国宾夕法尼亚州四个不同填充厚度碳酸盐岩厌氧湿地连续产碱系统治理效果进行研究与观测，Fe2+去除率最高达92%，出水pH值均得到提升。 |
| 硫酸盐还原生物反应器 | 适合处理的废水水质要求：pH: 5-8;温度28-38℃;H2S＜40mg/L; Eh＜-100mV。 | 需要定期更换有机质，系统受气候影响大，抗冲击负荷能力较差。 | 美国Tab-Simco煤矿通过设置硫酸盐还原生物反应单元处理酸性废水，建设生物反应器充填了约6000m3的改性石灰石堆肥材料，主要包含了木屑、秸秆和庭院垃圾。处理后酸性废水硫酸根离子含量下降30.4%，铁离子平均去除率达到76.5%，铝离子平均去除率达到99.6%。 |
| 人工湿地 | 好氧人工湿地适用于适合处理净碱废水，污染负荷为10-20gFe/m2/d，0.5-1.0gMn/m2/d。厌氧湿地适用于适合处理净酸废水，污染负荷约为3.5g酸度/m2/d，基质渗透系数103-104cm/s，水力停留时间24-36h。 | 有氧湿地受环境和季节影响较大，厌氧湿地基础建设和维护费用高。 | 贵州三都县老八井锑矿建设潜流湿地治理锑污染废水，反应单元分为四组，每组由上行流湿度和下行流湿地串联而成，湿地基层由石灰石、生物秸秆、活性炭、铁粉等吸附剂组成。美国俄亥俄州东部赫夫河流域运行了13年以上的好氧湿地-石灰石沟渠联用系统，去除酸性废水中绝大部分的铁、铝离子和部分锰离子。 |
| 中和沉淀技术 | 适用于处理高铁锰废水。 | 需要经常维护和日常管理，系统运行成本较高。 | 广元市旺苍县狮子岭煤矿建设日处理规模为300吨的污水处理站，采用化学中和+絮凝沉淀处理酸性废水，pH值由1.6提升至7左右，铁浓度由超标296倍降至达标。 |
| 铁铝资源化回收技术 | 适用于处理铁、铝浓度较高的废水，总铁浓度>200mg/L时具有较好的回收价值，总铁浓度越高其回收价值越高。 | 目前技术应用尚不成熟，大多处于开发阶段。 | 山西阳泉山底河酸性废水铁铝资源化回收中试项目，通过球磨技术实现铁铝资源化回收。废水中铁离子浓度从661mg/L降低至0.5mg/L以下，锰离子浓度从33.59mg/L将至0.1mg/L以下，pH值从3.49上升到7.8.。 |

* + 1. 经济可行性分析
       1. 筛选出可行的技术后，根据矿山条件，初步计算各项技术投入使用所需前期费用、材料费用、施工费用及系统运行维护费用，具体包括：

1. 材料费用主要为各项技术所需反应、充填、封堵等所用材料的购置费和加工费；

2）施工费用取决于各备选技术方案，包括人员费、设备租赁费、燃料动力费等。主要由场地条件、物料运输、施工技术、设施与设备等因素确定；

3）防治工程运行维护期间所需的人员、动力、材料和设备等费用，以及数据监测费用等。

* + 1. 污染防治技术确定

在技术适用性和经济可行性分析的基础上，以高效、低成本实现矿区地下水污染防治目标为目的，确定最优的一种或几种技术组合作为治理方案选项。常用的技术简介如下：

* + - 1. 源头预防技术通过对矿井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，以及矿区废渣堆场封场等实现矿区地下水污染源头预防和控制。
      2. 针对有矿井涌水的情况，采用源头预防技术可减少涌水产生量。常用的源头预防与控制技术见附录A。其中，注浆封堵工程可参考《矿山帷幕注浆规范》（DZ∕T 0285）。
      3. 过程阻断技术通过在矿井中对污染矿井水中污染物的阻截，或对污染矿井水的封闭、抽出，减少矿井水中的污染物总量。
      4. 针对有酸性涌水的井口实施封隔回填，可减少或避免涌水的排出，封堵厚度应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。
      5. 末端治理技术应通过对矿山排水或涌水的处理，使其达到相应的水质标准。
      6. 末端处理技术包括石灰石沟渠、连续产碱系统、生物反应器、人工湿地等。详见附录C。
  1. 污染防治技术方案制定
     1. 备选技术方案编制
        1. 技术路线确定，应包含以下内容：

1）技术路线应根据废弃矿山环境调查、水文地质调查和风险评估结果，以及风险管控与修复目标确定；

2）技术路线应通过对国内外现有修复技术方案的优化比选，确定一种或多种技术优化组合，因地制宜制定；

3）技术路线应反映矿山地下水污染防治的总体思路、方式、工艺流程等。

* + - 1. 工艺参数确定，应根据技术路线，结合目标污染物类型、浓度、备选技术成熟度、效率、成本和环境风险等，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，筛选出一种或多种风险管控或修复技术。
      2. 针对确定的修复技术，选择性开展实验室小试、现场中试以及模拟分析：

1）实验室小试，目的是获得所选风险管控或修复技术和材料在实际应用中的最佳参数，小试时设定的条件应与矿山地下水污染防治目标区域的生物地球化学特征相似。应针对筛选技术的关键环节和关键参数，制定实验室小试方案，采集矿坑水以及受污染井、泉水，按照不同的技术组合试验效果，确定最佳工艺参数和可能产生的二次污染物，估算修复成本和周期。试验过程需有严格的条件控制和质量保证。

2）现场中试，目的是在实验室小试的基础上，进一步获得施工设计所需要的工艺参数，如阻隔注浆的位置及注入工艺等，确定现场试验过程中产生的固体废弃物等二次污染物。现场中试内容应根据矿山区域地质、水文地质条件、污染物类型和空间分布特征等，选择适宜的水文地质单元开展。亦可对类似或相同矿坑水污染防治技术的应用案例进行分析，必要时可现场考察和评估应用案例实际工程。现场中试开展前需设计二次污染防控修复措施。

3）模拟分析，建立风险管控与修复对象的地下水水流模型和溶质运移模型，选择目标污染物作为模拟因子，利用解析法或数值法开展模拟预测，根据不同防治技术的设计情景，评估矿山地下水污染防治技术的工程实施效果、修复周期和经济成本等，获得并进一步优化设计和施工所需的工程参数。

* + - 1. 在小试和中试的基础之上，基于地下水水流模型和溶质运移模型评估风险管控或修复技术的实施效果，并根据模拟分析预测结果对工艺参数进行调整优化。
      2. 根据实验室小试、现场中试和模拟分析，确定风险管控技术的工艺参数包括药剂的投加比、投加方式和浓度，工程控制措施的规模、材料、规格以及地上处理单元的处理量、处理效率等。采用对比分析或矩阵评分法对初步筛选技术进行综合评估，确定一种或多种可行技术组合。
      3. 工程内容设计，根据技术路线，按照确定的技术方案，结合工艺流程和参数，估算方案工程量。估算工程量包括以下内容：

1）估算地下水修复方量应根据矿井水量水质监测结果，考虑极丰水期（水量最大）、极枯水期（水量最小）矿坑水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；

2）估算土壤修复方量时，以每种目标污染物的浓度等值线图为基础，以场地风险控制值为依据，结合垂向污染模拟确定污染物在场地中的空间分布，采用专业软件或手动估算等方法进行；

3）对于复合型污染，应将每种目标污染物的浓度等值线图进行叠加，并根据污染物最大的污染深度估算修复理论方量；

4）估算地下水理论修复方量时，还应考虑场地含水层深度及分布条件、地下水类型、流向、流速、水力梯度、地下水水位、土壤介质孔隙度等条件；

5）估算气体时，还应考虑到周围风向、风力变化情况、周围居民点分布情况等；

6）固体废弃物无害化处理工程量主要是在地下水风险管控与修复过程中采用中和沉淀法、过滤沉淀法以及微生物处理等方法产生的沉淀，应根据修复方量和不同修复工艺计算固体废弃物产生量。

* + - 1. 费用和周期估算，其中，周期估算应根据工程量、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确定。费用估算应根据矿区地下水防治工程量确定，应包含以下内容：

1）建设费用主要包括施工准备过程和施工过程所需费用，其中施工准备过程主要有技术准备、施工现场准备、材料准备、施工机械和施工人员准备等费用；施工过程所需费用包括污染防治系统施工安装、调试等费用，应依据工程设计图纸、施工方案和相关技术规范文件开展。

2）运行费用主要包括污染防治系统运行管理、设备操作、维护保养、检修以及工程控制材料和二次污染物处理药剂涉及的材料和能耗费用等。

3）监测费用主要包括施工前地下水、地表水监测费用和施工过程中需对地下水水位、水质、注入药剂特征指标、工程性能指标、二次污染物等进行监测所需费用，具体监测指标和监测频率指标参照HJ 25.6执行。

* + - 1. 备选技术方案编制应符合下列要求：

1）根据水文地质条件和污染现状、污染防治目标、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；

2）备选方案应满足防治目标要求，符合法律法规，且经济合理、技术可行。

* + 1. 技术方案比选与确定

从主要技术指标、工程建设及运行费用、环境及健康安全等方面对备选技术方案进行比选，可采用对比分析或矩阵评分等方法确定最优方案，比选内容包括：

* + - 1. 主要技术指标：结合矿坑水污染特征、防治目标，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。
      2. 工程建设及运行费用：包括直接费用和间接费用。直接费用主要包括防治工程主体设备、材料、工程实施等费用，间接费用包括工程监测、工程监理、质量控制、健康安全防护和二次污染防范措施等费用，比较不同备选技术方案产生费用的合理性。根据不同技术方案运行特点，比较项目建设后的运行维护及管理费用，主要包含燃料动力费、材料费、人员维护费等。
      3. 环境及健康安全：防治工程的实施，应首先分析工程实施的环境影响，并应根据工艺过程和施工设备清洗等环节产生的废水、废气、固体废物，噪声和扬尘等环境影响，制定相关的收集、处理和处置技术方案，提出二次污染防范措施。综合比较不同备选技术方案的二次污染排放情况以及对施工人员、周边人群健康和生态受体的影响等。
    1. 环境管理计划制定
       1. 对施工和运行过程可能造成的地下水、土壤、地表水、环境空气等二次污染，应制定修复措施，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。二次污染防治措施应具体可行，具有较强的可操作性，应符合下列要求：

1）废水、废气处理设施应明确处理能力、处理工艺、平面布局、主要工艺（设备）参数及排放去向；

2）扬尘污染防控应明确实施位置和施工阶段，采用喷水降尘的应明确频率和持续时间；

3）污染土壤临时堆存区等应明确具体位置，说明堆放点的截流、防尘、防雨和废水处理等措施；

4）污染修复过程中产生的废渣储存点位置应明确，危险废物储存应按照相应标准设置。

* + - 1. 环境监测计划计划包括工程实施过程中的环境监理、二次污染监控中的环境监测。应根据确定的技术方案，结合矿区污染特征和所处环境条件，有针对性地制定环境监测计划。主要监测对象包括：矿井涌水、地下水、土壤、地表水及环境空气及残余废弃物等。应符合下列要求：

1）矿井涌水，以及处理后的排水。应对矿井涌水的水质和水量进行持续监测，处理后的排水水质应根据排放要求进行检测；

2）地下水主要为矿区边界内的地下水或经场地地下径流到下游汇集区的浅层地下水。在污染较重且地质结构有利于污染物向深层迁移的区域，应对深层地下水进行监测；

3）土壤包括矿区内的表层土壤和深层土壤，表层土壤和深层土壤的具体深度划分应根据场地环境调查结论确定；

4）地表水主要为矿区边界内流经或汇集的地表水，应同时考虑流经场地地表水的下游汇集区；

5）环境空气是指矿区污染区域中心的空气和场地下风向主要环境敏感点的空气；

6）残余废弃物，环境调查的监测对象中还应考虑场地残余废弃物，主要包括场地内遗留的生产原料、工业废渣、废弃化学品及其污染物，残留在废弃设施、容器及管道内的固态、半固态及液态物质，其他与当地土壤特征有明显区别的固态物质。

* + - 1. 为确保废弃矿山地下水污染修复工程施工人员、周边人群和生态受体的安全，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，内容应包括安全问题识别、预防措施、突发事故应急措施、安全防护装备和安全防护培训等。
    1. 技术方案编制

根据前面几个环节内容，编制技术方案，在附录中给出方案大纲。

* 1. 防治工程建设运行和监测
     1. 工程建设和运行维护
        1. 矿区地下水防治工程应编制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。
        2. 当涉及地下水修复药剂、工程控制材料和二次污染物处理药剂及材料等使用时，应包括对药剂和材料进场检测、试验、储存、使用的管理等内容。
        3. 工程建设运行维护，应包含以下内容：

1）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；

2）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；

3）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；

4）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。

* + - 1. 根据工程建设运行维护方案进行工程实施，现场实施内容主要包括地下水修复和风险管控系统施工安装、调试等，应依据工程设计图纸、施工方案和相关技术规范文件开展。
      2. 施工过程中做好工程动态控制工作，通过落实安全和质量保证措施、控制工程施工进度和建设安装成本，保证安全、质量、进度、成本等目标的全面实现。
    1. 运行监测
       1. 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：

1）地下水水位和水质：包括地下水水位和目标污染物浓度等；

2）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。如阻隔墙两侧的地下水位、目标污染物浓度；注入药剂后矿井水水质变化如pH、温度、电导率、总硬度、氧化还原电位和溶解氧等；中和沉淀处理设施的进水、出水pH值，铁、锰、铝离子浓度，石灰石沟渠内的沉淀层厚度、潜流湿地的进水、出水水质等；

3）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；

4）其他监测指标，如降水量、地表河流流量及水质、矿井涌水水量及水质等。

* + - 1. 监测频次应符合下列要求：

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。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；

2）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每半个月一次；运行稳定期原则上监测频次为每月一次；运行后期原则上监测频次为每季度一次，两个批次之间间隔不得少于1个月；

3）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，应适当提高监测频次。

* + 1. 趋势预测
       1. 监获取工程运行监测数据后应及时进行趋势预测，可对9.2.1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。
       2. 污染趋势预测图中应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。
       3. 如进行数值运算，需包括模型计算区网格剖分图、水文地质参数分区图、初始流场和拟合流场图、初始浓度场和拟合浓度场图、观测点水头和污染物浓度拟合曲线图及误差情况图，预测流场和浓度场图，预测水头和浓度的时间变化曲线等。
    2. 运行状况分析

工程运行状况分析应根据地下水监测数据及趋势预测结果开展，应分析地下水防治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。

* 1. 污染防治效果评估
     1. 概念模型更新

应收集矿山地下水污染防治相关资料，通过现场踏勘和人员访谈了解矿山地下水调查及风险评估结论、防治工程实施情况，以及环境保护措施落实情况等，掌握矿山地质与水文地质条件、污染物空间分布、防治工程设施设置、二次污染物、防治过程监测数据等关键信息，更新矿山概念模型。

* + - 1. 收集矿山地下水污染防治相关资料清单，主要包括矿山地下水调查报告、风险评估报告、风险管控和修复技术方案、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、实施方案变更协议、运输与接收的协议和记录、施工管理文件等。
      2. 资料回顾要点主要包括地下水污染防治工程概况及环保措施落实情况。通过地下水污染防治工程概况回顾，了解工程范围及目标、工程设计和实施情况、工期、运输记录和运行监测数据等。环保措施落实情况回顾主要通过对地下水污染防治过程中二次污染防治相关数据记录和资料报告的梳理，分析工程建设和实施过程中二次污染物排放和防治情况。
      3. 开展现场踏勘工作，了解矿山地下水污染防治工程情况、环境保护措施落实情况，包括工程施工进度、基坑清理情况、工程设施运行情况和施工管理情况等。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。
      4. 应开展人员访谈工作，对矿山地下水污染治理工程情况、环境保护措施落实情况进行全面了解。访谈对象包括矿山责任单位、矿山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。
      5. 在资料回顾、现场踏勘、人员访谈的基础上，掌握矿山地下水污染防治工程情况，结合矿山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，对矿山概念模型进行更新，完善矿山地下水污染防治工程实施后的概念模型。更新矿山概念模型包括以下信息：

1）矿山地下水污染防治工程概况。工程工期、范围、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；

2）关注污染物情况。目标污染物原始浓度及风险管控与修复过程中的浓度变化、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防治情况、污染物空间分布特征的变化；

3）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；

4）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。

* + - 1. 矿山概念模型可用文字、图、表等方式表达，作为效果评估范围、点位布设方案、采样节点和采样频率确定等工作依据。
    1. 防治工程效果评估

参照HJ 25.5、HJ 25.6、GB 3838和GB 20426等相关标准内容，对关闭矿山地下水污染防治工作开展效果评估。

* + - 1. 关闭矿山地下水污染防治效果评估范围应根据不同防治措施的特点确定：

1）矿坑涌水污染地表水的矿山，应以矿坑排水口及受其影响的下游区域为评估范围；

2）尾矿库、矿渣堆淋溶水污染周边地表水的，应以尾矿库、矿渣堆边缘淋溶水流出点及其影响的下游区域作为评估范围；

3）因矿洞洞口或底部裂隙流出物污染至周边矿区环境的，应以受污染地下水修复范围的上游、内部和下游，以及修复工程可能涉及的二次污染区域为评估范围。

* + - 1. 采样持续时间和频次，应符合下列要求：

1）地下水污染防治效果评估采样频次应根据矿山地质与水文地质条件、风险管控与修复技术确定，如水力梯度、渗透系数、季节变化和其他因素等；

2）地表水风险管控与修复效果评估采样频次应根据矿山所在地区的降雨和水文条件以及工程特点确定。采样时应避开降雨时段以及降雨刚刚结束的时段；

3）地下水和地表水污染风险管控评估阶段针对污染物指标应至少采集4个批次的样品，采样持续时间至少为1年。地下水和地表水修复效果评估阶段针对污染物指标应至少采集8个批次的样品，采样持续时间至少为1年；

4）原则上采样频次为每季度一次，两个批次之间间隔不得少于1个月。对于地下水流场变化较大的矿山，应适当提高采样频次。

* + - 1. 布点数量与位置，应符合下列要求：

1）原则上在风险管控与修复效果评估范围上游应至少设置1个监测点，内部应至少设置3个监测点，下游应至少设置2个监测点。同时在可能涉及的二次污染区域设置监测点；

2）原则上修复效果评估范围内部采样网格不宜大于80 m×80 m；

3）地下水采样点应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；

4）可充分利用矿山环境调查阶段设置的监测井，现有监测井应符合效果评估采样条件，能满足污染羽特征刻画和工程运行状况分析的监测要求；

5）地表水污染防治效果评估点位为所有的出水断面，断面形状要满足流量测定的要求。

* + - 1. 检测指标，应符合下列要求：

1）地下水检测指标为技术方案中确定的目标污染物。采用加入化学药剂进行风险管控和修复，检测指标应包括产生的二次污染物。必要时可增加地下水常规指标、修复设施运行参数等作为效果评估依据。

2）地表水效果评估的检测指标在包括目标污染物的同时，应准确测定采样时段的地表水流量。

* + - 1. 现场采样与实验室检测

1）地下水采样时应依据矿区的水文地质条件，结合调查获取的污染源特征，应利用最低的采样频次获得最有代表性的样品；

2）设置监测井时，应避免采用外来的水及流体，同时在地面井口处采取防渗措施。

3）监测井的井管材料应有一定强度，耐腐蚀，对地下水无污染。

4）在监测井建设完成后必须进行洗井。所有的污染物或钻井产生的岩层破坏以及来自天然岩层的细小颗粒都必须去除，以保证出流的地下水中没有颗粒。常见的洗井方法包括超量抽水、反冲、汲取及气洗等。

5）地下水采样前应先进行洗井，采样应在水质参数和水位稳定后进行。

6）地下水采样的对照样品应与目标样品来自相同含水层的同一深度。具体地下水样品的采集、保存与流转应按照HJ/T 164的要求进行。

7）地表水的采样时避免搅动水底沉积物。为反映地表水与地下水的水力联系，地表水的采样频次与采样时间应尽量与地下水采样保持一致。具体地表水样品的采集、保存与流转应按照HJ/T 91、HJ 493的要求进行。

* + - 1. 风险管控效果达标判断

风险管控效果达标判断包括对工程性能指标、污染物指标和辅助指标的达标判断。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；污染物指标包括土壤、地下水和地表水等环境介质中的目标污染物；辅助指标包括地下水水位、地下水流速、地球化学参数等。

1）矿坑涌水污染地表水的矿山，以矿坑排水口污染地表水收集治理后达标排放，及受其影响的地下水下游区域目标污染物污染羽持续性缩小为达标；

2）尾矿库、矿渣堆淋溶水污染周边地表水的，应以尾矿库、矿渣堆边缘淋溶水流出点及其影响的地下水下游区域目标污染物污染羽持续性缩小为达标；

3）因矿洞洞口或底部裂隙流出物污染至周边矿区环境的，风险管控工程中可能涉及的二次污染区域目标污染物应根据其去向得以达标排放、安全填埋或阻隔管控。受影响的地下水下游区域目标污染物污染羽持续性缩小为达标。

* + - 1. 修复效果达标判断

1）原则上每口地下水监测井、处理后的污水排放口，以及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，应对未达标区域开展补充修复；

2）可采用趋势分析进行持续稳定达标判断：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；水中污染物浓度呈现上升趋势，则判断未达到修复效果；

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。

* + - 1. 同时满足下列条件的情况下，可判断修复达到极限：

1）矿山概念模型清晰，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；

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

3）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；

4）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；

5）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。

* + - 1. 残留污染物风险评估

若目标污染物浓度未达到评估标准，但已达到修复极限，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。应包括以下工作内容：

1）更新矿山概念模型：掌握修复后矿山地质与水文地质条件、污染物空间分布、潜在暴露途径、受体等，考虑风险管控措施设置情况，更新矿山概念模型。

2）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。

3）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》执行，相关参数根据矿山概念模型取值。

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；若残留污染物对受体和环境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。

* + 1. 风险管控期间的环境监管

1）风险管控期间的环境监管方式包括环境监测与制度控制；

2）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；

3）针对排水点应建设在线监测系统，实时监测地下水水位、水质、工程性能指标和二次污染物指标等，监测数据应上传至环境监管平台；

4）监管单位应对监测数据及信息公开内容的真实性和准确性负责；

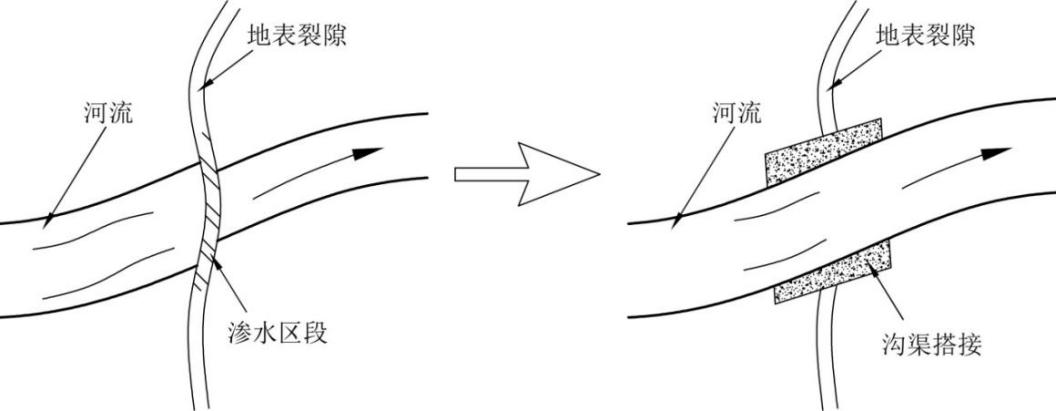
5）环境监测采样频次应不低于每季度一次，两个批次之间间隔不得少于1个月，一直持续到达到修复效果，结束风险管控为止；

6）制度控制包括限制矿山所在地土地利用方式、限制地下水或地表水利用方式、通知和公告矿山所在地潜在风险、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使用。

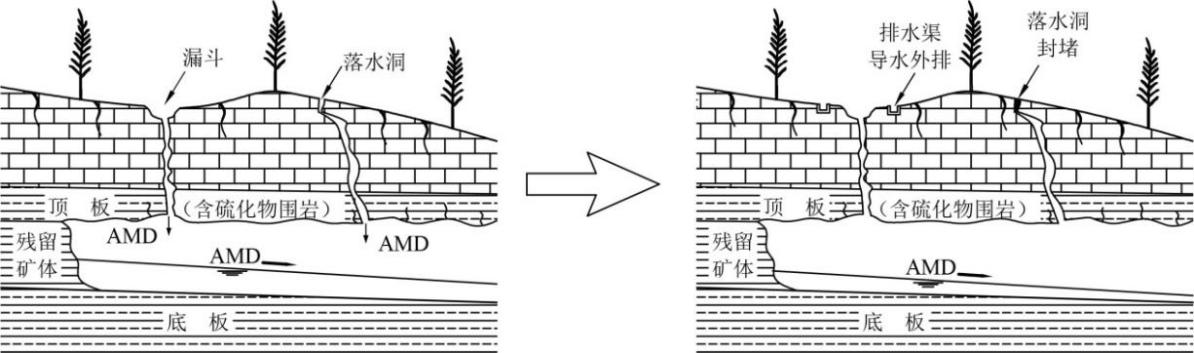
2. （资料性）  
   矿山地下水污染源头预防技术

A.1 补给源阻隔技术

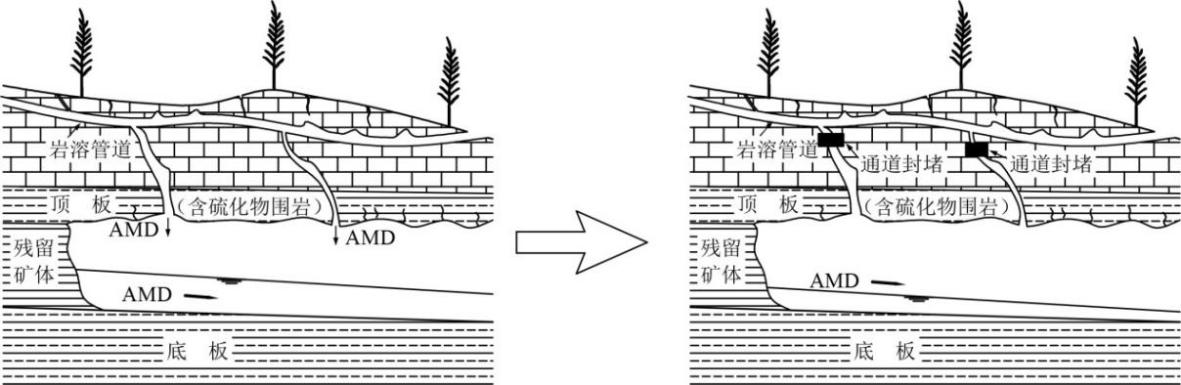
通过地面调查、示踪试验、地球物理勘探等方法，寻找和确定地表水集中补给矿井的优势通道，并通过地表通道封堵或渗漏区防渗改造，或对地层裂隙和溶隙的注浆封堵，阻断地表河流、湖泊、大气降水及岩溶水补给采空区的优势通道（图A.1）。同时可在集中渗流区段上游建立地表排水、导水工程设施，减少对采空区的入渗补给，从而减少酸性矿井涌水的排放。



（a）地表溪流导排减量示意图



（b）地表岩溶通道导排、封堵示意图

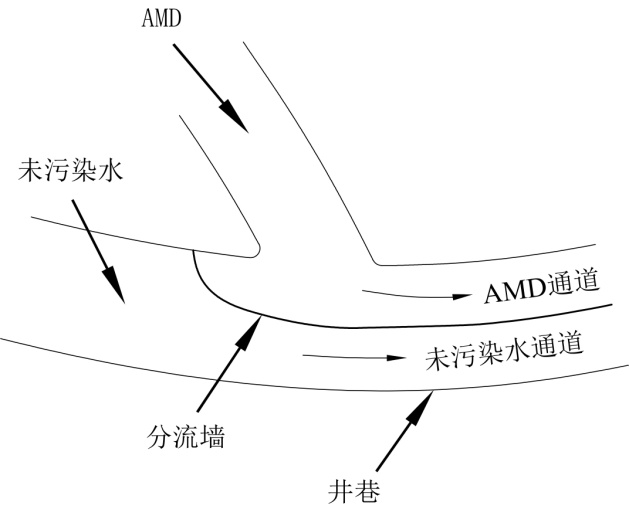
******

（c）地下岩溶管道及含水层封堵减量示意图

图A.1 补给源阻隔技术示意图

A.2 矿井巷道清污分流技术

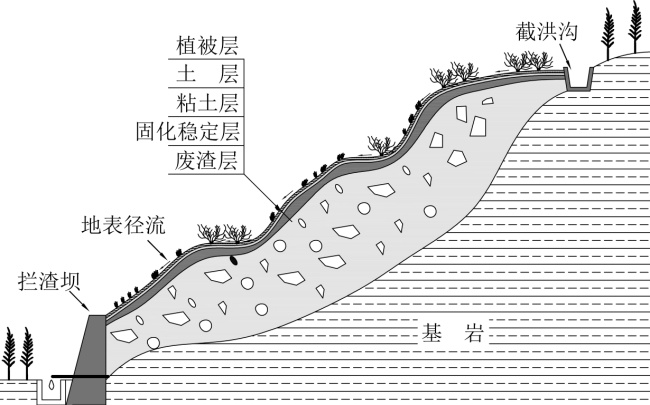
通过对矿井中的局部封堵和导流，使渗入巷道或采空区尚未被污染的地下水沿不含矿的巷道直接外排，以减少污水的产生量。采用这种技术应当预测采空区塌陷对封堵部位的影响程度，因为塌陷会形成新的导水通道，使矿井水有可能重新进入含矿部位。

**

图A.2 矿井巷道清污分流技术示意图

A.3 矿区含重金属废渣堆场封场阻隔技术

针对矿区裸露地表的含重金属污染废渣堆场（残留有含硫矿物）受雨水淋溶产生酸性废水的问题，可采用表面阻氧覆盖、表面钝化和杀菌处理等抑制酸性废水的产生。阻氧覆盖材料可选择粘土、石灰、粉煤灰及有机覆盖材料；表面钝化材料可选择磷酸盐、硅酸盐材料；杀菌材料可选择十二烷基硫酸钠、烷基磺酸钠及小分子有机酸等。废渣堆场封场后可对其表面进行植被生态恢复。

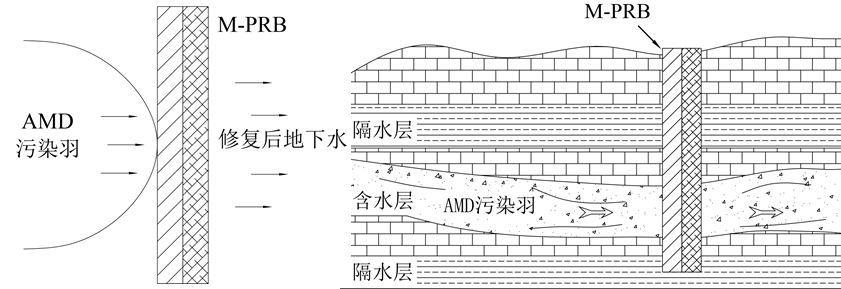
**

图A.3 矿区含重金属废渣堆场封场阻隔技术示意图

1. （资料性）  
   矿山地下水污染过程阻断技术

B.1 污染地下水可渗透反应格栅（PRB）修复技术

针对地质环境简单、污染物浓度较低的矿区地下水治理，可在水流路径上安装有反应活性材料的墙体，墙体一般放置在地下水污染羽状体流经的下游，与受污染地下水流动轨迹方向垂直，污染羽在自然水力梯度下迁移通过活性介质，与墙内介质发生反应（如沉淀、吸附、氧化还原、生物氧化与还原等反应），转化成低毒性或危害较小的化合物或被去除。充填材料主要有铁基材料（零价铁、纳米零价铁等）、改性生物炭（如铁、锰改性生物炭）、蒙脱石、石灰石、沸石、微生物膜、有机黏土、有机质（秸秆、稻壳、木屑等）、无机矿物材料（磷灰石、粉煤灰等）或其他活性物质。

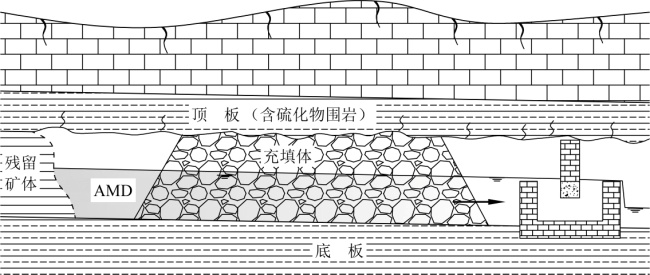


图B.1 补给源阻隔技术示意图

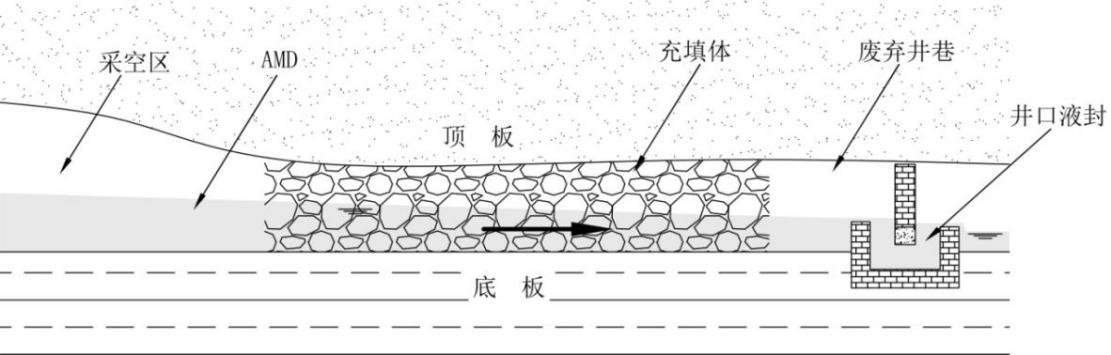
B.2 采空区和废弃巷道厌氧环境构建技术

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AMD，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.2）。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，控制酸性废水的产生。

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.3）。

******

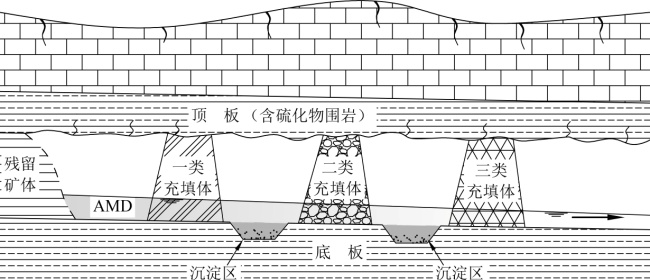
图B.2 采空区充填及厌氧环境构建示意图



图B.3 废弃巷道充填及厌氧环境构建示意图

B.3 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。

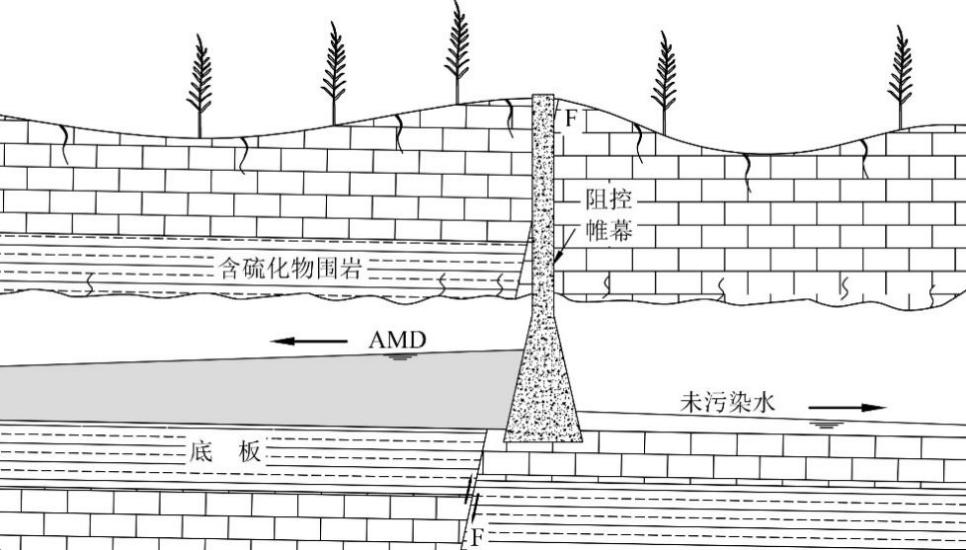


图B.4 多级反应串联耦合井巷填充技术示意图

B.4 污染阻控帷幕构建技术

构建污染阻控帷幕技术（图B.5）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。

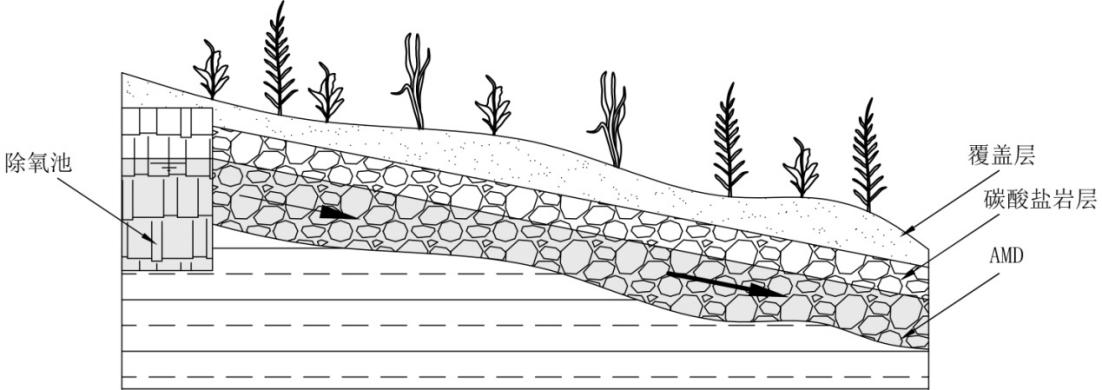
****

图B.5 污染阻控帷幕构建技术示意图

1. （资料性）  
   矿山地下水污染源头预防技术

C.1 缺氧石灰沟渠

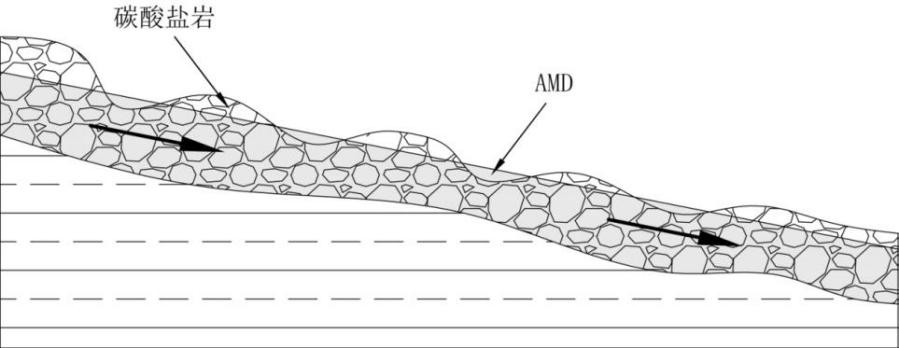
缺氧石灰石沟渠（Anoxic Limestone Drains， ALDs）的主体为填充石灰石的沟渠，上方覆盖塑料薄膜和粘土以隔绝空气。在低溶解氧和高二氧化碳条件下，石灰石与酸性矿山排水接触时，可产生碱度提高水体pH。为防止金属氢氧化物沉淀覆盖在石灰石表面，阻碍石灰石溶解，进水中溶解氧（DO）、Fe3+和Al3+浓度需低于1mg/L。为保证石灰石的溶解速率，系统水力停留时间需设置15h以上。为进一步减少系统中的溶解氧，可在缺氧石灰石沟渠前端串联一个除氧池，以去除酸性矿山排水中的溶解氧。缺氧石灰石沟渠操作简单，运行成本低，通常作为酸性矿山排水的预处理技术而被广泛应用，示意图如图C.1所示。



图C.1 缺氧石灰沟渠技术示意图

C.2 好氧石灰沟渠

好氧石灰沟（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度以上坡度，以保证酸性矿山排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

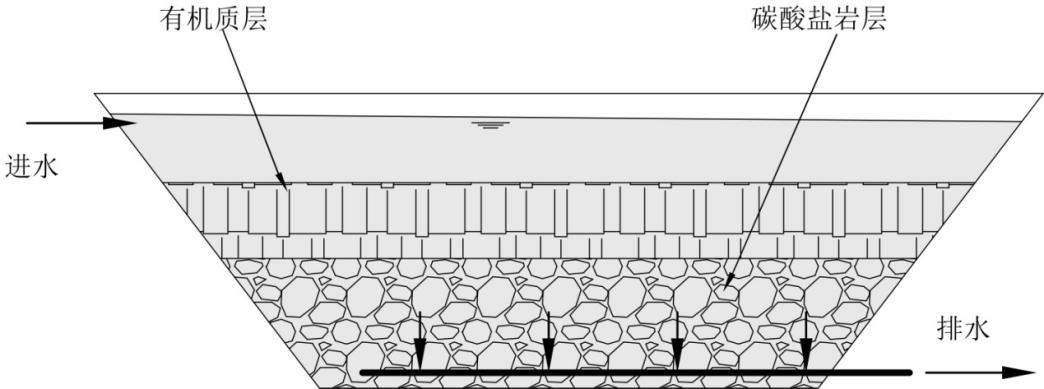
石灰石导流井（Limestone Diversion Wells，LDW）主体为—个垂直的金属或水泥的圆柱体水池，直径1.5~1.8m，深2~2.5m，填充砂粒大小的石灰石。酸性矿山排水通过管道引入导流井，然后在井中与石灰石接触，流速需能够使石灰石颗粒充分搅动（水头压力至少为2.5m），通过石灰石溶解产生碱度，而水解和中和反应产生的金属絮凝物随水流冲出系统。

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

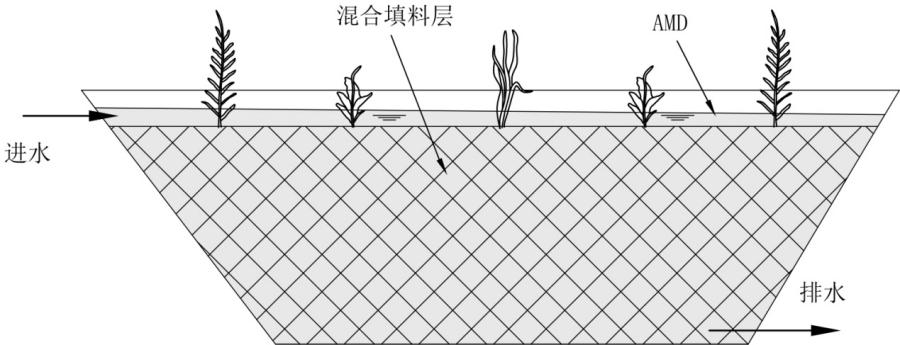
连续产碱系统（Successive alkalinity-producing systems， SAPS）最上层为1~3m的水层，中间是0.5~1m的有机层，底部为0.5~1m的石灰石层。水层能为系统冲洗提供一定的水头，有机层能为微生物提供营养物质以促进硫酸盐还原菌生长，石灰石层能有效地产生碱度。系统从上部进水，底部出水，并保留有一定的水位高度。由于酸性矿山排水与石灰石接触前先经过有机层消耗氧气，因此进入石灰石层时处于缺氧状态，能有效减少Fe3+在石灰石层的沉淀，出水通过一系列穿孔排水管输送到好氧湿地或沉淀池中，促使金属沉淀。连续产碱系统适宜处理溶解氧为2~5mg/L、净酸度300~500mg/L（碳酸钙当量）的高重金属酸性矿山排水，如图C.5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

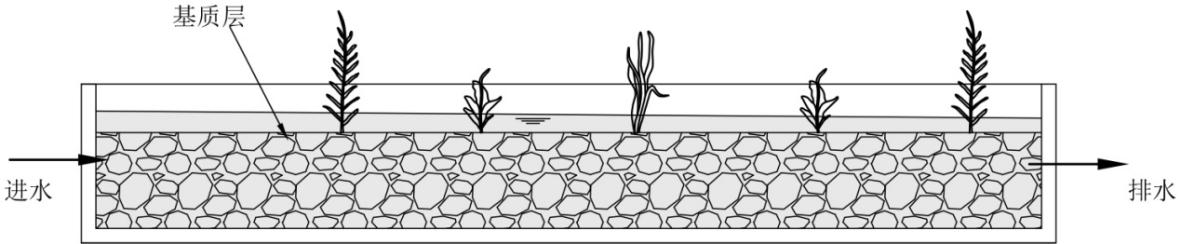
硫酸盐还原生物反应器（Sulfate-reducing bacteria bioreactor， SRB）是在有机碳源存在的前提下，利用硫酸盐还原菌（SRB）还原硫酸根，生成硫化氢和碳酸盐碱度，提高酸性矿山排水pH，硫化氢可与重金属离子生成金属硫化物沉淀。硫酸盐还原生物反应器施工简便，维护和管理费用较少，相比传统碳循环处理技术产生的生物污泥量和温室气体更少；但硫酸盐还原菌最适pH大于5，因此在反应基质中通常需补充石灰石提高系统碱度，如图C.6所示。



图C.4 硫酸盐还原生物反应器示意图

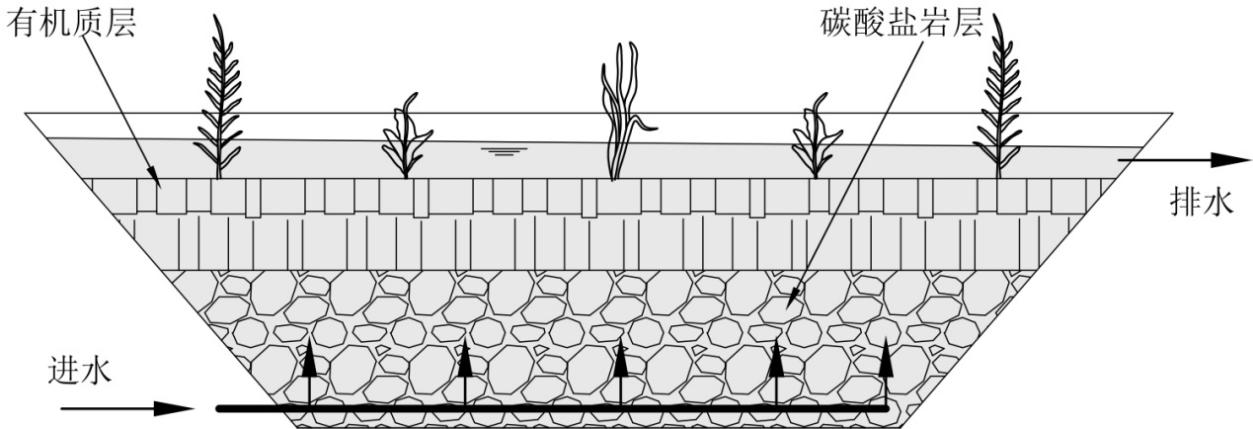
C.7 人工湿地

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山排水。人工湿地可分为好氧人工湿地和厌氧人工湿地。好氧人工湿地适合处理中性或碱性矿山排水，通常是一个浅水盆地，水深小于30cm，金属Fe和Mn在微生物的催化下在表层氧化和水解，吸附重金属或与重金属共沉淀。可通过种植香蒲或芦苇等植物促进水流缓慢流动、提供絮体附着点和改善生态环境（图C.7）。



图C.5 好氧湿地示意图

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山排水，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.8）。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.6 厌氧湿地示意图

C.8 中和沉淀技术

AMD中和沉淀技术是高铁锰废水处理应用最广的技术之一。它主要采取投加碱性物质提高废水pH，通过后进行复氧曝气促进Fe2+转化为Fe3+，加速Fe(OH)3的形成，并在沉淀池前投加絮凝剂，使Fe(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Mn2+向MnO2转化，实现Fe、Mn的达标排放。



图C.7 AMD中和沉淀技术示意图

1. （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 地下水污染概况

3.5 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