文章编号：1004-4051(2024)01-0098-07 DOI：10.12075/j.issn.1004-4051.20230596

# 贵州省废弃闭坑煤矿酸性废水治理新方法探讨

冯地宽，田合利，陈 冲，陈鸿申
（贵州省地质矿产勘查开发局一0六地质大队，贵州 遵义 563000）

**摘 要：**煤矿开采过程中和闭坑后产生的大量酸性废水未得到及时有效的处理，通过矿硐井口源源不断地向外排放，对周边生态环境造成了严重破坏。为有效处理废弃闭坑煤矿酸性废水排放问题，降低或消除其带来的环境破坏，在分析国内外有关煤矿酸性废水治理现行技术和方法基础上，围绕贵州省废弃闭坑煤矿酸性废水排放的现状及特点，根据煤矿酸性废水中有毒有害物质的成分和含量，结合有关规范标准对矿山废水污染物排放标准限值的要求，提出了一种治理该类矿山酸性废水的方法：即对闭坑煤矿井口排水采取巷道内设置挡水墙+巷道充填+封闭墙的巷道封闭充填技术。通过实例验证，矿山一井口不再排水，矿山二水质检测指标中 pH 值由原来的 5.26 上升至 7.93，从酸性变为弱碱性；总铁由 34.30 mg/L 下降至 0.06 mg/L，总锰由 4.34 mg/L 下降至 0.05 mg/L；总悬浮物、化学需氧量（$COD_{Cr}$）和石油类指标变化不明显，基本实现从源头上对废弃闭坑煤矿酸性废水的有效治理。

**关键词：**闭坑煤矿；酸性废水；治理；封闭；充填
**中图分类号：**TD82; X752 **文献标识码：**A

# Discussion on new method of acidic wastewater treatment in abandoned closed coal mine in Guizhou Province

FENG Dikuan，TIAN Heli，CHEN Chong，CHEN Hongshen
（106 *Geological Party*, *Guizhou Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development*, *Zunyi* 563000, *China*）

**Abstract：**A large amount of acidic wastewater produced in the process of coal mining and after the closure of the pit has not been treated in time and effectively. Through the continuous discharge of the wellhead of the mining roadway, it has caused serious damage to the surrounding ecological environment. In order to effectively deal with the problem of acidic wastewater discharge from closed coal mine and reduce or eliminate the environmental damage caused by it, on the basis of summarizing the current technologies and methods of acidic wastewater treatment at home and abroad, focusing on the current situation and characteristics of acidic wastewater discharge from abandoned closed coal mine in Guizhou Province, according to the composition and content of toxic and harmful substances in acidic wastewater from coal mine, combined with the requirements of relevant norms and standards for the discharge standard limit of mine wastewater pollutants, a method for treating acidic wastewater from this kind of mine is put forward: that is, to set up a water retaining wall + roadway filling + closed wall

**收稿日期：**2023-08-18 **责任编辑：**聂虹

**第一作者简介：**冯地宽（1989—），男，汉族，贵州桐梓人，高级工程师，主要从事水文、工程、环境地质研究及地下水污染防治修复方面的研究工作，E-mail：798134423@qq.com。
**通讯作者简介：**田合利（1990—），男，汉族，贵州遵义人，高级工程师，主要从事生态修复方面的研究工作，E-mail：947758586@qq.com。

**引用格式：**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.
FENG Dikuan, TIAN Heli, CHEN Chong, et al. Discussion on new method of acidic wastewater treatment in abandoned closed coal mine in Guizhou Province[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(1): 98-104.

in the roadway for the wellhead drainage of closed coal mine. Through the example verification, the mine No.1 wellhead is no longer drained, and the pH value in the mine No.2 water quality detection index is increased from 5.26 to 7.93, from acidic to weakly alkaline ; the total iron is decreased from 34.30 mg/L to 0.06 mg/L, and the total manganese is decreased from 4.34 mg/L to 0.05 mg/L; the total suspended solids, chemical oxygen demand($COD_{Cr}$) and petroleum indexes don't change significantly, and the effective treatment of acidic wastewater in closed coal mine is basically realized from the source.

**Keywords**：closed coal mine；acidic wastewater；governance；closed；filling

## 0　引　言

贵州省号称“江南煤海”，是中国南方煤炭资源最丰富的省份，煤炭资源储量占西南地区总量的61%。近年来，贵州省为贯彻落实国家有关文件精神，加快推动煤炭清洁高效利用，积极发展新能源，将部分规模较小、产能低下的煤矿实施兼并重组后关闭。然而，关闭后废弃的煤矿产生的酸性废水未得到及时有效的处理，通过矿硐井口源源不断地向外排放，对当地水土环境和生物多样性造成了严重破坏，违背了生态优先、绿色发展理念。因为这些废弃煤矿的环境恢复责任主体灭失，闭坑后的酸性废水治理任务便需要地方政府来承担。近年来，贵州省地方债务不断攀升，治理资金缺口较大。鉴于贵州省废弃闭坑煤矿矿坑水排放问题日趋严重，积极探索适合贵州省废弃闭坑煤矿酸性废水特点的治理新技术已迫在眉睫。本文在总结前人研究成果的基础上，提出了废弃闭坑煤矿酸性废水治理的巷道封闭充填技术，并在实例中取得了良好效果，希望能为类似废弃闭坑煤矿酸性废水治理提供借鉴，以此改善矿山生态环境，实现区域山水林田湖草沙一体化保护和修复。

## 1　材料与方法

### 1.1　研究现状

关于煤矿酸性废水的形成原因和过程已有大量的研究文献。一般认为：煤矿的开采过程会产生大量的煤矸石和煤层围岩，其中的金属硫化物与外界氧气接触后，在水和硫化细菌的共同作用下逐渐形成酸性矿山废水[1]。目前，已基本确定了酸性矿山废水形成的化学反应过程和生物反应过程，认为形成机制中主要涉及到一个核心、三个条件[2]。其中，贯穿酸性矿山废水形成过程的核心因素是矿石内的硫元素，水是酸性矿山废水形成过程中的重要条件，空气中的氧是矿石中的硫化物被直接氧化的重要氧化剂，硫化物的生物氧化是酸性矿山废水形成的第三个条件。

目前，酸性矿山废水的处理措施主要包括源头控制和末端处理[3]，源头控制技术主要有地下矿井淹没或水封、尾矿水下封存、废弃堆场陆上封闭、废矿石混合、尾矿固化、阴离子表面活性剂、保护膜技术等。原理是阻断氧气、水的传导，降低微生物活性，从而避免或减少化学反应和生物反应，防止酸水形成。末端处理技术可分为主动治理法和被动治理法，国内对于矿山酸性废水的治理以主动处理为主，主要技术有石灰石中和法、硫化物沉淀法、曝气氧化过滤法等[4]。近年来，不少学者提出了被动处理新技术，如利用碳酸盐岩处理煤矿酸性废水[5]、有氧垂直折流式反应池处理煤矿酸性废水[6]、碳酸盐岩充填采空区避免酸性矿山水外排技术、以碳酸盐岩为主要反应介质处理废弃煤矿酸性废水[7]等。无论是主动处理还是被动处理，都有其特定的优势，但也存在一些缺陷和不足，各种治理方法的优缺点见表 1。在新形势下，亟待通过理念创新和技术创新，大力研发矿井水处理新技术，实现矿井水的大规模低成本处理及高效利用，井下处理和利用矿区能源优势处理矿井水已成为新的发展趋势[8]。

相关研究表明，石灰作为碱性材料，能和酸水发生酸碱中和反应，目前已被广泛应用于矿山酸性废水治理，石灰中和法处理含重金属离子的酸性废水，工艺流程简单、技术可靠、经济合理、适应性强、处理效果快且好[9]。利用碳酸盐岩作为可渗透反应墙(PRB)反应介质处理酸性废水，对于提高废水 pH 值的效果显著，可由进水时的 2.50 左右升高到出水时的 7.00 左右[10]。贵州省被称之为“喀斯特王国”，碳酸盐岩广泛分布，资源丰富，具有较大优势。

黏土矿物具有特殊的结构特征和吸附性能，在环境污染防治中发挥着重要作用。黏土矿物具有种类繁多、储量丰富、价格低廉、投资少、处理效果好、二次污染小等优点，被广泛应用于环境保护领域[11]。国外对黏土矿物在水质处理中的应用研究较早，尤其是近二三十年来，许多研究成果已应用于实际水体污染处理中，并取得了良好的应用效果。近年来，国内不少学者也致力于改性黏土矿物吸附水中重金属离子和治理煤矿废水的研究，比如，用天然黏土制作回填衬层来净化废水，用黏土矿物(经处理后的蒙

表 1 不同处理方法的优缺点

Table 1 Advantages and disadvantages of different processing methods

| 治理方法 | | 典型技术 | 优点 | 缺点 | 建设投资 | 运行费用 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 源头控制 | | 地下矿井淹没或水封(矿井封隔)、尾矿水下封存、废弃堆场陆上封闭、废矿石混合、尾矿固化、阴离子表面活性剂、保护膜技术 | 从源头上抑制AMD形成,其中的矿井封隔可以隔绝氧气,并进一步形成水封 | 仅对地下矿井封隔适用,需查清矿区所有的竖井和入口,同时控制地表水流补给,对硐室稳定性等施工条件有一定要求 | 适中 | 无 |
| 末端治理 | 主动处理方法 | 中和法、沉淀法(硫化沉淀)、吸附法、离子交换法、生物膜技术、电化学法、微生物处理法 | 处理效率高,适合处理流量大、污染物浓度高的矿山排水 | 需要持续维护、添加药剂,沉淀产生的污泥易造成二次污染、处理高盐水 | 较高 | 高 |
| | 被动处理方法 | 人工湿地、缺氧石灰、连续碱产生系统、可渗透反应墙、石灰石过滤床(LSB)、矿渣过滤床(SLB)、敞口石灰渠 | 建设和维护费用相对较低、运行更稳定、产生污泥量少,生态效果明显 | 对场地条件有较高要求,仅适用于低流量的矿井水,大流量矿井水不适用 | 较低 | 低 |

脱石、硅石、高岭石等)处理污水中有机污染物和金属离子[12]。相关研究发现,煤矿废水在黄土的入渗过程中,既可发生过滤、离子交换吸附等物理作用,又可发生中和、化学吸附、絮凝沉淀等化学作用[13]。

秸秆是一种天然高分子生物吸附材料,吸附性能好,其主要成分为纤维素、半纤维素、木质素、灰分和水分。秸秆的吸附方式主要是物理吸附和化学吸附[14],相比于其他传统处理水中污染物的方法,秸秆具有结构性能好、比表面积大、去除效率高、来源丰富、成本廉价、不易产生二次污染等优点[15]。

刘晓蕊等[16]认为吸附法与其他技术相结合是其规模化应用的主要趋势,并提出生物炭吸附与中和沉淀法协同处理煤矿酸性矿井水的工艺路线。

### 1.2 研究方法

鉴于酸性矿山废水的形成机制和关键影响因素,设想将矿坑水封闭在地下采空区内,不让其排出地表,也接触不到空气,降低硫化细菌等微生物活性,从而阻断物质交换,避免化学、生物反应过程的发生,通过人为工程干预,促使“采空区”氧化环境向还原环境转变,可以杜绝或缓解矿井酸性水的形成[17],从而解决酸性废水外排引起的环境污染问题。同时,鉴于地下水自然径流和排泄作用,封存的地下水会沿着最有利的位置和区域扩散,如节理裂隙和构造发育且地层岩石破碎的位置。地下水在穿过岩层向周边扩散的过程中,会与周围的岩石发生一系列的物理作用、化学作用和生物作用,最终在地势低洼的地带向地表排泄,形成自然循环,达到自我净化。

基于前述研究成果和研究思路,综合贵州省资源禀赋优势,本文提出了治理废弃闭坑煤矿矿坑水外排的巷道封闭充填技术,其基本做法是:在闭坑煤矿矿山废弃的巷道合适位置设置挡水墙,挡水墙的作用是最大限度地将矿井水封闭在矿硐内,同时将空气隔离在外;挡水墙外侧巷道从里到外依次充填石灰石颗粒、黏土、石灰、秸秆等材料,目的在于中和吸附从挡水墙以及巷道壁渗透出的少量矿坑水,其中,充填石灰石颗粒的目的是让酸性废水与其充分反应,去除水中的铁离子和锰离子;充填黏土的目的是进一步吸附水中的有机污染物和金属离子;充填石灰的目的是中和水中的氢离子,提高pH值;充填秸秆的目的是吸附水中的悬浮物。巷道井口处设置封闭墙,防止人、动物和牲畜进入,巷道封闭结构如图1所示。理论上该方法可从源头上阻止或减少酸性矿山废水的形成,避免酸性矿山废水外排进入地表环境,进而消除或降低酸性矿山废水对地表水土和植物生长环境的影响。

### 1.3 研究过程

#### 1.3.1 试验矿山概况

本次选择了两座闭坑矿山开展试验工作。试验

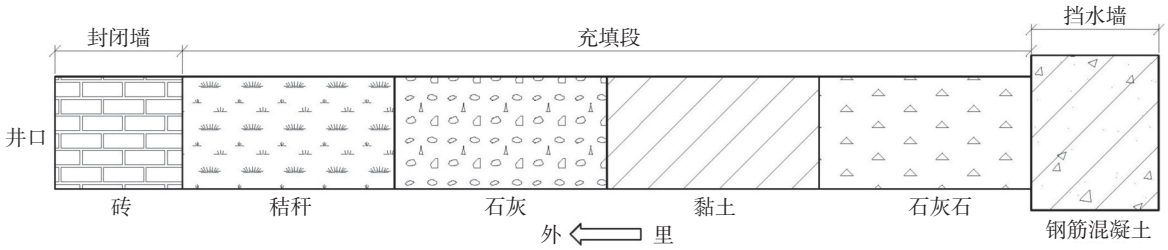


图 1 巷道封闭充填结构示意图

Fig. 1 Diagram of closed filling structure of roadway

矿山一：2013 年底关闭，矿山可采煤层 1 层，产于二叠系乐平统吴家坪组（$P_3w$）底部，煤层结构单一，不含夹矸，厚度 0.87～0.93 m，为中高硫煤；直接顶板为黑色泥岩，间接顶板为灰岩，直接底板为含硫铁矿黏土岩，间接底板为二叠系阳新统茅口组（$P_2m$）灰岩。井口和巷道位于下伏地层二叠系阳新统茅口组（$P_2m$）石灰岩地层中，井口呈上圆下方的常规断面，巷道浅部呈水平往内部延伸，深部呈小角度上山。试验矿山二：2014 年 3 月关闭，矿山可采煤层 2 层，产于二叠系乐平统龙潭组（$P_3l$）底部，煤层结构单一，不含夹矸，平均厚度 3.79 m，为低中硫煤；顶板为泥岩和粉砂岩，直接底板为含硫铁矿黏土岩，间接底板为二叠系阳新统茅口组（$P_2m$）灰岩。井口和巷道位于上覆地层三叠系下统夜郎组（$T_1y$）钙质泥岩地层中，井口呈上圆下方的常规断面，巷道浅部呈水平往内部延伸，深部呈小角度上山。

两座闭坑矿山均为地下井工开采，且只有一个运输巷道。从现场情况看，两座矿山主平硐井口均有大量废水排出，水体无色，有铁锈味，巷道底部矿井水流经处均有黄褐色絮状沉淀物，井口水样检测结果见表 2。由表 2 可知，样品检测指标中 pH 值、总铁、总锰均超过了《煤炭工业污染物排放标准》（GB 20426—2006）废水污染物排放标准限值，从感官和分析结果来看，该矿坑水属贵州省典型的煤矿酸性废水。

**表 2　样品检测结果统计表**

**Table 2　Statistical table of sample test results**

单位：mg/L

| 检测项目 | 检测结果（矿山一） | 检测结果（矿山二） | 日最高允许排放质量浓度 |
|---|---|---|---|
| | | | 新建（扩、改）生产线 |
| pH 值 | 2.76 | 5.26 | 6～9 |
| 总悬浮物 | <1.00 | <1.00 | 50.00 |
| 化学需氧量（$COD_{Cr}$） | 46.00 | 18.00 | 50.00 |
| 石油类 | <0.05 | <0.05 | 5.00 |
| 总铁 | 220.60 | 34.30 | 6.00 |
| 总锰 | 36.07 | 4.34 | 4.00 |

注：pH 值无单位。

1.3.2　试验过程

根据上述研究方法，在矿山一废弃的主平硐井口往深部 30 m 处设置挡水墙，在挡水墙位置四周巷壁和底部基岩上掏槽，深度 0.5 m，挡水墙厚度 3 m，挡水墙结构采用钢筋混凝土，设置两层钢筋网片，钢筋网片位于挡水墙两端，钢筋网片两侧保护层厚度 10 cm，钢筋规格为 Φ14 的螺纹钢，纵横间距均为 20 cm，混凝土强度大于 C30，水泥采用 425#膨胀防腐蚀水泥，混凝土采用强制搅拌机搅拌并高压泵送，常规养护时间 7 d。在挡水墙外侧巷道从里到外依次充填石灰石碎块 5 m、黏土 5 m、石灰 5 m、秸秆 5 m。碎石选用较纯的茅口组石灰岩，粒径小于 20 mm；黏土选用本地黄黏土；石灰为外购粒状生石灰；秸秆选用玉米秸秆，秸秆粉碎至长度小于 10 mm，并压实成型，码砌堆放；巷道井口封闭墙采用砖混结构，厚度为 3 m。其结构如图 2 所示，效果如图 3 所示。

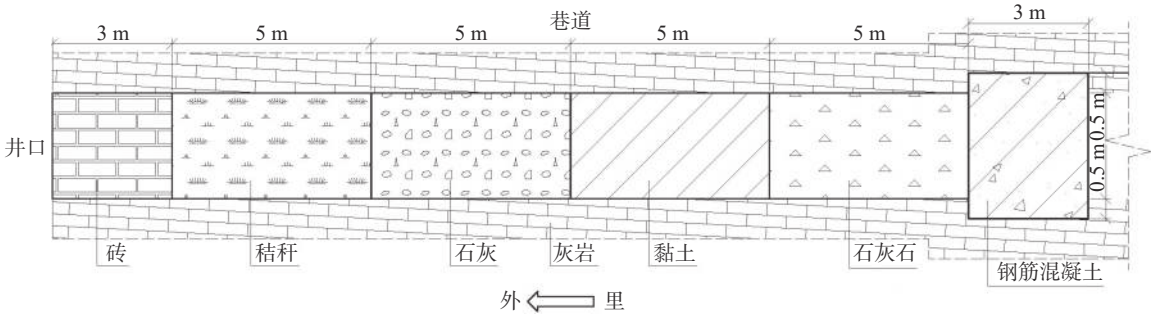


**图 2　巷道封闭充填结构图（矿山一）**

**Fig. 2　Diagram of closed filling structure of roadway（mine No.1）**

因矿山二井口排水量较大，在该矿山主平硐井口往深部 150 m 和 170 m 处分别设置了一道挡水墙，挡水墙采用与矿山一同样的工艺措施。挡水墙实施后发现外侧巷道四周基岩裂隙尚存在少量渗水迹象，

(a)挡水墙浇筑 (b)充填石灰岩

(c)充填生石灰 (d)充填黏土

(e)充填秸秆 (f)封闭墙

(g)治理前 (h)治理后

**图 3 治理过程及前后对比图(矿山一)**

**Fig. 3 Treatment process and comparison before and after(mine No.1)**

通过多次对汇聚后的井口水样进行取样检测,水质指标均满足排放标准,考虑到挡水墙的设置位置较深且位于相对隔水岩层中,后续未再实施巷道充填,仅对井口进行了封闭,并预留了出水口。

试验时间自 2021 年 10 月至 2022 年 12 月,其中工程实施时间为 2 个月,2022 年 1 月开始每月监测一次,监测内容为渗水量及水质变化情况。

## 2 结果与讨论

### 2.1 结果分析

1)试验过程中严格控制原材料和过程质量,总体质量良好,经一个水文年监测数据显示:矿山一主平硐巷道口未再有矿坑水排出,基本达到预期效果;矿山二主平硐巷道井口现每天排水 30.24 t,水体主要来自巷道壁基岩裂隙渗水,水体无色无味,感官上已基本满足要求。通过多次井口水样检测,水质指标中 pH 值由原来的 5.26 上升至 7.93,总铁由 34.30 mg/L 下降至 0.06 mg/L,总锰由 4.34 mg/L 下降至 0.05 mg/L;总悬浮物、化学需氧量($COD_{Cr}$)和石油类指标变化不明显,但均满足排放标准(表 3),达到了水质净化的目的。分析认为:通过两堵挡水墙的阻隔,矿井水被封闭在巷道内,经过长时间的累积,巷道内已充满水,形成类似水仓,巷道内的水通过周围黏土岩的吸附和一系列物理化学反应,铁锰等有害物质浓度降低,部分物质沉淀在巷道底部;少部分水体通过围岩裂隙向周边岩层渗透,通过层层过滤和反应,在浅部巷道壁和地势相对低洼的地段排出地表,实现了自然营力的作用,还原了大自然自我修复的过程。

**表 3 样品检测结果对比表(矿山二)**

**Table 3 Comparison table of sample test results(mine No.2)**

单位:mg/L

| 检测项目 | 治理前检测结果 | 治理后检测结果 | 日最高允许排放质量浓度 |
|---|---|---|---|
| | | | 新建(扩、改)生产线 |
| pH 值 | 5.26 | 7.93 | 6～9 |
| 总悬浮物 | <1.00 | <1.00 | 50.00 |
| 化学需氧量($COD_{Cr}$) | 18.00 | 35.00 | 50.00 |
| 石油类 | <0.05 | <0.01 | 5.00 |
| 总铁 | 34.30 | 0.06 | 6.00 |
| 总锰 | 4.34 | 0.05 | 4.00 |

注:pH 值无单位。

2)该方法投入经费相对较少,施工工艺简单,安全风险低,可操作性强,所选材料均在当地比较容易获取且价格低廉;该方法仅前期一次性投入,后期无维护费用,经济合理。此外,该方法主要在巷道内进行,不需要占用地表太多的土地资源,可以实现资源节约利用。

### 2.2 讨论

1)本次研究设置挡水墙的位置岩体相对较为完整,岩石为坚硬的石灰岩和未风化的泥岩,节理裂隙不发育,风化程度低,岩石较为新鲜。在巷道围岩破碎或节理裂隙、断层发育的区域设置挡水墙,可能影响后期效果。因此,该方法中巷道挡水墙位置选择比较关键,通常比较完整的基岩位置是首选,且尽量靠巷道深部。因矿坑水呈强酸性,腐蚀性极强,在选取原材料时一定要确保材料的抗腐蚀性或做抗腐蚀处理,避免后期因材料被腐蚀而影响效果。

2)本方法选择的都是当地比较常见、易获取且价格低廉的材料，如有其他更经济、效果更好的材料，可作更换替代。近年来，有关自燃煤矸石和碳钢渣处理该类酸性矿坑水的研究较多，郭旭颖等[18]提出自燃煤矸石通过表面孔隙吸附作用和发生配位反应，将煤矿酸性废水中的离子以小颗粒的形式沉积在自燃煤矸石表面。附着在煤矸石表面的硫酸盐还原菌不仅影响自燃煤矸石表面的矿物质成分，形成黑色硫化物颗粒，还可以直接处理煤矿酸性废水，进一步提高对煤矿酸性废水的处理效果。车志远等[19]研究成果表明碳钢渣对 $Fe^{2+}$去除率最高可达 98.72%，对 $Mn^{2+}$的去除率最高仅为 39.79%；处理煤矿酸性废水后碳钢渣表面生成了新物质 $Fe(OH)_3$，但没有生成含 Mn 的新物质，证明碳钢渣对 $Fe^{2+}$的去除以化学反应为主，对 $Mn^{2+}$的去除以吸附作用为主。自燃煤矸石和碳钢渣是日常生活中比较容易获取的材料，合理使用不但可以解决该类材料的储存和处理问题，还可以变废为宝。

3)在巷道充填中，可以考虑加入适量的硫酸盐还原菌，研究表明硫酸盐还原菌在矿坑水处理中可以起到很好的“催化作用”，如邓奇根等[20]提出的硫酸盐还原菌治理煤矿酸性废水应主要从源头治理、多种方法组合进行、加强对微生物驯化三个主要方向进行。

4)煤矿酸性废水治理需综合考虑经济性和适用性，并结合其他治理方法和技术，实现高效、快速、彻底治理的目的。在实际工程应用过程中，由于高硫酸盐矿山废水，一般同时含有重金属、氟化物等，需要根据矿山废水污染物类型，同时考虑污染物排放标准和环境质量标准，综合评估硫酸盐的处理方法，实现硫酸盐处理的低成本、低能耗化和资源化[21]。郭超等[22]阐明在处理实际煤矿废水中核心处理单元的选取是处理废水的关键，同时指出选取工艺时要注意将理论与实际结合，提出符合当地实际水平的处理工艺流程。

## 3　结　论

1)通过理论分析和实例验证，采用巷道封闭充填技术治理废弃闭坑煤矿酸性废水技术上是可行的，可以有效减少或彻底解决废弃煤矿酸性废水外排问题，还可以起到矿井水水质净化的目的，使 pH 值明显升高，总铁和总锰明显降低，最终达到相关排放标准，基本实现从源头上对废弃闭坑煤矿酸性废水的有效治理。此外，巷道封闭还能消除安全隐患，避免人畜进入形成次生伤害。该方法效果明显且经济合理，不需要后期维护，可以在类似废弃闭坑煤矿酸性废水排放治理中推广应用。

2)采用巷道封闭充填技术时应注意该技术的特点、适用条件和充填材料的选择，充分结合矿山自然地理条件和开采技术条件，必要时可结合末端废水处理技术，实现煤矿酸性废水生态修复的目的。

## 参考文献(References)：


[1] 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.
WANG Yaping, TIAN Tao, XU Jing. Research progress on the causes, hazards and treatment technology of acid wastewater from abandoned mines[J]. Applied Chemical Industry, 2023, 52(4): 1201-1205.

[2] 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，2010，19(5)：37-40.
WANG Zhuqiang, HU Wei. Causal analysis of acid mine drainage and evaluation of some control techniques[J]. China Mining Magazine, 2010, 19(5): 37-40.

[3] 倪师军，李珊，李泽琴，等. 矿山酸性废水的环境影响及防治研究进展[J]. 地球科学进展，2008，23(5)：501-508.
NI Shijun, LI Shan, LI Zeqin, et al. Progress in the research of acid mine drainage impact and remediation[J]. Advances in Earth Science, 2008, 23(5): 501-508.

[4] 罗凯，张建国. 矿山酸性废水治理研究现状[J]. 资源环境与工程，2005，19(1)：45-49.
LUO Kai, ZHANG Jianguo. Status quo of the disposal of acidic mining waste water[J]. Resources Environment & Engineering, 2005, 19(1): 45-49.

[5] 姚冬菊. 废弃煤矿酸性废水ARUM治理系统参数优化与中试试验研究[D]. 贵阳：贵州民族大学，2021.

[6] 杨绍章，吴攀，张瑞雪，等. 有氧垂直折流式反应池处理煤矿酸性废水[J]. 环境工程学报，2011，5(4)：789-794.
YANG Shaozhang, WU Pan, ZHANG Ruixue, et al. Treatment of acid mine drainage using aerobic baffled vertical flow reactor[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2011, 5(4): 789-794.

[7] 张瑞雪，吴攀，杨艳，等. 贵州煤矿酸性废水“被动处理”技术的新方法探讨[J]. 地球与环境，2010，38(2)：250-254.
ZHANG Ruixue, WU Pan, YANG Yan, et al. Study on new methods for treating acid mine drainage with passive treatment technology[J]. Earth and Environment, 2010, 38(2): 250-254.

[8] 顾大钊，李庭，李井峰，等. 我国煤矿矿井水处理技术现状与展望[J]. 煤炭科学技术，2021，49(1)：11-18.
GU Dazhao, LI Ting, LI Jingfeng, et al. Current status and prospects of coal mine water treatment technology in China[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(1): 11-18.

[9] 刘志刚. 石灰中和法处理含重金属离子酸性废水[J]. 江西冶金，2003，23(6)：109-110.
LIU Zhigang. Lime neutralization processed acid waste water containing heavy metal ions[J]. Jiangxi Metallurgy, 2003, 23(6): 109-110.

[10] 熊玲，张瑞雪，吴攀，等. 碳酸盐岩处理煤矿酸性废水的试验研究[J]. 水处理技术，2010，36(8)：45-48.
XIONG Ling, ZHANG Ruixue, WU Pan, et al. Experimental study on acid coal mine drainage treatment with carbonate[J]. Technology of

Water Treatment, 2010, 36(8): 45-48.

[11] 杨秀敏, 李立欣, 张迎春. 粘土矿物作为环境修复材料的研究进展[J]. 金属矿山, 2010(7): 153-156.
YANG Xiumin, LI Lixin, ZHANG Yingchun. Research progress of clay-mineral as environmental remediation material[J]. Metal Mine, 2010(7): 153-156.

[12] 崔龙鹏. 试论粘土矿物在淮河水污染治理中的应用前景[J]. 环境保护科学, 1998, 24(5): 17-19.
CUI Longpeng. Discussion on the application prospect of claymineral in Huaihe water pollution treatment[J]. Environmental Protection Science, 1998, 24(5): 17-19.

[13] 武胜忠, 张绍韡. 黄土处理煤矿酸性废水的可行性研究[J]. 工程勘察, 2006, 34(4): 17-19, 9.
WU Shengzhong, ZHANG Shaowei. Feasibility study on treatment of acidic waste water from coal mines with loess[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2006, 34(4): 17-19, 9.

[14] 胡振东. 改性稻草秸秆对重金属的吸附性能探究[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2016.

[15] 李海江, 阚晓伟, 姜子闻, 等. 秸秆材料的改性及其在水处理中的应用研究[J]. 高分子通报, 2011(2): 21-29.
LI Haijiang, KAN Xiaowei, JIANG Ziwen, et al. Modified straw materials and their applications in wastewater treatment[J]. Polymer Bulletin, 2011(2): 21-29.

[16] 刘晓蕊, 李栋, 王高峰. 生物炭吸附煤矿酸性矿井水中污染物技术展望[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(6): 1187-1197.
LIU Xiaorui, LI Dong, WANG Gaofeng. Prospects of biochar adsorption for pollutants removal from acid mine drainage[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2022, 39(6): 1187-1197.

[17] 卢裴裴, 王诗扬. 废弃煤矿山酸水地学防治的实验室模拟研究[J]. 贵州地质, 2022, 39(1): 66-71.
LU Peipei, WANG Shiyang. Laboratory simulation study of geosciences prevention and treatment of acid wasterwater in acid water in abandoned coal mines[J]. Guizhou Geology, 2022, 39(1): 66-71.

[18] 郭旭颖, 董艳荣, 里莹, 等. 自燃煤矸石吸附煤矿酸性废水矿物学特性研究[J]. 非金属矿, 2017, 40(3): 97-100.
GUO Xuying, DONG Yanrong, LI Ying, et al. Study on the mineralogical characteristics of spontaneous combustion gangue regarding its absorption capacity of acid mine drainage[J]. Non-Metallic Mines, 2017, 40(3): 97-100.

[19] 车志远, 刘虎, 周林康, 等. 碳钢渣处理煤矿酸性废水及其去除机理[J]. 太原理工大学学报, 2023, 54(3): 451-457.
CHE Zhiyuan, LIU Hu, ZHOU Linkang, et al. Carbon steel slag treatment of acid mine drainage and its removal mechanism[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2023, 54(3): 451-457.

[20] 邓奇根, 王颖南, 吴喜发, 等. 硫酸盐还原菌处理煤矿酸性废水的研究及其影响因素[J]. 水处理技术, 2020, 46(5): 8-11, 29.
DENG Qigen, WANG Yingnan, WU Xifa, et al. Study on the treatment of acid coal mine drainage by sulfate reducing bacteria and its influence factors[J]. Technology of Water Treatment, 2020, 46(5): 8-11, 29.

[21] 王晓青, 冯启言, 宫敏, 等. 高硫酸盐矿山废水的处理方法研究进展[J]. 应用化工, 2022, 51(8): 2355-2361.
WANG Xiaoqing, FENG Qiyan, GONG Min, et al. Research progress on treatment methods of wastewater with high sulfate mines[J]. Application Chemical Industry, 2022, 51(8): 2355-2361.

[22] 郭超, 刘怀英, 马兆瑞, 等. 煤矿废水处理工艺及应用分析[J]. 煤炭工程, 2015, 47(5): 79-82.
GUO Chao, LIU Huaiying, MA Zhaorui, et al. Analysis and application of coal mine wastewater treatment process[J]. Coal Engineering, 2015, 47(5): 79-82.