



移动扫码阅读

张溪彧,杨建,王皓,等.露天矿地下水库人工回灌介质渗透性与水质变化规律研究[J].煤炭科学技术, 2022, 50(6): 291-297.

ZHANG Xiyu, YANG Jian, WANG Hao, et al. Study on the regular pattern of medium permeability and water quality variation during artificial recharge of open-pit mine groundwater reservoir[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(7): 291-297.

露天矿地下水库人工回灌介质渗透性与水质变化规律研究

张溪彧^{1,2,3}, 杨建^{1,2}, 王皓^{1,2}, 王强民^{1,2}, 王甜甜^{1,2}

(1.中煤科工集团西安研究院有限公司,陕西 西安 710054;2.陕西省煤矿水害防治技术重点实验室,陕西 西安 710177;

3.西安交通大学 能源与动力工程学院,陕西 西安 710049)

摘要:针对矿井水人工回灌过程中水质演化及介质堵塞两大现实问题,通过自主搭建的矿井水人工回灌试验平台,开展矿井水人工回灌地下水库模拟试验。采用单一变量的试验方法,改变矿井水入库前的预处理方式,结合回灌前后矿井水浊度、TDS、悬浮物粒径及 SEM 扫描电镜,分析了地下水库连续储水过程中的水质变化规律,厘定了地下水库进水水质要求,并总结了露天煤矿地下水库自净化的主要机制;在此基础上研究了不同浊度矿井水人工回灌过程中介质渗透性变化规律,探查了矿井水人工回灌堵塞发生位置及堵塞类型,提出了地下水库自净化与介质渗透性间的矛盾关系。研究结果表明:采用混凝法对入库矿井水进行预处理,可以通过吸附架桥作用有效增大矿井水中悬浮微粒的粒径,进而淤积在回灌介质表层,促进了悬浮物在此阶段的去除,实现了地下水库的自净化,在地下水库连续储水过程中,水中浊度及 TDS 会进一步降低;但是从介质渗透性变化的角度而言,水中悬浮颗粒在被去除的同时缩短了回灌系统达到堵塞的时间,主要由于回灌介质表层发生了悬浮物堵塞,且回灌介质渗透性变化存在周期性规律,可采用 0~5 cm 表层清淤和 30 h 周期性回扬的技术手段消除介质渗透性下降对回灌系统的影响。

关键词:预处理;地下水库;自净化;人工回灌;堵塞

中图分类号:X752 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2022)07-0291-07

Study on the regular pattern of medium permeability and water quality variation during artificial recharge of open-pit mine groundwater reservoir

ZHANG Xiyu^{1,2,3}, YANG Jian^{1,2}, WANG Hao^{1,2}, WANG Qiangmin^{1,2}, WANG Tiantian^{1,2}

(1.Xi'an Research Institute of China Coal Technology & Engineering Group Corp., Xi'an 710054, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Prevention and Control Technology for Coal Mine Water Hazard, Xi'an 710077, China; 3. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xian 710049, China)

Abstract: Based on the scientific problem of self-purification of underground reservoirs in open-pit coal mines and the self-built experimental platform of artificial recharge of mine water, this paper conducted research on water quality and permeability in the process of artificial recharge of mine water, and the simulation artificial recharge experiment of mine water underground reservoir was carried out. Using a single-variable experimental method, changing the pretreatment method of mine water before storage, combining mine water turbidity, TDS, particle size of suspended solids and SEM scanning electron microscopy before and after recharging, the water quality changes during continuous water storage in underground reservoirs were analyzed. According to the law, the water quality requirements of underground reservoirs were determined, and the main mechanism of self-purification of underground reservoirs in open-pit coal mines was summarized. According to achieved results, the law of media permeability changes in the process of artificial recharge of mine water with different turbidity was studied. The location and type of blockage caused by artificial recharge of water were the first to put forward the contradictory relationship be-

收稿日期:2021-10-02 责任编辑:常琛 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2020-1029

基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2021JQ-948);国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2016YFC0501104-4);陕西省自然科学基金基础研究计划(2019JQ-009)

作者简介:张溪彧(1993—),男,陕西韩城人,助理研究员,博士研究生。E-mail:zhangxiyu@cctegxian.com

tween the self-purification of underground reservoir and the permeability of medium. The research results show that the use of coagulation method to pre-treat the mine water can effectively increase the particle size of suspended particles in the mine water through adsorption and bridging. In the process of continuous water storage in the underground reservoir, the turbidity and TDS in the water will be further reduced. However, from the perspective of the change of media permeability, the suspended particles in the water are removed and shortened at the same time. The time when the recharge system reaches the blockage is mainly due to the blockage of suspended matter on the surface of the recharge medium, and the permeability change of the recharge medium has a periodic law. The techniques of 0–5 cm surface dredging and 30-hour periodic reversion can be used as effective means to eliminate the impact of reduced media permeability on the recharge system.

Key words: pretreatment; groundwater reservoir; self-purification; artificial recharge; plugging

0 引 言

在煤炭开采过程中,覆岩结构的破坏无法避免,导致地表及地下水资源漏失进入矿井中形成矿井水^[1]。其作为一种多元混合体系早期与瓦斯、粉尘、火灾等一同被视为矿井四大灾害之一,往往采用预疏放、超前区域治理等方式消除隐患,随着环保形势日益严峻,越来越多的专家学者也意识到了矿井水的资源属性,《煤炭工业发展“十三五”规划》提出到 2020 年矿井水综合利用率达到 77%~80%。从途径而言矿井水保护主要分为源头治理和终端处理^[2],源头治理是指保护隔水层的方式避免水资源漏失,而终端处理是指在地面构建大型水处理设施对井下矿井水进行统一处理,存在着、处理成本高、处理周期较长的弊端。地下水库^[3]作为矿井水洁净利用的一项关键技术已受到行业广泛关注,其不仅可以有效解决水资源的季节性矛盾,真正意义上实现水资源的“冬储夏用”,矿井水与垮落岩体发生水岩作用,对水中部分污染外物有一定的去除效果,可以省去冗杂的处理工艺,研究发现:经地下水库自净化作用,矿井水中 Fe³⁺去除率达到 68%~100%,Mn²⁺去除率达到 75%~99%,其主要通过附着在悬浮物表面被去除^[4];采空区垮落及充填的煤矸石,其中的高岭土与石英石对矿井水中硝酸根、氨氮等污染物具有一定的吸附作用^[5];在地下水库储水过程中,如何合理有效地引导地下水库实现自净化目前尚未有这方面研究,且对地下水库入水浊度无明确标定。矿井水含有大量的悬浮物,主要由煤粉、岩粉和黏土组成^[6],悬浮物的去除是矿井水处理的首要亦是最关键的一步,其去除效率对后续工艺的处理效果将产生直接影响,进而影响最终的出水水

质与复用途^[7]。当高浊度矿井水不经预处理直接回灌进入地下水库中,由于水中悬浮物的累积形成淤泥层,造成回灌系统堵塞,当系统堵塞后,轻者耗费大量人财物力对其进行清淤,重则直接导致回灌系统瘫痪报废,所以在人工回灌地下水库前进行矿井水预处理至关重要。

基于此,本研究将悬浮物充填介质空隙的堵塞问题与人工回灌过程中水质净化问题进行结合,分析人工回灌过程中堵塞成因,在此基础上针对不同堵塞类型利用介质堵塞特性去除水中污染物质,同时保证矿井水回灌进程中堵塞与水质净化的协调控制。

1 研究区现状

研究区位于我国内蒙古自治区呼伦贝尔市宝日希勒矿,该地区年平均降水量 315.0 mm,蒸发量 1 344.8 mm,属于干旱地区,矿区周围的植被受降雨量影响较大,在丰水期,植被具有较好的涨势,而到了枯水期常会由于缺水出现植被大量干枯死亡的现象。该矿开采模式为露天开采,矿区每年用于灌溉绿化用水总量高达 250 万 t^[8]。基于这一现状,将丰水期多余的矿井水储存于地下水库中,到了枯水期重新回用,具有良好的经济价值及生态意义。

矿井水悬浮物含量过高会对其回用造成较大影响,损耗检修设备,导致排泥困难,增加运营成本^[9];亚硝酸盐超标会干扰肌肉组织对维生素 A 的吸收并引发维生素 A 缺失;此外亚硝酸盐可以与酰胺和胺反应生成致癌的亚硝酸胺和亚硝酸酰胺^[10];饮用水中,缺氟会引起龋齿,氟过量则会引发氟斑齿^[11]。宝日希勒矿井水主要污染因子见表 1。

表 1 宝日希勒矿井水水质指标
Table 1 Water quality index of Baorixile Mine

污染因子	浊度/NTU	质量浓度/(mg·L ⁻¹)			
		TDS	F ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻
露天矿坑水	390	924	0.09	2.50	3.76
地下水 3 类标准	3	1 000	0.50~1	20	1

由表 1 可以看出,宝日希勒矿井水主要呈现高浊度水质特性,由于矿井水中悬浮物质粒径分布小

292

于 100 nm,采用自然沉降的方式无法对其进行去除,需通过投加混凝剂破坏水中悬浮物质原有的双电子层稳定结构,由吸附架桥作用聚集而成较大的絮体,从而达到去除的目的^[12]。

笔者对矿井水人工回灌过程中水质演变及介质堵塞两大科学问题,通过人工模拟露天煤矿地下水库储水过程,采用混凝法对矿坑水进行预处理后回灌至地下水库中,并通过压力传感器监测人工回灌过程中水头压力变化,表示不同位置渗透性演化规律,并在地下水库进出水设取样口,通过研究不同预处理情况下地下水库出水水质变化情况,揭示露天煤矿地下水库自净化过程的机制,并在此基础上提出了人工引导地下水库实现自净化功能的方法,为工程实践提供技术指导。

2 试验材料与方法

水样:采集国家能源集团宝日希勒露天矿矿坑水,其中一部分使用混凝法预处理将浊度处理至 50 NTU,另一部分用去离子水对矿坑水按照一定比例

稀释至 50 NTU,开展对照试验。

土样:取自宝日希勒露天矿排土场,其主要来源于露天矿剥采过程中的煤层顶板,主要成分有:黑黏土、粉细沙、砂砾石等,将其过 2 mm 筛网筛分后,用去离子水浸泡 24 h,并置于 80 ℃ 烘箱烘干以备使用。

2.1 试验装置

首先选取一个 5 L 的烧杯作为供液瓶,并以一个内径 100 mm,高度 500 mm 的有机玻璃柱作为回灌柱,在西安市有机玻璃厂自行订制生产,试验开始前,以湿法加样的方式向玻璃柱中加入提前筛分好的粒径 2 mm 土样,在柱身的顶部设置有进样孔,在柱体侧面设有 8 个测样孔,互相间隔 50 mm,在开孔处连接有压力传感器,用于实时监测柱体内部各个位置水头压力的变化情况,并与 2 台 HOBO 4 通道数据采集器相连接,距离柱体顶部 100 mm 处,开设环形凹槽,凹槽内放置布液板,确保上部液体能够均一流下。柱体下部开有接样孔及样品采集系统,以法兰相连接。

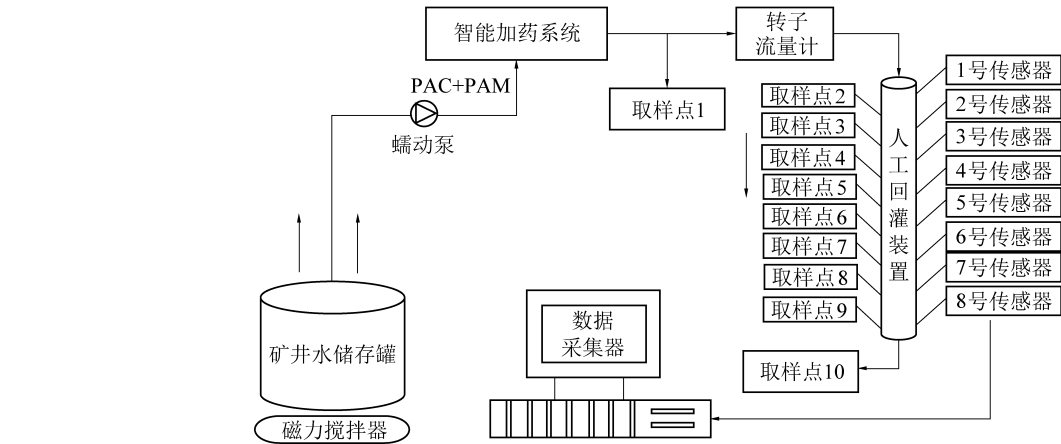


图 1 试验装置示意

Fig.1 Schematic of experimental setup

试验开始后,配置 5 L 不同浊度的悬浮液,放置于磁力搅拌器上部,创造紊流条件,以实现不同位置的悬浮液浓度均一化,用蠕动泵进行传输,其中蠕动泵的进水端放置于配置好的悬浮液底 1/3 处,在瓶体上部连接有智能加药系统,加入混凝剂使水中悬浮物质沉降,出水端连接在模拟回灌玻璃柱的进水端,通过流量计精准控制回灌流量 18 mL/min,打开磁力搅拌器,并设置转速为 50 r/min,以保证矿井水的悬浮状态,而后打开蠕动泵,以 18 mL/min 的流量定流量、定水头条件下输送至玻璃柱中,每隔 5 min 记录一组数据,根据达西定律 $K = \frac{Q\Delta x}{\pi r^2 \Delta h}$,式中, Δx 为渗透路径,即为相邻测压孔的距离; r 为断

面的半径; πr^2 为断面圆的面积。在流量 Q 一定的情况下,流体在介质中的渗透性变化情况可用水头压力 h 表示,当某处水头压力增大,表示该处渗透性下降,反之,则表示该处渗透性增加。并对进水和出水水质进行测试分析,考察不同预处理条件下矿井水水质区别以及矿井水中污染物在地下水库的运移状况,以此判断地下水库自净化的机制。

2.2 分析方法与仪器

采用英国马尔文公司生产的马尔文 NANO 激光粒度仪测定水体当中悬浮物的粒径分布情况,对每组样品分析 3 次,取其均值。试验完成后采用美国 FEI QUANTA 650 扫描电子显微镜测定悬浮物在回灌介质中的赋存状况。

试验前后,分别对水质进行检测分析,以此考量水中不同污染物随试验进行的变化情况,其中浊度的测定采用美国哈希便携式浊度仪,TDS采用称量法进行测定^[13]。

3 结果与讨论

3.1 矿井水水质变化

由图2可以看出,在矿井水人工回灌地下水库过程中,不同预处理方法的回灌后水质差异较大,在进水浊度同为50 NTU的条件下,采用混凝法处理的矿井水在回灌后浊度降至4.14 NTU,相较于预处理阶段去除率达到91.7%,出水水质澄清且无肉眼可见物。而采用稀释法处理的矿井水在回灌后浊度仅降至25 NTU,相较于预处理阶段去除率达到50%。

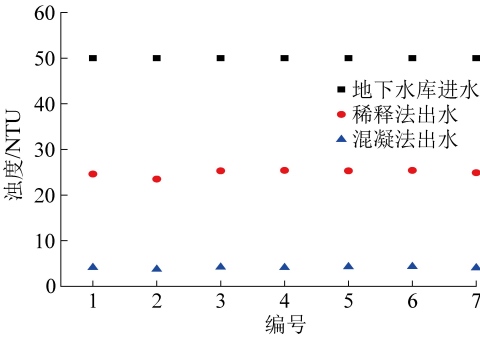


图2 不同预处理方法出水浊度

Fig.2 Turbidity of effluent from different pretreatment methods

由图3可以看出,2种预处理方式对水中TDS皆有一定的去除效果,通过人工回灌地下水库后,经稀释法预处理后的矿井水中TDS无明显变化,而混凝法预处理后的矿井水TDS有一定去除效果,去除率达到47.3%。

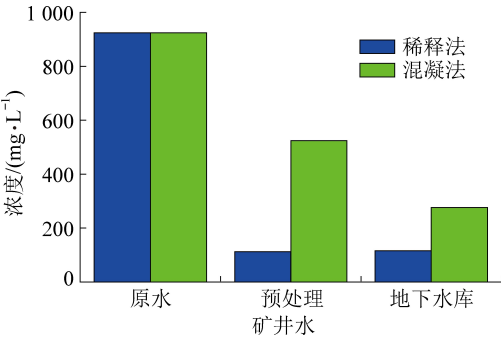


图3 矿井水中TDS的变化情况

Fig.3 Changes of TDS in mine water

为研究连续储存条件矿井水水质风险,开展了矿井水储存试验,在连续1个月条件下,每隔5 d取样,观察其水质变化情况,如图4所示。

可以看出,在地下水库储水过程中,浊度会呈现一定程度的下降,当达到0.7 NTU后基本维持不变,

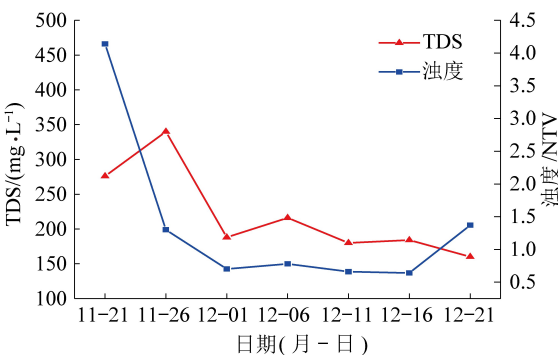


图4 地下水库储水过程中水质变化

Fig.4 Water quality changes during groundwater storage

随着时间增加,悬浮颗粒不断地累积,当连续储水2 d后,浊度略微增加;在地下水库连续储水过程中,水中TDS呈现缓慢下降的趋势,这与传统概念下TDS变化趋势有一定出入,分析是由于环境温度降低,导致水中部分离子溶解度降低而析出,并附着在悬浮物上被去除^[14]。

3.2 矿井水悬浮颗粒粒径

针对不同预处理方式的矿井水在进入地下水库后呈现出的水体浊度有较大差异,分析是由于混凝法预处理时在水中添加了混凝剂,其与矿井水中悬浮颗粒由于电性中和、吸附架桥等作用生成大分子的絮团,导致微粒粒径有了较大的变化^[15],为证实这个猜想,对不同预处理条件下矿井水的粒径进行测试分析,分析结果见表2。

表2 地下水库进出水粒径分布

Table 2 Particle size distribution of inflow and outflow of underground reservoir

预处理方法	粒径/nm	
	地下水库进水	地下水库出水
混凝	41 530~71 630	1 773~2 751
稀释	255.01~458.66	255.01~458.66

可以看出,矿井水原水粒径均值主要分布在398.3~427.0 nm,因其粒径较小,采用自然方法较难沉降^[17],通过对比分析,采用稀释法预处理过后矿井水中悬浮颗粒的粒径无明显变化,基本分布在365.3~389.0 nm,而采用混凝法预处理过后的矿井水中悬浮颗粒粒径有大幅度增高,基本分布在41 530~71 630 nm,经人工回灌地下水库过后,采用稀释法预处理的矿井水悬浮颗粒粒径无明显变化,基本分布在344.7~361.4 nm,而采用混凝法预处理后的矿井水悬浮颗粒有了一定降低,基本分布在1 773~2 751 nm。这一结果证实了此前关于不同预处理方式水质变化的猜想:是由于经过混凝法预处理后的矿井水,水中悬浮颗粒相互凝聚形成大颗粒悬浮物,

进而在人工回灌地下水库过程中粒径大于 2 800 nm 的微粒被回灌介质拦截,实现了水质的自净化^[16]。

3.3 SEM 扫描电镜

为探查混凝法预处理条件下,矿井水中悬浮颗粒在回灌介质中的空间分布规律,进一步研究地下

水库自净化机理,在试验进行结束后,分别在 0~5, 5~10, 10~15, 15~20 cm 不同层位对回灌介质进行分层取样,并将其从上至下定义为第 1 层至第 4 层,并置于 80 ℃ 干燥箱中去除水分,通过 SEM 扫描电镜观察回灌介质剖面形态,如图 5 所示。

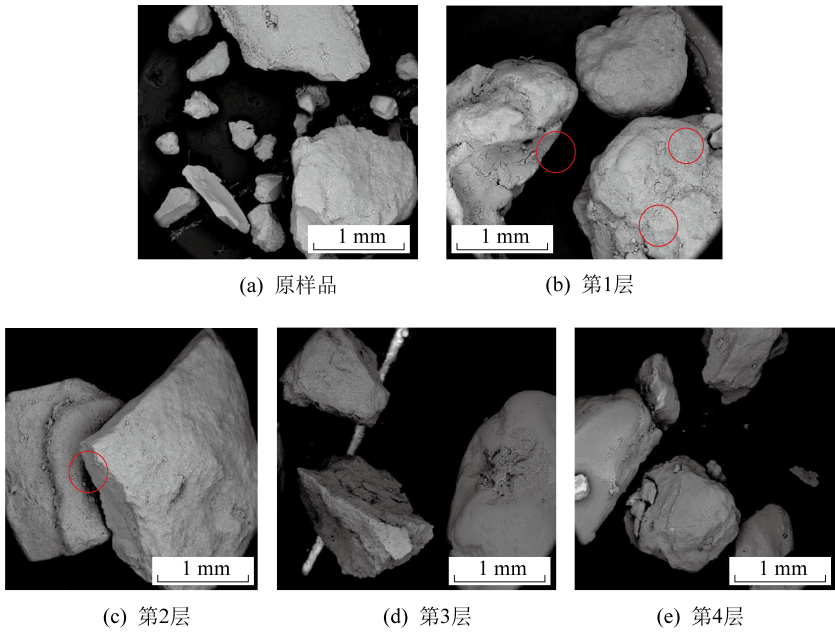


图 5 人工回灌介质剖面形态

Fig.5 Profile of artificial recharge medium profile

通过混凝法预处理后的矿井水经过人工回灌地下水库,会有一定的悬浮微粒附着在回灌介质表面,并且随位置变化,赋存状态有较大差异。在表层 0~5 cm 处,有大量的悬浮物附着在回灌介质表面,随着入渗深度的增加,附着量逐渐减小^[17-19],基于此,提出了矿井水人工回灌过程中的自净化机理,如图 6 所示。

地下水库自净化机理遵循“滤饼过滤”模型,介质堵塞发生的位置取决于介质粒径与矿井水中微粒粒径的大小有关,当回灌介质粒径一定时,可通过改变矿井水中微粒粒径的方法控制系统间自净化与介质渗透性变化的关系。

3.4 矿井水在地下水库储存过程中渗透性变化

为研究不同浊度矿井水人工回灌下介质渗透性的变化规律,选取不同浊度矿井水进行人工回灌,采用压力传感器测定回灌过程中不同位置的水头压力,进而判断系统堵塞情况,当水头压力增大代表该位置介质渗透性降低,并用数据采集器每隔 30 s 读取 1 次数据,如图 7 所示。

当地下水库进水浊度为 10 NTU,在回灌介质不同空间位置渗透性变化规律一致,皆呈现先下降后上升的趋势,在表层 0~5 cm 处,介质渗透性下降最

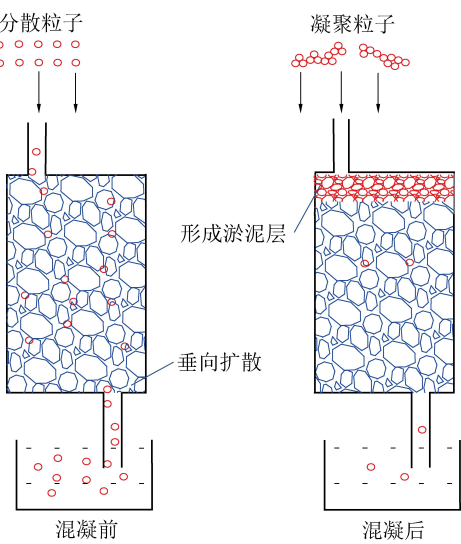


图 6 不同预处理方法回灌示意

Fig.6 Schematic diagram of groundwater storage

为明显,且介质渗透性变化具有周期性,当某处水头压力持续性增加至峰值后,会迅速减小;当进水浊度达到 20 NTU,试验进行 20 h 之前,不同位置水头压力皆无明显变化,当试验达到 20~30 h,在 0~5 cm 表层位置水头压力有了较低程度的增加,当试验达到 30 h 之后,0~5 cm 表层位置水头压力出现大幅度增加,介质渗透性严重下降,这是由于随着回灌过

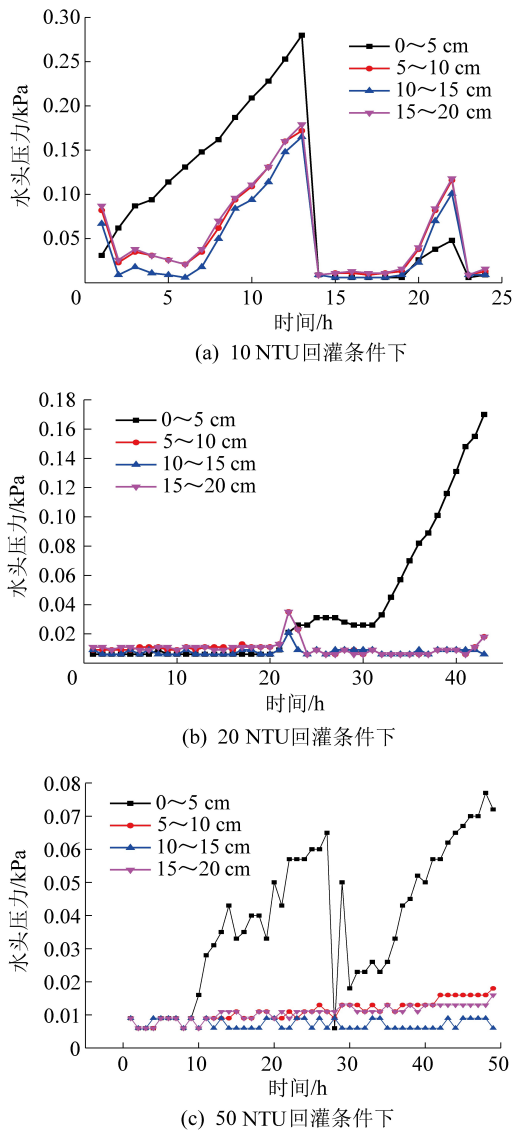


图7 人工回灌过程中水头压力变化

Fig.7 Change of head pressure of artificial recharge ground reservoir

程的进行,越来越多的悬浮物质淤积在介质表层,发生了物理堵塞,进而导致水体无法顺利流动至系统内部,在实际工程中需采用清淤或反向回扬的方法清除堵塞;当进水浊度达到 50 NTU 时,主要堵塞位置集中在表层 0~5 cm 处,且渗透性变化呈现周期性趋势,这是由于随着浊度增加,水体中悬浮物浓度增大,系统达到堵塞的时间变短,当试验进行至 10 h,表层水头压力呈现迅速增加,介质渗透性下降,而当试验进行至 28 h,水头压力呈现急剧性下降,推测是随着表层介质渗透性下降,水体在介质顶部不断积累,水体总质量逐渐增大,由于重力作用再次冲破淤泥层,从而导致表层位置水头压力的急剧下降。

综上所述:当回灌过程进行至 30 h,回灌介质表

层 0~5 cm 处渗透性开始逐渐降低,所以可采用 30 h 周期性回扬的措施,此时只需要周期性对 0~5 cm 表层进行清淤就可以保证回灌系统稳定的运行。对比图 4 中浊度的变化规律可以发现,地下水库的自净化作用与回灌介质渗透性下降存在矛盾关系,当进水浊度小于 20 NTU,水中悬浮粒子会迁移至介质内部,随着水体的冲刷进入地下水库中,此时自净化作用减弱,而当浊度大于 50 NTU,水中大量悬浮粒子在表层被拦截,其在表层形成的淤泥层作为滤饼对矿井水中的悬浮微粒起到了过滤的作用,因此控制进水浊度在 20~50 NTU,既能保证回灌系统长期稳定运行,又能合理控制预处理成本,避免过度处理的现象。

4 结 论

1)发现地下水库自净化与介质渗透性变化存在矛盾关系,需控制进水水体浊度位于 20~50 NTU 之间,过高的浊度会加快系统渗透性的降低的速度,而过低的浊度会增加处理成本,造成过度处理。

2)露天煤矿地下水库连续储水过程中,水中浊度呈现先下降后趋于平稳的趋势,TDS 呈现缓慢下降的趋势,其自净化的机制以物理过滤为主,粒径大于 2 800 nm 的微粒被拦截在所填介质当中,可通过添加絮凝剂的方法增大水中微粒粒径,引导地下水库实现自净化。

3)地下水库系统介质渗透性变化存在间歇性的规律,当局部堵塞,随着顶部积累水量的增加,由于重力作用会重新冲破堵塞,根据这一规律,提出了 30 h 周期性回扬的技术措施,以保证地下水库连续稳定储水。

参考文献 (References) :

[1] 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.

[2] 范立民.保水采煤的科学内涵[J].煤炭学报,2017,42(1):27-35.
FAN Limin. The scientific connotation of water-preserving coal mining [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1):27-35.

[3] 顾大钊.煤矿地下水库理论框架和技术体系[J].煤炭学报,2015,40(2):239-246.
GU Dazhao. Theoretical framework and technical system of coal mine groundwater reservoir [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(2):239-246.

[4] 张 庆,罗绍河,赵 丽,等.有机氮和"三氮"在西部煤矿区地

下水库迁移转化的实验研究[J].煤炭学报,2019,44(3):900-906.ZHANG Qing, LUO Shaohe, ZHAO Li, *et al.* Experimental study on the transfer and transformation of organic nitrogen and “trinitrogen” in the groundwater reservoir of western coal mining areas [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(3):900-906.

[5] 赵 丽,孙艳芳,杨志斌,等.煤矸石去除矿井水中水溶性有机物及氨氮的实验研究[J].煤炭学报,2018,43(1):236-241. ZHAO Li, SUN Yanfang, YANG Zhibin, *et al.* Experimental study on removal of water-soluble organic matter and ammonia nitrogen from coal mine wastewater by coal gangue [J] Journal of China Coal Society, 2018, 43(1):236-241.

[6] 何绪文,李福勤.煤矿矿井水处理新技术及发展趋势[J].煤炭科学技术,2010, 38(11):17-22,52. HE Xuwen, LiFuqin. New technology and development trend of coal mine water treatment [J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(11):17-22, 52.

[7] 汪 伟,贾宝山,祁 云,等.高浊度矿井水资源化处理条件优选试验研究[J].非金属矿,2019, 42(1):81-84. WANG Wei, JIA Baoshan, QI Yun, *et al.* Experimental study on optimization of water resource treatment conditions for high turbidity mine [J]. Non-Metallic Mine, 2019, 42(1):81-84.

[8] 周 宁. 草原区露天矿外排土场生态恢复的探究与实践[J]. 中国资源综合利用, 2018, 36(11):194-196. ZHOU Ning. Exploration and practice of ecological restoration of open dumps in the Open-pit mine in grassland district [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2018, 36(11):194-196.

[9] 杨 建,王强民,王甜甜,等.神府矿区井下综采设备检修过程中矿井水水质变化特征[J]. 煤炭学报, 2019, 44(12): 3710-3718. YANG Jian, WANG Qiangmin, WANGTiantian, *et al.* Mine water quality changes during the overhaul of the underground comprehensive mining equipment in Shenfu mining area [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(12):3710-3718..

[10] 王伟泽. 渭河潜流带水交换作用对间隙水含氮污染物的影响机理研究[D].西安:西北大学,2018. WANG Weize. Study on the mechanism of the effect of water exchange on the nitrogen-containing pollutants in interstitial water of the Weihe River undercurrent zone [D]. Xi'an:Northwest University, 2018.

[11] 崔玉川.煤矿矿井水处理利用工艺技术与设计[M].北京:化学工业出版社,2015.

[12] 程志伟,王碧清,田江鱼.高悬浮物矿井水处理技术研究与应用[J].煤炭科学技术,2020,48(S1):278-282. CHENG Zhiwei, WANGBiqing, TIANJiangyu. Research and application of high suspended mine water treatment technology [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(S1):278-282.

[13] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M].北京:中国环境科学出版社,2002.

[14] 顾大钊.“能源金三角”地区煤炭开采水资源保护与利用工程技术[J].煤炭工程,2014,46(10):34-37. GU Dazhao.Engineering Technology for water resources protection and utilization of coal mining in the “golden triangle of energy” region [J]. Coal Engineering, 2014, 46(10):34-37.

[15] 朱思远,田军仓,李全东. 地下水库的研究现状和发展趋势[J].节水灌溉,2008(4):23-27. ZHU Siyuan, TIANJuncang, LI Quandong. Research status and development trend of groundwater reservoir [J]. Water Saving Irrigation, 2008(4):23-27.

[16] 蒋斌斌,刘舒予,任 洁,等.煤矿地下水库对含不同赋存形态有机物及重金属矿井水净化效果研究[J].煤炭工程,2020, 52(1):122-127. JIANG Binbin, LIUShuyu, RENJie, *et al.* Study on purification effect of coal mine groundwater reservoir on mine water containing different forms of organic matters and heavy metals [J]. Coal Engineering, 2020, 52(1):122-127.

[17] 崔蕴霞,肖 锦.铝盐絮凝剂及其环境效应[J].工业水处理, 1998(3):8-11,47. CUI Yunxia, XIAOJin. Aluminum salt flocculant and its environmental effects [J]. Industrial Water Treatment, 1998(3):8-11,47.

[18] 章丽萍,何绪文,张 先,等.高浊度矿井水处理技术研究[J].矿业安全与环保,2008(6):14-16,99. ZHANG Liping, HE Xuwen, ZHANG Xian, *et al.* Research on high turbidity mine water treatment technology [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2008(6):14-16, 99.

[19] 何绪文,张斯宇,何 灿. 焦化废水深度处理现状及技术进展[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(1): 100-107. HE Xuwen,ZHANG Siyu,HE Can. Status and progress of coking wastewater advanced treatment technology[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(1): 100-107.