



KEP材料“以废治废”技术在硫铁矿矿硐 封堵中的应用效果研究 ——以白河县硫铁矿污染治理为例

王 晨^{1,2}, 刘厚松¹, 仵西龙¹, 王浩琦¹, 穆 松¹, 孙洪军²

(1. 中煤地环(西安)环境科技有限公司, 陕西 西安 102417;

2. 辽宁工业大学 土木建筑工程学院, 辽宁 锦州 121001)

摘要:为解决硫铁矿废弃矿硐“磺水”渗漏与矿渣二次污染的双重难题,本文以陕西省白河县为研究区域,系统探究 KEP 材料“以废治废”技术在矿硐封堵中的应用效果。通过工程实践与长期监测相结合的方法,明确了 KEP 材料与废弃矿渣的最佳配比(3:7)及注浆工艺参数(压力为 0.8~1.2 MPa),并以白河县 213 个废弃矿硐为典型案例展开实践。结果表明:该技术实现了四重核心效果:1)矿硐密封性显著提升,经两个水文年考验,渗漏率为 0,封堵体透水率 ≤ 0.01 Lu;2)流域水质大幅改善,白石河入汉江断面及汉江出陕断面水质稳定达到国家地表水Ⅱ类标准,“磺水”影响里程缩短约 40 km;3)“以废治废”成效突出,累计消耗废弃矿渣 13 万立方米,成本较传统混凝土技术降低 31.8%;4)地质安全与生态效益协同提升,封堵体抗压强度达 25 MPa,治理区域植被覆盖率提高至 72%。研究表明,KEP 材料“以废治废”技术是兼具生态性与经济性的硫铁矿矿硐治理方案,可为全国同类矿区生态修复提供技术参考。

关键词: KEP; KEP 材料; 硫铁矿矿硐封堵; 以废治废; 封堵效果; 白河县

中图分类号: X751

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2026)02-0001-09

doi: 10.13402/j.gejs.2026.02.02.012

Study on application effect of KEP material in “treating waste with waste” technology for sealing pyrite mine adits ——A case study of pyrite pollution control in baihe county

WANG Chen^{1,2}, LIU Housong¹, WU Xilong¹, WANG Haoqi¹, MU Song¹, SUN Hongjun²

(1. Environmental (Xi'an) Technology Co., Ltd., of China Coal, Geology, Environment and Ecology

Technology Co., Ltd., Xi'an 102417, Shaanxi, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture,

Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, Liaoning, China)

Abstract: In order to solve the dual problems of “acid mine drainage (AMD)” leakage and secondary pollution from waste residue in abandoned pyrite mine adits of pyrite, in this paper, Baihe County area in Shaanxi Province is studied to systematically explore the application effect of the KEP material in “treating waste with waste” technology for sealing mine adits. Through the method of combining engineering practice with long-term monitoring, the optimal ratio of KEP material to waste residue (3:7) and the grouting process parameters (pressure of 0.8~1.2 MPa) are determined. The technology is implemented in 213 abandoned mine adits in Baihe County as typical cases. The results show that the technology has

收稿日期: 2025-11-26

基金项目: 2024 年辽宁省科技计划联合计划资助项目(2024011314-JH2/1026)

作者简介: 王 晨(1999—),男,硕士研究生,从事矿山环境修复、大宗固废资源化利用等方面的研究工作。

achieved four core effects: 1) significantly increased sealing performance of the mine adit, with zero leakage and a permeability of the sealing body ≤ 0.01 Lu after two hydrological years of observation; 2) greatly improved watershed water quality, with the water quality of Baishi River's inflow section into the Han River and the Han River's exit section from Shaanxi consistently meeting the national Class II surface water quality standard, and the mileage affected by AMD reduced by approximate 40 km; 3) Prominent "treating waste with waste" efficiency, cumulatively utilizing 130 000 cubic meters of waste residue and reducing costs by 31.8% compared to traditional concrete technology; 4) Synergistic enhancement of geological safety and ecological benefits, with the sealing body achieving a compressive strength of 25 MPa and the vegetation coverage in the treated area increasing to 72%. The study indicates that the KEP material in "treating waste with waste" technology represents an ecologically sound and economically viable solution for pyrite mine adit remediation, providing a technical reference for ecological restoration in similar mining areas nationwide.

Key words: KEP; KEP material; pyrite mine adit plugging; treating waste with waste; plugging effect; Baihe County

硫铁矿作为我国化工产业的基础原料^[1],其长期开采后遗留的废弃矿硐,已成为制约矿区生态安全维系与可持续发展进程的关键瓶颈。以陕西省白河县为例,县域内分布的 200 余个硫铁矿废弃矿硐引发了突出的流域污染、地质灾害问题,对周边 3 个乡镇近万名居民的生产生活安全构成了直接风险。为破解上述问题,2020 年 8 月,白河县废弃硫铁矿污染治理项目进入全面系统推进阶段。生态环境部华南环境科学研究所结合既往治理经验,确立了“源头减量、过程控制、生态修复”的总体方针,其中矿硐封堵作为源头减量的核心环节,是整个治理工作的主要难点。从国内外研究现状来看,硫铁矿矿硐治理缺乏成熟经验,且目前研究应用多集中于“磺水”末端治理^[2-4]、矿硐砌碛封堵^[5-6]以及普通注浆^[7-9]等技术,其成本与材料性能难以实现长效维持。在此背景下,通过系统梳理在全国范围内征集到的治理方案并组织专家多轮论证,最终选定 KEP 材料作为矿硐封堵的核心技术载体。该材料具备微膨胀、不收缩以及良好环境适应性等优势^[10],加之其具有可高效利用废弃矿渣的经济性、对矿渣中有害物质的强效固结性及环境友好性,为同步破解矿硐封堵与矿渣处置两大难题提供了创新性技术路径。

本文以白河县治理实践为研究案例,通过梳理 KEP 材料“以废治废”技术的工程应用,结合长期监测数据系统验证其在矿硐密封性强化、区域水质改善、治理成本控制及地质灾害防控等方面的实际效能,以期为全国同类硫铁矿矿区的生态修复提供可落地、可复制的技术范式。

1 硫铁矿矿硐污染与封堵原理

1.1 酸性矿山废水的形成与迁移机制

硫铁矿废弃矿硐是酸性矿山废水(acid mine drainage, AMD)产生的源头,其本质是黄铁矿在水、氧气及微生物共同作用下的链式氧化反应^[11]。矿硐开挖破坏岩体原有封闭还原环境^[12],使赋存于耀岭河岩组的黄铁矿暴露于大气与渗流场中,先发生氧化反应生成硫酸亚铁与硫酸,随后 Fe^{2+} 在嗜酸氧化亚铁硫杆菌等微生物催化下快速转化为 Fe^{3+} ^[13],生成的 Fe^{3+} 进一步加速黄铁矿溶解并引发水解反应^[14],导致矿硐涌水 pH 值降至 1.99~4.72 的强酸性至弱酸性范围。

AMD 污染迁移呈现“三维扩散”的特征(图 1): 1)沿硐壁裂隙渗透,污染周边风化裂隙潜水,导致地下水 Fe、Mn 质量浓度分别高达 2 771.0、55.8 mg/L,远超《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017)Ⅴ类限值; 2)通过硐口直接排泄,汇入白石河支流形成“磺水”河段,在厚子河、小白石河等断面 Fe 污染负荷达 2 292.88 mg/s,造成河道沉积物重金属富集; 3) AMD 对矿硐周边废石堆的淋溶作用^[15-16],促进 Ca、Mg 等元素溶出,形成硫酸盐浓度超标的复合污染流,最终威胁汉江出陕断面水质安全。

1.2 矿硐稳定性劣化机制

白河县硫铁矿矿硐多沿武当岩群与耀岭河岩组界面开挖,围岩以炭质绢云母石英片岩、沉凝灰岩为主(图 2),岩体完整性受构造裂隙切割影响显著^[17]。矿硐废弃后,原有应力平衡被打破,呈现“双重劣化”效应:一方面,AMD 长期侵蚀加剧岩体矿物风化,绢云母、绿泥石等黏土矿物

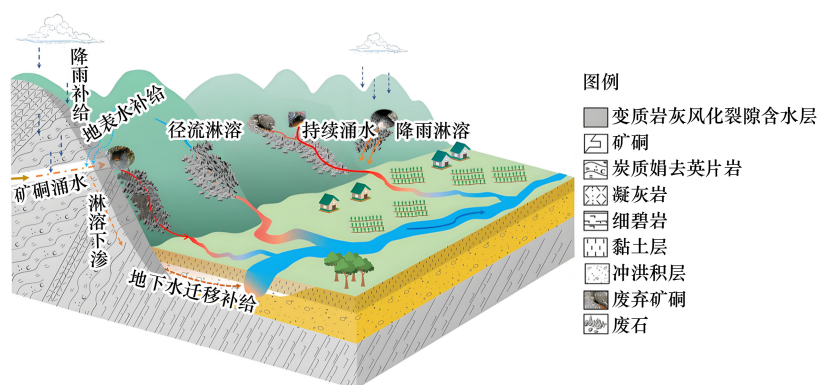


图1 区域污染概念

膨胀崩解,使围岩抗压强度降低 30%~50%,引发洞壁剥落与局部坍塌;另一方面,雨季雨水通过洞口及顶板裂隙灌入,形成动态水力压力,加剧断层破碎带渗透变形,导致 213 个矿洞中 20 个完全坍塌、26 个半坍塌,进一步扩大污染扩散通道。



图2 条带状构造

此外,矿洞稳定性与氧化带发育深度密切相关。白河县矿区地形起伏大,构造发育区氧化深度达 8~20 m,裂隙呈线状延伸形成贯通性渗水通道;而负地形及构造平缓区氧化深度达 5~10 m,污染主要集中于洞口浅部。这种差异导致矿洞污染呈现“持续涌水型”、“季节性涌水型”与“积水型”三类特征,其中 18 个持续涌水矿洞的污染负荷占总负荷的 68%,成为重点管控对象。

1.3 矿洞封堵核心原理

矿洞封堵的核心目标是构建“物理阻隔-化学稳定-生态适配”的三重防护体系,其技术原理围绕“切断污染生成条件、阻断污染迁移路径”展开:

(1) 环境隔离原理:通过封堵材料填充矿洞裂隙与通道,隔绝氧气与地表水进入,使洞内环境从氧化态转为还原态,抑制黄铁矿氧化反应。实现这一转变的关键是封堵位置需精准定位至还原带,避免氧化带残留导致 AMD 的持续产生。

(2) 材料适配原理:封堵材料需同时满足抗

酸腐蚀性、微膨胀密封性与围岩变形适应性,以确保矿洞封堵的有效性和长期性。KEP 材料的可控弹塑性可吸收围岩微量位移(变形量 $\leq 3\%$),避免传统混凝土因刚性开裂失效;其微膨胀特性(膨胀率为 0.3%~0.5%)能填充细微裂隙,形成渗透系数 $\leq 1.0 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ 的致密防渗层,抵御强酸性废水的侵蚀。

(3) 协同固化原理:基于“以废治废”理念,将废弃矿渣作为骨料掺入 KEP 材料中。矿渣中 SiO_2 、 Al_2O_3 与 KEP 胶凝体发生二次水化反应,生成稳定的钙硅铝酸盐凝胶;此外,矿渣表面铁锰氧化物可吸附废水中的重金属离子,实现污染控制与固废资源化的双重效益。

2 白河县硫铁矿矿洞现状与工程设计

2.1 白河县矿洞基础概况

依据《白河县硫铁矿污染综合治理总体方案》(以下简称总体方案)的专项普查数据,县内遗留的硫铁矿废弃矿洞呈现出分布范围广、数量规模大、地质环境复杂等特征,已构成区域生态环境与地质安全的主要风险源。全县已探明废弃硫铁矿矿洞 213 处,空间上形成以卡子镇、茅坪镇为核心的两大污染聚集区,并沿白石河及其支流呈带状分布。

从工程地质与水文地质特征分析,治理区域矿洞类型涵盖平洞、斜井及竖井,其中以平洞为主,多为中小型矿山粗放式开采的产物。各洞道长度差异显著,从数十米至千余米不等,部分大型矿区已形成结构复杂的矿洞群。矿洞围岩主要为志留系、泥盆系的页岩与砂岩,岩体完整性差,节理裂隙发育。加之区域属亚热带湿润季风气候,降水充沛,大气降水易通过洞口、顶板及侧壁裂

隙渗入硐内,诱发硫铁矿氧化,产生大量 AMD。

2.2 矿硐封堵工程设计

2.2.1 KEP 材料及其注浆配比

KEP 材料是一种基于地质聚合物改性的化学键合陶瓷类无机高分子注浆材料,其制备以《LCE 矿化改性剂》(Q/DDY 001—2025)为标准:以高岭土为主料,经煅烧生成半偏高岭土,再与羟基磷灰石、碳纳米管等共混磨粉后,加入 1%~2% 碱激发剂与 0.6%~0.8% 碳酸锂渣微粉,陈化制成。水化凝固后形成兼具陶瓷属性、介孔结构与离子交换特性的三维网状结构。

该材料核心性能突出:耐酸抗腐蚀性强,在 pH 为 2.2~2.5 的硫铁矿“磺水”中浸泡 120 d 未出现剥离,且抗压强度保留率 $\geq 90\%$,远优于易受“水泥杆菌”腐蚀的抗硫酸盐水泥(图 3);弹性稳定,28 d 极限抗剪强度 ≥ 1.5 MPa、自由膨胀率 $\geq 3\%$,固结体呈塑性变形特征,可与矿硐围岩协调蠕变;重金属固化能力优异,通过“腐蚀-解聚-重构-聚合”反应将 As、Hg 等重金属离子键合为分子结构中,其浸出浓度远低于《危险废物鉴别标准 通则》(GB 5085.7—2019)限值。

按照“一硐一策”、“以废治废”治理原则,矿硐封堵采用“KEP 基材料-废弃矿渣”复合体系,即以 KEP 胶凝材料为胶结料、硫铁矿矿渣为骨料拌合而成的填充料。该方案可有效利用矿硐附近矿渣及废水,取材便捷、成本低,真正实现了固废资源化利用,具体配比如表 1 所示。

2.2.2 工程总体设计

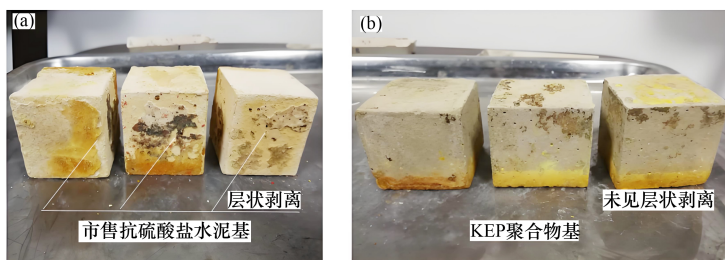
基于勘察成果,从“磺水”治理、矿硐涌水动态控

制及次生灾害防治 3 个维度分析可知:首先,矿硐“磺水”主要由硐内氧化反应生成,局部封堵仅能处理局部渗水点,无法切断全域氧化反应链,导致源头治理失效;其次,治理区域属变质岩强裂隙构造,简易或强化局部封堵易引发“磺水”沿裂隙重构导水通道,形成硐外异位渗出,难以保障封堵稳定性;再者,施工中裂隙水运移途径改变,可能使季节性涌水或暂不涌水的矿硐转化为持续涌水矿硐,仅封堵现有持续涌水矿硐无法覆盖潜在风险;此外,矿硐围岩因采矿扰动形成松弛圈,易随岩体蠕变诱发坍塌、滑坡等次生灾害,而全硐注浆封堵可通过压力充填形成径向预应力支撑,同步实现围岩稳定与灾害防控。

综上,全硐封堵是实现区域长效治理的最佳方案。同时,结合矿硐实际完整程度差异化调整方案:对完整、无大规模塌陷的部分采用 KEP 全硐封堵注浆,对坍塌部分采取钻孔压力注浆法。此外,根据矿硐长度方向的特点,为确保封堵效果并彻底阻断硐内氧化反应,工程采用由内而外的分段封堵方式。在矿硐内各分支点或拐弯处设置挡墙,以挡墙划分独立单元;考虑浆液稠度、自由流动度等技术参数,挡墙间距控制在 40 m 以内。若矿硐洞口存在不稳定岩体或崩塌隐患,则通过清挖、削坡、挂网喷锚等方式加固。

2.2.3 施工工艺

以工程设计方案为指导,矿硐封堵严格遵循“前期准备—主体注浆—后期保障”的逻辑顺序,按“矿硐内围岩清理→管路铺设及密闭墙布设→制浆→硐内注浆→固化养护→密封性检测”6 个阶段推进。其中,管路与密闭墙布设环节需将矿硐划分为若干独



(a) 水泥基试块; (b) KEP 材料试块

图 3 浸泡 120 d 的浸蚀情况

表 1 KEP 注浆材料配合比及固结体参数

废矿渣用量/t	KEP 材料用量/t	水用量/t	固结体积/ m^3	固结体密度/ $(\text{t} \cdot \text{m}^{-3})$	浆液密度/ $(\text{t} \cdot \text{m}^{-3})$
0.98	0.42	0.58	1.00	1.35	1.70

立注浆单元,单元间以混凝土密闭墙分隔,且密闭墙从矿洞末端向外部逐段建造(图 4);墙体预先埋设 KEP 混凝土注浆管、袖阀管、排气管及压力传感器。矿洞空间注浆采用“自流平+泵送加压”协同模式。KEP 超流态混凝土从单元最高处注入,依托自身流动性与泵送压力填充矿洞空间及连通的主要围岩裂隙;浆体充满后,充填泵以低速持续泵送,维持不低于 3 MPa 的静压力,直至压力稳定后关闭阀门锁定。待 KEP 超流态混凝土终凝,启动袖阀管注浆泵与柱塞式注浆泵,将密度为 1.05~1.20 kg/m³ 的纯 KEP 浆液按“由低到高”原则注入袖阀管,注浆泵压力逐步升至 3 MPa。高压下浆液向围岩裂隙深处运移,随沿程阻力增大最终停止;浆液中自由水渗入裂隙,胶凝材料滞留固结后与围岩形成整体封堵体,阻止外围裂隙水向矿洞运移。当注浆量小于 0.1 L/min 且压力稳定在 3 MPa 时停止注浆,完成矿洞主体空间封堵。

3 应用效果监测与分析

3.1 矿洞封堵密封性效果

3.1.1 监测方法

选取白河县布袋沟 33 个封堵矿洞作为核心观

测点,连续两个水文年(覆盖丰水期、汛期、枯水期),每周记录洞口及周边土壤湿度、是否存在“磺水”渗出痕迹。封堵材料检测方面,待材料完全固化后,随机选取 5 个矿洞,每个矿洞钻 2~3 个检测孔,依据《水利水电工程钻孔压水试验规程》(SL 31—2003)测量单位长度透水率。

3.1.2 监测数据

布袋沟 14[#]洞封堵前后直观情况如图 5 所示。由图 5 可知:连续两个水文年观测显示,33 个矿洞均未出现渗漏水现象,矿洞周边土壤 pH 值稳定在 6.5~7.2。单位长度透水率试验结果如表 2 所示。由表 2 可知:5 个矿洞透水率均≤0.01 Lu,远低于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中“弱透水层”的要求。

表 2 检测孔的透水率检测结果

试件编号	透水率/Lu
S1	0.009
S2	0.007
S3	0.004
S4	0.006
S5	0.007

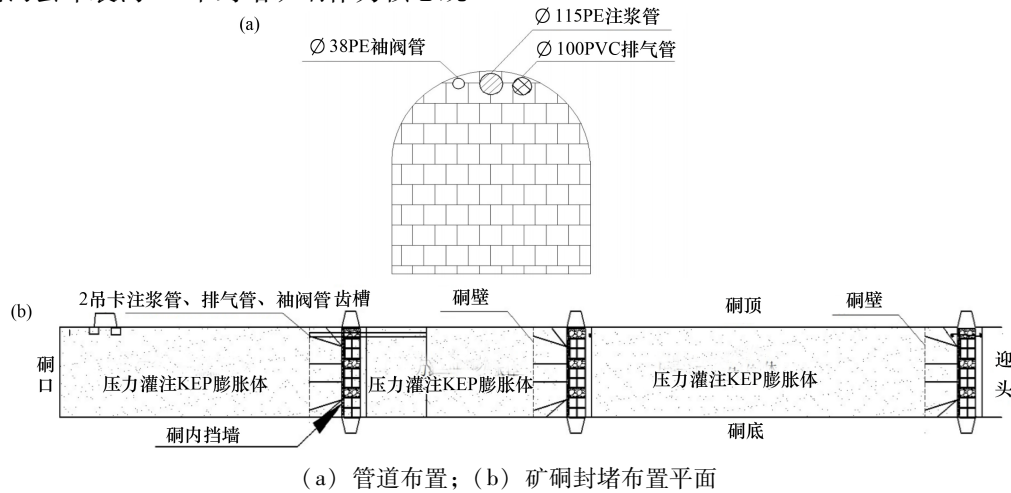
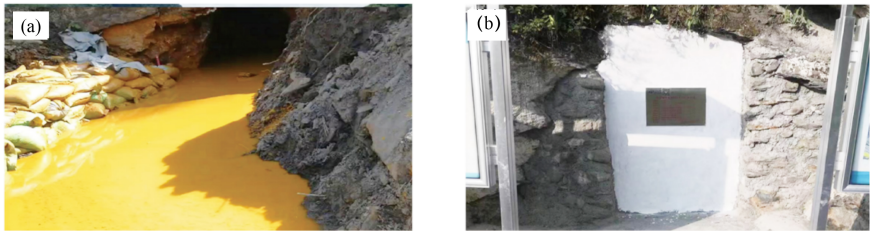


图 4 矿洞内管道布置示意



(a) 封堵前; (b) 封堵后

图 5 布袋沟 14[#]洞封堵前后对比示意

3.2 流域水质改善效果

依据《总体方案》，白河县生态环境局围绕治理区域地表水与地下水水质情况，开展工程实施效果专项评估。地表水监测参照 GB 3838—2002 技术要求，于小白石河、西坝河、东坝河、里端沟四大片区布设 8 个水质控制断面(图 6)，按季度监测，重点聚焦 Fe、Mn 两项关键污染指标；地下水监测依托矿硐周边已建成的水文监测井，按年度监测，针对性监测 Fe、Mn、Cd、Ni、Cu 五类特征污染因子，构建“地表水—地下水”协同监测体系。

表 3、4 分别为白河县污染区域治理前后地表水、地下水的监测数据，图 7 为布袋沟厚子河治

理前后的画面，二者直观反映了治理前后水质的动态改善趋势。生态环境部华南环境科学研究所分别于 2022 年 5 月、2023 年 2、6 月开展 3 次阶段性评估，结果表明：治理区域各水质控制断面特征污染物浓度持续下降，与 2020 年基准值相比，Fe 质量分数降幅达 99.66%，Mn 质量分数降幅达 16.79%；其中厚子河入白石河、白石河入汉江、汉江出陕等断面水质均达国家地表水Ⅱ类标准。另据安康市生态环境局 2023 年 8 月发布的官方监测数据，原总长为 56 km 的“磺水”污染河段经治理后缩短至 15 km 以内，印证了矿硐封堵作为源头减量核心工程的实施成效与技术可行性。

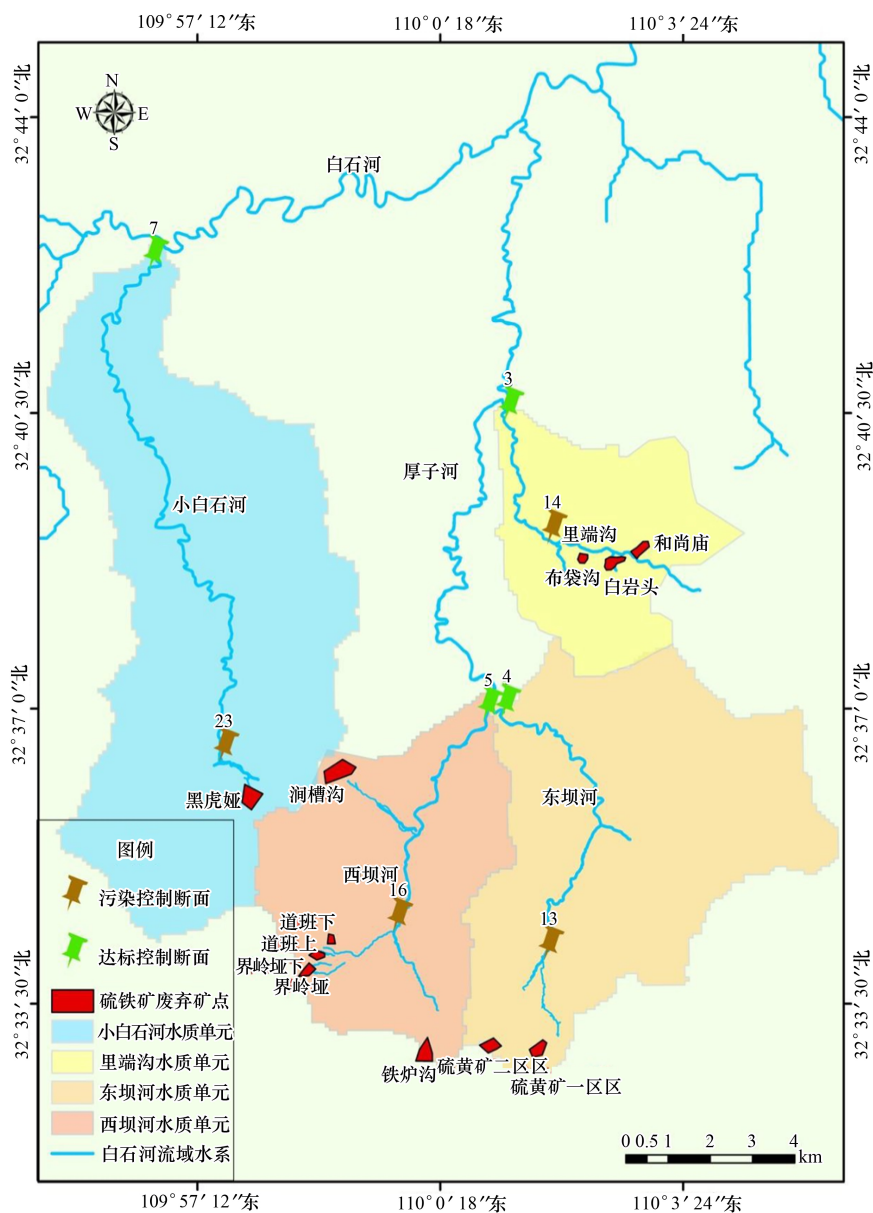


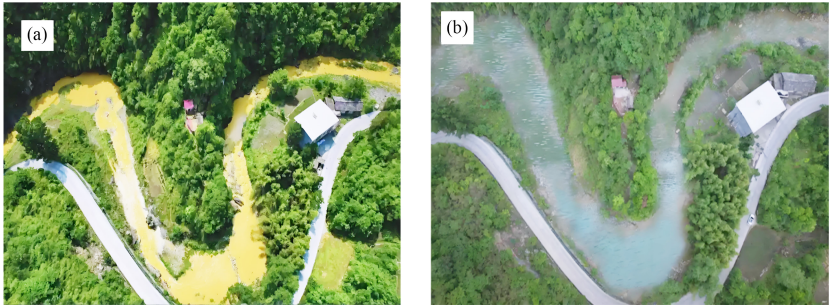
图 6 硫铁矿片区流域水质控制单元划分

表 3 白河县治理区域地表水水质治理前后效果对比

对比项目	监测指标					
	pH	Fe/(mg·L ⁻¹)	Mn/(mg·L ⁻¹)	氟化物/(mg·L ⁻¹)	Cu/(mg·L ⁻¹)	Zn/(mg·L ⁻¹)
GB3838—2002 Ⅱ类地表水限值	6~9	≤0.3	≤0.1	≤1.0	≤1.0	≤1.0
治理前	2.91	35.1	1.74	2.94	1.22	2.02
治理后	6.70	0.12	0.01	0.14	0.05	0.05

表 4 白河县治理区域地下水水质治理前后效果对比

对比项目	监测指标					
	pH	Fe/(mg·L ⁻¹)	Mn/(mg·L ⁻¹)	Cd/(mg·L ⁻¹)	Cu/(mg·L ⁻¹)	Ni/(mg·L ⁻¹)
GB3838—2002 Ⅱ类地表水限值	6.50~8.50	≤0.300 0	≤0.10	≤0.005 00	≤1.000 00	≤0.020 0
治理前	1.99	4.930 0	3.27	0.457 00	0.247 00	0.283 0
治理后	8.17	0.004 5	0.09	0.002 36	0.002 14	0.012 9



(a) 治理前; (b) 治理后

图 7 布袋沟厚子河治理前后水质情况

3.3 “以废治废”与经济性效果

本工程以 KEP 新型注浆材料为核心, 构建“废矿渣资源化—矿硐封堵—污染治理”一体化体系, 既通过“以废治废”实现生态污染源头管控, 又通过多维度成本优化凸显经济性优势, 为硫铁矿废弃矿硐治理提供了技术与成本双优的方案。在“以废治废”实践中, 工程选取布袋沟Ⅰ区、Ⅱ区历史遗留硫铁矿废矿渣, 经大桥村一期延续使用的制砂制粉车间粉碎至 0~30 mm 级配(0~10、10~20、20~30 mm 砂各占 1/3), 再按质量比为 1.00:0.35:0.40(废矿渣:KEP 材料:拌和水)混合制浆(废矿渣占比为 70%), 既降低了 KEP 材料消耗, 又固化了矿渣中的重金属。以 16

个废弃矿硐为例, 工程采用“全硐注浆+钻孔注浆”组合工艺, 累计消纳废矿渣 3 490 t, 使“磺水”源头减量达 95% 以上。

经济性方面, 从单位成本、材料成本、人工与机械费、后期维护费 4 项成本构成与传统抗硫酸盐水泥工艺对比(表 5), 数据直观展现了 KEP 工艺的优势。此外, KEP 工艺在废矿渣处置、资源复用及政策资金方面节约效果显著, 具体体现:该工艺就地消纳废矿渣, 全免了传统废矿渣转运至贮存场所的运输费、贮存场建设费等;项目复用一期制砂制粉车间、变压器等设施费, 节省了设施费, 并通过治理“磺水”减少了水费支出;政策资金方面, 成功申请中央土壤污染防治专项资金 3 500 万元。

表 5 KEP-废矿渣混合注浆工艺与传统抗硫酸盐水泥工艺的成本对比

材料类型	单位成本	材料成本	人工与机械费	后期维护费
KEP-废矿渣混合注浆工艺	712.68	414.45	80	—
传统抗硫酸盐水泥工艺	764.00	495.10	92	300

元/m³

3.4 地质安全与生态修复效果

为系统评估治理后区域的地质安全状态与生态修复成效,采用无人机三维建模、现场岩体力学试验与多维度生态监测相结合的综合评估方法,全面核验治理效果。

在地质安全评估方面,重点选取卡子镇布袋沟、茅坪镇白岩头两大矿硐聚集区,共布设 12 个监测点(含裂缝位移计、应力传感器及倾角仪),通过连续两个水文年的动态监测获取数据。结果显示:治理后矿硐围岩最大水平位移量 $\leq 0.8\text{ mm/a}$,远低于《场地地质灾害危险性评估技术要求(试行)》(T CAGHP 025—2018)中“潜在不稳定边坡位移预警值 5 mm/a ”的标准;封堵体抗压强度达 25 MPa ,完全满足《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330—2013)对永久性支护结构的强度要求。同时,KEP 浆液通过高压注浆技术渗透至围岩 $3\sim 5\text{ m}$ 深处,使围岩完整性系数从 0.35 提升至 0.72 ,岩体类别由“破碎岩”改善为“较完整岩”;加之全硐封堵形成的 0.5 MPa 径向预应力有效抵消围岩卸荷应力,成功切断“酸性废水侵蚀—岩体风化—地质灾害”的连锁反应链条。

生态修复效果同样显著改善。土壤修复层面,在矿硐周边 50 m 范围内布设 20 个采样点,经检测:土壤 pH 值从治理前的 $1.99\sim 4.72$ 提升至 $6.5\sim 7.3$

的中性范围,Fe、Mn 重金属质量分数分别从 $2\,771$ 、 55.8 mg/kg 降至 56 、 12.3 mg/kg ,各项指标均符合《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)。植被恢复层面(图 8、9),通过 30 个 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 植被样方调查,区域植被覆盖率从 28% 提升至 72% ,植物群落由单一耐酸物种演替为侧柏、紫穗槐、早熟禾等构成的乔灌木复合群落,Shannon-Wiener 多样性指数从 0.68 增至 1.85 ,生态系统稳定性大幅增强。水生生态层面,白石河治理段浮游生物种类数从 8 种增至 23 种,其中指示清洁水体的硅藻占比达 42% ;2024 年监测还观察到鲫鱼、泥鳅等鱼类洄游现象,标志着水生生态系统功能逐步恢复。

4 结 论

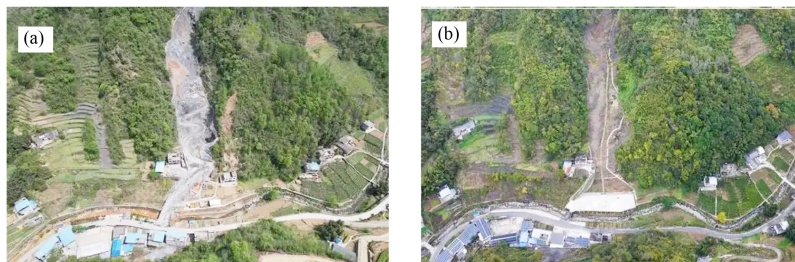
(1) KEP 材料“以废治废”技术在白河县硫铁矿矿硐封堵中成效显著。通过优化 KEP 材料与废弃矿渣配比及注浆工艺参数,实现封堵体透水性 $\leq 0.01\text{ Lu}$ 、两个水文年无渗漏现象,彻底解决了传统混凝土封堵易开裂、耐酸性差的技术难题,为硫铁矿矿硐源头治理提供了可靠的技术方案。

(2) 该技术实现“四重协同”效应:水质改善方面,白石河入汉江断面及汉江出陕断面水质稳定达到国家地表水Ⅱ类标准,“磺水”污染河段



(a) 治理前; (b) 治理后

图 8 布袋沟某废弃矿点治理前后对比



(a) 治理前; (b) 治理后

图 9 卡子镇凤凰村某废弃矿点治理前后对比

由 56 km 缩短至 15 km 以内;固废处置方面,累计消纳废弃矿渣 13 万立方米,避免“渣山”占用土地并造成污染;成本控制方面,较传统混凝土技术成本降低 31.8%,且实现 50 a 长效封堵;生态安全方面,治理区域植被覆盖率提升至 72%,地质灾害风险降低 90%,兼具生态、经济与社会效益。

(3) KEP 材料凭借其可控弹塑性、微膨胀性与强耐腐蚀性,结合“还原带精准封堵+多重防护”设计,构建了“物理阻隔—化学稳定—生态适配”三重防护体系,为同类矿区治理提供了范例。

参考文献:

- [1] 叶志一. 基于循环经济的德兴市硫化工及精深加工产业链设计和基地规划[D]. 杭州:浙江大学,2016.
- [2] MASINDI V, FOSSO-KANKEU E, MAMAKOA E, et al. Emerging remediation potentiality of struvite developed from municipal wastewater for the treatment of acid mine drainage[J]. *Environmental Research*, 2022, 210: 112944.
- [3] HO H J, IIZUKA A, VADAPALLI V R K, et al. Potential investigation of concrete fines as an alternative material: A novel neutralizer for acid mine drainage treatment[J]. *Environmental Technology&Innovation*, 2023, 29: 102985.
- [4] SHAHEDI A, DARBAN A K, JAMSHIDI-ZANJANI A, et al. An overview of the application of electrocoagulation for mine wastewater treatment[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2023, 195(4): 522.
- [5] 冯地宽, 田合利, 陈冲, 等. 贵州省废弃闭坑煤矿酸性废水治理新方法探讨[J]. *中国矿业*, 2024, 33(1): 98–104.
- [6] 时鹏程, 李保珠, 白龙发, 等. 合作市某矿山环境恢复治理与研究[J]. *世界有色金属*, 2025(6): 132–135.
- [7] 黄森林. 精确定向钻进技术在急倾斜煤层老空区探放水中的应用[J]. *煤矿安全*, 2018, 49(1): 104–106.
- [8] 崔永红. 立井井筒过含水老空巷综合支护及堵水技术[J]. *煤炭工程*, 2015, 47(2): 41–43; 46.
- [9] 裴宏. 煤矿井下注浆堵水技术探析[J]. *能源与节能*, 2014(12): 120–121.
- [10] 杜金龙, 潘树仁, 刘长友, 等. 面向绿色矿山的注浆关键技术与工程示范[J]. *矿业科学学报*, 2023, 8(3): 293–307.
- [11] 舒小华, 覃紫其, 聂昌达, 等. 表面次生氧化矿物对 FeS₂ 降解抗生素的影响及作用机制[J]. *中国环境科学*, 2024, 44(10): 5539–5546.
- [12] 张莉, 徐智敏, 孙亚军, 等. 鄂尔多斯典型煤矿不同功能区水化学与微生物群落特征及环境响应[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(12): 180–196.
- [13] 王亚萍, 田涛, 徐晶. 废弃矿山酸性废水的成因、危害及治理技术研究进展[J]. *应用化工*, 2023, 52(4): 1201–1205.
- [14] 张军伟, 刘顺, 文雯, 等. 矿山酸性废水治理与综合利用研究进展[J]. *资源环境与工程*, 2023, 37(6): 734–740.
- [15] 马超, 赵康, 冯印成, 等. 我国历史遗留矿山环境污染综合整治技术与路径探索[J]. *环境工程学报*, 2024, 18(11): 3102–3113.
- [16] 项赞, 温晓晴, 邱郴, 等. 典型废弃硫铁矿环境风险分级研究及应用[J]. *有色金属工程*, 2023, 13(4): 136–144.
- [17] 陈长林, 刘洪祺, 曹林杰, 等. 陕西省白河县硫铁矿地质特征及成矿认识[J]. *科技视界*, 2014(34): 352–353.