

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2023. 04. 015

# 无动力跌曝交迭滤床处理关闭煤矿的酸性涌水

谭伟<sup>1</sup>, 宋浩洋<sup>1</sup>, 罗勇<sup>2</sup>, 李科<sup>3</sup>, 蒋进元<sup>1</sup>

(1. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 2. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074;  
3. 四川省煤炭设计研究院, 四川 成都 610017)

**摘要:** 针对关闭煤矿井涌水污染治理问题, 设计了经济适用可持续的无动力跌曝交迭滤床处理技术, 并成功应用于四川广元市关闭煤矿的涌水治理工程, 取得了较好的处理效果和社会经济效益。该工程设计规模为 11 664 m<sup>3</sup>/d, 矿井水经过处理后, 出水水质完全满足《煤炭工业污染物排放标准》(GB 20426—2006), 出水 pH 保持在 6~9, 总铁浓度平均值为 1.02 mg/L, 总锰浓度平均值为 0.19 mg/L, 悬浮物浓度平均值为 15.86 mg/L。运行期间无药剂添加, 无提升动力费, 该技术可用于涌水量大、场地较为充足、具有一定高程差地区的关闭煤矿涌水治理。

**关键词:** 关闭煤矿; 酸性涌水; 三级无动力滤床; 跌曝交迭

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2023)04-0086-04

## Treatment of Acid Water Inflow in Closed Coal Mine by Unpowered Overlapping Drop-aeration Filter Bed

TAN Wei<sup>1</sup>, SONG Hao-yang<sup>1</sup>, LUO Yong<sup>2</sup>, LI Ke<sup>3</sup>, JIANG Jin-yuan<sup>1</sup>

(1. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3. Coal Design and Research Institute of Sichuan, Chengdu 610017, China)

**Abstract:** Aiming at the pollution control problem of closed coal mine water inflow, an economical and sustainable treatment technology of unpowered overlapping drop-aeration filter bed is designed and applied to the treatment projects of closed coal mine water inflow in Guangyuan, Sichuan Province, which has good treatment effects and social economic benefits. The design treatment capacity of the project is 11 664 m<sup>3</sup>/d. The effluent quality could meet the requirements in *Emission Standard for Pollutants from Coal Industry* (GB 20426-2006). After the mine water is processed, the pH of the treated water maintains at 6-9, and the concentrations of total iron, total manganese and suspended solids is 1.02 mg/L, 0.19 mg/L and 15.86 mg/L respectively. There is no addition of chemicals and no power costs during operation of project. This technology can be used to control the closed coal mine water inflow where the amount of water inflow is large, the site is relatively sufficient, and there is a certain elevation difference.

**Key words:** closed coal mine; acid water inflow; three-stage unpowered filter bed; overlapping drop-aeration

基金项目: 长江生态环境保护修复广元驻点跟踪研究项目(CJZDCZYJ44)

通信作者: 蒋进元 E-mail: jiangjy@craes.org.cn

我国“十一五”“十二五”期间共关闭煤矿 16 716 座,数量多、分布广,单井影响范围和程度差别大,矿井涌水污染影响范围广。近年来,由于国家能源、产业结构调整等政策要求,四川省广元市关闭淘汰大量矿企,但闭矿时按要求仅简易封堵主(副)平硐,仍会出现涌水,影响生态环境。据统计,广元市共关停矿企 492 家,100 余处矿井口有水涌出,影响周边河道生态,因此,针对此类矿井涌水的有效治理对于该市的经济发展和生态环境保护具有重要意义。

1 工程背景

针对关闭矿井涌水,目前国内外主要采用的技术包括中和沉淀法、硫化物沉淀法、生物化学法等,但这些传统的技术存在二次污染、产泥量多、治理工程运行维护费用高等缺点,具有不可持续性。中和沉淀法主要采用石灰或石灰石中和法,优点是工艺简单、操作方便,缺点是易造成排泥管的堵塞,设备需频繁维护,产生铁泥量大,且铁泥因含有杂质较多,只能作为固体废弃物填埋而无法资源化利用,运行费用高达 5 元/m<sup>3</sup> 以上<sup>[1]</sup>。硫化物沉淀法主要利用硫化剂沉淀矿井水中的金属离子,具有沉渣含水率低、不易返溶等优点,但硫化剂有剧毒且成本高。生物化学法是利用氧化亚铁硫杆菌氧化矿井水中二价铁离子,再进行石灰石中和,该方法氧化二价铁离子效率较高,弊端是处理速率低、所需反应器体积大、工程投资较高,运行费用仍在 5 元/m<sup>3</sup> 以上。现有的锰砂滤池处理技术虽能克服传统矿井涌水治理技术的缺点,但当前锰砂滤池由于采用下流式进水方式,导致能耗大,水头损失增加较快,过滤周期较短,并且下层滤料难以发挥作用。单层滤料的滤池由于污染物穿透深度浅,不能发挥整个滤层的纳污能力,并且沉积在滤料顶部的污染物易结垢而降低去除效率。因此,研发经济适用、可持续的关闭煤矿涌水治理技术是煤矿开采和环境治理行业技术升级的关键。

四川省广元市关闭煤矿矿井涌水治理中采用了一种无动力跌曝交迭滤床处理技术,该技术自入口至出口依次包括初级跌水曝气池、沉淀池、三级无动力跌曝交迭滤床和储泥池。该技术的特点为日常运行“无动力、零加药”,滤料更换周期长,处理效果好,很好地解决了关闭矿井涌水治理运行维护

费用高、产生污泥量大等难题,为矿井水和铁泥资源化提供了解决思路<sup>[2-3]</sup>,实现了经济实用可持续的技术突破。

2 工程设计

2.1 设计水量和进、出水水质

根据五房沟煤矿水文地质条件调查报告数据分析,该处井口涌水量总体呈逐年递减趋势,结合剑阁县的年降雨量,考虑工程实施的经济性和使用率等因素,本工程设计水量定为枯水期的 1.5 倍,即设计规模为 11 664 m<sup>3</sup>/d。

关闭煤矿涌水治理工程设计进水水质见表 1,设计出水水质执行《煤炭工业污染物排放标准》(GB 20426—2006)的表 2 标准。

表 1 设计进、出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality

项目	pH	悬浮物/ (mg·L <sup>-1</sup> )	总铁/ (mg·L <sup>-1</sup> )	总锰/ (mg·L <sup>-1</sup> )
设计进水	4~6	200	200	10
设计出水	6~9	≤50	≤6	≤4

综合考虑涌水井口周边地形、土地利用面积及涌水量等因素,该井口涌水治理的核心工艺采用三级无动力跌曝交迭滤床技术,配套配水渠、沉淀池和储泥池。

工艺流程见图 1。

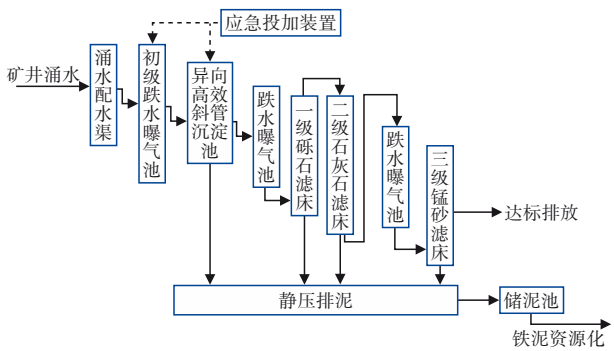


图 1 关闭煤矿井涌水治理工艺流程

Fig.1 Flow chart of closed coal mine water treatment process

2.2 工程设计

① 配水渠

对原涌水井口出水口进行改造,用管道和渠道将来水引至跌水池,根据高程设计实现自流。配水渠采用砖混结构,尺寸为 30 m×0.8 m×30 m。

② 跌水曝气池

矿井水通过渠道配水进入跌水池,可起到对原水增氧的作用,并加快二价铁的氧化。跌水池采用钢混结构,尺寸为3.0 m×2.5 m×2.5 m。

### ③ 反应沉淀池

跌水池来水自流进入反应池,反应池为二价铁氧化提供充足反应时间,同时起到初沉池作用,进一步去除水中悬浮物,减小滤池运行负荷,延长滤池运行时间。反应沉淀池采用钢混结构,尺寸为30.0 m×12.0 m×4.0 m。

### ④ 三级无动力串联式滤床

设计三级无动力滤床,串联,一级为砾石滤床,二级为石灰石滤床,三级为锰砂滤床,尺寸为96.0 m×30.0 m×1.3 m。一级砾石滤床填料粒径 $\phi 5\sim 10$  cm,高0.9 m,表观断面潜流滤速为20.8 m/h;二级石灰石滤床填料粒径 $\phi 3\sim 6$  cm,高0.85 m,表观断面潜流滤速22.0 m/h;三级锰砂滤床填料粒径 $\phi 1\sim 2$  cm,高0.8 m,其中下部设置0.2 m级配砾石承托层,锰砂滤床采用上向流过滤形式,上向流床层滤速1.8 m/h。

经过反应沉淀池初步沉淀的矿井水自流进入滤池配水渠,滤床长宽比控制在(1:1)~(1.5:1)之间,通过配水渠均匀分配到各个滤床,配水系统为

穿孔墙和管道配水相结合。每级滤床分两格,便于检修及运行管理,可根据水量实时调节。矿井水经过一级砾石滤床时,通过砾石滤床内填料的物化吸附和生物作用<sup>[3]</sup>去除悬浮物、COD、总铁、总锰等污染物;经过二级石灰石滤床时,石灰石与矿井水接触,矿井水pH升高, $\text{Fe}^{2+}$ 在石灰石表面反应生成氢氧化亚铁,在空气作用下,进一步反应生成氢氧化铁沉淀,总铁进一步被去除<sup>[4]</sup>;因锰砂作为滤料时对矿井水中铁的吸附效果优于石英砂、陶粒、瓷砂<sup>[5-6]</sup>等滤料,故经过三级锰砂滤床时,矿井水中的铁、锰等将会被锰砂滤料大量吸附去除,保障出水达标排放。

### ⑤ 储泥池

为防止滤床堵塞,在滤床底部设有排泥格栅,后端设有储泥池定期排泥。储泥池采用钢混结构,尺寸为10.0 m×2.5 m×5.0 m。

## 3 实际运行效果及经济分析

### 3.1 处理效果

该关闭煤矿涌水治理工程于2020年12月建成并通水调试,经过近6个月的调试和运行,矿井水经过多级无动力跌曝交迭滤床后出水稳定达标。工程调试和运行期间涌水进、出水水质见表2。

表2 实际运行进、出水水质

Tab.2 Actual influent and effluent quality

日期	进水				出水			
	pH	悬浮物/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	总铁/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	总锰/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	pH	悬浮物/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	总铁/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	总锰/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )
2021-02-01	6.46	56	37.40	0.47	7.58	14	2.25	0.14
2021-02-07	6.89	61	55.50	0.55	7.75	17	1.58	0.18
2021-03-15	6.76	60	42.24	0.51	7.56	18	0.31	0.27
2021-03-19	6.89	62	54.50	0.45	7.63	10	0.56	0.26
2021-04-25	6.75	65	26.70	0.64	7.40	16	0.80	0.19
2021-05-24	6.50	43	20.00	0.42	7.03	19	0.94	0.18
2021-06-07	7.02	47	23.10	0.40	6.98	17	0.68	0.09

工程调试和试运行期间未添加任何药剂,无需动力提升,三级滤床未出现堵塞现象,出水pH保持在6~9之间,出水总铁浓度平均约1.02 mg/L,总锰浓度平均约0.19 mg/L,悬浮物平均约15.86 mg/L,总铁的平均去除率保持在96%以上,因进水总锰浓度已经较低,总锰的平均去除率只有61.67%,仍可进一步降低矿井水中总锰浓度。

### 3.2 运行费用

在调试和试运行期间,矿井涌水利用天然地势

高程差,依次流经配水渠、初级曝气池、沉淀池、三级无动力滤床,出水稳定达标,无任何药剂费和提升动力费产生,无动力滤床的滤料更换周期为6~12个月,日常维护简单,对操作人员要求较低,日常运维成本主要为人工费,折合运行成本约0.15元/ $\text{m}^3$ 。

### 3.3 存在的问题

① 该工程为地方治理煤矿井涌水污染提供了一种经济、适用、可持续的处理技术,其不足之处是占地面积较大,日常需要对设施进行较好维护,

保障设施稳定运行。当雨季暴雨来临时,可能导致井口涌水进水量超出设计值,可采用应急加药措施进行强化处理除铁。应急处理工艺为混凝沉淀,原水经过闸门切换进入混凝池与絮凝剂充分混合反应,通过加入混凝剂使原水中的悬浮物形成絮体,然后自流由混凝池底部进入沉淀池(反应池)进行泥水分离,上部上清液进入滤床,底部污泥定期清运处置。

② 运行过程中总铁去除效果较好,但是缺乏对矿井水中亚铁离子和三价铁离子的转化机理及其他影响因素的研究。需进一步研究其影响因素,确定最合理、最经济的适用条件,从而进行推广应用。

#### 4 结论

关闭矿井涌水经过配水渠和跌水曝气池后,水中溶解氧浓度升高,加上通过三级无动力跌曝交迭串联式滤床处理,亚铁离子浓度迅速下降,并转化为三价铁离子形成沉淀,各级滤池中总铁浓度呈逐级递减趋势。从工程调试和运行数据来看,三级无动力跌曝交迭串联式滤床出水稳定达标排放,感官清澈,日常运行无动力和药剂费产生,运行维护费用较低。该工程项目的实施,不仅可减少矿井涌水污染,改善河流水质,有效降低矿井涌水对周边河道生态环境的影响,同时为关闭煤矿酸性矿井水污染的治理提供了一种经济、适用、可持续的关键技术。

#### 参考文献:

- [1] 高波,丁西明,康建邨,等. 臭氧氧化+混凝沉淀过滤+UF+RO[J]. 中国给水排水, 2021, 37(10): 99-104.  
GAO Bo, DING Ximing, KANG Jiancun, *et al.* Treatment of mine drainage by ozone oxidation+coagulation sedimentation and filtration+ultrafiltration+reverse osmosis process [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(10): 99-104(in Chinese).
- [2] 何绪文,杨静,邵立南,等. 我国矿井水资源化利用存在的问题与解决对策[J]. 煤炭学报, 2008, 33(1): 63-66.  
HE Xuwen, YANG Jing, SHAO Linan, *et al.* Problem and countermeasure of mine water resource regeneration in China [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(1): 63-66(in Chinese).
- [3] 高建文,何圣兵,陈雪初,等. 生物滤池/生态砾石床处理含氮微污染地表水[J]. 中国给水排水, 2012, 28(1): 26-30.  
GAO Jianwen, HE Shengbing, CHEN Xuechu, *et al.* Nitrogen removal from micro-polluted surface water by combined process of biofilter and ecological gravel bed [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(1): 26-30(in Chinese).
- [4] 梁浩乾. 鱼洞河流域酸性矿井水被动处理实验研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2019.  
LIANG Haoqian. Research on Passive Treatment of Acid Mine Drainage in Yudong River Basin [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019(in Chinese).
- [5] 王建兵,蒋雯婷,李亚男,等. 改性锰砂滤料处理高铁锰煤矿矿井水[J]. 环境工程学报, 2012, 6(11): 3843-3848.  
WANG Jianbing, JIANG Wenting, LI Yanan, *et al.* Treatment of coal mine drainage with high concentrated iron and manganese by modified manganese sand filter [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, 6(11): 3843-3848(in Chinese).
- [6] 康媿,胡文,陈守应. 煤矿酸性废水处理技术的应用研究[J]. 环境工程, 2012, 30(4): 46-47, 69.  
KANG Ti, HU Wen, CHEN Shouying. The applied research on coal mine acid wastewater treatment technology [J]. Environmental Engineering, 2012, 30(4): 46-47, 69(in Chinese).

作者简介:谭伟(1988- ),男,湖北仙桃人,硕士,工程师,主要从事流域污染治理与规划、煤矿废水处理与资源化工作。

E-mail: weitan\_2012@163.com

收稿日期: 2021-07-07

修回日期: 2021-07-19

(编辑:衣春敏)