



引文格式: 贺俊, 赵强, 杨建强, 等. 陕南硫铁矿矿山酸性水形成机理及治理方法探究: 以西乡五里坝硫铁矿为例[J]. 西北地质, 2025, 58(1): 219–230. DOI: 10.12401/j.nwg.2023171

Citation: HE Jun, ZHAO Qiang, YANG Jianqiang, et al. Formation Mechanism of Acid Water and Treatment Method in Pyrite Mine: Example from Wuliba Pyrite Mine in Xixiang, Southern Shaanxi[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(1): 219–230. DOI: 10.12401/j.nwg.2023171

陕南硫铁矿矿山酸性水形成机理及治理方法探究: 以西乡五里坝硫铁矿为例

贺俊¹, 赵强¹, 杨建强², 李金钱³, 李麟¹

(1. 陕西矿业开发工贸有限公司, 陕西 西安 710054; 2. 中煤科工生态环境科技有限公司, 北京 100013;
3. 陕西地矿集团有限公司, 陕西 西安 710054)

摘要: 硫铁矿矿山在开采过程中往往产生含有金属硫酸盐类的酸性矿排水, 不仅腐蚀管道和设备, 危害工人身体健康, 还会严重污染水系, 影响工农业和渔业生产, 因而, 系统解决硫铁矿矿山环境问题是矿山环保工作亟待解决的课题之一。系统分析矿山环境问题, 深入认识酸性水形成机理, 因地制宜提出其中一个或多个方法生态修复治理方案, 是硫铁矿酸性矿排水生态修复的有效途径。笔者以陕南西乡五里坝硫铁矿为例, 在分析矿洞、废渣、地表水及地面塌陷等环境现状和生态环境问题的基础上, 重点分析酸性水产生的根源, 提出了“地表水治理+地下水治理+地质灾害治理+生态修复+末端治理+环境监测”综合治理技术, 最后探究了矿洞改性充填、弃渣资源化利用和塌陷区注浆加固 3 种治理模式, 以为类似地区矿山生态修复治理提供科学参考。
关键词: 酸性矿排水; 形成机理; 综合治理; 五里坝硫铁矿

中图分类号: P592

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2025)01-0219-12

Formation Mechanism of Acid Water and Treatment Method in Pyrite Mine: Example from Wuliba Pyrite Mine in Xixiang, Southern Shaanxi

HE Jun¹, ZHAO Qiang¹, YANG Jianqiang², LI Jinqian³, LI Lin¹

(1. Shaanxi Mining Industry and Trade Co. Ltd, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. China Coal Technology & Engineering Group Ecological Environment Technology Co. Ltd, Beijing 100013, China; 3. Shaanxi Geology and Mining Group Co., Ltd, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: Sulphate acid water is often produced in the mining process of pyrite mines, which not only corrodes pipelines and equipment, endangers workers' health, but also seriously pollutes water system, affects industry, agriculture and fishery production. Therefore, it is one of the urgent tasks to solve the environmental problems of pyrite mines. Systematic analysis of mine environmental problems, in-depth understanding of the formation mechanism of acid water, and proposed one or more methods of ecological restoration and treatment programs according to local conditions are effective ways for ecological restoration of acid water in pyrite

收稿日期: 2022-10-10; 修回日期: 2023-08-26; 责任编辑: 贾晓丹

基金项目: 汉中市生态环境局项目“汉中市汉江流域硫铁矿环境调查与风险评估(HZGJ-HZ2021Z024)”资助。

作者简介: 贺俊(1990-), 男, 硕士, 工程师, 长期从事地质灾害防治与矿山生态修复研究。E-mail: 641101007@qq.com。

minerals. Taking Wuliba Pyrite Mine in Xixiang County of South Shaanxi Province as an example, based on the analysis of the environmental status and ecological environment problems of mine cave, waste residue, surface water and ground subsidence, the paper analyzes the root of acid water, puts forward the comprehensive treatment technology of "surface water treatment + groundwater treatment + geological disaster treatment + ecological restoration + end treatment + environmental monitoring", and finally explores three treatment modes of mine cave modification filling, waste residue resource utilization and grouting reinforcement in subsidence area. It provides a scientific reference for the ecological restoration of mines in similar areas.

Keywords: acid mine drainage; formation mechanism; comprehensive treatment; Wuliba Pyrite Mine

酸性矿排水(Acid Mine Drainage, AMD)是硫化矿床或含硫煤层在氧气、水和微生物等的参与下,经一系列生物化学反应或微生物作用而产生,主要来源包括废石堆、选厂、尾矿库和地下矿坑等(Acharya et al., 2020; 朱爱平等, 2020),具有 pH 值低、可溶性金属离子浓度大、硫酸盐含量高、危害程度大等特点(袁加巧等, 2022)。AMD 在未经处理情况下排放不仅破坏周边水体、生物群落、土壤等生态环境,还严重危害人体健康(Gayathri et al., 2019; 徐友宁等, 2023)。研究表明,AMD 的形成与硫化矿物的水氧反应和细菌的作用有关,并且细菌的存在可通过协助硫化矿物的分解来加速 AMD 的形成(Ata et al., 2006)。Younger (1995)和 Chen(2014)认为 AMD 主要是硫化矿物如黄铁矿(FeS_2)在开采阶段的氧化产物溶入恢复中的地下水形成的。李春花等(2022)认为水在黄铁矿氧化过程中可能起到了预氧化作用。陆现彩等(2019)认为地表金属硫化物微生物氧化直接导致酸性矿山排水,并形成重金属污染。李娟等(2015)认为微生物对金属硫化物的氧化分解是导致重金属离子释放的重要原因。王晓勇等(2023)以紫阳石煤矿区为例,通过研究硫酸盐 S、O 同位素富集规律,认为石煤中黄铁矿开采后氧化是酸性废水产生的主要机制。陈华清等(2023)研究了嵩坪河流域石煤矿区铝相次生矿物吸附重金属的地球化学特征以及“酸性白水”演化机制,对于促进嵩坪河流域酸性矿水-酸性白水防治具有的重要理论及应用价值。多年来,国内外专家学者们在探究酸性水形成机理研究的基础上,将 AMD 治理技术分为“主动治理”技术和“被动治理”两大类(Johnson et al., 2005; Kefeni et al., 2017)。其中,“主动治理”技术本质是一种化学方法,包括中和沉淀法、硫化沉淀法、絮凝法等,主要是通过加入石灰和絮凝剂分别调节 AMD 酸度和沉淀重金属。杨程等(2021)采用中和法在不同处理工艺和不同加碱速率

条件下探究 AMD 中锰离子去除效果。何绪文等(2013)探究了硫化钠投加量、反应初始 pH 等操作条件对含铅酸性矿山水中铅离子去除效率的影响。刘伟(2017)以云南某冶炼厂酸性含重金属废水为研究对象,提出以自制生物絮凝剂协同石灰中和沉淀脱除重金属的处理方法,这类方法需不断地投加化学试剂,易产生大量含重金属的污泥,投资、运行和维护成本较高;“被动治理”技术依靠自然的物理、地球化学和生物过程中和 AMD 的酸度并去除伴生污染物,包括石灰石沟渠(Johnson et al., 2002; Skousen et al., 2017)、微生物法、人工湿地法(Jarvis, 1999; Fabiand et al., 2005)等,其运行和维护成本较低,在国外应用广泛,但在国内应用比较少,国内主要采用矿洞封堵、修建污水处理厂等(陈宏坪等, 2021)。目前,关于 AMD 治理技术主要是从末端治理体系出发,采用化学或生物的方法对污染水体进行处理以期达到排放标准,主要存在以下两点问题:这类方法仅从单一的角度考虑解决水的问题,硫铁矿矿山造成的环境污染不仅是水的问题,更重要的是土壤、地下水、生物群落等生态环境;矿山酸性废水产生量大,具有长期性,采用化学方法、修建污水处理厂等可以从面上解决水污染问题,但是,长此以往,对于矿山企业来会造成的严重经济负担,不能彻底根除。要彻底解决 AMD 带来的矿山环境问题,不仅要在方法上有创新,还要从观念上有转变,在治理方法上可因地制宜的选择矿洞封堵、地表废石封存、尾矿的水下存储、尾矿固化等一种或多种源头治理方法来消除 AMD 根源,再辅以末端治理、生态修复等措施,以达到消除 AMD 危害、恢复矿区环境的目的。

陕南地区废弃硫铁矿开采历史悠久,分布广泛。五里坝硫铁矿位于汉中市西乡县,矿区矿水溢流,水质呈强酸性,重金属污染严重,视觉效果差,弃渣裸露堆放,地面塌陷发育,破坏地形地貌景观,生态环境问

题突出, 硫铁矿开采对生态环境破坏严重。笔者以五里坝硫铁矿为例, 在分析矿区环境污染问题及酸性水形成机理的基础上, 探究硫铁矿酸性水治理技术, 为陕南地区硫铁矿治理提供借鉴。

1 研究区概况

研究区位于西乡县高川镇五里坝社区, 地理坐标: E 108°04'08"~108°04'36", N 32°41'00"~32°43'20", 属停产矿山, 面积为 1.341 5 km²。矿山海拔高程在 948~1 240 m, 相对高差约 300 m, 地势总体西高东低、南高北低, 属于中山地貌单元, 地表水系由牟子河支流炮桐沟和乌云沟构成, 年均降水量为 1 100~1 700 mm, 雨量充沛, 但时空分布差异较大。矿区主要出露地层为寒武系、泥盆系、石炭系、三叠系、二叠系, 岩性以碳酸盐、变质岩为主, 局部夹杂碎屑岩, 矿区含矿岩系含两个矿层, 即 I 矿层和 II 矿层, 赋矿层位为泥盆系中统三岔沟组(D_{2s}), 矿床围岩主要为细粒石英砂岩, 直接顶板黏土质砂岩及砂质黏土岩。地质构造为一倒转的单斜构造, 地层倾向 NW, 倾角为 57°~80°, 主

要断裂为近 SN 走向逆断裂(F1), 次级断裂较发育(F2~F6, 图 1), F1 断裂 SN 向延伸长度约 40 km, 断裂带宽度约 20 m, 具有多期活动特征, 倾向 NW, 倾角为 65°~75°, 地质构造不发育。地下水类型包括基岩裂隙水、岩溶水和第四系松散层孔隙水, 含水岩组富水性以弱-强为主, 岩溶水含水岩组在局部地区(炮桐沟南支沟及乌云沟右岸)富水性较强, 可见泉眼出露。受采矿活动影响, 人类工程活动强烈主要表现为矿硐挖掘和弃渣堆放等, 地表可见多处地面塌陷。矿区主要生态环境问题表现为以下 3 个方面: 矿硐水和弃渣淋滤水中的 Fe³⁺、Mn²⁺等重金属离子超标, pH 呈酸性, 对牟子河、乌云沟、炮桐沟流域地表水污染严重; 弃渣裸露堆放, 破坏地形地貌景观, 压占土地资源, 与周边地形地貌不协调; 不稳定斜坡、采空塌陷等不良地质现象发育, 威胁周边群众生命财产安全。

2 研究方法

2.1 遥感调查

近年来, 随着遥感科学的快速发展, 遥感技术被



图1 研究区环境地质概况

Fig. 1 The research survey of environmental geology

广泛应用在生态环境、自然资源、农业生产等领域。研究区地形复杂,高差较大,植被发育,尤其是矿区开采历史悠久,对于探矿、开采遗留的部分废渣难以人工发现,利用高精度遥感技术,可以达到精细调查废渣的分布。同时,对于矿区的地面塌陷、不稳定斜坡等地质灾害,利用机载 LiDAR 制作数字表面模型(DSM)、数字高程模型(DEM)、数字正射影像图(DOM)、三维实景模型和基于 InSAR 技术的形变探测分析,机载雷达激光发射频率高达 750 000 点/S,扫描速度高达 200 次/S,运行高度高达 530.352 m,相机像素为 4 240 MP,数据采集 3.71 km²(李强等, 2022)。在此基础上开展不良地质现象遥感解译,综合判识解译地质灾害隐患点,识别矿区潜在岩溶塌陷区,不稳定斜坡等。

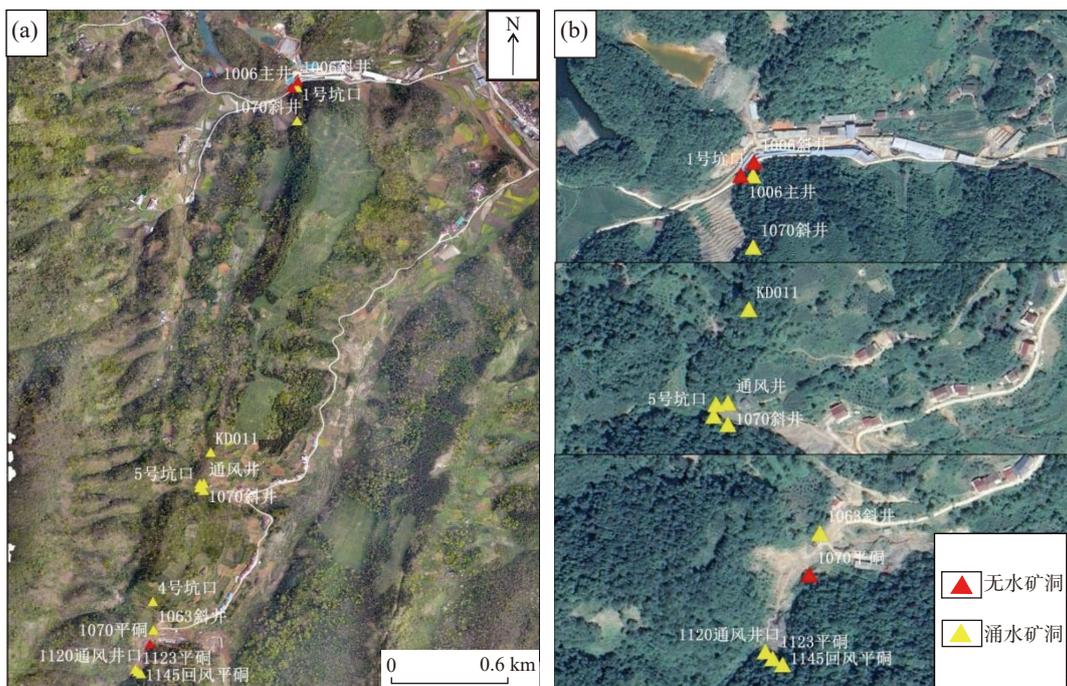
2.2 地面调查

在搜集区域地质资料的基础上,采用路线追溯法,对矿区开展 1:2 000 比例尺地质调查、水文地质调查、环境地质调查、物探调查以及主要污染源调查、水环境调查等。其中,水文地质调查在丰水期和枯水期分别对乌云沟和炮桐沟地表水(泉眼)和矿洞水进行测流、采样,同时布设水文孔 7 个,进尺 180 m,共采集水样 49 件,以分析矿区水水化学类

型及地表水对地下水的影响;物探主要采用高密度点法,实测弃渣方量。通过地面调查,进一步查明矿洞围岩的工程地质特征、矿区水力联系情况与补径排关系、地表水的污染现状、主要污染源(矿洞、废渣)的分布现状,为分析酸性水来源和治理方法的探究提供基础资料。

2.3 测试分析

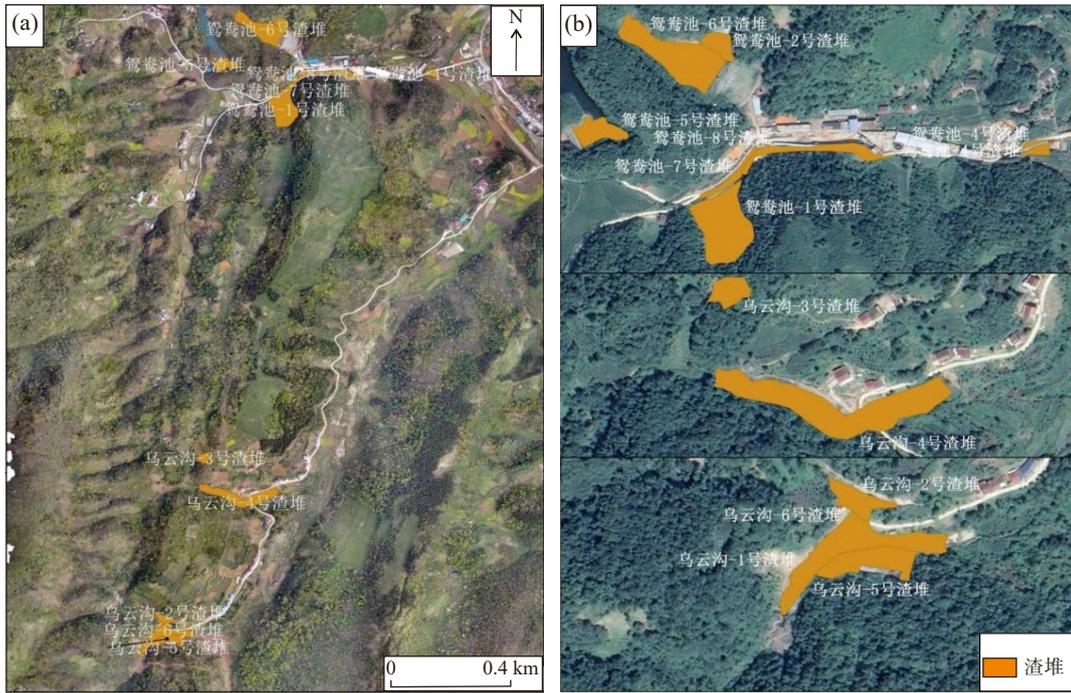
主要内容包括岩石力学分析、水质简分析、环境样分析、废渣固废属性鉴别等,均送检至有检测资质的实验室。岩石力学分析测试指标包括抗压强度、饱和抗压强度和抗剪强度,采集岩石样 1 件;水质简单分析指标包括 K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Al³⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻、CO₃²⁻、溶解性总固体、pH、总硬度等,共采集水样 49 件;环境样分析指标包括常量分析(pH、TDS、K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻、CO₃²⁻)、重金属元素(铁、锰、锌、铜、镉、总铬、铅、镍、铍等)、理化性质(pH、有机质)、定性分析和定量分析等,在丰水期和枯水期分别采集酸性废水样 26 件(各 13 件,采样点见图 2 和图 3),流域地表水样品 16 个(采样点见图 4);废渣固废属性鉴别采用硝酸法和水平震荡法,分别对尾矿和弃渣中的铜、锌、镉、铅、铬等重金属进行分析,共采集 1 号和 2 号尾矿库尾砂样品各 1 件,



a. 矿洞总体分布平面图; b. 炮桐沟-乌云沟矿洞分布详图

图2 矿洞分布现状图

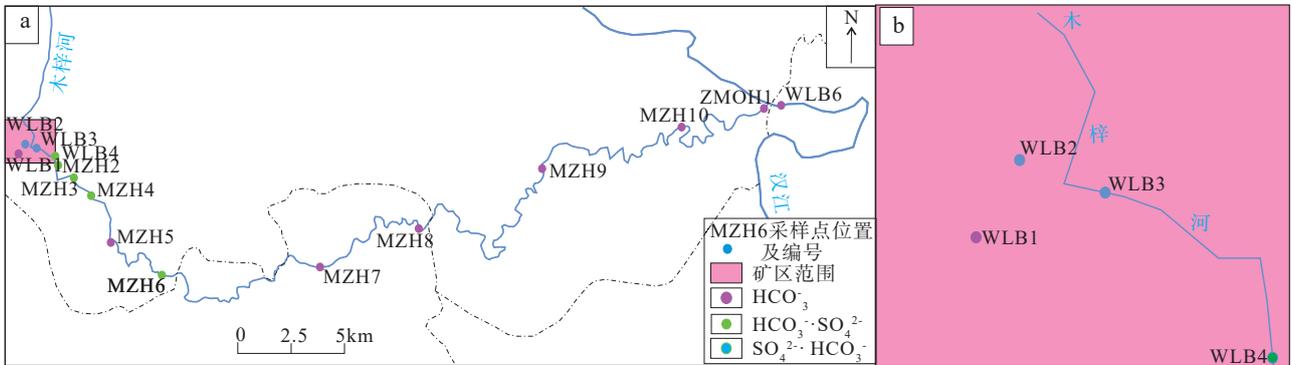
Fig. 2 The distributing plot of the adit



a. 弃渣总体分布平面图; b. 炮桐沟-乌云沟弃渣分布详图

图3 弃渣分布现状图

Fig. 3 The distributing plot of the slag



a. 木梓河流域地表水水化学类型演化规律图; b. 矿区周边地表水水化学类型演化规律图

图4 流域地表水采样点位置及矿区地表水水化学类型演化规律图

Fig. 4 The plot of the underground water quality evolution rul in the mning area and watershed

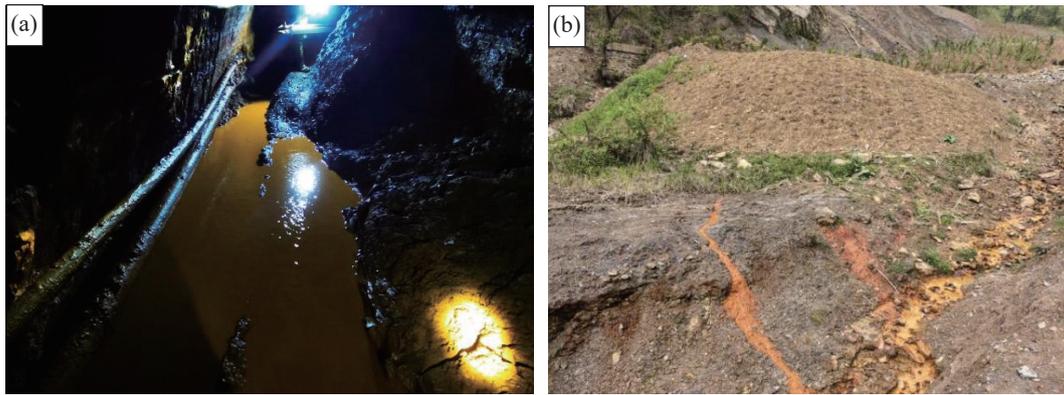
共采集弃渣样 11 件。旨在研究矿硐顶底板围岩的稳定性、水化学类型、污染源特性等, 为下一步分析酸性水迁移途径、演化规律、治理方法等提供基础数据。

3 研究区环境现状

3.1 污染源现状

根据资料显示, 矿区酸性矿排水污染源主要包括废弃矿硐涌水、弃渣淋滤水等(李麟等, 2021)。矿区共有矿硐 15 处(图 2a、图 2b), 主要分布在乌云沟和

炮桐沟, 多数矿硐可见磺水涌出, 雨季实测 1006 矿坑最大涌水量为 512 m³/d, 矿坑水呈黄褐色(图 5a)。矿区废水(不包括渣堆淋滤水)pH 值主要分布为 2.94~6.42(表 1), 呈中-强酸性, 铁、锰、镍等重金属离子严重超标, 部分矿硐硐口虽已采用钢筋混凝土挡墙, 但墙体、钢筋腐蚀强烈, 仍可见磺水渗出。矿区弃渣主要沿炮桐沟、乌云沟沟道两侧山坡裸露堆放(13 处, 图 3a、图 3b), 总方量为 154 439 m³, 全区渣堆体平面面积为 36 685 m², 弃渣粒径大小不一, 堆存时间久远, 局部稳定性较差, 雨后可见磺水渗出(图 5b), 属性鉴



a. 1006 主平硐磺水现状图; b. 弃渣雨后磺水现状图

图5 矿硐和弃渣磺水现状图

Fig. 5 The plot of the current situation yellow water in the adit and waste residue

表1 水样分析数据统计表(mg/L)

Tab. 1 The statistical table of water sample analysis data (mg/L)

采样地点	地表水 II 类水质标准	1070 平硐	1006 主井	1006 斜井	2#尾矿库渗水	1#尾矿库渗水	乌云沟-5 渣堆渗水	乌云沟-6 渣堆渗水
pH	6~9	4.17	3.02	2.96	5.4	6.42	3.32	7.12
锌	1	1.54	0.61	2.92	0.05 L	0.05 L	0.11	0.05 L
铜	1	0.05 L	0.05 L	0.05 L	0.05 L	0.05 L	0.05 L	0.05 L
锰	0.1	5.33	1.98	7.4	5.36	1.84	0.66	0.34
铁	0.3	0.91	27.8	48	19.7	0.96	1.18	0.72
镉	0.005	0.002 5	0.000 8	0.002 1	0.000 6	0.000 8	0.001 5	0.001
铬(六价)	0.05	0.004 L	0.005	0.004	0.004 L	0.004 L	0.004 L	0.004 L
砷	0.05	0.000 3	0.000 4	0.000 3 L	0.000 3 L	0.000 3 L	0.000 3 L	0.000 3 L
镍	0.02	0.21	0.09	0.28	0.05 L	0.05 L	0.05 L	0.05 L

采样地点	地表水 II 类水质标准	乌云沟-4 渣堆西侧渗水	乌云沟-4 渣堆东侧渗水	乌云沟-4 渣堆下游地表水	乌云沟-5 渣堆下游地表水	鸳鸯池-8 渣堆渗水	鸳鸯池-1 渣堆渗水
pH	6-9	3.21	7.22	3.22	7.43	2.94	4.64
锌	1	0.19	0.05 L	0.29	0.05 L	1.67	0.05 L
铜	1	0.05 L	0.05 L	0.05 L	0.05 L	0.05 L	0.05 L
硒	0.01	0.000 6	0.000 8	0.000 7	0.000 8	0.001 1	0.000 6
铁	0.3	9.39	3.44	13.6	0.84	450	0.14
汞	0.000 05	0.000 11	0.000 14	0.000 08	0.000 11	0.000 13	0.000 2
镉	0.005	0.000 9	0.001	0.000 7	0.000 4	0.003 6	0.001 2
总铬	/	0.005	0.004 L	0.009	0.004 L	0.017	0.004 L
砷	0.05	0.000 3 L	0.000 3 L	0.000 3	0.0003 L	0.000 6	0.000 5
镍	0.02	0.07	0.05 L	0.1	0.05 L	0.57	0.05 L

注：统计数据来源于2021年4月28日汉环集团陕西名鸿检测有限公司分析结果。L表示低于检出限。

别主要为二类固废。

3.2 地表水化学类型

前期采矿活动造成矿硐水和弃渣淋滤水对下游

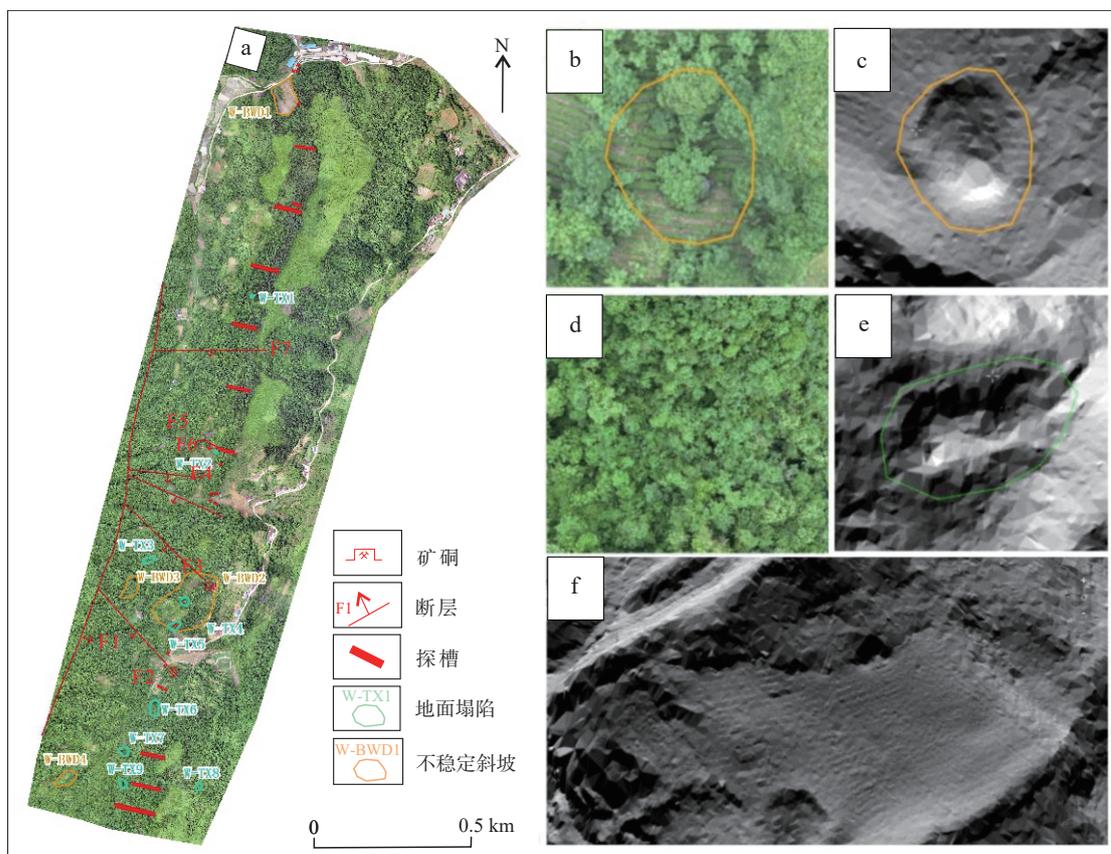
河流水化学类型和水质产生了一定影响。为了探究污染源对木梓河及矿区周边地表水体的影响,前期共采集地表水样品 16 个。矿区地下水原生水化学类型

为 $\text{SO}_4^{2-} \text{HCO}_3^- \text{CaMg}$ 、 $\text{HCO}_3^- \text{Ca}$ 型水, 呈弱碱性-中性水, 受硫铁矿开采影响, 矿洞水、渣堆淋滤水水化学类型均为 $\text{SO}_4^{2-} \text{Ca}$ 型水, 且 SO_4^{2-} 离子含量显著增大, 呈强酸性, pH 值约 2~3。通过对周边地表水体及下游木梓河的水化学类型进行分析可知, 矿区上游地表水水化学类型主要为 $\text{SO}_4^{2-} \text{HCO}_3^- \text{CaMg}$ 、 $\text{HCO}_3^- \text{Ca}$ 型水。受开采活动影响, 矿洞及弃渣周边地表水体水化学类型为 $\text{SO}_4^{2-} \text{Ca}$ 型水。流经矿区后, 受到木梓河上游来水的稀释混合作用, 在汇入木梓河的 WLB4 点, 硫酸根离子占比有所减少, 水化学类型为 $\text{HCO}_3^- \text{SO}_4^{2-} \text{Ca}$ 型水。随木梓河两侧地下水及支流天然来水的进一步稀释混合, 在距矿区约 33 km 处, 木梓河水化学类型演变为 $\text{HCO}_3^- \text{Ca}$ 型水 (MZH7), 恢复天然地表水的水化学类型 (图 5)。由此可见, 硫铁矿开采对矿区下游地表水体水化学类型影响较大。

3.3 地质灾害现状

地面塌陷是金属矿山地下开采常见的地质灾害

之一, 尤其是在矿体开采厚度大、埋藏深度浅、围岩工程地质性质差的地段表现更为明显。采空塌陷一方面为地下水汇集形成蓄水空间, 另一方面, 塌陷周边的裂隙贯通围岩裂隙、采动裂隙, 为地下水运移提供了良好的充水通道。根据水文地质调查资料显示, 矿区矿坑水的主要来源之一就是地表水沿着塌陷裂隙入渗。因此查明采空塌陷的分布特征对于矿洞涌水防治极为重要。近年来, 机载 LiDAR 和 InSAR 遥感技术在地面变形监测中具有较好的应用, 通过 InSAR 和遥感解译技术, 发现研究区共发育地面塌陷 9 处 (W-TX1~W-TX9)、断层 6 处 (F1~F6) 和不稳定斜坡 4 处 (W-BWD1~W-BWD4), 其中主断裂 F1 为近 SN 走向逆断层, 次级断裂共 5 条, 与主断裂斜交 (图 6a)。受采矿活动影响沿矿体走向方向上地面塌陷发育 9 处 (表 2), 主要分布在何家湾-乌云沟一带, 塌陷深度为 0.4~2.5 m, 单个面积为 79.63~1 201.81 m^2 , 总面积约为 4 830.88 m^2 , 规模较小, 平面上基本沿矿体走向方向分



a. 地质灾害分布现状图; b. W-TX4 三维实景模型正射影像; c. W-TX4 机载 LiDAR 影像; d. W-TX6 三维实景模型正射影像; e. W-TX6 机载 LiDAR 影像; f. W-BWD2 下错陡坎与局部塌陷区 LiDAR 影像

图 6 地质灾害分布现状 (a) 及三维实景模型图/机载 LiDAR 影像 (b~f)

Fig. 6 (a) The distribution graph of geological hazard and (b~f) real-time 3D/airborne LiDAR image

表2 地面塌陷统计表

Tab. 2 The table of subsidence statistics

编号	面积(m ²)	深度(m)	形态特征
W-TX1	89.33	0.7	近圆形
W-TX2	79.63	1.3	近圆形
W-TX3	590.63	0.5	椭圆形, 长轴呈北东东向
W-TX4	574.22	2.2	近圆形
W-TX5	716.53	2.5	不规则四边形
W-TX6	1201.81	0.6	椭圆形, 长轴呈近南北向
W-TX7	667.76	2.5	近圆形
W-TX8	545.35	0.4	椭圆形, 长轴呈近西北北向
W-TX9	365.62	2.1	近圆形
合计	4830.88		

布,形态呈近圆形、椭圆形(图 6b~图 6e);4处不稳定斜坡坡度为 24°~33°,高差为 23.9~69.4 m,规模以小型为主(图 6f)。

4 酸性水形成机理分析

4.1 水循环现状

五里坝矿山开采遗留的矿硐、巷道多,采空面积大,废弃井巷、采空、采动裂隙等为地下水的运移就储存提供了良好的空间,致使矿山地下水位下降,形

成降落漏斗,岩溶突水改变了地下水的补给来源及补给量,改变了矿区地下水补给、径流及排泄条件,改变了矿区地下水循环系统。地表水渗漏改变了地下水的氧化还原电位等水化学条件,进而导致地下的硫铁矿风化溶解产酸。矿区地下水补给主要来自降雨补给,降雨在形成地表水后通过塌陷裂隙、岩溶裂隙、风井孔口等拉裂带不断补给含矿层地下水,造成了补给量的增大效应,增加了矿坑涌水量。矿坑地下水主要通过 1006 平硐、1006 斜井、1070 平硐及乌云沟、炮桐沟泉眼进行排泄,最终汇入牟子河(图 7)。

4.2 水源分析

根据水循环现状和水文地质调查资料可知,矿区酸性矿排水主要来源于 1006 和 1070 矿硐水,而这两个矿硐水又主要来源于乌云沟沟脑、乌云沟魏家沟支沟及何家湾支沟地表径流的垂直入渗补给。

(1) 乌云沟沟脑径流入渗

据调查资料,在乌云沟上游(1070 矿硐左侧)地表平水期测得非灰岩地段流量为 9.6 m³/d,但在下游 20 m 裸露灰岩地段地表径流消失,分析认为消失的水量是 1070 平硐涌水的主要来源。且 1070 平硐涌水经管道输送至炮桐沟 1006 斜井排出地面,在平水期实测流量 337 m³/d,雨季观测降雨流量达 512 m³/d,增加量为 175 m³/d,同时观测到 1070 平硐口地表径流约 1500

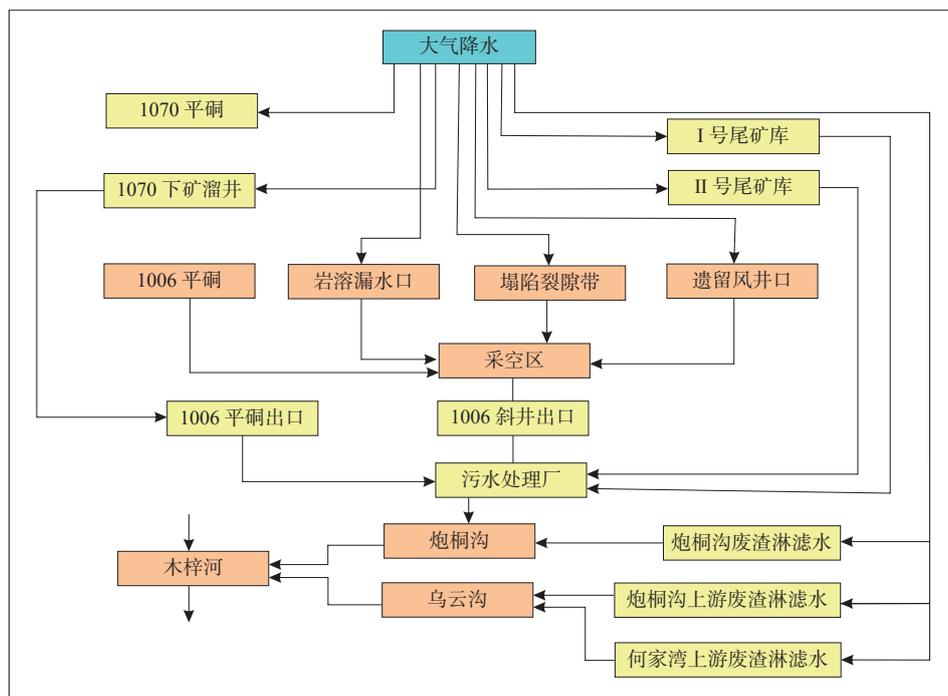


图7 矿区地下水文循环模式图

Fig. 7 The model graph of the groundwater circulation in mining area

m^3/d , 据此推算最大涌水量达到 $604 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

(2) 乌云沟魏家沟支沟径流入渗

降雨期间在观测魏家沟非灰岩地段与下游流经灰岩地段流量相差 $30 \text{ m}^3/\text{d}$, 且该地段灰岩(ϵ_{1sh5})渗透性好, 据此分析渗漏量基本上全部径流至 1006 平硐, 平水期入渗量在 $30\sim 50 \text{ m}^3/\text{d}$, 根据汇水面积计算丰水期最大径流量约为 $1100 \text{ m}^3/\text{d}$, 推断最大涌水量达到 $132 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

(3) 乌云沟何家湾支沟地表径流入渗

据调查资料, 在采矿活动进行之前, 何家湾泉流量大约在 $350\sim 580 \text{ m}^3/\text{d}$, 受硫铁矿开采, 干枯。按照 2013 年开挖矿 1006 矿坑突水量为 $3600 \text{ m}^3/\text{d}$, 该泉域的全部静储量被释放至岩溶含水层, 造成了该泉域岩溶含水层的疏干, 据此可知 1006 矿坑最大涌水量为 $3600 \text{ m}^3/\text{d}$, 按流域面积及入渗量估算最大可达 $2100 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

4.3 形成机理

早在 20 世纪 20~30 年代, 学者们在研究过程中确定了酸性矿排水形成的化学和生物反应过程(徐志诚, 2005)的形成机制, 主要涉及到 1 个核心、3 个条件。其中, 1 个核心是矿石内的硫元素, 3 个条件是水、氧气和生物氧化(王柱强等, 2010)。鉴于样品分析项目中未包含细菌分析测试项, 笔者主要分析 AMD 的水氧形成机理。矿区开采前地下水丰富, 水质良好, 原生水化学类型为 $\text{SO}_4^{2-}\text{HCO}_3^-\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 、 HCO_3^-Ca 型, 且 SO_4^{2-} 背景值偏高(46.57 mg/L)。受矿体开采影响, 地下水化学类型发生严重变化, 在矿坑揭露地段, 围岩风化较强烈, 节理裂隙发育, 硫化物矿石矿中的硫离子在水、空气等参与下发生氧化还原反应, 转化成硫酸根离子(最大含量达 1103.71 mg/L), 最终的硫酸根离子不仅改善了水质的酸度, 还溶解了难以溶解的铁、锰等重金属离子。因此, 矿石中的硫或硫化物是形成酸性矿排水的核心因素。另一方面, 矿区地下水是酸性矿排水产生的根源, 乌云沟、炮桐沟地表水来开采前存在多出泉眼, 受采动影响, 泉水基本消失, 这些地下水出露点在地表裂隙发育地段垂直入渗补给含水岩层, 一旦含水岩层饱和后会沿着采空区、巷道等释放静储, 并汇入斜井, 这些水源在迁移、渗流过程与硫化物矿石中的硫离子发生氧化反应形成大量的酸性矿排水。也就是说, 酸性矿排水的形成主要是矿区硫化物矿石中的硫离子在水和氧的作用下发生氧化还原反应, 形成的含大量硫酸根离子的地下水在含水层饱和后, 沿着围岩裂隙、孔洞、矿坑等释放出来的。

5 治理方法探究

5.1 治理思路

通过分析矿区环境污染现状和酸性矿排水形成机理, 综合认为酸性矿排水产生的原因主要有以下 4 点: 乌云沟、魏家沟、何家湾沟道地表水沿着基岩裂隙进入矿硐(采空区); 地表水汇入塌陷坑、塌陷裂隙后进入矿硐(采空区); 何家湾地表径流垂直入渗; 弃渣淋滤水。那么要系统解决酸性矿排水带来的一系列环境污染问题, 首先要从根源上解决“水源”的问题, 然后再从过程中控制, 最后进行末端治理、风险管控等。结合矿区环境现状, 提出“地表水治理+地下水治理+地质灾害治理+生态修复+末端治理+环境监测”的综合治理方案(图 8), 以达到隔绝地表水渗入矿硐、采空区形酸性矿排水, 恢复矿区绿水青山面貌的目的。

5.2 方法探究

五里坝硫铁矿治理工程包括地表水治理、矿硐(采空区)治理、弃渣治理、塌陷区治理、生态恢复等, 其中的地表水、矿硐(采空区)、弃渣、塌陷区治理方法主要是“断源”, 对于断源后的治理工程需要长时间的环境监测, 也就是风险管控, 其核心还是前者。据此, 根据目前国内外关于矿硐、废渣、塌陷等治理方法, 结合矿区实际, 主要探究出以下 3 种治理模式, 以期为陕南硫铁矿类似矿山治理提供借鉴。

(1) 矿硐(采空区)治理: 地质聚合物+弃渣混合充填

矿区开采历史悠久, 形成的采空区面积十余万方, 废弃矿硐 10 余处。目前矿硐(采空区)治水的方法主要包括简易封堵、强化封堵、帷幕注浆、地质聚合物新材料充填封堵。简易封堵和强化封堵是常见的矿硐(采空区)治水方法, 但对于五里坝硫铁矿这种酸性环境的矿硐治理, 无论是简易封堵还是强化封堵, 在封堵一段时间后墙体、钢筋均受到不同程度的腐蚀, 普通水泥、抗硫酸水泥等通用的硅酸盐材料都难以达到长久的效果。帷幕注浆主要用于地下水封堵、巷道加固, 对于正在使用的矿硐治理效果较好, 经验成熟, 但工艺复杂, 且成本较高, 在本研究中的应用受到了一定的限制。地质聚合物新材料充填封堵近年来在环保领域应用较为广泛, 具有环境友好、抗酸、耐腐蚀、低渗透、固封重金属、耐久性好等优良特点(黎

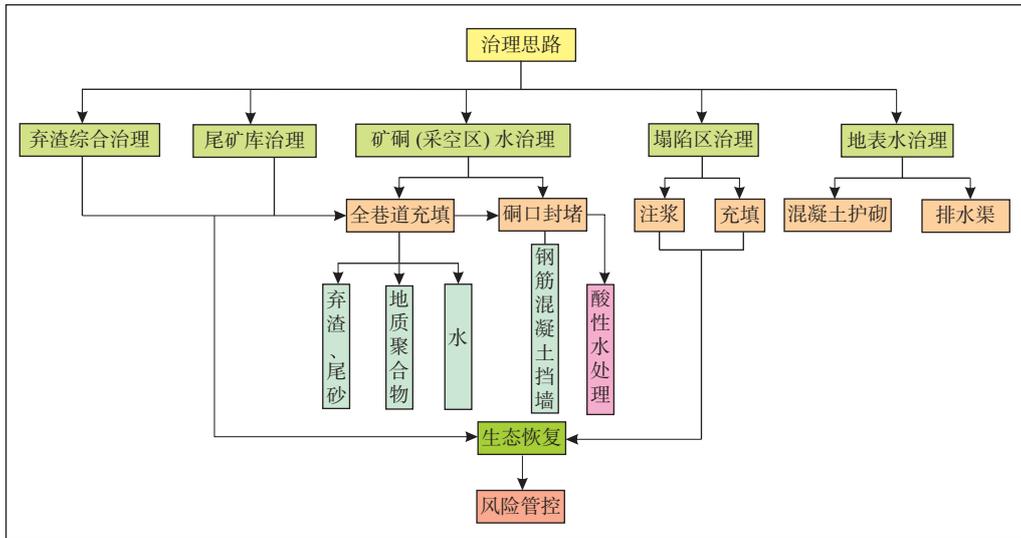


图8 技术路线图

Fig. 8 The technology roadmap

洁等, 2020; 李建民等, 2021)。五里坝硫铁矿弃渣(尾砂)中硅铝质含量较高, 其本身就是制备地质聚合物很好的一种原材料, 渣和地质聚合物二者的亲密度很高, 利用它们拌合后充填矿洞(采空区), 既可解决矿洞磺水横流、重金属超标问题, 又可消除弃渣裸露堆放、磺水渗流、占用土地资源、破坏地形地貌景观的问题。因此, 利用地质聚合物和弃渣混合后形成的混合材料充填矿洞(采空区)是治理矿洞最佳手段。本着充分利用废渣, 优化配比降低成本的原则, 根据试验和略阳县长沟硫铁矿酸性水治理工程经验(李麟等, 2022年), 推荐重量配合比为弃渣: 地质聚合物: 水=100: 22: 45, 具体配比可根据矿石化学成分进行适当调整。

(2) 弃渣治理: 综合利用充填矿洞+生态恢复

弃渣治理技术主要包括原位异位处置、风险管控和综合利用三大类。原位异位管控包括建库处置、原位固结封存, 原位建库对于陕南秦巴山区这种生态脆弱区而言, 需要占用大量的土地资源, 且建库投资成本较大, 后期需要维护, 这种处置方式也不能一劳永逸的解决问题。风险管控主要是原位修整、覆土复绿等, 对于废渣污染程度低, 危害程度小, 治理难度低, 可采取这种简易的管控措施, 像五里坝矿区这种污染范围大、污染程度严重、治理难度大的矿区, 仅仅采取管控措施不能存在解决酸性矿排水的问题。综合利用主要是将弃渣用于建筑材料、微晶玻璃、土壤固化剂、多孔陶粒等(聂轶苗等, 2009)。通过综合利用既可解决废渣占地, 破坏地形地貌景观, 又可消除环

境污染风险, 还可产生一定的社会效益、经济效益、生态效益。五里坝硫铁矿矿区形成的采空区面积大、废渣量达10余万方, 占地面积大, 污染程度严重, 采用废渣资源化利用, 即, 用其结合地质聚合物拌合后充填采空区、矿洞, 应是弃渣治理的最好方式。根据13处弃渣所处的位置及渣堆特征, 按照就近处置、就近充填的原则, 全部充填至矿洞(采空区), 以实现弃渣全部资源化利用、无害化处理。充填之后, 对于弃渣场地, 按照渣场所在的土地利用类型, 按照宜耕则耕, 宜林则林的原则, 优先恢复成耕地、园地、林地, 恢复矿区绿水青山面貌。

(3) 塌陷区治理: 注浆加固+充填+生态恢复

塌陷区采用的治理方法主要有注浆法、充填复垦法。注浆法是在查清地下含水层、塌陷坑的分布及其影响范围的基础上, 采用钻孔灌注法将一定比例的灌浆材料注入塌陷区, 填充地下孔隙(洞)、隔断地下水流通道, 加固岩土体结构, 使之达到稳定状态的方法。充填复垦法是利用矿区已有的废石弃渣作为充填材料来充填地表采空塌陷坑, 然后覆土复田, 或实施生态恢复, 这种方法既解决了塌陷区复垦、生态恢复难题, 又解决了矿山固体废弃物的处理问题。注浆法可较为全面解决因塌陷坑及周边的次生裂缝引发的矿洞水水源问题, 但是单一的注浆法对生态环境扰动较大, 且治理后不利于恢复山体同貌, 辅助以充填复垦法, 既可系统解决塌陷引起的水源问题, 又可恢复矿区生态环境。综合认为, 对注浆加固+充填+生态恢复可以解决矿区塌陷引起的酸性矿排水问题。对于注

浆孔的布设,参照类似矿山注浆经验,设计采用10 m×10 m 网格布设,钻孔深度根据塌陷裂隙发育程度和采空区埋藏深度等来综合确定,单孔平均深度约40 m,浆液采用渣、地质聚合物和水组成,推荐浆液重量配比为渣:地质聚合物:水=1.25:0.27:0.56,具体配比根据研究区域矿渣性质进行调整。在注浆加固的基础上,再采用地质聚合物和渣形成拌合材料对塌陷坑进行充填,最后进行生态恢复,消除塌陷坑汇水面积,减少地表水对地下水的补给渗流。

6 结论与展望

(1)笔者以西乡县五里坝硫铁矿为例,以遥感调查、地面调查和实验测试为研究方法,分析了矿区存在的生态环境问题:矿排水水量大,水质呈中-强酸性,铁、锰、镍等重金属离子严重超标;大量弃渣裸露堆放,破坏地形地貌景观,弃渣淋滤水污染地表水体;地面塌陷、不稳定斜坡等地质灾害发育,破坏生态环境。

(2)通过分析矿区地下水循环模式、水化学类型和酸性矿排水水源等,认为AMD的形成主要是矿区硫化物矿石中的硫离子在水和氧的作用下发生氧化还原反应,形成大量含硫酸根离子的地下水在含水层饱和后,沿着围岩裂隙、孔洞、矿坑等释放而出。

(3)本着以治理水源为目的,按照“源头治理+过程控制+末端治理+风险管控”的思路,提出“地表水治理+地下水治理+地质灾害治理+生态修复+末端治理+环境监测”治理方案,并探究了矿硐、弃渣和塌陷区3种治理模式。

(4)硫铁矿矿山环境治理是一个世界性难题,存在一定的复杂性和隐蔽性。目前探究将地质聚合物混合弃渣充填矿硐(采空区)技术应用在硫铁矿矿山酸性水治理修复中,对于后期陕南地区硫铁矿治理有一定的引领示范作用。硫铁矿治理方法处于探索阶段,该方法可借鉴,但也存在不足,因而要加强各种新技术、新方法、新材料的探讨以及试点研究,不断提高治理技术的科学性、经济性、合理性。

参考文献(References):

陈华清,张天亮,龚慧山,等. 矿山酸性水中铝相次生矿物及环境学意义的研究进展[J]. *西北地质*, 2023, 56(4): 141-151.

CHEN Huaqing, ZHANG Tianliang, GONG Huishan, et al. Stable isotope characteristics and geological significance of acid wastewater in a stone coal mining area[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(4): 141-151.

陈宏坪,韩占涛,沈仁芳,等. 废弃矿山酸性矿井水产生过程与生态治理技术[J]. *环境保护科学*, 2021, 47(6): 73-80.

CHEN Hongping, HAN Zhantao, SHEN Renfang, et al. Production process and ecological treatment technology of acid mine drainage in abandoned mines[J]. *Environmental Protection Science*, 2021, 47(6): 73-80.

何绪文,胡建龙,李静文,等. 硫化物沉淀法处理含铅废水[J]. *环境工程学报*, 2013, 7(4): 1394-1398.

HE Xuwen, HU Jianlong, LI Jingwen, et al. Treatment of lead-containing wastewater by sulfide precipitation[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2013, 7(4): 1394-1398.

李春花,张倩,张文龙,等. 黄铁矿氧化过程中水的作用再认识[J]. *桂林理工大学学报*, 2022, 42(3): 695-703.

LI Chunhua, ZHANG Qian, ZHANG Wenlong, et al. Reunderstanding of the role of water in pyrite oxidation[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2022, 42(3): 695-703.

李麟,贺俊,高沛,等. 略阳县峡口驿镇长沟硫铁矿矿区酸性水综合治理工程可行性研究报告[R]. 西安:陕西矿业开发工贸有限公司, 2022.

李建民,李晔,董宪伟. 地质聚合物的研究进展与发展趋势[J]. *化工新材料*, 2021, 49(8): 28-32+36.

LI Jianmin, LI Ye, DONG Xianwei. Research progress and development trend of geopolymer[J]. *New Chemical Materials*, 2021, 49(8): 28-32+36.

黎洁,谢贤,李博琦,等. 地质聚合物研究进展[J]. *矿产保护与利用*, 2020, 40(6): 141-148.

LI Jie, XIE Xian, LI Boqi, et al. Overview of research on geopolymers[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2020, 40(6): 141-148.

李麟,张俊峰,杨苏才,等. 西乡县五里坝硫铁矿矿山污染现状调查与环境风险评估报告[R]. 西安:陕西矿业开发工贸有限公司, 2021.

李娟. 黄铁矿表生氧化及其与微生物相互作用关系研究[D]. 南京:南京大学, 2015.

LI Juan. Study on surface oxidation of pyrite and its interaction with Microorganisms [D]. Nanjing: Nanjing University, 2015.

刘伟. 新型生物絮凝剂协同处理重金属废水的研究与应用[D]. 昆明:昆明理工大学, 2017.

LIU Wei. Research and application of novel bioflocculating agents in the collaborative treatment of heavy metal wastewater [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017.

陆现彩,李娟,刘欢,等. 金属硫化物微生物氧化的机制和效应[J]. *岩石学报*, 2019, 35(1): 153-163.

- LU Xiancai, LI Juan, LIU Huan, et al. Mechanism and effect of microbial oxidation of metal sulfide[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2019, 35(1): 153–163.
- 李强, 钟峻宏, 肖皓天, 等. 陕西省汉中市五里坝、刘家坪、麻柳铺硫铁矿机载 LiDAR 数据采集与解译项目成果报告[R]. 京创智慧科技有限责任公司, 2022.
- 聂轶苗, 牛福生, 张锦瑞. 我国矿渣综合利用的现状[J]. *建材技术与应用*, 2009, (2): 6–9.
- NIE Yimiao, NIU Fusheng, ZHANG Jinrui. Slag comprehensive utilization status of mine in our country[J]. *Building Materials Technology and Application*, 2009, (2): 6–9.
- 王晓勇, 徐友宁, 赵振宏, 等. 石煤矿区酸性废水稳定同位素特征及地质意义[J]. *西北地质*, 2023, 56(4): 162–168.
- WANG Xiaoyong, XU Youning, ZHAO Zhenhong, et al. Stable Isotope Characteristics and geological significance of acid wastewater in a stone coal mining area[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(4): 162–168.
- 王柱强, 胡巍. 矿山酸水成因分析及治理技术评价[J]. *中国矿业*, 2010, 5(4): 37–40.
- WANG Zhuqiang, HU Wei. Genetic analysis and treatment technology evaluation of mine acid water[J]. *China Mining*, 2010, 5(4): 37–40.
- 徐志诚. 酸性矿井水的人工湿地处理方法综述[J]. *矿业安全与环保*, 2005, 32(2): 40–43.
- XU Zhicheng. Review on constructed wetland treatment of acid mine drainage[J]. *Safety and Environmental Protection in Mining Industry*, 2005, 32(2): 40–43.
- 徐友宁, 陈华清, 柯海玲, 等. 嵩坪河流域石煤矿区河流铝的白色污染及其成因分析[J]. *西北地质*, 2023, 56(4): 128–140.
- XU Youning, CHEN Huaqing, KE Hailing, et al. Analysis of White Pollution of River Aluminum in Stone Coal Mining Area in Haoping River Basin and Its Causes[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(4): 128–140.
- 袁加巧, 柏少军, 毕云霄, 等. 国内外矿山酸性废水治理与综合利用研究进展[J]. *有色金属工程*, 2022, 12(4): 131–139.
- YUAN Jiaqiao, BAI Shaojun, BI Yunxiao, et al. Research progress of acid mine wastewater treatment and comprehensive utilization at home and abroad[J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2022, 12(4): 131–139.
- 杨程, 王广成, 王绍平, 等. 化学中和法处理含锰酸性矿山废水的工艺优化[J]. *广州化工*, 2021, 49(7): 118–121.
- YANG Cheng, WANG Guangcheng, WANG Shaoping, et al. Optimization of chemical neutralization. Optimization of chemical neutralization process for treating manganese containing acid mine wastewater[J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2021, 49(7): 118–121.
- 朱爱平, 田虎伟. 浅谈金属矿山酸性废水处理工艺[J]. *现代矿业*, 2020, 36(1): 204–206.
- ZHU Aiping, TIAN Huwei. Discussion on acid wastewater treatment technology of metal mine[J]. *Modern Mining*, 2020, 36(1): 204–206.
- Acharya B S, Kharel G. Acid mine drainage from coal mining in the United States-An overview[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 588(1): 125061.
- Jarvis A P, Younger P L. Design, construction and performance of a full-scale compost wetland for mine-spoil drainage treatment at quaking houses[J]. *Water and Environmental Management Journal*, 1999, 13(5): 313–318.
- Ata Akcil, Soner Koldas. Acid Mine Drainage (AMD): causes, treatment and case studies[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2006, 14(12–13): 1139–1145.
- Chen Y T, Li J T, Chen L X, et al. Biogeochemical processes governing natural pyrite oxidation and release of acid metalliferous drainage[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(10): 5537–5545.
- Fabind, Younger P L, Aplina C. Constructed wetlands for the passive treatment of acid mine drainage allow quantitative appraisal of the biogeochemical removal of iron, sulphur, and other pollutants[J]. *Abstracts of Papers of the American Chemical Society*, 2005, 230: 1785–1786.
- Gayathri Naidu, Seongchul Ryu, RameshThiruvenkatachari, et al. A critical review on remediation, reuse, and resource recovery from acid mine drainage[J]. *Environmental pollution (Barking, Essex:1987)*, 2019, 247: 1110–1124.
- Johnson D. Barrie; Hallberg Kevin B. Acid mine drainage remediation options: a review[J]. *Science of the Total Environment*, 2005, 338(1): 3–14.
- Johnson D Barrie, Hallberg Kevin B. Reviews in environmental science and biotechnology[M]. Springer, 2002: 335.
- Kefeni K K, Msagati T A M, Mamba B B. Acid mine drainage: prevention, treatment options, and resource recovery: a review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 151: 475–493.
- Skousen J, Zipper C E, Rose A, et al. Review of passive systems for acid mine drainage treatment[J]. *Mine Water and the Environment*, 2017, 36(1): 133–153.
- Younger P L. Hydro geochemistry of mine waters flowing from abandoned coal workings in County Durham[J]. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 1995, 28: 101–113.