



移动扫码阅读

张源, 他旭鹏, 师鹏, 等. 废弃矿井蓄洪储能与取热综合利用模式研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(6): 197-204.

ZHANG Yuan, TA Xupeng, SHI Peng, *et al.* Energy storage via storing flood in abandoned mines and low temperature heat energy utilization from mine water[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(6): 197-204.

## 废弃矿井蓄洪储能与取热综合利用模式研究

张源<sup>1,2</sup>, 他旭鹏<sup>2</sup>, 师鹏<sup>2</sup>, 张洪伟<sup>3</sup>

(1. 中国矿业大学深部煤炭资源开采教育部重点实验室, 江苏徐州 221116; 2. 中国矿业大学矿业工程学院, 江苏徐州 221116;

3. 中国矿业大学(北京)能源与矿业学院, 北京 100083)

**摘要:** 废弃矿井地下空间利用是煤炭行业重点支持的方向。将地下空间利用、汛期蓄洪和冬季供热相结合, 提出了基于地面引水蓄洪、井下蓄水储能和热泵取热技术的废弃矿井蓄洪储能与取热综合利用模式, 阐述了该模式的概念、关键技术和科学问题; 分析了我国废弃矿井分布及其与降水量分布之间的关系, 论证了废弃矿井地下空间的蓄洪储能潜力。研究发现, 安徽、河南、山东等 13 个省份的废弃矿井地下空间近 6 000 万 m<sup>3</sup>, 可储存约 6 个西湖的水量, 适宜开展废弃矿井地下蓄洪储能和取热的工程示范。其中, 仅淮南矿区 5 个废弃矿井的地下空间资源高达 30 万 m<sup>3</sup>, 储能量达 94 500 GJ, 可满足 21 万 m<sup>2</sup> 的建筑供暖需求。以旗山矿为例, 设计了地面引水沟渠布置、井下储水空间布置以及矿井水提取和利用等方案, 初步测算旗山矿蓄洪储能方案的供热功率可达 6 835 kW, 可为 13.67 万 m<sup>2</sup> 的建筑供暖, 减少二氧化碳排放量约 5 330 t, 经济效益达 350.75 万元, 初步论证了废弃矿井地下空间蓄洪储能的可行性。废弃矿井蓄洪储能与取热综合利用模式既可有效利用废弃矿井地下空间, 还可以缓解汛期的局部洪涝灾害, 并开发矿井水中的低品位清洁热能, 对提高废弃矿井地下空间利用的附加值和推进废弃矿井地下空间利用有一定意义。

**关键词:** 废弃矿井; 蓄洪; 储能; 地热能; 供暖

中图分类号: TD745; TKS2

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)06-0197-08

### Energy storage via storing flood in abandoned mines and low temperature heat energy utilization from mine water

ZHANG Yuan<sup>1,2</sup>, TA Xupeng<sup>2</sup>, SHI Peng<sup>2</sup>, ZHANG Hongwei<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Deep Coal Resource Mining, Ministry of Education of China, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China;

2. School of Mines, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China; 3. School of Energy and Mining Engineering, China

University of Mining & Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The utilization of underground space in abandoned mines is a key direction supported by the coal industry. By combining underground space utilization, flood storage, and heat supply in winter, this paper proposes a comprehensive utilization model of flood storage and heat extraction in the abandoned mine, based on three technologies: ground flood diversion, underground flood storage and heat pump. This paper addresses the concept, key technologies and scientific issues of the model. The distribution of abandoned mines in China and its relationship with precipitation distribution were analyzed. The potential for flood and energy storage in abandoned mine was also studied. Results showed that 13 provinces, including Anhui, Henan, and Shandong province, can utilize approximately 60 million cubic meters of underground space and store nearly 6 volumes of West Lake water, making it suitable for engineering demonstration of flood storage and heat extraction in abandoned mines. Among them, five abandoned mines in Huainan mining area can utilize approximately 300 000 cubic meters of underground space, with energy storage capacity of up to 94 500 GJ that can meet the heating demand of 210 000 square meters. Taking Qishan Mine as an example, a scheme was designed based on ground flood diversion and storage, underground water storage, and

收稿日期: 2022-03-08

责任编辑: 黄小雨

DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-0323

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52074266, 51674242)

作者简介: 张源(1985—), 男, 安徽阜阳人, 副教授, 博士。E-mail: zhangyuan@cumt.edu.cn

mine water extraction and utilization. According to preliminary calculations, the heating power of Qishan Mine can reach 6 835 kW which can provide heating for 136 700 square meters of buildings, reduce carbon dioxide emissions by about 5 330 tons, and save 3.507 5 million yuan. This demonstrates the feasibility of flood and energy storage in abandoned underground space. Research showed that the comprehensive utilization model of flood storage, energy storage, and heat extraction in abandoned mines can not only effectively utilize the underground space of abandoned mines but also alleviate local flood disasters during the flood season. It can develop low-grade clean energy in mine water and has certain significance in improving the added value of underground space utilization in abandoned mines and promoting the utilization of underground space in abandoned mines.

**Key words:** abandoned mine; flood storage; energy storage; geothermal energy; heating

## 0 引言

随着我国煤炭淘汰落后产能及绿色低碳政策的推进,关闭和废弃矿井数量日益增多。据统计,2018—2020年,我国废弃(关闭)矿井至少911处,预计到2030年这一数量将到达15 000<sup>[1-2]</sup>。废弃矿井中仍存在大量的可利用资源,如煤炭资源约420亿t、非常规天然气近5 000亿m<sup>3</sup>、地下空间资源约60万m<sup>3</sup>/矿,以及丰富的矿井水、地热能与工业旅游等资源<sup>[3-4]</sup>。大量的废弃矿井资源得不到科学有效利用,不仅造成资源浪费,还会产生一系列经济、环境等问题<sup>[5]</sup>。因此,充分利用废弃矿井中的可再生能源及空间资源,对促进经济社会持续健康发展,践行“双碳”目标具有重要意义。

废弃矿井地热资源不受外部因素影响,是稳定的可再生能源,具有巨大的利用价值。针对废弃矿井地热资源利用,国内外学者从不同角度进行了有益探索。谢友泉等<sup>[6]</sup>根据矿井地热水能源品质,将废弃矿井地热能的利用方式分为供热/制冷和发电两种模式。GUO等<sup>[7]</sup>利用数值计算评价了废弃矿井储层的地热资源,研究了废弃矿井地热提取与流量、注射温度及寿命之间的关系。DÍEZ<sup>[8]</sup>开发了用于评估废弃矿井地热能潜力的方法,估算了欧洲废弃煤矿可用的地热资源规模,认为该类能源的有效利用可减少二氧化碳的排放。目前,对于废弃矿井中地热能的认知相对统一,普遍认为矿井水中的热/冷能具有开发价值,主要用于供热/制冷、发电等<sup>[9]</sup>。例如,利用矿井水源热泵系统直接抽取矿井水,通过热泵或热交换器对建筑物供暖/制冷;或者借助当地的地表水,利用巷道进行有效换热,进行季节性蓄水蓄热<sup>[6]</sup>。位于英格兰东北部的Seaham Garden Village项目利用当地废弃矿井的地热水对全镇1 500处建筑供暖,实现了该地区的零碳排放目标<sup>[10]</sup>。荷兰海尔伦市利用奥兰治纳苏废弃煤矿的矿井水实现了80万m<sup>2</sup>的室内供热/冷<sup>[11]</sup>。近年来,极端天气日益频繁,短时强降雨频发,造成地区排洪压力突增,引发区域内重

大洪涝灾害,威胁社会正常生产生活秩序。废弃矿井地下构筑物的工程质量高,改造再利用成本低,是理想的蓄水空间。利用废弃矿井的地下空间分担区域蓄洪泄洪压力,再利用季节性洪水提取废弃矿井地热,不仅可缓解地区排洪压力,还可实现废弃矿井地下空间及地热能的资源化利用。

笔者提出了废弃矿井汛期蓄洪储能与冬季取热供暖综合利用模式,阐述了其关键技术与科学问题,估算了废弃矿井蓄洪与储能潜力,并以旗山煤矿为例,设计了废弃矿井蓄洪储能与取热方案,为废弃矿井资源化利用、区域洪水治理提供了新思路。

## 1 模式的提出

废弃矿井蓄洪储能与取热综合利用模式是指在汛期把季节性洪水引至废弃矿井地下空间内,使之与深部地下相对高温岩体发生换热形成高温矿井水,并储存在地下空间内,在冬季时把高温水提至地面,通过热泵换热后再回灌至地层或者处理后用于灌溉、养殖等,提取的热量用于建筑供暖、洗浴等,从而达到蓄洪、储能、利用地热多种功能的废弃矿井地下空间和地热能资源化利用新模式。

废弃矿井蓄洪储能与取热模式由引水、蓄水、提水、取热等环节构成,如图1所示。

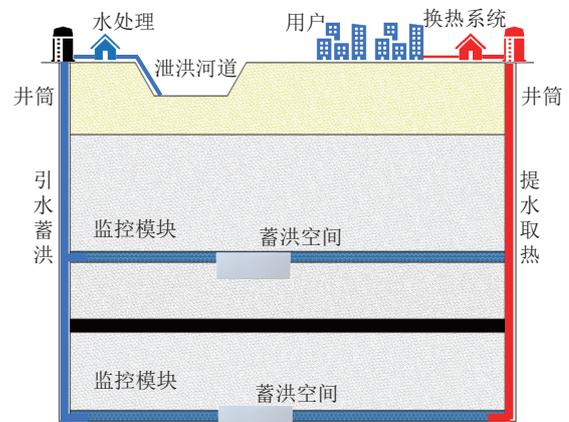


图1 废弃矿井蓄洪储能与取热系统示意

Fig.1 Flood and energy storage in abandoned mines and heat extraction system

### 1.1 引水蓄洪系统

引水蓄洪系统是控制蓄水流态、水质的核心机构,由泄洪沟渠及水处理 2 个子系统组成。泄洪沟渠通过构建引水渠、溢流堰、泄槽、消能防冲段及尾水渠等设施,控制蓄水流态及流量,并消除蓄水动能。水处理系统通过物理及化学方法过滤蓄水中的漂浮物及有机污染物并软化水质。

### 1.2 蓄水监测系统

蓄水监测系统是掌握储层巷道蓄水情况的关键机构。储层巷道在抽蓄水循环疲劳载荷作用下,巷道围岩易被冲刷崩解,导致蓄水流失、水质污染等问题。因此,需要在储层巷道各区域布置监控模块,实现对储层各区域水量、水质及水温等情况的实时监控。

### 1.3 提水取热系统

提水取热系统是实现取热用水的最后一环。提水取热系统由提水控制及换热两个子系统构成。提水控制系统通过学习区域用热用水历史情况,智能预测下阶段供暖取热需求,结合井下蓄水水量、水温情况,实现蓄水的智能调度与提取。换热系统首先要对蓄水进行净化处理,避免有机污染物腐蚀设备,然后通过热泵机组对提取的矿井水进行取热,满足供暖用水需求。

要实现废弃矿井蓄洪储能与取热,首先需要掌握区域内水文情况及矿井地热分布特征,综合考虑区域蓄洪泄洪需求与废弃矿井可用空间资源,科学规划地表引水系统与地下蓄洪储能空间;其次,要合理改造蓄洪空间,结合储层巷道多场耦合变形机理与传热效率,制定优选的储层巷道防渗改造方案与智能监测系统。在上述基础上,调研周边城镇供暖用水需求,规划布置抽水取热系统,制定技术经济可行的取热供暖方案,实现废弃矿井蓄洪储能与取热目标。

## 2 关键技术与科学问题

### 2.1 关键技术

1)引水蓄洪技术。废弃矿井地表引水蓄洪是综合考虑蓄洪流量压力、洪水流态、消除洪水的动能、清污排污等方面的技术。其中,河流泄洪需求预测是引水蓄洪改造的先导条件。我国在降雨降水历史高位及预测、河流水文观测等方面,积累了丰富的资料<sup>[12-13]</sup>。但是,从废弃矿井蓄洪改造角度看,泄洪规律预测还有很多基础工作要做,包括流域的地形地貌、长序列水文资料等,其中,重要流域的洪峰预测、河流泄洪需求与引水蓄洪能力设计息息相关。

2)储层稳定性控制技术。废弃矿井储层空间稳

定是蓄洪储能稳定运行的基础。储层空间蓄洪时间长、水温变化大,导致围岩渗透系数、热传导系数及强度等性质发生改变,储层巷道往往出现大变形、明显的蠕变等问题。此外,为保证蓄洪储能效率,储层空间围岩还需具备较强的导热能力。因此,废弃矿井储层空间再利用时,需要综合考虑长时间尺度下多场耦合围岩变形机理、防渗改造后的导热系数及巷道原设计的时效性等因素。

3)矿井水取热技术。提水取热技术是废弃矿井蓄洪储能与取热实现的关键。其中,提水取热系统的规划与布置是废弃矿井蓄洪储能可持续发展的基础,需要综合考虑周边城镇用热用水历史与发展需求。提水取热系统主要包括设备选型、智能监测及水源热泵系统。在设备选型方面,要全面考虑矿井空间条件,水的化学性质导致的设备锈蚀,长时间浸泡导致的失灵等问题。其次,为保证蓄洪储能系统稳定运行,需设置监测系统,在地表引水、井下储水环节检测流量、水质和水温,定期检测储水巷道的稳定性。在上述基础上,综合周边用热情况,规划布置提水取热系统,制定取热供水方案,合理调度水热资源。

4)矿井水污染防治技术。矿井水污染防治是保证废弃矿井蓄洪储能与取热模式绿色环保运行的重要一环。矿井水中往往赋存悬浮物、有机污染物、复杂的微生物群落等有毒有害物质,不仅影响系统管路及设备的正常运行,严重时还会影响储层的稳定性。矿井水污染防治技术应综合考虑矿井水质演化的时间效应、矿井水中微生物作用影响,建立矿井水污染物来源、扩散途径及出口防治体系,形成时间-空间上的配合。首先对洪水进行污染物过滤,从源头减少悬浮物等固体污染物的积聚;其次,研究蓄水在储层巷道的长期存储下污染源及扩散规律,针对性的采取注浆封堵等措施;最后,建立井下缓冲区域,分段利用蓄水,在出口处对污染物进行吸附等。

### 2.2 科学问题

1)废弃矿井地层温度场及热资源特征。废弃矿井地温分布规律及地热资源评价是蓄洪储能与取热的关键科学问题。对于储能与取热模式来说,可持续性是一个关键问题。热能资源不足会严重危及废弃矿井地热利用项目。因此,对废弃矿井地热资源进行准确的评价是非常必要的。废弃矿井地温场的调查与评价工作不仅有利于精准布置取热设备,还可智能调度蓄水,高效利用热源。我国矿井对煤系地层及上覆地层积累了丰富的勘探资料,然而,要实现废弃矿井蓄水资源化利用,还需要深入以下工作:储层巷道不同区域地温分布情况及变化规律、深部

热源分析及水循环对储层温度场的影响等。

2) 废弃矿井水-岩热交换过程。洪水引入储层空间后,水与储层围岩间存在温度梯度,两者必然会产生热量交换,这一热交换平衡过程所持续的时间取决于储层岩层性质、水流状态、温度梯度、水岩温差等因素。此外,蓄水储能过程是水渗流与热传导、对流传热及热弥散过程相互作用的复杂过程。因此,需要在蓄水运移及热量运移的基础上,建立渗流-传热-传质三维模型,得到蓄水储能模型,分析并预测储能系统的变化规律,结合储层的渗流、传热、储能特性,提高系统的储能效率。

3) 废弃矿井水-岩物化响应特征。水岩作用是复杂的力学、物理及化学作用过程。在这一过程中,围岩内部胶结物质逐渐被冲蚀溶解,加速了储层吸水崩解。同时,劣化后的储层围岩内部结构发生改变,导致水质发生污染。水岩作用诱发的矿物微观结构变化是储层围岩吸水失稳的根本原因。因此,有必要深入分析水岩作用下围岩劣化的相关机理及物理力学性质变化规律,揭示储层围岩劣化机理,掌握频繁抽蓄水及干湿循环过程中围岩的劣化规律,并提出相应防治措施。

### 3 蓄洪储能潜力

#### 3.1 蓄洪潜力

废弃矿井拥有巨大的地下空间资源。“十三五”期间,全国有序退出煤矿 2 347 个,主要分布在湖南、江西、河南、黑龙江等 11 个地区,产生废弃矿井地下空间约 0.8 亿  $\text{m}^3$ <sup>[14]</sup>。然而,受限于地理位置、技术成本等问题,废弃矿井地下空间开发利用程度有限,造成大量地下空间资源的严重浪费。

废弃矿井地下空间与防洪相结合值得探索。近年来,我国区域持续性暴雨和极端暴雨事件呈上升趋势,增大了地区泄洪排洪压力,引发了严重的流域性洪涝灾害<sup>[15-16]</sup>。根据国家气象局发布的 1981—2010 年气象数据及谢和平院士团队研究成果,汇总出我国部分省份废弃矿井可有效利用地下空间与年降水分布情况,如图 2 所示。

将流域性大洪水频发区域(长江、黄河上游、珠江流域洞庭湖、鄱阳湖和太湖)与可利用的废弃矿井地下空间匹配后发现,我国河南、山东、安徽等 13 个省份共有 5 921 万  $\text{m}^3$  可利用地下空间,可储存 5.74 个西湖水量。可见,废弃矿井地下空间具有分担地区汛期泄洪压力的巨大潜力。从图 2 可以看出,安徽、河南、山东和河北 4 个省份的年降雨量和废弃矿

井地下空间容量均较高,总体高于其他省份。湖南和江西的年降雨量最高,但是废弃矿井地下空间容量较低。因此,安徽、河南、山东等黄淮地区相对适合开展废弃矿井地下蓄洪;湖南和江西由于废弃矿井地下库容小,很难承担区域性泄洪任务,但可以在小型城镇开展试验。

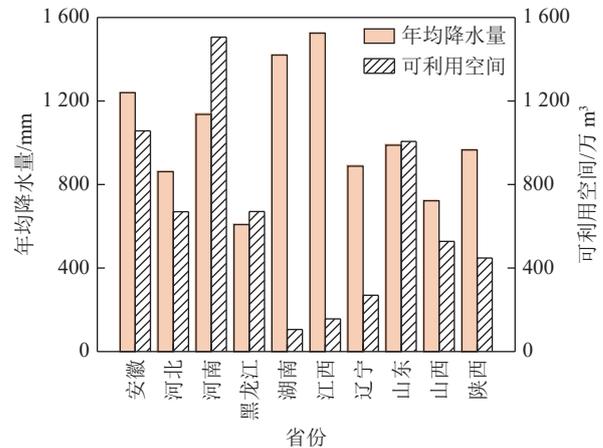


图 2 部分省份废弃矿井地下空间与年降水量分布  
Fig.2 Underground space of abandoned mines and annual precipitation distribution in some provinces

以安徽省为例,淮河流域地势低洼,是分蓄河道超量洪水、削减洪峰的主要区域<sup>[17]</sup>。全省 2 600 多万亩肥沃低洼土地,3~4 a 就要发生长达 2~3 个月的涝灾,对农业生产影响很大,治理投入高、难度大,防洪形势严峻<sup>[18]</sup>。安徽省煤炭资源丰富,主要分布在皖北两淮地区,如图 3 所示。两淮煤田,尤其是淮南矿区,煤层埋深大、矿井开采深、地层温度高。关闭矿井地处淮河流域,地下空间和地热利用潜力很大。据不完全统计,截至 2016 年,安徽省废弃矿井可利用地下空间 1 939 万  $\text{m}^3$ <sup>[14]</sup>,可容纳 1.88 个西湖水量。

#### 3.2 储能潜力

我国高地温矿井主要分布在江苏、安徽、山东、河南等 13 个省份,遍布东北、华北、华东及华中地区。据不完全统计,有 200 多座矿井的采掘工作面气温超过 30  $^{\circ}\text{C}$ ;在部分构造发育地区,甚至出现深部热水上涌现象,地热资源尤为丰富<sup>[19-20]</sup>。根据国家能源局发布的全国煤矿退出情况相关数据、谢和平和胡圣标教授团队<sup>[14-21]</sup>相关工作,汇总出我国大陆地区“十三五”期间退出煤矿数量与大地热流分布情况,如图 4 所示。

由图 4 可知,我国西藏、华北及东部地区地下蕴藏大量的地热资源,其中,中东部地区分布有大量的废弃矿井。以 60  $\text{mW}/\text{m}^2$  为标准,我国山西、河南、

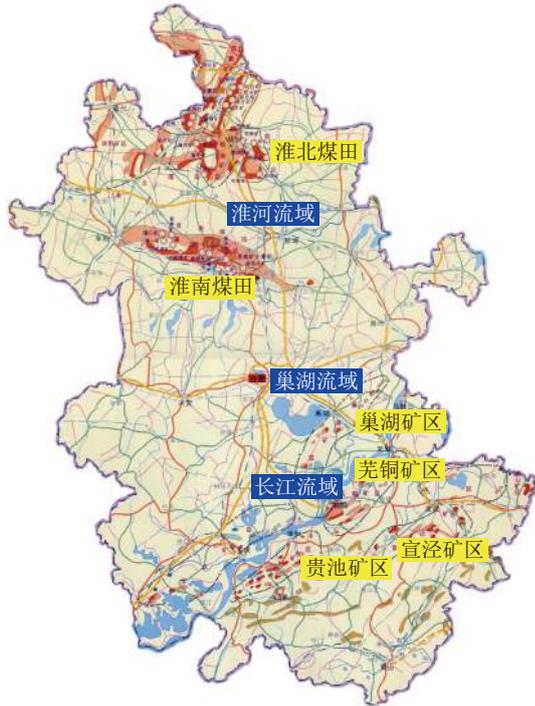


图 3 安徽省煤炭资源与河流分布示意

Fig.3 Coal resources and river distribution in Anhui Province

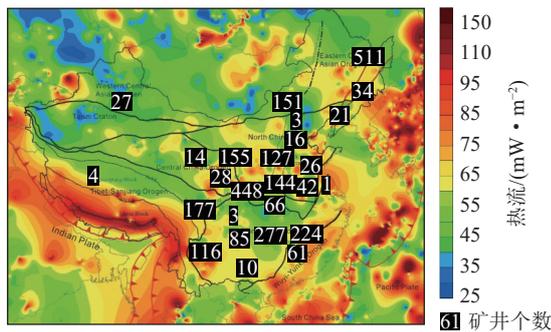


图 4 我国大陆地区十三五期间退出煤矿与大地热流分布情况<sup>[21]</sup>

Fig.4 Withdrawal of coal mines and distribution of heat flow in mainland China during the 13th Five Year Plan period<sup>[21]</sup>

河北及安徽等 18 个省份共有约 1 729 处废弃矿井。通常，中东部的矿井开采时间较长，埋深较大，地温普遍较高。表 1 所示为安徽省部分煤矿的采深和岩温数据。

以表 1 中淮南矿区 5 个废弃矿井为例，每个矿井的可利用地下空间约 30 万 m<sup>3</sup>。安徽汛期为 5~9 月份，梅雨季一般在 7 月前后，此间日均气温为 30℃ 左右。通常，地表水体的温度随季节气温变化，随气温增加而增高，受日照影响表层水温略高于大气温度<sup>[22-23]</sup>。随深度增加，河水温度呈不同程度降低，但是对于较浅的河流，降幅有限。考虑深度影响因素，假设淮南矿区 7 月份河水平均温度为 25℃。

淮南矿区处于华北石炭二叠系煤田范围内，地

表 1 安徽部分矿井开采深度与地温  
Table 1 Mining depth and ground temperature of some mines in Anhui Province

矿井	采深/m	最高岩温/℃	备注
张集矿	1 260	51.5	生产
顾桥矿	996	43.8	生产
潘三矿	962	54.8	生产
丁集矿	1 075	52.7	生产
谢桥矿	720	41.1	生产
刘庄矿	900	45.2	生产
潘一东矿	1 040	46.1	废弃
新庄孜煤矿	870	40.7	废弃
新集三矿	700	36.3	废弃
李嘴孜煤矿	548	36.8	废弃
谢家集一矿	660	39.7	废弃

热水主要赋存在奥陶系碳酸盐岩层，潘集、张集等井田内多个钻孔显示 300~1 000 m 深处水温为 36.5~52℃，矿井深部岩温平均 40℃ 以上<sup>[24]</sup>。废弃矿井经过多年采动影响，岩体裂隙发育，地下水通道丰富。河水进入废弃矿井地下空间后与深部高温裂隙岩体及高温水发生对流换热，温度升高，假设经 3~6 个月的换热后水温升高 2℃。

在冬季，采用水源热泵系统对储存在井下的温水取热。热泵出水温度为 12℃，则废弃矿井地下空间蓄水热量可由下式得出：

$$Q_w = Q_L c_w \rho_w (t_w - t_0)$$

式中： $Q_w$  为水中储存的热量，J； $Q_L$  为理想蓄水空间，5 个矿井共约 150 万 m<sup>3</sup>； $c_w$  为地热水的比热容，取  $4.2 \times 10^3$  J/(kg·℃)； $\rho_w$  为水的密度， $1.0 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>； $t_w$  为矿井水温度，取 27℃； $t_0$  为换热后温度，取 12℃。

经计算，矿井地下空间蓄水可提取热量为  $9.45 \times 10^{13}$  J，折合标煤 3 225 t，按耗煤量指标 15 kg/m<sup>2</sup> 计算，可以满足一个 21 万 m<sup>2</sup> 小区（1 750 个家庭，按每户 120 m<sup>2</sup> 计算）的供暖需求。

#### 4 工程示例分析

旗山煤矿位于徐州市贾汪-潘家庵盆地的东南部，始建于 1957 年。不牢河自西南流向东北横贯矿区，是唯一的排水河道。京杭运河流经矿井南缘，与不牢河连通。旗山井田地面河流分布如图 5 所示。

据徐州气象站观测资料，矿区降水多集中在 7~9 月份，约占全年降水量的 65%。将旗山井下-700 m 和-1 000 m 水平的开拓及准备巷道改造为蓄洪空间，

依托地面防洪标准工程,在原有防洪措施基础上改造引水蓄洪系统。



图5 旗山矿河流分布

Fig.5 River distribution in Qishan mining area

#### 4.1 地面泄洪沟渠布置

为达到汛期蓄洪的目的,设计泄洪沟渠将不老河和旗山矿主井连接起来。由于正槽式溢洪道具有结构简单、水流条件好、泄洪能力大、施工管理及维修方便等优点,泄洪沟渠在正槽式溢洪道的设计原则上进行简化和改动。为了减少洪水中的泥沙和漂浮物,泄洪沟渠设计引水渠、控制段、泄槽段、消能防冲段和尾水渠。引水渠可以连接泄洪沟渠主体部分和不牢河道,使水流能够平顺的流入控制段。控制段是控制泄洪沟渠泄流量的关键部分,结合不老河和旗山矿具体水文和地质条件,选用宽顶堰型。泄槽一般布置在基岩上,可以排泄从控制段流入的洪水,分为直线段和收缩段。消能防冲段位于泄槽出口处,一般采用挑流消能方式,可以消除下泄水流具有的动能。尾水渠可以对泥沙进行沉淀并清除水面的漂浮物,使水流平缓顺畅的流入地下水库中。泄洪沟渠平面布置如图6所示。

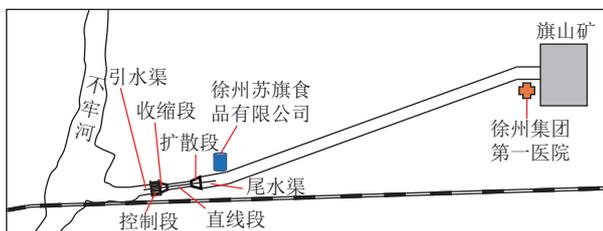


图6 泄洪沟渠平面布置

Fig.6 Layout plan of flood discharge ditch

#### 4.2 井下储水空间布置

旗山矿地下废弃空间包括主要井筒、井底车场、水仓、运输大巷、东翼和西翼运输大巷、石门和轨道上(下)山,经初步估算,总容积约90万 $m^3$ ,蓄水总容积相当于徐州市白龙湖库容的一半。

为保证地下储水空间安全运行,选用二次混凝

土衬砌方法对井下巷道进行加固,防止巷道内的水向外渗漏,抵抗围岩压力。在一次衬砌和二次衬砌之间铺设土工膜和土工织物。土工膜具有较好耐久性、防渗及抗腐蚀性,能够适应巷道表面的凹凸不平。土工织物具有较强的力学性能,可以吸收浇筑二次衬砌混凝土时的压力,缓解由于温度和载荷的变化而造成的巷道二次衬砌混凝土变形,保护土工膜防止其被外力破坏。

#### 4.3 矿井水提取及利用

根据《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》要求,设计供暖时间为120天,则水源热泵提取的水流量取260 $m^3/h$ 。旗山矿平均地温梯度为22.6 $^{\circ}C/km$ ,-1100m处的岩温达到41.4 $^{\circ}C$ 。矿井水的平均温度取27 $^{\circ}C$ 。经热泵机组取热后,矿井水温度为12 $^{\circ}C$ ,则地下蓄水热量为5468kW。热泵机组冬季的综合能效比取5,则热泵机组供热功率为6835kW。根据以上负荷计算,选择1台离心式水源热泵和1台螺杆式水源热泵,设计装机总容量为7280kW。热泵机组配套有机房控制系统、混水箱、供水系统和供电系统等部分组成。

汛期洪水存在较多的悬浮物和部分有机污染物,会导致水源热泵系统运行时的管道堵塞及污染环境等问题。此外,高温条件下钙镁离子容易在管壁上依附结垢,降低换热效率,严重影响系统的正常运行。因此,地下蓄水进入设备之前需要进行预处理,首先采用旋流除砂器对地下蓄水进行除砂,再利用电子水处理仪溶解水垢并预防管路结垢。

#### 4.4 经济性分析

经初步测算,旗山矿矿井水及热泵机组的供热功率为6835kW,按居民建筑供暖50 $W/m^2$ 的标准计算,可为13.67万 $m^2$ 面积的建筑供暖。

按照每小时每吨蒸汽提供700kW的供热能力计算,如果购买热力厂的蒸汽供暖,13.67万 $m^2$ 的建筑需要蒸汽2.81万t。每吨蒸汽的价格按180元计算,则一个供暖季需要蒸汽费用506万元。

如果采用热泵系统供暖,引水改造、热泵机组及水处理等工程总投入约865万元。热泵机组使用寿命取20年,净残值为3%,则每年折旧费用为25.95万元。机组用电总负荷约1516kW,工业用电电费取0.61元/(kW·h),供暖季平均运行系数按0.7计算,冬季机组的平均满负荷系数为0.91,则系统耗电费用为170万元。

采用蒸汽供暖,平均供暖系数取0.7,供暖锅炉效率0.9,整个采暖季大约消耗2050t标准煤,每吨

煤排放 2.6 t 二氧化碳, 则一共排放二氧化碳 5 330 t。采用矿井水源热泵系统供暖后, 将碳排放投入市场进行交易, 碳价格按 45 元/t 计算, 碳排放费用约 24 万元。

表 2 为矿井水源热泵机组供暖和蒸汽供暖的经济效益对比。可以看出, 旗山矿地下空间蓄水储能和供暖经济效益明显, 13.67 万 m<sup>2</sup> 的建筑供暖费用每年减少 350.75 万元。

表 2 矿井水源热泵机组运行效益对比  
Table 2 Operating benefits comparison of mine water source heat pump units

序号	项目	金额/万元		备注
		蒸汽	热泵	
1	折旧费用	0	25.95	总投资的3%
2	维修费用	1.8	9.6	总投资的1%
3	工人工资	9.6	9.6	4人, 每人每月 2 000元
4	电费	24.5	170	—
5	蒸汽费用	506	0	—
6	碳交易收益	0	-24.0	热泵为碳减排
累计		541.9	191.15	

## 5 结 论

1) 提出了废弃矿井蓄洪储能与取热综合利用模式, 阐述了该模式的概念, 并从引水、蓄水、提水和取热等方面论述了模式的组成; 指出引水蓄洪技术、储层稳定性控制技术、矿井水提水取热及污染物防治技术等 4 个方面为该模式的关键技术, 地层温度场及热资源特征、水-岩热交换过程及物化相应特征为该模式的科学问题。

2) 分析了我国废弃矿井的分布及其与降水分布之间的关系, 认为安徽、河南、山东等黄淮地区的废弃矿井地下空间与降水量分布具有高度的一致性, 且地温普遍较高, 相对适合开展废弃矿井地下蓄洪和取热。

3) 结合废弃矿井蓄洪储能与取热模式的特殊性, 仍有以下问题需要重点关注和深入研究: ①在废弃矿井蓄洪储能的基础上, 结合废弃矿井蓄洪系统承载能力, 探索季节性洪水资源化利用的多种途径, 缓解矿区水资源缺乏问题; ②蓄洪往往累积重金属、微生物菌群等污染物, 分析废弃矿井蓄洪水质及化学特征对地下水循环的影响; ③蓄洪储能与取热对洪水及地热的利用是多样的, 探讨废弃矿井供能在电网调峰中协同调度的可能性。

4) 以旗山矿为例, 初步测算蓄洪储能模式可为当地供暖建筑面积 13.67 万 m<sup>2</sup>, 每年节省供暖费 350.75 万元, 直接减少二氧化碳排放 5 330 t, 释放碳排放权价值约 24 万元。

## 参考文献(References):

- [1] 袁亮, 姜耀东, 王凯, 等. 我国关闭/废弃矿井资源精准开发利用的科学思考[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 14-20.  
YUAN Liang, JIANG Yaodong, WANG Kai, et al. Precision exploitation and utilization of closed / abandoned mine resources in China[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 14-20.
- [2] 孟召平, 李国富, 田永东, 等. 晋城矿区废弃矿井采空区煤层气地面抽采研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 204-211.  
MENG Zhaoping, LI Guofu, TIAN Yongdong, et al. Research progress on surface drainage of coalbed methane in abandoned mine gobs of Jincheng mining area[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 204-211.
- [3] 谢和平, 高明忠, 高峰, 等. 关停矿井转型升级战略构想与关键技术[J]. 煤炭学报, 2017, 42(6): 1355-1365.  
XIE Ping, GAO Mingzhong, GAO Feng, et al. The strategic concept and key technologies of the transformation and upgrading of the closed mine[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(6): 1355-1365.
- [4] 武俐, 曹斌, 李怀珍, 等. ASE萃取对低、中阶煤增产生物气的研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(2): 334-340.  
WU Li, CAO Bin, LI Huaizhen, et al. Study on biogas production of low and medium rank coals by ASE extraction[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(2): 334-340.
- [5] 刘峰, 李树志. 我国转型煤矿井下空间资源开发利用新方向探讨[J]. 煤炭学报, 2017, 49(9): 2205-2213.  
Liu Feng, Li Shuzhi. The new direction of development and utilization of underground space resources in transition coal mines in China[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 49(9): 2205-2213.
- [6] 谢友泉, 高辉, 苏志国. 废弃矿井地热资源的开发利用[J]. 太阳能, 2020(10): 6.  
XIE Youquan, GAO Hui, SU Zhiguo, et al. Development and utilization of geothermal resources in abandoned mines[J]. Solar energy, 2020(10): 6.
- [7] GUO P, ZHENG L, SUN X, et al. Sustainability evaluation model of geothermal resources in abandoned coal mine[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 144: 804-811.
- [8] DÍEZ R R, DÍAZ-AGUADO M B. Estimating limits for the geothermal energy potential of abandoned underground coal mines: A simple methodology[J]. Energies, 2014, 7(7): 4241-4260.
- [9] 赵东亮, 李勇, 代彦军. 季节性蓄热太阳能集中供热系统[J]. 太阳能, 2011(3): 26-31.  
Zhao Dongliang, Li Yong, Dai Yanjun. Seasonal regenerative solar central heating system[J]. Solar Energy, 2011(3): 26-31.
- [10] MICHAL Vokurka, ANTONÍN Kunz. Case Study of Using the Geothermal Potential of Mine Water for Central District Heating —The Rožná Deposit, Czech Republic[J]. Sustainability,

- 2022, 14: 2016. <https://doi.org/10.3390/su14042016>.
- [ 11 ] 吴金焱. 荷兰海尔伦市废弃煤矿矿井水地热开发利用工程实践[J]. 中国煤炭, 2020, 46(1): 94-98.  
WU Jinyan. Practice on geothermal energy development and utilization from abandoned coal mine water in Heerlen of Netherlands[J]. China Coal, 2020, 46(1): 94-98.
- [ 12 ] 殷方圆, 殷淑燕. 1960-2012年我国夏季降水的时空分布特征[J]. 陕西师范大学学报(自科版), 2015(3): 80-85.  
YIN Fangyuan, YIN Shuyan. Temporal and spatial distribution characteristics of summer precipitation in China from 1960 to 2012[J]. Journal of Shaanxi Normal University (self-edition), 2015(3): 80-85.
- [ 13 ] 曹思沁. 我国现代降水时频分布特征分析与预测综述[J]. 科技展望, 2016, 26(36): 275.  
CAO Siqin. Analysis and prediction of time-frequency distribution characteristics of modern precipitation in China[J]. Technology prospect, 2016, 26(36): 275.
- [ 14 ] 谢和平, 高明忠, 刘见中, 等. 煤矿地下空间容量估算及开发利用研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(6): 1484-1503.  
XIE Heping, GAO Mingzhong, LIU Jianzhong, *et al.* Research on capacity estimation and development and utilization of underground space in coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(6): 1484-1503.
- [ 15 ] 吴燕娟. 气候变化背景下我国极端降水的时空分布特征和未来预估[D]. 上海: 上海师范大学, 2016.  
WU Yanjuan Spatial and temporal distribution characteristics and future projections of extreme precipitation in China under the background of climate change [D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2016.
- [ 16 ] 王莉萍, 王维国, 张建忠. 我国主要流域降水过程时空分布特征分析[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(2): 161-173.  
WANG Liping, WANG Weiguo, ZHANG Jianzhong. The spatial and temporal distribution characteristics of precipitation processes in major basins in China[J]. Journal of Natural Disasters, 2018, 27(2): 161-173.
- [ 17 ] 张霖琳, 张珺琳, 刘道会, 等. 蒙洼泄洪区补偿机制存在的问题与对策分析: 基于安徽阜南蒙洼泄洪区的典型案例调查[J]. 产业与科技论坛, 2010, 9(11): 132-134.  
ZHANG Linlin, ZHANG Junlin, LIU Daohui, *et al.* Mengwa flood discharge area compensation mechanism problems and countermeasures analysis - Based on the typical case investigation of Funan Mengwa flood discharge area[J]. Industry and Technology Forum, 2010, 9(11): 132-134.
- [ 18 ] 蔡敏. 安徽省将投入11亿元积极推进中小河流治理进程[EB/OL]. (2009-11-29)[2022-03-08]. [https://www.gov.cn/jrzq/2009-11/29/content\\_1475872.htm](https://www.gov.cn/jrzq/2009-11/29/content_1475872.htm).
- [ 19 ] ZHANG Yuan, WAN Zhi-jun, GU Bin, ZHOU Chang-bing, CHENG Jing-yi. Unsteady temperature field of surrounding rock mass in high geothermal roadway during mechanical ventilation[J]. J. Cent. South Univ., 2017, 24(2): 374-381.
- [ 20 ] 万志军, 毕世科, 张源, 等. 煤-热共采的理论与技术框架[J]. 煤炭学报, 2018, 43(8): 2099-2106.  
WAN Zhijun, BI Shike, ZHANG Yuan, *et al.* Theoretical and technical framework of coal-thermal co-mining[J]. Coal Journal, 2018, 43(8): 2099-2106.
- [ 21 ] JIANG G, HU S, SHI Y, *et al.* Terrestrial heat flow of continental China: Updated dataset and tectonic implications[J]. Tectonophysics, 2019, 753: 36-48.
- [ 22 ] 胡平, 刘毅, 唐忠敏, 等. 水库水温数值预测方法[J]. 水利学报, 2010, 41(9): 1045-1053.  
HU Ping, LIU Yi, TANG Zhongmin, *et al.* Numerical prediction of water temperature in reservoir[J]. Shuili Xuebao, 2010, 41(9): 1045-1053.
- [ 23 ] 鲍其钢, 乔光建. 水库水温分层对农业灌溉影响机理分析[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(2): 69-72.  
BAO Qigang, QIAO Guangjian. Impacts of Reservoir Water Temperature Stratification on Agricultural Irrigation[J]. South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology, 2011, 9(2): 69-72.
- [ 24 ] 吴基文, 王广涛, 翟晓荣, 等. 淮南矿区地热地质特征与地热资源评价[J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2566-2578.  
WU Jiwen, WANG Guangtao, ZHAI Xiaorong, *et al.* Geothermal geological characteristics and geothermal resources evaluation of Huainan mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2566-2578.