

关闭煤矿采空区积水量预测及其演化过程分析

丁艳青¹, 逢仁昊¹, 钱 静^{1,2}, 段李宏³, 陈太森¹

(1. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116; 2. 江苏省地质矿产局第五地质大队, 江苏 徐州 221004;
3. 永城永安矿山安全技术工程有限公司, 河南 永城 476600)

摘 要: 煤矿关闭之后地下水水位回升, 但采空区内的积水演化过程鲜有研究。以徐州三河尖关闭煤矿为例, 基于闭坑报告及钻孔数据资料, 结合煤层底板标高三维(3D)曲线图确定采空区的积水途径, 基于回采空间法分煤层和分水平预测矿井积水量, 并依据水力学等相关理论, 确定煤矿关闭后各水平的涌水量取值, 探究关闭煤矿采空区积水的演化过程。研究表明: 根据煤层底板形态3D图预测矿井水首先流向矿井南北两翼的深部采空区及巷道, 随后流经矿区东西两翼边缘区域的中部采空区, 最后汇集到龙固背斜与张庄断层所在的浅部采空区。三河尖关闭煤矿共计积水 $9.88 \times 10^6 \text{ m}^3$, 其中基于回采空间法计算得到关闭煤矿各煤层积水体积共计 $9.35 \times 10^6 \text{ m}^3$ (采空区和废弃巷道系统积水体积分别为 7.86×10^6 、 $1.49 \times 10^6 \text{ m}^3$), 其他储水空间积水体积为 $0.53 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。随着积水水位的升高, 涌水量逐渐降低, 在标高为 $-350 \sim -400 \text{ m}$ 的水平, 涌水量最低, 约为 $134.81 \text{ m}^3/\text{h}$ 。煤矿关闭后采空区水位随时间回升的过程表明: 积水初期, 矿井深部采空区容积小、涌水量大、积水速度快; 积水中期, 采空区容积增大、涌水量降低且随着巷道数量的增加, 积水高度上升速度减慢; 积水后期, 浅部采空区容积变小, 积水高度随时间的增加迅速上升。由此预测煤矿关闭2546 d后地下水将回升至标高为 -350 m 的水平。

关键词: 关闭煤矿; 采空区积水; 演化过程; 积水体积; 三河尖煤矿

中图分类号: TD745 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2025)05-2635-10

Analysis of the prediction and evolution process of waterfilling in closed coal mine goaf

DING Yanqing¹, PANG Renhao¹, QIAN Jing^{1,2}, DUAN Lihong³, CHEN Taisen¹

(1. School of Resources & Earth Science, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. The Fifth Geological Brigade of Jiangsu Bureau of Geology and Mineral Resources, Xuzhou 221004, China; 3. Yongcheng Yong'an Mining Safety Technology Engineering Co., Ltd., Yongcheng 476600, China)

Abstract: After coal mine closure, the groundwater level recovers, while the water accumulation process in goaf areas has rarely been studied. Taking Xuzhou Sanhejian closed coal mine as an example. Based on mine closure reports and borehole data, combined with 3D contour maps of coal seam floor elevations, the water accumulation pathways in goaf areas were identified. The mine water accumulation volume was predicted by mining-induced space method through separate calculations for different coal seams and levels. Water inflow rates at various levels after mine closure were determined using hydraulic theory and related principles, revealing the evolutionary process of water accumulation in abandoned mine

收稿日期: 2024-05-28 策划编辑: 韩晋平 责任编辑: 陈思成 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.0593

基金项目: 江苏省自然资源保护利用专项资金(矿地融合试点)资助项目

作者简介: 丁艳青(1983—), 女, 山东巨野人, 副教授, 博士。E-mail: yqding7@163.com

引用格式: 丁艳青, 逢仁昊, 钱静, 等. 关闭煤矿采空区积水量预测及其演化过程分析[J]. 煤炭学报, 2025, 50(5): 2635-2644.

DING Yanqing, PANG Renhao, QIAN Jing, et al. Analysis of the prediction and evolution process of waterfilling in closed coal mine goaf[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(5): 2635-2644.



移动阅读

goaf. Research shows: According to 3D coal seam floor morphology, mine water first flows to deep goaf areas and roadways in the north and south wings, then passes through central goaf areas in the east and west wing edge zones, and finally converges to shallow goaf areas near Longgu anticline and Zhangzhuang fault. The total accumulated water volume in Sanhejian closed mine is $9.88 \times 10^6 \text{ m}^3$, including $9.35 \times 10^6 \text{ m}^3$ calculated by mining-induced space method ($7.86 \times 10^6 \text{ m}^3$ in goaf areas and $1.49 \times 10^6 \text{ m}^3$ in abandoned roadway systems), with $0.53 \times 10^6 \text{ m}^3$ from other water storage spaces. As water level rises, water inflow rate gradually decreases, reaching the minimum value of approximately $134.81 \text{ m}^3/\text{h}$ at -350 – -400 m elevation. The groundwater recovery process reveals three phases: initial stage features small deep goaf capacity, high inflow rate and rapid accumulation; mid-stage shows increased goaf capacity, reduced inflow rate, and slowed rising speed with more roadways; final stage exhibits reduced shallow goaf capacity and accelerated water level rise. It is predicted that groundwater will recover to -350 m elevation after 2 546 days of mine closure.

Key words: closed coal mine; water accumulation in mined-out areas; evolution process; water accumulation volume; Sanhejian Coal Mine

0 引 言

随着能源结构的调整,我国已关闭了很多不符合国家安全及生态环境标准的煤矿,截至 2023 年,我国已关闭(废弃)矿井数量已达到 15 000 座^[1-2],但煤矿关闭后,仍赋存大量资源,如剩余煤炭、煤层气、地下空间和矿井水等^[3]。近年来,我国每年煤炭开采产生的矿井水量约为 80 亿 t,但其利用率仅为 25%,损失量约占我国工业和民用缺水量的 60%^[4]。目前,我国约 1/3 煤矿为水资源丰富矿井,矿井水在煤炭开采过程中常用于选煤、煤场降尘、软化中硬顶煤和减缓冲击倾向等,煤矿停止开采后,关闭煤矿内部蕴含的大量矿井水资源仍然可以被有效利用^[5],因此开展关闭煤矿积水研究具有重要意义。

煤矿关闭后,煤矿井下涌出的地下水停止抽排,其天然流场逐渐自然恢复,地下水位逐渐回升,采空区开始出现大量的积水,形成丰富的矿井水资源^[6]。耿建军^[7]指出,若充分利用关闭煤矿中的矿井水,将解决我国工农业和居民 80% 的用水需求。针对关闭煤矿矿井水资源化利用,部分企业开展了大量的探索,如山东省原枣庄煤矿利用生化技术深度处理废弃矿井水,直至使其达到生活饮用水标准,为全国关闭煤矿的水资源再利用提供了宝贵范例^[8]。在工艺方面,山西省煤炭地质 115 勘查院发明了移动式智能化采空区积水处理装置,该装置已在同煤集团塔山煤矿成功应用,提高了矿井水的处理能力,并在一定程度上提高了地下水储存量^[9]。除了上述资源效应外,煤矿关闭之后随着地下水位的回升,也可能产生其他危害^[10-14]。例如,当地下水位不断回升,地下水甚至可能外渗出地表土壤,将使地层的承载能力和土壤颗粒之间的黏性明显下降,导致地表发生塌陷或沉降,威胁周边建筑物和基础设施安全^[15];此外,还可能引发

地下水渗漏和采空区涌水等问题,进而影响周边地下设施的安全运行,增加了地质灾害风险^[16]。因此,探究煤矿关闭后矿井水的积水演化过程,可以准确评估地下积水对周边水文地质条件产生的影响状况、理解矿井关闭后影响周边生态环境程度以及为政府、企业等相关部门在闭坑管理、矿山生态修复及后续开发再利用等方面提供可靠的数据支持和理论依据,促进矿区的可持续发展。

笔者以徐州市三河尖煤矿为研究对象,利用煤矿闭坑资料,根据煤层底板三维(3-Dimensional, 3D)图确定关闭后的积水路径,基于回采空间法分煤层、分水平计算采空区及巷道系统内的积水体积;依据水力学相关理论确定煤矿关闭后不同水平的涌水量并进一步分析预测地下水水位到达最高积水标高时所需要的时间,以期为关闭煤矿矿井水资源的再利用和降低关闭煤矿发生危险事故的概率提供理论支撑。

1 地质概况

三河尖煤矿位于江苏省徐州市沛县龙固镇境内,地理坐标为东经 $116^{\circ}41'18''$ ~ $116^{\circ}51'17''$,北纬 $34^{\circ}52'30''$ ~ $34^{\circ}56'02''$ 。三河尖煤矿地处苏鲁两省的边界,东邻昭阳湖、西邻丰县、北与山东省鱼台县接壤,东南距徐州市 92 km,至沛县 27 km,西北距鱼台县城 19 km。

矿区主要含煤地层为石炭系和二叠系,含 3 个含煤组,下石盒子组仅含煤线,上石炭统太原组和下二叠统山西组含有可采煤层。矿区内有 4 层可采煤层,自上而下称为 7、9、17 和 21 号煤层。勘探和井下揭露表明,煤层倾角变化范围为 $+4^{\circ}$ ~ -4° ,煤厚变化范围为 $+0.4$ ~ -0.4 m 。区内褶皱宽缓(图 1),地层倾角为 0° ~ 25° ,次一级小褶皱较发育,伴生断裂构造,褶曲主要有龙固背斜、张庄向斜、张庄背斜、三里庙向

斜、西谢庄背斜和西谢庄向斜等; 区内发育落差为 1 m 以上的断层有 52 条, 其中落差大于 100 m 的断层有 9 条, 落差为 100~50 m 的断层有 10 条, 落差为

50~30 m 的断层有 4 条, 落差为 30~10 m 的断层有 29 条; 在这 52 条断层中, 仅 F_2 和 F_{26} 为逆断层, 其余均为正断层^[17]。

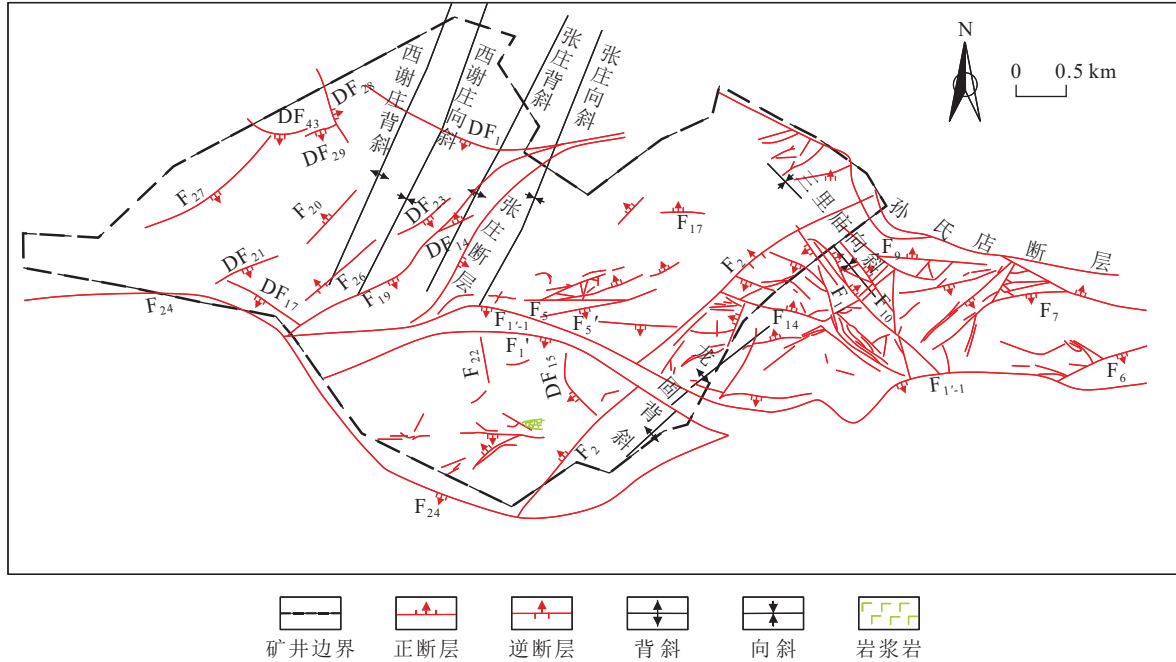


图 1 三河尖煤矿构造纲要^[17]

Fig.1 Structural outline map of Sanhejian Coal Mine^[17]

矿区位于半封闭的滕县背斜储水构造水文地质单元的西南侧, 该储水构造除三河尖煤矿外, 还包括龙东煤矿、姚桥煤矿、龙固煤矿及柴里煤矿。煤矿发育山西组 7、9 号煤的煤层顶、底板砂岩裂隙承压含水层和太原组灰岩含水层等多个含水层 (图 2), 充水通道主要包括断层破碎带、裂隙、褶皱和采动裂隙等^[18], 主要充水水源包括主采煤层 7 号煤和 9 号煤顶底板砂岩裂隙水、17 号煤顶底板灰岩水、采空区积水。在天然状态下, 地下水由东北向西南方向流动。

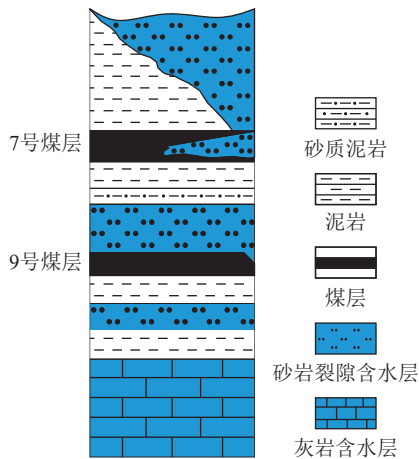


图 2 三河尖煤矿主要含水层隔水层

Fig.2 Schematic diagram of main aquifers in goaf of Sanhejian Coal Mine

2 采空区积水路径确定

煤矿关闭后, 地下水位不断回升, 逐渐淹没生产阶段开采煤层所形成的采空区, 地下水由深部采空区向中部和浅部采空区过渡 (表 1)。根据三河尖煤矿钻孔柱状图, 统计主采煤层 7 号煤和 9 号煤的钻孔数分别为 140 和 73 个, 采用钻孔经纬度坐标与钻孔中 7、9 号煤的底板标高, 利用 Surfer 软件中克里金插值法绘制出煤层底板标高 3D 曲线图, 刻画出 7 号和 9 号煤的煤层底板起伏形态 (图 3 和图 4)。三河尖煤矿煤层整体发育情况为东西两翼高、南北两翼低。煤层底板的最低标高均位于 F_1' 断层南部的 14-4 钻孔处, 7 号煤最低标高为 -1 314.58 m, 9 号煤最低标高为 -1 354.5 m; 最高标高位于龙固背斜附近, 7 号煤最高标高为 -335.62 m, 9 号煤最低标高为 -371.05 m。根据煤层底板形态分布特征, 可预测矿井关闭后的积水路径^[19-20], 三河尖煤矿关闭后, 地下水首先流向矿井

表 1 采空区分水平划分

Table 1 Horizontal division of goaf area

采空区范围	水平/m
深部采空区	-750~-1 000
中部采空区	-550~-750
浅部采空区	-350~-550

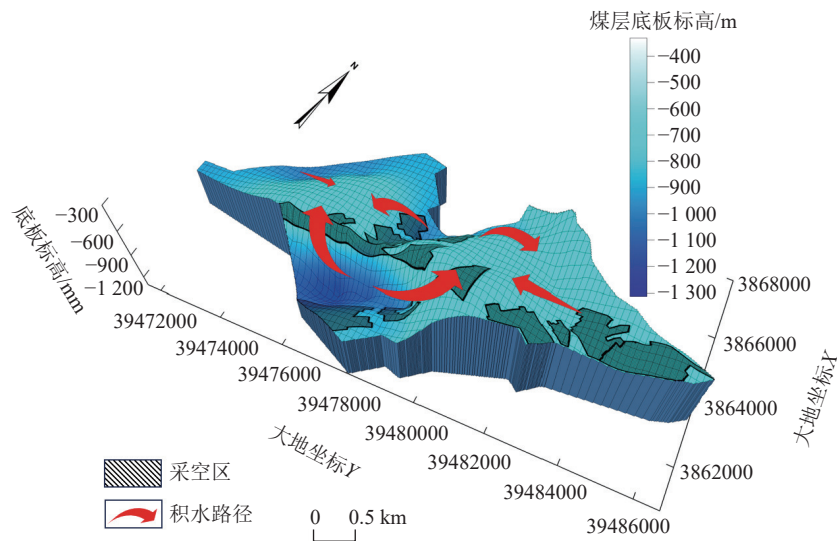


图3 三河尖煤矿7号煤层底板标高三维图与积水路径

Fig.3 Three-dimensional map of floor elevation of the No.7 coal seam in Sanhejian Coal Mine

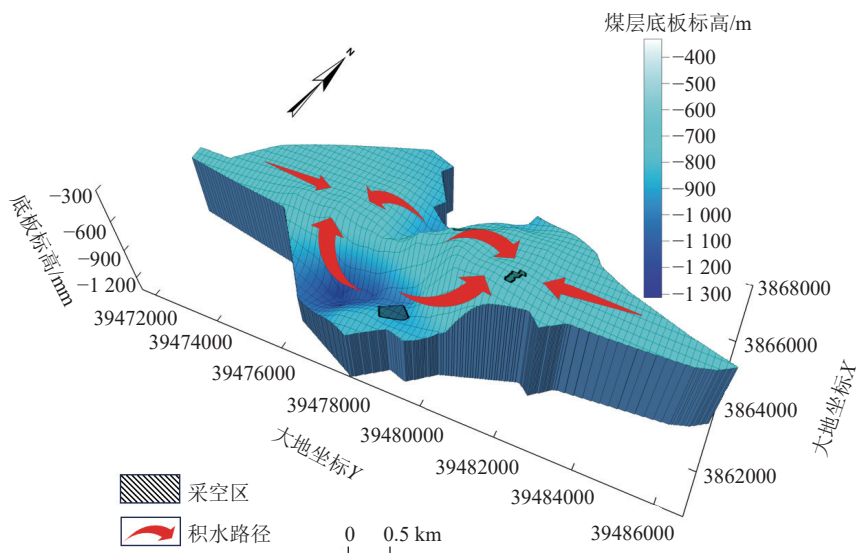


图4 三河尖煤矿9号煤层底板标高三维图与积水路径

Fig.4 Three-dimensional map of floor elevation of the No. 9 coal seam in Sanhejian coal mine

南北两翼的深部采空区及巷道,随后流经矿区东西两翼边缘区域的中部采空区,最后汇集到龙固背斜与张庄断层所在的浅部采空区(图3、图4)。

3 采空区积水量预测

3.1 方法选择

目前,我国预测矿井采空区积水量的方法主要包括回采空间法和积水空间法^[21]。回采空间法是基于采空区面积、采煤厚度、煤层倾角及巷道数据等资料,在矿井完成探放老空水工作的基础上,根据所得经验积水系数和公式计算出矿井采空区的积水体积,并建立关闭矿井水位回升模型^[22]。回采空间法适用于采空区积水高度大于 $5M$ (M 为采高)的情况,尤其是整

个回采工作面存在积水的情况,对采空区积水量预测较为准确;而积水空间法适用于最大水头高度小于 $5M$,且水文地质条件复杂,或者有持续水源补给的情况^[23]。

依据三河尖煤矿钻孔取样记录,分别采集深度为573 m处的泥岩、606 m处的泥岩、680 m处的砂岩(7号煤上覆岩层)等样品;621 m处的泥岩、631 m处的砂岩、724 m处的砂岩(9号煤上覆岩层)等样品,采用由X射线源系统、高精密度运动样品台和探测器系统3部分组成的计算机断层扫描系统 μ -Computed Tomography, μ -CT;德国v|tome|x180&240),采用该系统扫描样品时,其所用电压为120 kV、电流为100 μ A,扫描分辨率为25 μ m。利用Avizo软件,绘制

得到三河尖煤矿关闭后主采煤层 7 号煤和 9 号煤上覆岩层“三带”裂隙 3D 空间分布情况 (图 5 和图 6), 计算得到主采煤层“上三带”裂隙率 (图 7)。由图 5 与图 7 可看出, 7 号煤上覆岩层的“上三带”的上部区域到“上三带”区域再到“上三带”的下部区域的裂隙占比先降低后升高, 且“三带”之下的裂隙率最高, 约为 6.20%; 由图 6 与图 7 可看出, 9 号煤的“三带”裂隙占比逐渐降低, 在“三带”之上的区域, 裂隙率最高, 约为 7.58%。

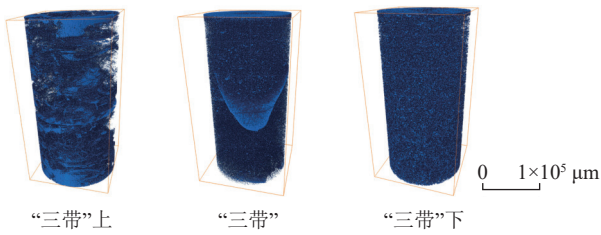


图 5 7 号煤上覆岩层“三带”裂隙三维空间分布

Fig.5 Three dimensional spatial distribution map of the “three zones” fractures in the overlying strata of No.7 coal seam

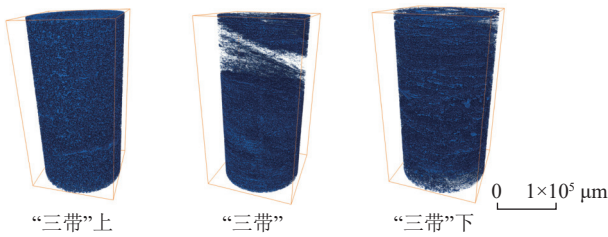


图 6 9 号煤上覆岩层“三带”裂隙三维空间分布

Fig.6 Three dimensional spatial distribution map of the “three zones” fractures in the overlying strata of No.9 coal seam

虽然 2 号煤层顶板岩性均以中粗粒砂岩为主, 但 7 号煤相较于 9 号煤存在连续的波状层理及富含菱铁质鲕粒条带, 且 9 号煤的顶板砂岩多为煤层的直接顶板, 部分区域被冲刷变薄或缺失, 导致 2 号煤层上覆岩层的裂隙率存在差异。

观察图 7 可以看出, 在“三带”及“三带”的上部区域 9 号煤的裂隙率高于 7 号煤, “三带”的下部区域 9 号煤的裂隙率低于 7 号煤, 且在“三带”区域内二者占比差值最大, 约为 4.96%。以往仅靠经验数据获

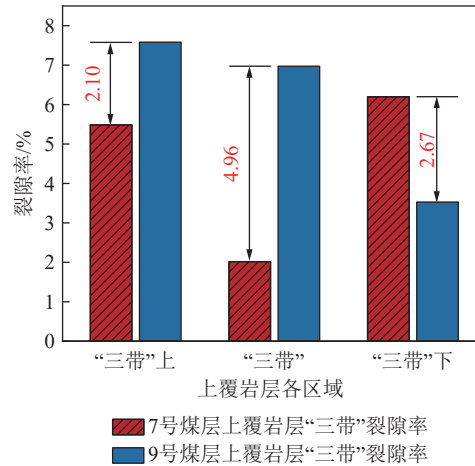


图 7 主采煤层上覆岩层“三带”裂隙率

Fig.7 Fracture rate of “three zones” in the overlying strata of main mining coal seam

取“三带”发育程度, 不确定性较大, 然而基于 μ -CT 的孔裂隙的定性定量研究, 可以更加直观、精确和高效的获取“三带”裂隙占比情况。

煤矿关闭后, 导水裂隙带作为地下水流动的重要途径, 为采空区积水提供了通道。根据《矿区水文地质工程地质勘查规范》^[24]中关于煤层开采导水裂隙带最大高度计算公式, 顶板岩性为坚硬岩层的最大导水裂隙带高度为

$$H_{li} = \frac{100M}{1.2M + 2.0} \pm 8.9 \quad (1)$$

顶板岩性为中硬岩层的最大导水裂隙带高度为

$$H_{li} = \frac{100M}{1.6M + 3.6} \pm 5.6 \quad (2)$$

式中: M 为采高, m; H_{li} 为导水裂隙带高度, m。

由三河尖煤矿主采煤层 7 号煤和 9 号煤导水裂隙带发育高度计算统计数据 (表 2) 可知: 7 号煤层在开采期间, 导水裂隙带发育高度范围为 31.7~72.7 m; 9 号煤层导水裂隙带发育高度范围为 51.8~60.2 m。三河尖煤矿在生产阶段开采煤层的最大厚度为 5.62 m。对比导水裂隙带高度与采煤厚度数据可知: 三河尖煤矿关闭后采空区积水高度大于 5M, 且关闭后积水将覆盖整个工作面, 煤矿积水过程符合回采空

表 2 主采煤层导水裂隙带发育高度

Table 2 Development height of water-bearing fracture zones in main coal seam

区域	顶板岩性		平均煤厚/m		导水裂隙带高度/m	
	7号煤	9号煤	7号煤	9号煤	7号煤	9号煤
三河尖区F ₂ 逆断层下盘	坚硬-中硬	坚硬	5.45	2.02	49.8~72.7	54.6
三河尖区F ₂ 逆断层上盘	坚硬-中硬	坚硬	2.82	1.77	40.4~61.3	51.8
刘庄区	坚硬	坚硬	2.49	2.67	58.8	60.2
吴庄区	坚硬-中硬	坚硬	1.61	1.81	31.7~49.8	52.3

间法的要求,因此,可选择回采空间法计算采空区积水量。

关闭煤矿采空区积水体积采用《煤矿防治水细则》中老窑水公式^[25]计算:

$$Q = Q_1 + Q_2 = C_1 AM / \cos \alpha + C_2 SL \quad (3)$$

式中: Q 为三河尖矿区各积水区总积水量, m^3 ; Q_1 为煤层采空区总积水量, m^3 ; Q_2 为各巷道总积水量, m^3 ; C_1 为采空区积水系数; A 为淹没采空区面积的水平投影, m^2 ; α 为煤层平均倾角, ($^\circ$); C_2 为巷道积水系数; S 为巷道断面面积, m^2 ; L 为巷道累计长度, m 。

3.2 确定计算参数

1) C_1 。 C_1 为采空区积水量 V_z 与已采煤炭体积 V_p 的比值, 其是采空区准确预测积水量的关键参数^[26-27], C_1 与采煤方法、煤层倾角、煤层顶底板岩性及采后间隔时间等因素相关^[28]。 C_1 的取值在《煤矿安全规程》中规定为 0.25~0.50^[29]。三河尖煤矿开采 7 号和 9 号煤的煤层均采用走向长壁采煤法, 采用全部垮落法管理顶板, C_1 较小; 煤层厚度变化不均匀, 并且 7 号和 9 号煤的煤层厚变化也不同, 故文中 C_1 的取值按照以下要求^[13,30], 开采年限小于 5 a, C_1 取 0.3; 开采年限处于 5~10 a, C_1 取 0.2; 开采年限大于 10 a, C_1 取 0.1。

2) C_2 。 C_2 主要与断面变化有关, 一般根据煤(岩)巷和成巷时间不同及维修状况而定。煤巷的 C_2 取 0.5~0.8, 岩巷的 C_2 取 0.8~1.0^[29]。

3) A 。根据煤层底板等高线及资源储量估算水平投影图, 分别对 A 进行圈定。通过 CAD 软件, 根据煤层采掘工程平面图, 在煤层底板等高线图中测量出倾角, 依据倾角相似程度划分块段。在每 1 块段中按照 50 m 等高距进行分水平圈定 A , 然后按照相同水平进行合并统计。各煤层 A 统计结果见表 3。三河尖煤矿各煤层的 A 共计 $1.16 \times 10^7 \text{ m}^2$, 7 号煤的 A 为 $1.07 \times 10^7 \text{ m}^2$, 9 号煤的 A 为 $0.09 \times 10^7 \text{ m}^2$ 。两部分煤层的 A 均随其所在水平的升高基本呈现先升高后降低的趋势, 分别在 -600~-650 m、-850~-900 m 水平处取得最大值。

4) M 。根据不同煤层分水平圈定采空区面积时, 采用所圈矿井采空区内平均煤厚作为该圈定块段的 M 值。各煤层 M 的统计结果见表 3。其中 7 号煤开采厚度范围为 2.00~5.62 m, 在 -500~-550 m 水平处最大, 约为 5.62 m; 9 号煤开采厚度范围为 2.50~4.27 m, 在 -450~-500 m 水平处最大, 约为 4.27 m。

5) α 。在圈定采空区面积过程中, 可根据煤层底板等高线测量出 α , 将 α 大致相等的划分为同一块段, 并求得每一块段的平均倾角。各煤层的 α 统计见表 4, 7 号煤的 α 为 $8^\circ \sim 20^\circ$; 9 号煤的 α 为 $6^\circ \sim 14^\circ$ 。

6) L 。 L 的量取与采空区面积的量取方法相似, 根据资源储量估算水平投影图上所标注的岩巷, 分水平对 L 进行量取。巷道宽取 4.5 m, 高取 3 m, 巷道断面面积为 13.5 m^2 , 不同水平 L 和巷道体积见表 3。三河尖煤矿巷道体积共计 $1.86 \times 10^6 \text{ m}^3$, 在 -600~-650 m

表 3 参数取值统计

Table 3 Parameter value statistics table

水平/m	开采煤层厚度/m		煤层倾角/ $^\circ$		A/m^2			巷道长度/m	巷道体积/ m^3
	7号煤	9号煤	7号煤	9号煤	7号煤	9号煤	总计		
-950~-1 000	2.00	3.30	8.00	12.00	367 089	97 535	464 624	4 842	65 367
-900~-950	2.50	3.30	16.00	12.00	863 428	119 699	983 127	11 526	155 598
-850~-900	2.73	3.30	11.67	12.00	545 056	131 195	676 251	9 438	127 417
-800~-850	2.67	2.50	10.33	14.00	943 768	23 938	967 706	8 956	120 900
-750~-800	2.40	3.49	20.00	6.00	302 615	32 748	335 363	3 330	44 949
-700~-750	3.53	3.49	20.00	6.00	565 838	96 200	662 037	7 452	100 607
-650~-700	4.86	3.49	15.33	6.00	1 435 568	119 122	1 554 691	17 558	237 026
-600~-650	3.00	3.49	11.67	6.00	2 131 061	92 363	2 223 424	22 444	302 994
-550~-600	4.51	3.49	10.00	6.00	1 016 722	41 946	1 058 667	11 362	153 382
-500~-550	5.62	3.49	8.33	6.00	539 897	101 327	641 224	9 134	123 311
-450~-500	3.65	4.27	10.00	6.00	658 152	93 017	751 169	14 715	198 646
-400~-450	3.65	3.34	10.00	9.00	769 652	4 886	774 538	7 854	106 033
-350~-400	3.65	0	10.00	0	553 156	0	553 156	9 502	128 273
总计	—	—	—	—	10 692 002	953 976	11 645 978	138 111	1 864 503

表 4 三河尖煤矿采空区积水体积计算结果
Table 4 Calculation results of water volume in goaf of Sanhejian coal mine

水平/m	积水体积/m ³			总计
	7号煤	9号煤	巷道长度/m	
-950~-1 000	74 139	32 906	52 293	159 338
-900~-950	224 556	40 383	124 478	389 418
-850~-900	152 125	44 261	101 933	298 320
-800~-850	511 641	12 336	96 720	620 697
-750~-800	154 578	22 984	35 960	213 521
-700~-750	424 718	67 517	80 486	572 721
-650~-700	1 445 685	83 605	189 621	1 718 911
-600~-650	1 305 609	64 825	242 395	1 612 829
-550~-600	931 230	29 439	122 705	1 083 375
-500~-550	613 320	71 116	98 649	783 084
-450~-500	487 863	79 874	158 917	726 654
-400~-450	570 514	3 304	84 826	658 644
-350~-400	410 033	0	102 619	512 652
总计	7 306 011	552 551	1 491 602	9 350 164

水平处取得最大值,为 $0.30 \times 10^6 \text{ m}^3$; 在 $-750 \sim -800 \text{ m}$ 水平处取得最小值,为 $0.04 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。 $-600 \sim -650 \text{ m}$ 水平处的采空区面积是 $-750 \sim -800 \text{ m}$ 水平处的 6.63 倍,因此,前者的巷道系统相对后者更加复杂。

3.3 积水体积计算

分煤层、分水平按式 (3) 计算采空区积水体积,包括工作面采空区积水体积和废弃巷道积水体积,计算结果见表 4。三河尖煤矿各煤层的积水体积共计 $9.35 \times 10^6 \text{ m}^3$,其中采空区积水体积为 $7.86 \times 10^6 \text{ m}^3$,废弃巷道系统积水体积为 $1.49 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。

根据各水平采空区积水体积的计算结果,按深部、中部、浅部采空区绘制三河尖煤矿采空区与积水体积关系柱状图如图 8 所示。由图 8 可知:深部、浅部采空区的积水体积显著小于中部采空区的积水体积。结合式 (3) 及表 3 中不同水平的巷道体积相关数据进行分析可知:在 $-550 \sim -750 \text{ m}$ 水平范围内的采空区面积显著大于其他水平范围的采空区面积;此外,矿区中部的巷道系统较其他水平更为复杂。

三河尖煤矿开采期间产生的采动裂缝会成为储水空间并储存一定量的水,此外,这些裂缝会在矿井关闭后,地下水位回升的过程中储蓄一部分地下水,据此依据下式^[30]计算该储水空间内的积水体积:

$$Q^* = \mu AH_{li} \quad (4)$$

式中: Q^* 为储水空间积水量, m^3 ; μ 为裂隙率。

三河尖主采煤层不同水平的采空区面积不一致,

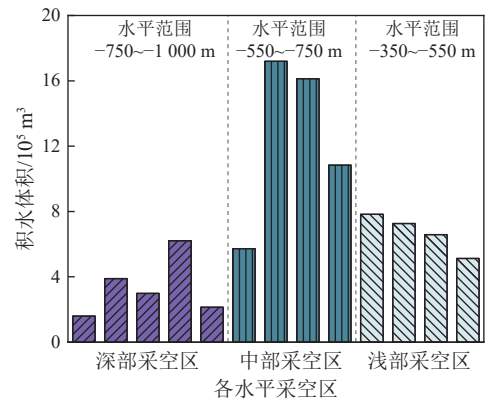


图 8 三河尖煤矿各部分采空区与积水体积关系

Fig.8 Column chart showing the relationship between different parts of goaf and water volume in Sanhejian Coal Mine

此处根据表 3 取两煤层的面积均值 (7 煤为 $8.22 \times 10^5 \text{ m}^2$ 、9 煤为 $0.73 \times 10^5 \text{ m}^2$); 依据 μ -CT 试验可得到 7 号煤和 9 号煤平均裂隙率 (分别为 1.3% 和 2.1%); 7 号煤和 9 号煤裂隙平均发育高度分别为 41.5 和 54.7 m, 由此计算得到三河尖煤矿裂隙储水空间积水体积为 $0.53 \times 10^6 \text{ m}^3$, 见表 5。

表 5 三河尖煤矿裂隙储水空间积水体积计算结果
Table 5 Calculation results of accumulated water volume in the fissure water storage space of Sanhejian coal mine

参数	主采煤层		
	7号煤	9号煤	总计
采空区面积/m ²	822 462	73 383	—
裂隙发育高度/m	41.5	54.7	—
裂隙率/%	1.3	2.1	—
积水体积/m ³	443 718	84 333	528 051

因此,煤矿内部各采空区、废弃巷道以及其他储水空间的积水总体积为 $9.88 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。

4 井下补给点涌水量变化分析

矿井生产阶段为保证安全生产,需要对其进行抽排水,从而使煤层顶底板含水层水位降低,直至疏干或部分疏干,形成以矿井为中心的降落漏斗。煤矿关闭后,停止抽排地下水,含水层水位逐渐回升。根据三河尖生产地质报告及闭坑报告,矿区的主要补给水源为煤层底板的灰岩含水层。矿井其他的充水水源包括大气降水、地表水体和含水层层间径流等,这些水源的补给过程具有季节性或不确定性的特点,对煤矿的补给贡献较小,因此不予考虑。

根据优势流原理,地下水在运移过程中,会首先选择通过最有利于水流移动的优势运移通道。因此,关闭煤矿在接受补给水源补给后,水流会首先沿巷道

系统流动,随着巷道内水位的升高,巷道与围岩之间的水力梯度会随之升高,围岩中的水位得到补给,从而围岩水位上升,如图9所示。随着巷道系统与围岩的水位上升,水力梯度逐渐减小,二者接受补给源的补给量逐渐变化^[31]。

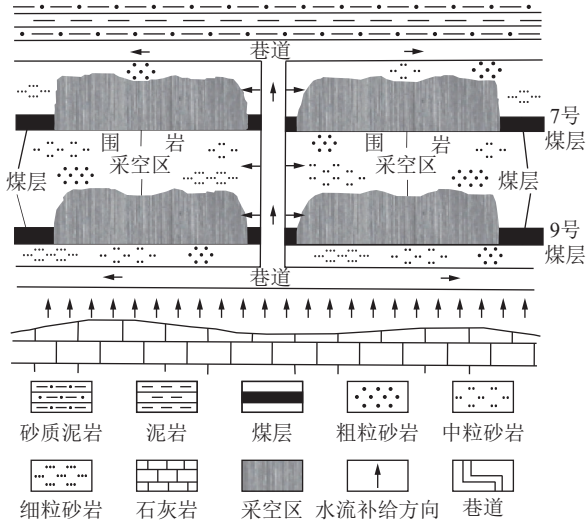


图9 三河尖关闭煤矿关闭后水位回升过程示意

Fig.9 Schematic diagram of water level rise process after the closure of Sanhejian Coal Mine

根据三河尖煤矿历年涌水量统计结果可知:关闭初期矿井涌水量为 $185.4 \text{ m}^3/\text{h}$, 矿井在生产阶段中巷道系统的突水点是重要的补给点,为地下水位的回升提供了补给水源。根据水力学与其他相关研究成果^[32-33],假定补给通道水流为圆管层流,其流速公式为

$$V = \frac{\gamma J}{32\mu} \phi^2 \quad (5)$$

断面流量为

$$Q^\# = VA = \pi \left(\frac{\phi}{2}\right)^2 \frac{\gamma J}{32\mu} \phi^2 = \frac{\pi \gamma J}{128\mu} \phi^4 \quad (6)$$

其中, $J = \frac{H_1 - H}{l}$, $\mu = \nu\rho$, $\gamma = \rho g$,代入式(5)可得:

$$Q^\# = \frac{\pi g \phi^4}{128\nu} \frac{H_1 - H}{l} \quad (7)$$

式中: $Q^\#$ 为补给点涌水量, m^3/h ; ϕ 为涌水管道等效直径, m ; ν 为地下水流运动黏滞系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; H_1 为补给源含水层处水位, m ; H 为接受补给点处水位, m ; l 为水流补给通道垂直长度, m 。

根据三河尖煤矿提供观测孔的监测数据,截至2019年3月灰岩含水层水位为 -123.23 m 。依据巷道的宽高取涌水管道等效直径为 5.4 m ;水流运动黏滞系数取 $1 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。

根据式(7),计算得到三河尖煤矿各水平涌水量,不同水平涌水量变化曲线如图10所示。由图10可

以看出,由于补给源含水层水位与积水水位的差值逐渐减小,涌水量随着积水水位的升高而逐渐降低,且在 $-350 \sim -400 \text{ m}$ 水平处的涌水量值最低,为 $134.81 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

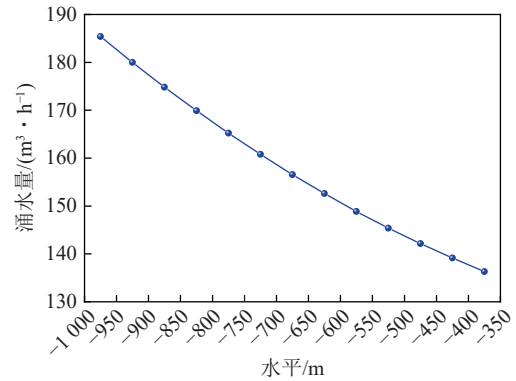


图10 不同水平涌水量变化曲线

Fig.10 Curve of water inflow variation at different levels

5 采空区积水演化过程

三河尖煤矿二叠系地层中山西组砂岩层较厚,主采煤层7号煤和9号煤的顶底板砂岩裂隙含水层有较大的地下水静储量,这些地下水是煤矿关闭以后的主要充水水源;9号煤下部距离约100m的17号煤,其部分区域煤层底板有效隔水层等效厚度较小,特别是在构造发育区域,隔水层破坏严重,容易形成充水通道,因此17号煤顶底板灰岩水也是煤矿关闭后的主要充水水源。

根据式(1)计算出三河尖矿区老窑水体即为采空区储水量。按照充水时间计算公式,可得各水平充满时间,充水时间计算公式如下:

$$t = V/q \quad (8)$$

式中: t 为积水时间, h ; V 为采空区积水体积, m^3 ; q 为矿井涌水量, m^3/h ,取值参考图10。

根据各水平采空区充水时间,绘制出三河尖煤矿闭坑后积水高度随时间变化曲线如图11所示。

根据三河尖煤矿积水高度与时间变化关系曲线斜率 k ,将 $k \leq 0.2$ 所属的阶段划分为积水中期, $k > 0.2$ 的阶段按时间先后划分为积水初期和积水后期。

1) 积水初期。由于矿井深部采空区的容积小,涌水量大,积水高度随时间变化关系曲线的斜率大,积水高度上升速度快,煤矿关闭后的积水到达矿井中部采空区所用的时间较短。

2) 积水中期。随着地下水位的上升,积水淹没深部采空区后到达中部采空区,采空区容积增大、矿井涌水量减小且该处巷道系统更加复杂,积水高度随时

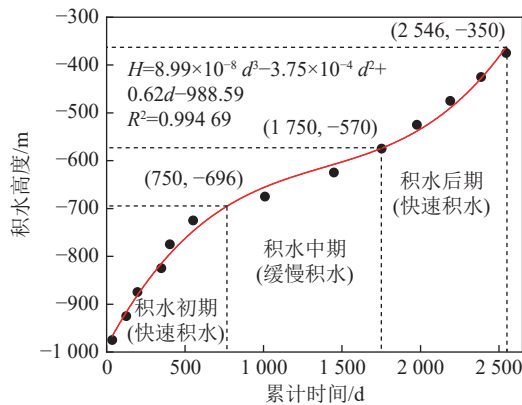


图 11 三河尖煤矿积水高度与时间变化关系曲线

Fig.11 Curve showing the relationship between water level and time variation in Sanhejian Coal Mine

间变化关系曲线变得平缓, 积水高度上升速度减慢。

3) 积水后期。积水高度随时间变化关系曲线又变陡峭, 采空区容积变小, 积水速度加快, 积水高度随时间的增加而迅速上升。预计煤矿关闭 2 546 d 后地下水水位将回升至-350 m 水平。

6 结 论

1) 三河尖煤矿煤层整体发育情况为东西高、南北低。预测矿井关闭后矿井水首先流向该矿井的南北两翼的深部采空区及巷道, 进而流经矿区东西两翼边缘区域的中部采空区, 最后到达龙固背斜与张庄断层所在的浅部采空区。

2) 三河尖关闭煤矿共计积水 $9.88 \times 10^6 \text{ m}^3$, 其中基于回采空间法计算得到三河尖关闭煤矿各煤层积水体积共计 $9.35 \times 10^6 \text{ m}^3$ (采空区积水体积为 $7.86 \times 10^6 \text{ m}^3$, 废弃巷道系统积水体积为 $1.49 \times 10^6 \text{ m}^3$); 其他储水空间积水体积为 $0.53 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。

3) 根据水力学及其他相关理论, 可计算得到三河尖关闭煤矿的各水平涌水量。涌水量随着积水水位与补给源含水层水位差值减小而逐渐降低, 在-350~ -400 m 水平, 涌水量值最低, 为 $134.81 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

4) 关闭矿井的积水过程在采空区面积、涌水量取值及废弃巷道系统复杂程度等因素影响下, 呈现积水初期快速积水、中期缓慢积水、后期快速积水的特征, 预计三河尖煤矿关闭 2 546 d 后地下水水位将回升至-350 m 水平。

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] 冯飞胜, 张继强, 王于. 中国关闭/废弃矿井的分类利用与等级评价[J]. 科技导报, 2022, 40(22): 105-112.
FENG Feisheng, ZHANG Jiqiang, WANG Yu. Classified utilization and grade evaluation of closed/abandoned mines in china[J]. Science & Technology Review, 2022, 40(22): 105-112.
[3] 张海涛, 许光泉, 陈晓晴, 等. 我国闭坑煤矿矿井水水质演化研究进展与展望[J]. 煤炭学报, 2024, 49(9): 3944-3959.
ZHANG Haitao, XU Guangquan, CHEN Xiaoqing, et al. Research progress and prospects on the water quality evolution of closed coal mine water in china[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(9): 3944-3959.
[4] 张飞燕, 纪开鑫, 韩颖. 我国关闭煤矿潜在资源分析及二次利用前景[J]. 中国煤炭, 2023, 49(1): 64-68.
ZHANG Feiyan, JI Kaixin, HAN Ying. Analysis of potential resources of closed coal mines in china and the prospect of secondary utilization[J]. China Coal, 2023, 49(1): 64-68.
[5] 康红普, 李全生, 张玉军, 等. 我国煤矿绿色开采与生态修复技术发展现状及展望[J]. 绿色矿山, 2023, 1(1): 1-24.
KANG Hongpu, LI Quansheng, ZHANG Yujun, et al. Development status and prospect of green mining and ecological restoration technology of coal mines in China[J]. Journal of Green Mine, 2023, 1(1): 1-24.
[6] 岳建华, 鲁凯亮, 张河瑞, 等. 煤矿采空区精细探查技术[J]. 绿色矿山, 2023, 1(1): 70-78.
YUE Jianhua, LU Kailiang, ZHANG Herui, et al. Fine exploration techniques for coal mine goafs[J]. Journal of Green Mine, 2023, 1(1): 70-78.
[7] 耿建军. 基于环境治理的关闭煤矿瓦斯和水资源利用探讨[J]. 中国煤炭地质, 2019, 31(4): 35-37.
GENG Jianjun. Discuss about the utilization of coal gas and water resource in closed coalmine based on environment management[J]. Coal Geology of China, 2019, 31(4): 35-37.
[8] 任辉, 吴国强, 张谷春, 等. 我国关闭/废弃矿井资源综合利用形势分析与对策研究[J]. 中国煤炭地质, 2019, 31(2): 1-6, 81.
REN Hui, WU Guoqiang, ZHANG Guchun, et al. The situation analysis and strategy research of closed/abandoned mineresources comprehensive utilization in china[J]. Coal Geology of China, 2019, 31(2): 1-6, 81.
[9] 刘汉斌, 张亚宁, 程芳琴. 山西关闭煤矿资源利用现状及开发利用建议[J]. 煤炭经济研究, 2019, 39(10): 78-82.
LIU Hanbin, ZHANG Yaning, CHENG Fangqin. Utilization status and development suggestions on closed coal mine resources in Shanxi Province[J]. Coal Economic Research, 2019, 39(10): 78-82.
[10] ADAMS R, YOUNGER P L. A strategy for modeling ground water rebound in abandoned deep mine systems[J]. Ground Water, 2001, 39(2): 249-261.
[11] 孙亚军, 陈歌, 徐智敏, 等. 我国煤矿区水环境现状及矿井水处理利用研究进展[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 304-316.
SUN Yajun, CHEN Ge, XU Zhimin, et al. Research progress of water environment, treatment and utilization in coal mining areas of china[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 304-316.
[12] 李唐山, 王权明, 曹志忠. 老窑积水威胁煤矿工作面水害综合防治

- 技术[J]. *矿业安全与环保*, 2012, 39(1): 70-71.
- LI Tangshan, WANG Quanming, CAO Zhizhong. Comprehensive prevention and control technology of water disaster in old kiln threatening coal mine working face[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2012, 39(1): 70-71.
- [13] QI T Y, ZHANG F, PEI X M, et al. Simulation research and application on response characteristics of detecting water-filled goaf by transient electromagnetic method[J]. *INTERNATIONAL JOURNAL OF COAL SCIENCE & TECHNOLOGY*, 2022, 9(1): 17.
- [14] 鲍道亮, 邱占林. 福建煤矿水害防治现状分析与对策[J]. *矿业安全与环保*, 2014, 41(1): 99-101.
- BAO Daoliang, QIU Zhanlin. Analysis of current situation and countermeasures for prevention and control of water hazards in fujian coal mines[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2014, 41(1): 99-101.
- [15] 赵鲁涛, 李丰荣, 李照源, 等. 中国绿色低碳经济政策: 进展与展望[J]. *绿色矿山*, 2023, 1(1): 128-137.
- ZHAO Lutao, LI Fengrong, LI Zhaoyuan, et al. China's green and Low-Carbon economic policies: progress and prospects[J]. *Journal of Green Mine*, 2023, 1(1): 128-137.
- [16] 武强, 刘宏磊, 曾一凡, 等. 我国绿色矿山建设现状与存在问题及对策建议[J]. *绿色矿山*, 2023, 1(1): 25-32.
- WU Qiang, LIU Honglei, ZENG Yifan, et al. Situation, challenges, and proposed strategies for green mine construction in china[J]. *Journal of Green Mine*, 2023, 1(1): 25-32.
- [17] 钱静, 易高峰, 周琦忠, 等. 三河尖关闭煤矿煤层 CO₂ 封存潜力研究[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(3): 258-268.
- QIAN Jing, YI Gaofeng, ZHOU Qizhong, et al. Study on CO₂ Sequestration potential in coal seams of Sanhejian closed coal mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(3): 258-268.
- [18] 汪善好, 刘孝刚. 三河尖煤矿吴庄区充水因素分析及防治[J]. *科技风*, 2017(23): 133.
- WANG Shan hao, LIU Xiaogang. Analysis and prevention of water-filling factors in Wuzhuang district of Sanhejian Coal Mine[J]. *Technology Wind*, 2017(23): 133.
- [19] 施亚丽. 刘桥一矿闭坑矿井地下水动态演化特征研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2021.
- SHI Yali. Study on dynamic evolution characteristics of groundwater in closed mine of Liugiao No. 1 Coal Mine[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2021.
- [20] 杨高峰, 卫金善, 杨新亮, 等. 晋城矿区凤凰山矿周边闭坑矿井水害分析及治理[J]. *煤田地质与勘探*, 2019, 47(S1): 14-19.
- YANG Gaofeng, WEI Jinshan, YANG Xinliang, et al. Analysis and treatment of water hazard in closed mines around Fenghuangshan Mine in Jincheng[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2019, 47(S1): 14-19.
- [21] 汪北方. 浅埋采空区垮落岩体储水结构特性及储水量预测研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2016.
- WANG Beifang. Study on water storage structural feature and storage prediction of caving rock in shallow goaf[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2016.
- [22] 张壮路, 闫显运, 姜茂武. 废弃矿井采空区积水过程分析[J]. *陕西煤炭*, 2004, 23(1): 12-13, 42.
- ZHANG Zhuanglu, YAN Xianyun, JIANG Maowu. Analysis on process of water accumulated in abandoned coal mine[J]. *Shaanxi Coal*, 2004, 23(1): 12-13, 42.
- [23] 毕尧山, 吴基文, 王广涛等. 闭坑矿井采空区积水过程分析[J]. *工矿自动化*, 2018, 44(6): 52-56.
- BI Yaoshan, WU Jiwen, WANG Guangtao, et al. Analysis of water-filling process in goaf of closed mine[J]. *Journal of Mine Automation*, 2018, 44(6): 52-56.
- [24] 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 中国地质调查局, 中国矿业大学(北京), 华北有色工程勘察院有限公司, 中国煤炭地质总局水文地质局. 矿区水文地质工程地质勘查规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [25] 国家煤炭安全监察局. 煤矿防治水细则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [26] 温思南. 采空区积水量计算方法研究与应用[J]. *能源与节能*, 2019(12): 180-181.
- WEN Sinan. Research and application of calculation method for goaf water accumulation quantity[J]. *Energy and Energy Conservation*, 2019(12): 180-181.
- [27] 熊崇山, 王家臣. 矿井采空区积水量的研究[J]. *矿业安全与环保*, 2005, 32(2): 10-11, 81.
- XIONG Chongshan, WANG Jiachen. Research on water accumulating volume in mine gob[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2005, 32(2): 10-11, 81.
- [28] 李思标, 李迪昌, 孔令珍等. 关于充水系数的取值问题[J]. *煤炭科学技术*, 2002, 30(9): 53-54.
- LI Sibiao, LI Dichang, KONG Lingzhen, et al. On the value of water filling coefficient[J]. *Coal Science and Technology*, 2002, 30(9): 53-54.
- [29] 国家安全生产监督管理总局, 国家煤矿安全监察局. 煤矿安全规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [30] 方杰, 宋洪庆, 徐建建等. 考虑有效应力影响的煤矿地下水库储水系数计算模型[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(12): 3750-3759.
- FANG Jie, SONG Hongqing, XU Jianjian, et al. Storage coefficient calculation model of coal mine underground reservoir considering effect of effective stress[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(12): 3750-3759.
- [31] 孙婷婷. 峰峰矿区泉头矿闭井后水位恢复过程及其对区域地下水影响研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
- SUN Tingting. Groundwater rebound of quantou mine after abandoned in Fengfeng Mining Area and its impacts on regional groundwater[D]. Beijing: China University of Geosciences Beijing, 2014.
- [32] 潘国营, 邓清海, 闫芙蓉. 预测矿坑突水量的广义三重空隙介质渗流模型[J]. *煤炭学报*, 2003, 28(5): 509-512.
- PAN Guoying, DENG Qinghai, YAN Furong. Generalized triple porosity media flow model for calculating mine karst - fracture water bursting discharge[J]. *Journal of China Coal Society*, 2003, 28(5): 509-512.
- [33] 尹尚先. 煤矿区突(涌)水系统分析模拟及应用[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2002.
- YIN Shangxian. Analysis, Simulation, and application of water inrush system in mine area[D]. Beijing: China University of Mining and Technology-Beijing, 2002.