

榆神矿区中深煤层开采松散含水层地下连续墙侧向截水帷幕可行性分析

赵春虎^{1,2,3}, 王世东^{1,2,3}, 姬中奎^{1,2,3}, 朱开鹏^{1,2,3}, 梁向阳^{1,2,3}

(1. 中煤科工西安研究院(集团)有限公司, 西安 710077; 2. 煤矿灾害防控全国重点实验室, 陕西 西安 710077;
3. 陕西省煤矿水害防治技术重点实验室, 西安 710077)

摘 要:榆神矿区是陕北煤炭基地的主力矿区, 高强度煤炭资源开发过程中煤层顶板水害与地下水资源流失问题突出, 随着黄河流域生态环境保护战略的全面推进, 对矿井水防治与水资源保护提出了超前化、主动化、源头化的地质保障要求。笔者针对陕北榆神矿区井工煤矿煤层开采影响下近地表富水松散含水层涌(失)水问题, 借鉴露天大水矿区地下连续墙的帷幕减渗成功经验, 从稳定的补给水源、相对集中补给通道、防绕流托底 3 个方面总结了煤矿区开展地下水连续墙截水帷幕的基本条件; 通过建立井工煤矿开采与松散富水含水层帷幕条件下矿井涌水量理论计算模型, 得出截水帷幕墙体渗透能力越弱、厚度越大, 以及距离采掘范围越近是减少煤层顶板近地表松散含水层涌(失)水的基本原理。以榆神矿区某矿工作面集中涌水问题为研究对象, 依据井工煤矿地下水连续墙帷幕减渗基本原理, 分析得出工作面集中涌水区段主要水源以近地表松散含水层地下水为主, 且具备稳定可观的动态补给, 煤层开采形成的导水裂隙突破顶板隔水土层揭露松散层内条带状古河道(古河道内隔水土层变薄、松散层增厚), 形成了相对集中的涌水通道, 以及在“上含下隔”(上为富水松散含水层, 下为相对隔水土层)的防绕流托底组合结构下, 认为该区段具有建造侧向截水帷幕墙的可行性。并建立了案例矿井正常开采与侧向帷幕墙建设条件下地下水系统数值模型, 模拟结果显示, 在工作面外围局部侧向帷幕工况下(侧向帷幕墙体长度 600 m), 帷幕墙体内外松散含水层地下水水位梯度显著加剧, 但由于松散含水层良好的渗透性, 以及井田地面东高西低地形地貌控水条件, 帷幕墙体外围近地表松散层地下水水位整体未发生明显抬升, 原来通过薄基岩区、松散层增厚带进入工作面采空区的地下水径流量沿帷幕墙体外围导流至下游, 600 m 长侧向截水帷幕整体减水效率 28.43%。研究成果为榆神矿区井工煤矿开展基于侧向截水帷幕的顶板水害防治与地下水资源保护可行性分析提供了科学依据。

关键词:顶板水害; 导水裂隙; 充水条件; 截水帷幕; 保水开采

中图分类号:TD32 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2025)02-1055-11

Feasibility analysis of lateral water interception curtain in loose aquifer during deep coal seam mining in Yushen mining area

ZHAO Chunhu^{1,2,3}, WANG Shidong^{1,2,3}, JI Zhongkui^{1,2,3}, ZHU Kaipeng^{1,2,3}, LIANG Xiangyang^{1,2,3}

收稿日期: 2024-04-25 策划编辑: 韩晋平 责任编辑: 李雅楠 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.0457

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(52474278); 中国煤炭科工集团科技创新资助项目(2024-TD-ZD009; 2023-TD-MS016)

作者简介: 赵春虎(1981—), 男, 汉族, 陕西扶风人, 博士, 研究员。E-mail: zhaochunhu@cctegxian.com

引用格式: 赵春虎, 王世东, 姬中奎, 等. 榆神矿区中深煤层开采松散含水层地下连续墙侧向截水帷幕可行性分析[J]. 煤炭学报, 2025, 50(2): 1055-1065.

ZHAO Chunhu, WANG Shidong, JI Zhongkui, et al. Feasibility analysis of lateral water interception curtain in loose aquifer during deep coal seam mining in Yushen mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(2): 1055-1065.



移动阅读

(1. CCTEG Xi'an Research Institute (Group) Co., Ltd., Xi'an 710077, China; 2. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Prevention and Control, Xi'an 710077, China; 3. Shaanxi Key Laboratory of Prevention and Control Technology for Coal Mine Water Hazard, Xi'an 710077, China)

Abstract: Yushen mining area is the main mining area of the coal base in northern Shaanxi at present. During the development of high-intensity coal resources, the problems of coal seam roof water disaster and water resource leakage are prominent. With the comprehensive promotion of the ecological environment protection strategy in the Yellow River Basin, advanced, proactive, and source oriented geological guarantee requirements have been put forward for mine water prevention and water resource protection. The article focuses on the problem of water inrush (loss) in the loose water bearing layer near the surface under the influence of underground coal mining in Yushen mining area, Shaanxi Province. Drawing on the successful experience of curtain seepage reduction in open-pit large water mining areas, the article summarizes the basic conditions for carrying out underground continuous wall water interception curtains in coal mining areas from three aspects: stable supply water sources, relatively concentrated supply channels, and the waterproof layer conditions to prevent groundwater from flowing around; a theoretical model of water inflow under the condition of loose water rich aquifer curtain in underground coal mines is established. It is concluded that the weaker the permeability and thickness of the cut-off curtain wall, and the closer it is to the mining range, are the basic principles for reducing water inrush in the loose aquifer near the surface of the coal seam roof. Taking the problem of concentrated water inflow in a coal mining face in Yushen mining area as the research object, based on the basic principle of groundwater continuous wall curtain seepage reduction, it is analyzed that the main water source in the concentrated water inflow section of the working face is the loose aquifer groundwater near the surface, which has stable and observable dynamic recharge. The water conducting cracks formed by coal seam mining break through the roof waterproof soil layer and expose the strip-shaped ancient river channel inside the loose layer (the waterproof soil layer inside the ancient river channel becomes thinner and the loose layer becomes thicker), forming a relatively concentrated water inflow channel. Under the combination structure of "upper aquifer and lower barrier" (the upper layer is the rich water loose aquifer, and the lower layer is the relatively waterproof soil layer), it is believed that this section has the feasibility of constructing a lateral waterproof curtain wall. And a numerical model of the groundwater system was established for the working face under normal mining and curtain wall construction conditions. The simulation results showed that under local curtain wall conditions around the working face, the groundwater level gradient in the loose aquifer around the curtain wall was significantly intensified. However, due to the good permeability of the loose aquifer and the low terrain and water control conditions of the mining field, the groundwater level in the loose layer near the ground did not significantly rise. The groundwater runoff that entered the goaf through the thin bed-rock area and the thickened strip of the loose layer was diverted downstream, and the overall water reduction rate under the construction conditions of a 600 m long lateral cut-off curtain wall is 28.43%. The research results of the article provide a scientific basis for the feasibility analysis of roof water damage prevention and groundwater resource protection based on water interception curtains in the Jinggong Coal Mine of Yushen Mining Area.

Key words: Roof water damage; Water conducting cracks; Water filling conditions; Water interception curtain; Water conservation mining

0 引 言

榆神矿区是我国陕北煤炭基地的主力矿区^[1],地处西部干旱与半干旱地区,毛乌素沙漠与陕北黄土高原的接壤地带,水资源贫乏,生态环境脆弱^[2]。特别在榆神矿区中深部赋煤区(埋深一般为200~300 m),受区域沉积环境、地层风化、剥蚀等地质作用控制,煤层顶板分布厚度稳定(一般>30 m)富水性好的第四系松散含水层、侏罗系风化基岩裂隙含水层^[3],保德组红土与离石组黄土相对隔水层空间厚度变化大甚至

局部缺失^[4-5]。高强度煤层开采形成的采动导水裂隙易突破煤层顶板风化基岩甚至隔水关键层(保德组红土与离石组黄土层)^[6-7],导致富水性好的第四系松散含水层、侏罗系风化基岩裂隙含水层地下水沿采动裂隙直接或间接进入采煤工作面^[8],往往形成严重的顶板水害问题^[9],如榆神矿区中部的锦界、金鸡滩、曹家滩等煤矿,矿井正常涌水量均超1 000 m³/h,矿井的大量涌水、高强度排水加剧了矿区水资源短缺及生态环境的负面响应^[10]。

生态脆弱区煤炭资源开发过程保护具有生态意

义、供水意义含水层水位是保水采煤的核心^[11]。煤层开采扰动形成的采动导水裂隙是引起矿井大量涌水与含水层水资源漏失的主要通道,目前针对煤层顶板水害主要以预先疏降(干)含水层中的地下水为主要手段,存在疏水钻探工程量大、排水强度高、水资源浪费等问题^[12]。保水技术措施主要以“分层^[13]、限高^[14]、条带^[15]、充填^[6,16]”等采煤工艺优化为主,取得了良好的地下水资源保护效果,但极大的影响着煤炭产量。相关行业专家也开展了“地下水库^[17]、转移存贮^[18]、深层回灌^[19]”等矿井水保护的工程实践,这与地下水资源原位保护需求存在差距。2024年02月23日,国家发展改革委联合水利部、自然资源部、生态环境部等8部委发布了《国家发展改革委等部门关于加强矿井水保护和利用的指导意见》(发改环资〔2024〕226号),对矿山开采形成的矿井水保护提出了“推行源头控制”以及“鼓励采用特殊开采工艺,推广含水层侧向帷幕截流、透水天窗和隔水薄弱区修复治理等,减少主要含水层的地下水流失”等指导意见。可见,随着智能化、绿色化矿井建设与生产全面推广实施,对煤矿防治水与矿区水资源保护提出了超前化、主动化、源头化的地质保障要求^[20-21]。

煤矿区强补给强富水的含水层通常难以疏排,矿井水防治一般存在疏水工程量大、排水量大、排水费用高、水资源浪费等问题。为解决大水矿山的安全开采和水资源浪费问题,自20世纪60年代开始水利、建筑等行业针对富水岩溶裂隙、松散孔隙等强渗岩层进行截水帷幕技术与工程实施,帷幕技术由单一的地面直钻孔注浆发展为地面定向钻孔注浆、井上下联合钻孔注浆、连续墙、防渗膜等多种截水帷幕技术^[22]。近年来基于地下连续墙的侧向帷幕截水技术已成功应用于内蒙古大雁扎尼河、元宝山等露天大水矿区的矿井水源头控制的工程实践中,截水效果均在90%以上^[23-24],而煤矿区截水帷幕建设具有工程量大(一般长度大于1 km)、有效墙体高度受限(受地面液压抓斗和液压双轮铣配合成槽技术能力限制,地面成槽建立帷幕墙深度一般小于100 m)、一次投资费用高(每公里投资费用在5 000万元以上)等特点,科学分析煤矿区地下连续墙截水帷幕效果是方案设计重要基础。

笔者针对榆神中深部矿区煤层开采面临的顶板水害防治与水资源协同保护技术需求,充分借鉴露天煤矿区地下连续墙截水帷幕技术优势,通过分析地下连续墙截水帷幕建设基本条件,根据含水层地下水渗流理论,建立了井工煤矿开采与松散富水含水层地下连续墙截水帷幕墙截条件下矿井涌水理论分析模型,

并以榆神矿区某矿采煤工作面煤层顶板涌水问题为研究对象,通过分析工作面煤层开采影响下集中涌水区段煤层顶板松散含水层涌水模式,从井工煤矿地下连续帷幕墙体建设技术适用条件、截水帷幕减水效果等角度开展地下连续墙截水帷幕的可行性分析,以期为我国西部矿区顶板水害防治和水资源协同保护实践提供借鉴。

1 地下连续墙截水帷幕基本原理

1.1 基本条件

煤矿开采主要充水水源为强补给强渗含水层是难以实现疏干治理^[26],传统群井疏降排水存在水资源浪费严重、疏排强度大、经济合理性不高等问题,基于地下连续墙的帷幕减水技术在强富水补给含水层中的应用适宜性好。煤矿区建设基于地下连续墙的截水帷幕墙体一般具备以下基本条件^[26-27]:

1) 具备稳定可观的动态补给源。如内蒙古呼伦贝尔大雁矿区扎尼河露天矿,由于近地表富水性好的松散含水层接受海拉尔河补给充分,先后共施工67眼疏干井,矿坑疏排强度一直稳定在16.5万m³/d左右,2018年开始施工6.3 km帷幕阻水墙,建成后减少了80%以上的疏排水量^[28]。陕西张家峁井田煤层顶板烧变岩含水层受地表常家沟水库地表水体充分补给,针对富水烧变岩层开展了钻孔注浆帷幕工程后,回采期间工作面涌水量均小于5 m³/h^[24]。安徽淮北朱仙庄煤矿煤层顶板渗透性强的砂砾岩含水层,通过区域导水断层受煤层底板高承压富水性好奥灰岩溶水补给充分,从2016年开始施工4 km帷幕阻水墙后,回采工作面涌水量减少了80%以上^[29]。

2) 具有相对明确和集中的补给通道。如扎尼河、元宝山露天煤矿矿坑水主要是由于周边地表河流通过渗透性好地表松散层进入矿坑,陕北张家峁井工煤矿矿井涌水主要是由于井田边界水库通过渗透性好烧变岩露头进入矿井。

3) 具备防绕流托底条件。帷幕底界须进入相对渗透能力低的相对隔水层内部,以最大程度降低底部绕流风险,即主要充水含水层底板应为渗透性差、分布稳定的相对隔水层,一般上部含水层渗透能力一般高于下部相对隔水层2个数量级以上,且截渗目标层埋藏深度一般要小于80 m,大量帷幕截水工程表明,80 m以深富水弱胶结地层开挖难度大、泥浆护壁难度大,截水防渗膜垂向叠覆铺设难以实现^[30]。

1.2 井工煤矿地下连续墙截水帷幕基本原理

不同于露天煤矿直接剥离造成的强渗强富水含水层的大量涌水,井工煤矿开采煤层顶板采动导水裂

隙揭露近地表强渗含水层是引起矿井大量涌水与地下水资源漏失的主要通道。

如图 1a 所示,根据地下水达西渗流理论,为了便于分析将采空区所在的水文地质单元与采掘形成采空区范围概化为圆形,近地表松散含水层在影响半径 R_0 之外可概化为定水头边界,则井工煤矿矿井涌水主要由将近地表松散含水层侧向排泄,以及水文地质单元大气降水入渗补给两部分组成:

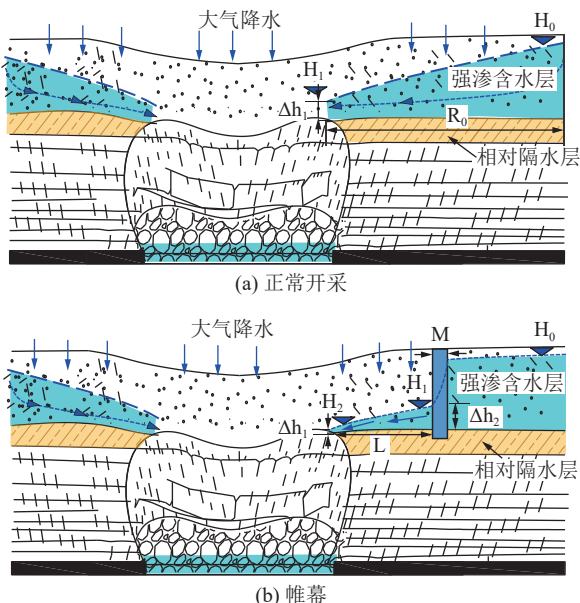


图 1 煤矿正常开采与帷幕条件下地下水流场

Fig.1 Schematic diagram of groundwater flow field between open pit and surface water

其中,以采空区为中心的松散含水层的侧向排泄量=含水层渗透系数 (K)×水力梯度 (H_0-H_1)/ R_0 ×过水断面面积 ($\Delta h_1 \cdot 2\pi r$)。

大气降水补给量=水文地质单元面积 (πR_0^2)×降水入渗系数 (α)。

即矿井单宽涌水量即为

$$Q = K \times \Delta h_1 (H_0 - H_1) / R_0 + R_1^2 \times \alpha / 2 * r \quad (1)$$

式中: K 为松散含水层渗透系数, m/h ; H_0 、 H_1 为含水层外围水位和导水裂隙揭露处的水位, m ; R_0 为矿井涌水形成的影响半径, m ; R_1 为开采区所在水文地质单元范围的概化半径, m ; r 为形成采空区范围的概化半径, m ; α 为近地表松散含水层的大气降水入渗系数, 无量纲。

由式 (1) 可见,当煤层开采形成的导水裂隙揭露近地表强渗含水层时,近地表松散含水层水位 H_0 越高、渗透系数 K 越大、影响半径 R_0 越小,大气降水能力 α 越强,以及开采区所在水文地质单元范围 R_1 越大,则近地表松散含水层涌水量越大。

如图 1b 所示,在地下连续帷幕墙建设条件下,矿井单宽涌水量主要由帷幕墙体的单宽残余渗漏量与帷幕墙内大气降水入渗补给两部分组成:

$$Q = K_s \times \Delta h_1 \times (H_0 - H_1) / M + L^2 \times \alpha / 2 \times r \quad (2)$$

式中: K_s 分别为帷幕墙与含水层的渗透系数, m/h ; M 为帷幕墙厚度, m ; H_0 、 H_1 为帷幕墙内外的含水层水位, m ; L 为开采区域距离帷幕墙体的距离, m 。

由式 (2) 可见,在地下连续帷幕墙建设条件下,帷幕墙厚度 M 越大、渗透系数 K_s 越小,通过帷幕墙残余渗漏量越小,以及开采区域距离帷幕墙体的距离 L 越近,则大气降水补给强度越低。

因此,施工的帷幕墙体渗透能力越弱、厚度越大,以及距离采掘范围近是减少煤层顶板强渗含水层涌(失)水的基本原理。

2 案例矿井概况

2.1 地质与水文地质概况

案例矿井位于榆神矿区一期,井田内地势平坦开阔,地表为典型的风成沙丘及滩地地貌。矿区地层总体表现为向北西缓倾的单斜,地质构造相对简单。案例矿井内大部分地区被第四系沙层所覆盖,如图 2 所示,井田含煤地层为侏罗系中统延安组 (J_{2y}),煤层覆

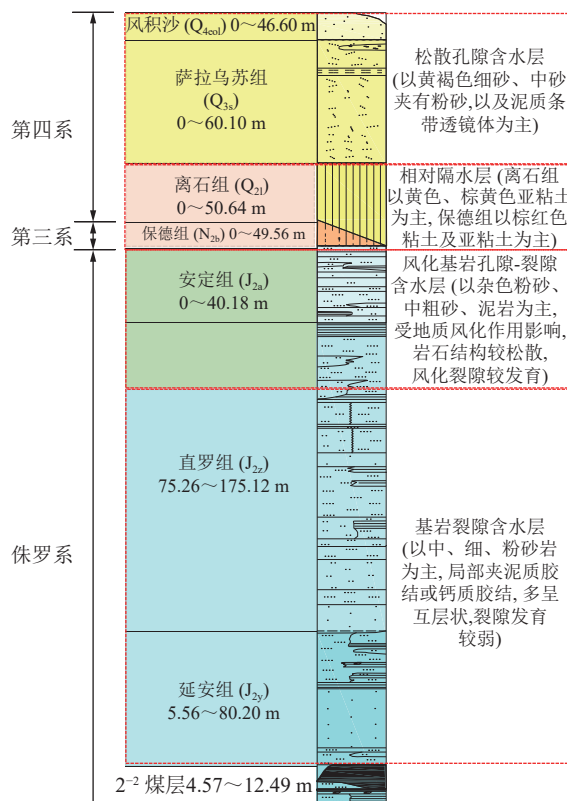


图 2 主采煤层顶板综合水文地质柱状示意图

Fig.2 Comprehensive hydrogeological column diagram of coal seam roof

岩由下至上依次为侏罗系直罗组 (J_{2z}), 新近系保德组 (N_{2b}), 第四系离石组 (Q_{2l}), 第四系萨拉乌苏组 (Q_{3s}), 以及风积层 (Q_{4eol})。由于地层剥蚀, 新近系保德组 (N_{2b}) 在井田大面积缺失, 第四系离石组 (Q_{2l}) 分布较为稳定。

根据矿区主采煤层覆岩的地层岩性, 以及地层剥蚀、风化等作用, 井田内主要含、隔水层划分为第四系上更新统萨拉乌苏组与全新统风积沙松散孔隙含水层、第四系离石组黄土与新近系保德组红土相对隔水层、侏罗系风化基岩孔隙裂隙含水层, 以及正常基岩裂隙含水层等。

1) 松散潜水含水层。主要为第四系上更新统萨拉乌苏组 (Q_{3s}) 与全新统风积沙 (Q_{4eol}) 孔隙潜水含水层, 在井田内大部分布, 地面多被风积沙掩盖, 并以滩地的形式出露。由于岩层结构松散、地表地形平缓, 极易接受大气降水补给, 风积沙与萨拉乌苏组累计厚度一般 20 m~50 m, 渗透系数在 3.5 m/d~15.42 m/d 之间, 富水性中~极强。其中萨拉乌苏组 (Q_{3s}) 潜水含水层是区域唯一具有供水意义和重要生态价值的含水层, 为矿区保水采煤的目标保护层。

2) 相对隔水层。松散含水层底部的第四系离石组黄土 (Q_{2l}) 与新近系保德组红土层 (N_{2b}) 是实现松散含水层地下水资源保护的阻水关键层。其中井田内离石组黄土层基本遍布全区, 厚度 0~50.64 m, 平均 17.18 m。岩性以黄色、棕黄色亚粘土为主, 局部夹流砂、亚砂土。而新近系保德组红土层在沉积过程中受降水、风和线状流水等地质营力共同作用, 局部地段被剥蚀, 井田内呈片状分布, 厚度 0~49.56 m, 岩性为浅红色、棕红色粘土及亚粘土, 为良好的隔水层。

3) 风化基岩孔隙-裂隙承压含水层。新近系土层底部的侏罗系基岩顶部岩层沉积过程中受地质风化作用影响, 结构相对杂乱, 松软易碎, 井田主要发育地层层段为侏罗系安定组 (J_{2a}) 全段, 以及直罗组上部 (J_{2z})。岩性主要以杂色的粉砂岩、泥岩、中粗粒砂岩为主, 岩石结构较松散, 裂隙较发育, 厚度 5~70 m, 渗透系数在 0.03~1.5 m/d, 富水性弱~中等。

4) 正常基岩裂隙承压含水层。由于侏罗系安定组 (J_{2a}) 在井田大面积缺失, 基岩裂隙含水层组, 主要是指煤层上覆延安组 (J_{2y})、直罗组 (J_{2z}) 的正常基岩地层, 渗透系数在 0.007~0.23 m/d, 含水层富水性普遍较弱。

2.2 矿井涌水概况

案例矿井采用一次采全高综合机械化采煤法主开采 2^{-2} 煤层, 煤层厚度 4.57~12.49 m, 平均达 8.03 m, 埋深 213.95 m~286.67 m, 平均 247.39 m, 属于典型的中等埋深煤层。据实测, 案例矿井 2^{-2} 煤层裂采比为

20.76(采动导水裂隙高度与采厚的比值)。

如图 3 所示, 案例矿井近年来主要采掘东翼井田, 其中先期回采的东翼 101、103、123 工作面采用分层开采工艺 (上分层采高为 6 m, 下分层尚未开采), 117、115、113 工作面依次采用综放开采工艺, 矿井正常涌水量稳定在 1 900 m³/h(2023 年), 案例矿井煤层顶板涌水问题突出, 排水负担与经济压力大, 特别在黄河流域生态保护和高质量发展、《国家发展改革委等部门关于加强矿井水保护和利用的指导意见》等新形势下, 矿井水源头控制亟待开展。

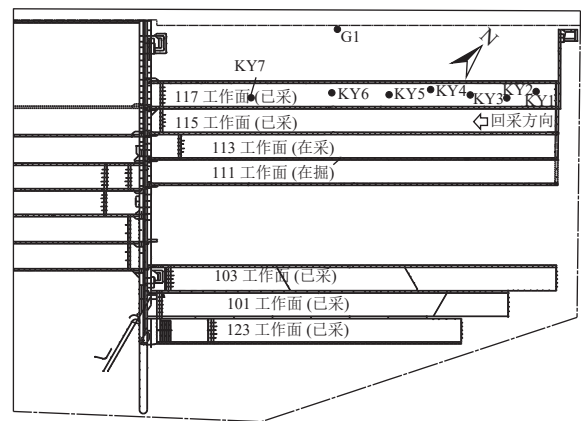


图3 案例矿井一盘区东翼工作面划分示意

Fig.3 Schematic diagram of coal mining face division in Jinjitan coal mine

3 工作面涌水模式与截水帷幕可行性分析

3.1 工作面涌水模式

案例矿井近年来主要采掘东翼井田, 其中 117、115、113 工作面依次采用综放开采工艺, 其中 117 工作面位于东翼采区边界, 煤层顶板基岩相对较薄、局部松散厚度大、富水性好, 是矿井涌水量最大的工作面。因此本节依据井工煤矿地下连续截水帷幕墙体建设基本技术条件, 分析该工作面的截水帷幕可行性。

1) 涌水来源。案例井田近地表第四系上更新统萨拉乌苏组 (Q_{3s}) 与全新统风积沙 (Q_{4eol}) 松散孔隙潜水含水层, 由于岩层结构松散、地表地形平缓, 极易接受大气降水补给, 厚度一般 20~50 m, 富水性中~极强。根据案例矿井 117 工作面实际采掘, 如图 4 所示, 回采至 2 200~2 600 m 段时, 工作面涌水量急剧增大, 涌水量由 320 m³/h 快速增至 800 m³/h 左右, 随后又趋于缓增状态。同时涌水量增大区段上覆松散含水层水文孔 (KY6) 水位出现了协同快速下降, 随后又趋于缓慢下降, 周边风化基岩、正常基岩含水层水文孔水位基本未发生变化。通过在已回采的 113 工作面联

巷密闭墙泄水孔取样测试,该工作面矿井水矿化度为2 052~2 380 mg/L,而在117工作面集中涌水区段联巷密闭墙泄水孔取样测试的矿井水矿化度一般为750~1 359 mg/L,明显小于113工作面。因此,根据117工作面回采期间涌水量变化、近地表松散层与风化基岩含水层水位变化,以及矿井水水化学差异,说明松散含水层地下水在此区段构成涌水重要的直接充水水源。根据水量增加幅度分析,测算该地段顶板涌水松散含水层地下水稳定占比约60%左右。

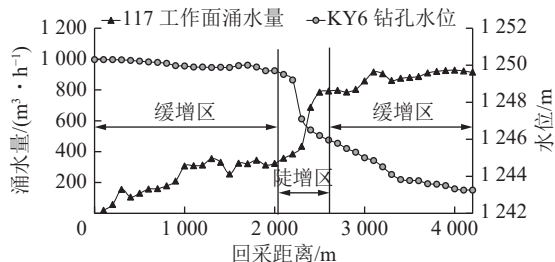


图4 案例矿井工作面涌水量与钻孔潜水位曲线

Fig.4 Curve of water inflow from coal mining face and borehole groundwater level in case mine

2) 涌水通道。如图5所示,井田地面整体标高为东高、西低,地形整体向榆溪河倾斜,但井田地面波状起伏、河道地形不明显,局部最大高差一般小于2 m,周边主要常年性河流为三道河则,在井田内过度为季节性河流,受地形地貌控制,近地表松散潜水含水层地下水与地表水体(三道河则)为典型的地下水补给地表水补排关系,最终汇流至榆溪河内。通过绘制松散层厚度等值线与底板标高等值线图,发现在117工作面涌水量急剧增大的2 200~2 600 m区段外围,如图6a所示,松散层厚度局部明显变厚(大于50 m),且厚度增加区整体呈条带状分布,条带内外厚度变化在20 m以上,松散层增厚区底板标高亦呈条带分布,其空间位置基本与地面三道河则(河道)基本一致,整体表现出地表地形平缓,而地面以下古河道内松散层厚度大,因此在整体地形地貌与松散层下垫面古河道局部控制下,松散潜水含水层地下水具有沿古河道向井田外三道河则集中径流排泄的水文地质特征(图6b)。

而在开采扰动下,由于117工作面靠近三道河则古河道,且在工作面2 200~2 600 m区段存在古河道分叉,松散含水层厚度明显变厚(从一般厚度25 m增加至50 m左右),而煤层与松散含水层的间距变小(间距从180 m减少至160 m)。矿井煤层开采实测裂采比为20.76,该工作面采高约为8 m,计算得出导水裂隙高度166.08 m,因此在117工作面外侧松散层显著增厚区、土层相对变薄区(即古河道分叉处),采动

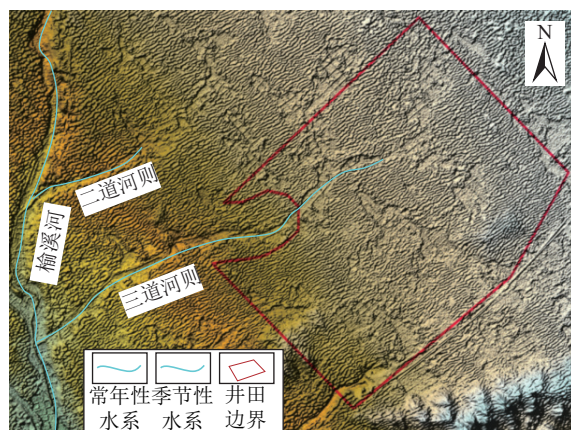
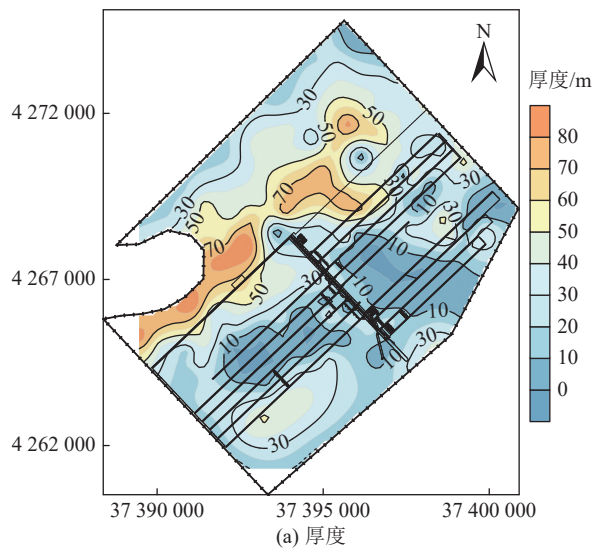
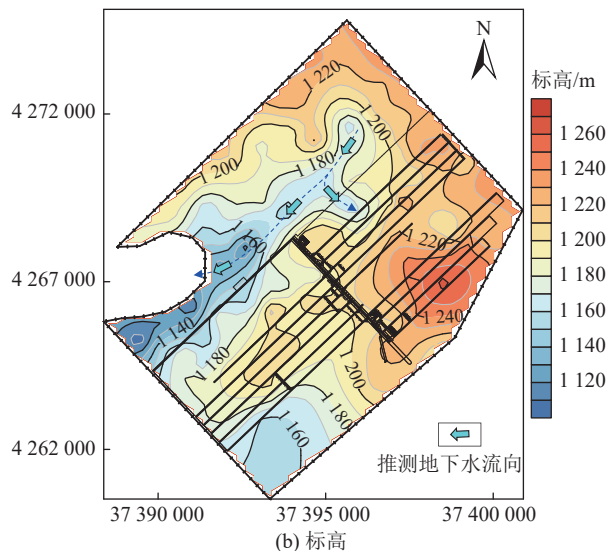


图5 井田地形地貌图

Fig.5 Landform Map of Coal Mine



(a) 厚度



(b) 标高

图6 井田松散层厚度与底板标高等值线图

Fig.6 Contour map of loose layer thickness and bottom plate elevation

导水裂隙局部突破相对隔水土层已进入富水性好补给能力强的松散含水层内,导致了117工作面在该区

段涌水量显著增加。

3) 涌水模式。综合矿井 117 工作面 2 200~2 600 m 回采段涌水来源和涌水通道分析, 近地表富水松散层地下水是主要充水水源, 煤层采动导水裂隙突破基岩与相对隔水土层厚度变薄区、连通古河道富水松散层是构成大量涌水主要通道。而且, 当采动导水裂隙直接揭露富水松散含水层后, 含水层水位快速下降, 在工作面局部形成降落漏斗, 导致古河道内的分叉处松散层地下水流向发生改变, 局部形成了富水松散层地下水沿古河道分叉集中向采空区排泄的水文地质特征 (图 6b), 即形成富水松散层 (充水水源)—采动导水裂隙与古河道 (充水通道) 为组合特征的工作面集中涌水模式 (图 7)。

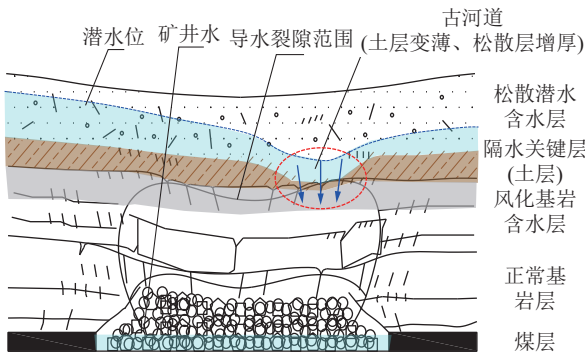


图 7 案例矿井工作面集中涌水模式

Fig.7 Contour map of loose layer thickness and bottom plate elevation

3.2 截水帷幕技术可行性分析

根据井工煤矿地下连续墙截水帷幕基本原理, 从稳定可观的动态补给源、相对明确集中的补给通道, 以及防绕流托底条件 3 个方面分析案例矿井集中涌水区段的地下连续墙截水帷幕的技术可行性。

1) 近地表富水松散层地下水是 117 工作面 2 200~2 600 m 回采段主要涌水来源, 由于该含水层富水性好, 分布范围广, 而且古河道区厚度大, 在采掘扰动下由于形成降落漏斗, 局部地下水流向发生逆转, 袭夺了一部分松散含水层向下游地表水体 (三道河则) 排泄量, 可见构成该区段涌水增加的充水含水层地下水具备稳定可观的动态补给源。

2) 117 工作面采掘扰动下, 煤层采动导水裂隙突破隔水层厚度变薄区, 连通古河道富水松散层是构成大量持续涌水主要通道, 可见在工作面局部条带装的古河道处松散层地下水具有相对集中的涌水通道。

3) 井田第四系上更新统萨拉乌苏组 (Q_{3s}) 与全新统风积沙 (Q_{4col}) 松散孔隙潜水含水层, 井田内大部分分布, 井田 17 个钻孔抽水试验显示, 渗透系数一般 3.5~15.42 m/d, 平均为 7.23 m/d, 富水性中~极强。

下伏黄土层基本全区分布, 平均厚度 17.18 m, 矿井对 10 组土层天然渗透性进行了室内测试, 离石黄土测定的天然渗透系数平均为 0.004 87 m/d 在天然状态下具有良好的隔水性。可见上部含水层 (松散层) 渗透能力高于下部相对隔水层 (黄土层) 3 个数量级以上。另外, 117 工作面古河道分叉处土层最大埋深小于 60 m, 具有落地建造截水帷幕墙的可行性。

综合分析, 117 工作面矿井涌水量主要地下水具备稳定可观的动态补给源, 相对集中的补给通道, 以及上下隔渗透性差异大, 具有建造截水帷幕墙的可行性。

4 截水帷幕墙数值仿真预测分析

4.1 模型构建

为进一步分析帷幕墙建造截水效果, 根据井田水文地质条件, 如图 8 所示, 构建矿井三维地下水系统模拟数值模型。模型在垂向上按照含隔水层空间分布剖分为松散含水层、土层、风化基岩与正常基岩含水层, 以及煤层合计 5 层, 其中近地表松散含水层直接接受大气降水补给和蒸发, 概化为潜水面边界, 底部边界煤层富水性差, 与近地表松散含水层渗透性能差异大, 将模型底板概化为零通量边界。模型西侧以榆溪河为河流边界, 河流水位以地表水体标高为准, 模型东北侧由于距离开采区域较远, 地下水位稳定, 模型根据水文孔水位实际观测值, 定义为一般水头边界, 其它以近地表局部分水岭概化为二类“零”通量边界。

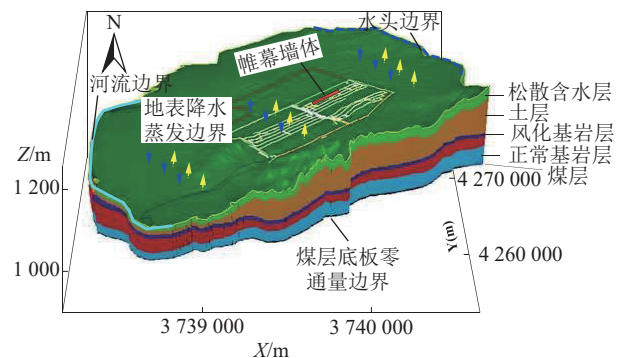


图 8 研究区地质模型

Fig.8 geological model of the research area

被采动导水裂隙直接揭露的含水层, 在采动导水裂隙与揭露含水层接触带上, 形成了含水层地下水排泄“带”, 地下水沿排泄“带”涌入采空区形成了较为稳定的矿井正常涌水, 造成地下水水位在排泄“带”处下降至该含水层底板, 其水位高度基本等于该处的含水层底板标高。从水文地质条件概化的角度, 根据笔

者前期提出的导水裂缝接触带数值化处理方法,将采动导水裂隙与揭露含水层接触面处理为地下水运动的“内边界”^[31-32],其水头高度 H 近似等于该处的位置水头标高 (Hz)。模型中大气降水、蒸发等模型参数以研究区平水年数据为准。

另外,在正常开采地下水系统数值模型的基础上,在 117 工作面 2 200~2 600 m 区段外围的古河道处,采用 MODFLOW 中的“wall”边界模块,将 117 工作面外侧垂直与松散层显著增厚与基岩变薄条带 (古河道分叉处) 数值处理成帷幕墙体边界,帷幕墙体长度按照 600 m 设计,受地面液压抓斗和液压双轮洗配合成槽工艺限制,一般成槽宽度为 0.6~1.2 m,借鉴目前元宝山、扎尼河等露天矿区地下连续墙帷幕工程成功经验,墙体厚度设计为 0.8 m,墙体下端进入土层内部。根据《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120-2012),地下连续墙用于截水时,截水帷幕搭接处最小厚度应满足抗渗要求的同时,渗透系数宜小于 1×10^{-6} cm/s,即墙体渗透系数设置为 0.00864 m/d,构建出帷幕墙建设条件下地下水系统数值模型 (表 1)。

表 1 截水帷幕墙数值模型主要参数表

Table 1 Main Parameters of Numerical Model for Cut off Curtain Wall

参数	数值
降水入渗系数(无量纲)	0.27~0.47
松散含水层	渗透系数 3.5 m/d~15.42 m/d 重力给水量 0.3
相对隔水土层	渗透系数 0.001~0.003 m/d 弹性给水量 $1e-8$
风化基岩含水层	渗透系数 0.03 m/d~1.5 m/d 弹性给水量 $1e-6$
基岩含水层	渗透系数 0.007 m/d~0.23 m/d 弹性给水量 $1e-9$
帷幕墙长度/m	600
帷幕墙厚度/m	0.8
帷幕墙渗透系数/(m·d ⁻¹)	0.008 64

通过地下水系统非稳定流数值模型调参,模型拟合了案例矿井 117 工作面回采期间 G1 松散层水文孔的计算与实测水位,如图 9 所示,计算与实测水位拟合程度好。同时,采用稳定流模型模拟得出案例矿井计算水位与井田内近地表松散含水层实测地下水位基本一致,区域地下水场宏观吻合效果较好 (图 10a 与图 10b)。因此,稳定流与非稳定流模型验证整体拟合程度高,满足本次截水帷幕墙数值仿真分析。

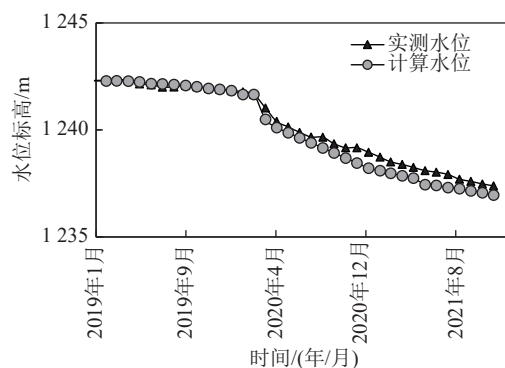


图 9 案例矿井工作面回采期间计算与实测水位 (G1 松散含水层水文孔)

Fig.9 Calculation and measured water level during the mining period of the working face in the case mine

4.2 模拟分析

煤层正常开采工况下,如图 10b 所示,由于 117 工作面 2 200~2 600 m 区段古河道处,松散层厚度显著增大、煤层与松散层底板间距减少,采动导水裂隙直接近地表富水松散层,导致松散层地下水场形成以采动导水裂隙揭露区为中心的地下水降落漏斗,由于松散含水层良好的渗透性和采动导水裂隙揭露松散层的范围有限,松散含水层地下水场整体趋势并未发生较大变化。同时在模型中以工作面涌水量显著增加区段 (2 200~2 600 m) 为均衡区,计算被导水裂隙揭露的松散含水层以及下伏风化基岩、基岩含水层地下水进入该均衡区的水量,即为该区段的涌水量。

在工作面外围局部帷幕工况下 (600 m 长帷幕墙),如图 10c 所示,在帷幕墙体外围松散含水层地下水水位梯度显著加剧,但由于松散含水层良好的渗透性,以及井田地面东高西低整体向榆溪河倾斜地形控水条件,地下水水位整体未发生明显抬升,原来通过古河道形成的松散层显著增厚条带进入采空区的地下水径流量沿帷幕墙体导流至下游区段,经均衡区模拟计算 (表 2),600 m 长的侧向帷幕条件下该地段总水量由 $890 \text{ m}^3/\text{h}$ 减少至 $637 \text{ m}^3/\text{h}$,减水效率 28.43%。

5 结 论

1) 通过借鉴露天矿区地下连续墙的帷幕减渗应用成果经验,从稳定的补给水源、相对集中补给通道,以及防绕流托底 3 个方面总结了地下水连续墙截水帷幕的基本条件。通过建立井工煤矿松散富水含水层帷幕条件下涌水量解析计算模型,分析得出帷幕墙体渗透能力越弱、厚度越大,以及距离采掘范围近是减少煤层顶板强渗含水层涌 (失) 水的基本原理。

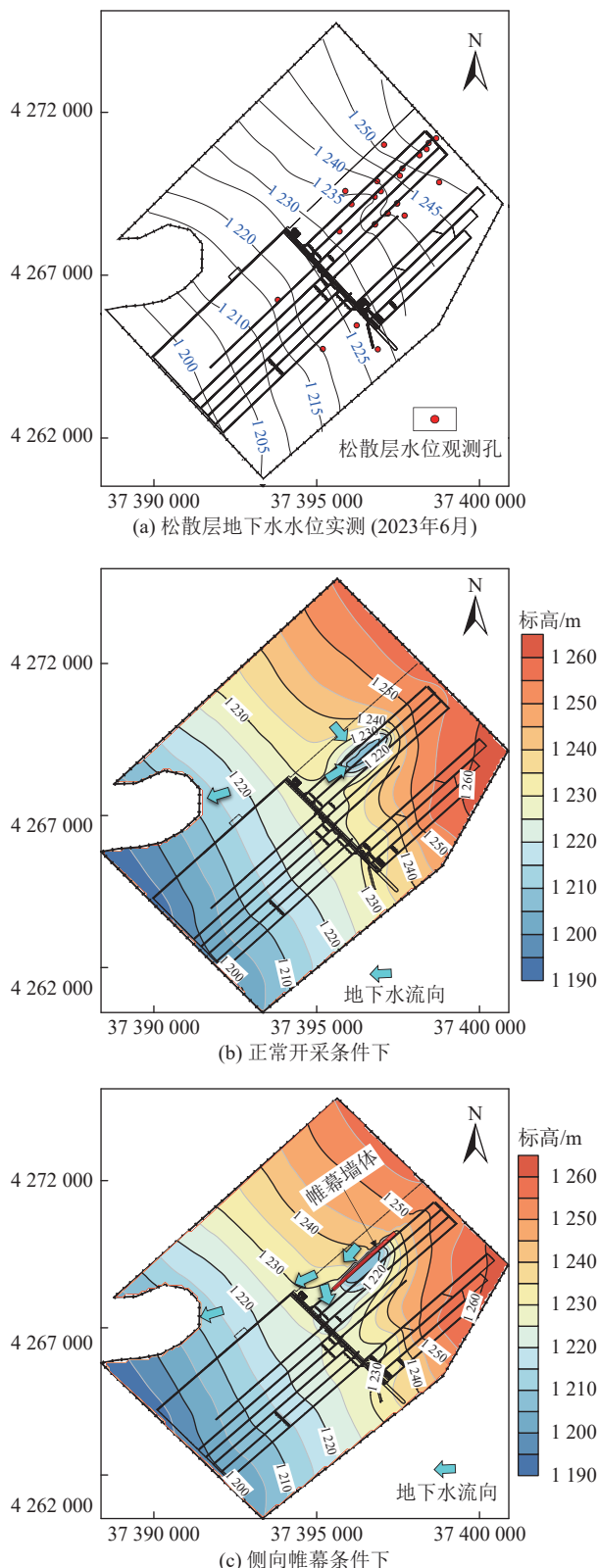


图10 开采正常开采与帷幕情况下地下水流场

Fig.10 Groundwater flow field under normal mining and curtain conditions

2) 以榆神矿区某矿工作面集中涌水问题对研究对象,依据井工煤矿地下水连续墙帷幕减渗基本原理,分析得出工作面集中涌水区段主要水源以近地表松

表2 开采正常开采与帷幕情况下矿井涌水量

Table 2 Mine water inflow under normal mining and curtain conditions

工况	松散含水层涌水量(m^3/h)	总涌水量(m^3/h)
正常开采	558	890
侧向帷幕	313	637

散含水层为主,具备稳定可观的动态补给源,煤层开采形成的导水裂隙突破顶板隔水土层揭露松散层内条带状古河道(即薄隔水土层与松散层增厚带),形成了相对集中的涌水通道,以及在“上含下隔”(上为富水松散含水层,下为相对隔水土层)的防绕流托底组合结构下,认为案例矿井集中涌水区段具有建造侧向截水帷幕墙的可行性。

3) 通过建立正常开采与侧向帷幕条件下地下水系统数值模型,模拟结果显示在工作面外围局部帷幕工况下,在帷幕墙体外围松散含水层地下水水位梯度显著加剧,但由于松散含水层良好的渗透性,地下水水位整体未发生明显抬升,原来富水松散层地下水沿古河道形成的相对集中径流通道进入采空区的地下水排泄量沿帷幕墙体导流至下游,600 m长截水帷幕整体减水效率28.43%。

参考文献(References):

- [1] 彭苏萍, 毕银丽. 黄河流域煤矿区生态环境修复关键技术与战略思考[J]. 煤炭学报, 2020, 45(4): 1211-1221.
PENG Suping, BI Yinli. Strategic consideration and core technology about environmental ecological restoration in coal mine areas in the Yellow River Basin of China[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(4): 1211-1221.
- [2] 范立民, 马雄德, 冀瑞君. 西部生态脆弱矿区保水采煤研究与实践进展[J]. 煤炭学报, 2015, 40(8): 1711-1717.
FAN Limin, MA Xiongde, JI Ruijun. Progress in engineering practice of water-preserved coal mining in western eco-environment fragile area[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(8): 1711-1717.
- [3] 李智学, 申小龙, 李明培, 等. 榆神矿区最上可采煤层赋存规律及开采危害程度[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(3): 130-139.
LI Zhixue, SHEN Xiaolong, LI Mingpei, et al. Occurrence regularity of uppermost minable coal seams and their harmful level of mining in Yushen mining area[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(3): 130-139.
- [4] 李智学, 李明培, 申小龙, 等. 榆神矿区基岩顶面土层缺失机理分析及其防治水意义[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(6): 102-107.
LI Zhixue, LI Mingpei, SHEN Xiaolong, et al. Genetic analysis of the bedrock top surface soil layer deletion and its significance for water prevention in Yushen mining area[J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(6): 102-107.
- [5] 马俊鹏, 赵春虎, 胡东祥, 等. 榆神矿区中深部煤层开采顶板涌水模

- 式分析[J]. 干旱区资源与环境, 2024, 38(3): 104–111.
- MA Junpeng, ZHAO Chunhu, HU Dongxiang, et al. Roof water gushing modes during coal seam mining: A case study in central Yushen mining area[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2024, 38(3): 104–111.
- [6] 黄庆享. 浅埋煤层保水开采岩层控制研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 50–55.
- HUANG Qingxiang. Research on roof control of water conservation mining in shallow seam[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 50–55.
- [7] 范立民. 保水采煤的科学内涵[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 27–35.
- FAN Limin. Scientific connotation of water-preserved mining[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 27–35.
- [8] 范立民, 蒋泽泉. 榆神矿区保水采煤的工程地质背景[J]. 煤田地质与勘探, 2004, 32(5): 32–35.
- FAN Limin, JIANG Zequan. Engineering geologic background of coal mining under water-containing condition in Yushen coal mining area[J]. Coal Geology & Exploration, 2004, 32(5): 32–35.
- [9] 董书宁, 姬亚东, 王皓, 等. 鄂尔多斯盆地侏罗纪煤田典型顶板水害防控技术与应用[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2367–2375.
- DONG Shuning, JI Yadong, WANG Hao, et al. Prevention and control technology and application of roof water disaster in Jurassic coal field of Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2367–2375.
- [10] 华照来, 范立民, 李增林, 等. 古河道砂岩含水层水资源保护与水害防治方法[J]. 绿色矿山, 2024(1): 64–74.
- HUA Zhaolai, FAN Limin, LI Zenglin, et al. Methods for water resource protection and water hazard prevention in sandstone aquifers of ancient river channels[J]. Journal of Green Mine, 2024(1): 64–74.
- [11] 王双明, 黄庆享, 范立民, 等. 《生态脆弱区煤炭开发与生态水位保护》[J]. 中国煤炭地质, 2011, 23(2): 31.
- WANG Shuangming, HUANG Qingxiang, FAN Limin, et al. Coal development and ecological water level protection in ecologically fragile areas[J]. Coal Geology of China, 2011, 23(2): 31.
- [12] 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): 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): 25–32.
- [13] 张杰, 侯忠杰. 榆树湾浅埋煤层保水开采三带发展规律研究[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2006, 21(4): 10–13.
- ZHANG Jie, HOU Zhongjie. Study on three strap in water resources preservation in yu-Shu-Wan shallow seam mining[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2006, 21(4): 10–13.
- [14] MA L Q, JIN Z Y, LIANG J M, et al. Simulation of water resource loss in short-distance coal seams disturbed by repeated mining[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(7): 5653–5662.
- [15] 彭小沾, 崔希民, 李春意, 等. 陕北浅煤层房柱式保水开采设计与实践[J]. 采矿与安全工程学报, 2008, 25(3): 301–304.
- PENG Xiaozhan, CUI Ximin, LI Chunyi, et al. Design and practice of room & pillar water-preserved mining for shallowly buried coal seam in north of Shaanxi Province[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008, 25(3): 301–304.
- [16] 马立强, 张东升, 王烁康, 等. “采充并行”式保水采煤方法[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 62–69.
- MA Liqiang, ZHANG Dongsheng, WANG Shuokang, et al. Water-preserved mining with the method named “backfilling while mining”[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 62–69.
- [17] 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. Theory framework and technological system of coal mine underground reservoir[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(2): 239–246.
- [18] 杨光辉, 朱开成, 晏嘉. 基于屈服强度理论的深埋砂岩可注性研究[J]. 中国煤炭地质, 2020, 32(8): 62–66.
- YANG Guanghui, ZHU Kaicheng, YAN Jia. Study on deeply buried sandstone water injectability based on yield strength theory[J]. Coal Geology of China, 2020, 32(8): 62–66.
- [19] 陈歌. 鄂尔多斯盆地东缘矿井水深部转移存储机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- CHEN Ge. Study on transfer and storage mechanism of mine water depth in the eastern margin of Ordos basin[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [20] 鞠金峰, 李全生, 许家林, 等. 采动含水层生态功能修复: 概念内涵、理论与技术框架[J]. 绿色矿山, 2024(1): 21–30.
- JU Jinfeng, LI Quansheng, XU Jialin, et al. Ecological function restoration of mining-damaged aquifers: Conceptual connotation, theory, and technical framework[J]. Journal of Green Mine, 2024(1): 21–30.
- [21] 赵春虎, 王世东, 靳德武, 等. 陕北与神东煤炭基地煤矿开采对地下水资源影响研究现状与评价方法[J]. 绿色矿山, 2024(2): 150–159.
- ZHAO Chunhu, WANG Shidong, JIN Dewu, et al. Research status and evaluation methods on the impact of coal mining on groundwater resources in Shaanbei and Shendong coal bases[J]. Journal of Green Mine, 2024(2): 150–159.
- [22] 王海, 董书宁, 孙亚军, 等. 我国大水矿山侧向帷幕截水技术及水资源保护效果研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(7): 207–223.
- WANG Hai, DONG Shuning, SUN Yajun, et al. Lateral curtain interception technology and water conservation effect in groundwater abundant mines of China[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 207–223.
- [23] 董书宁, 杨志斌, 姬中奎, 等. 神府矿区大型水库旁烧变岩水保水开采技术研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(3): 709–717.
- DONG Shuning, YANG Zhibin, JI Zhongkui, et al. Study on water-preserved mining technology of burnt rock aquifer beside the large reservoir in Shenfu mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(3): 709–717.
- [24] 张雁, 黄选明, 彭巍, 等. 截水帷幕在露天煤矿截渗减排中的应用[J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1865–1873.
- ZHANG Yan, HUANG Xuanming, PENG Wei, et al. Application of water cutoff curtain in the seepage cutoff and drainage reduction of open-pit coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5): 1865–1873.
- [25] 黄选明, 张雁, 李文嵩, 等. 我国露天煤矿水害特征与防治水技术

- [J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(4): 53–60.
- HUANG Xuanming, ZHANG Yan, LI Wensong, et al. Summary of water disaster characteristics and water prevention and control technology in open-pit coal mines in China[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(4): 53–60.
- [26] 黄选明, 张雁, 王明星, 等. 我国露天煤矿截水帷幕关键技术进展[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(7): 1–9.
- HUANG Xuanming, ZHANG Yan, WANG Mingxing, et al. Key technical progress of water cutoff curtain technology in open-pit coal mines in China[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(7): 1–9.
- [27] 赵春虎, 王明星, 曹海东, 等. 露天煤矿开采侧向帷幕控水原理与截水效果数值分析: 以元宝山露天煤矿为例[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(7): 10–17.
- ZHAO Chunhu, WANG Mingxing, CAO Haidong, et al. Water control principle of lateral water cutoff curtain and numerical analysis of its water interception effect in Yuanbaoshan open-pit coal mine[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(7): 10–17.
- [28] 王海, 彭巍, 曹海东, 等. 露天煤矿截水帷幕效果检验方法及截水效果分析[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(4): 87–93.
- WANG Hai, PENG Wei, CAO Haidong, et al. Inspection method and analysis of the effect of water cutoff curtain in open-pit coal mine[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(4): 87–93.
- [29] 尚宏波, 靳德武, 赵春虎, 等. 砾岩含水层帷幕浆液运移规律与改性效果分析[J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2460–2469.
- SHANG Hongbo, JIN Dewu, ZHAO Chunhu, et al. Transport law of curtain grouting fluid in conglomerate aquifer and evaluation of rock mass modification effect[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2460–2469.
- [30] 王海. 隐伏火烧区烧变岩含水层水害治理技术研究[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(5): 88–97.
- WANG Hai. Technologies for water hazard prevention and control in burnt rock aquifers within concealed burnt areas[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(5): 88–97.
- [31] 赵春虎, 虎维岳, 靳德武. 西部干旱矿区采煤引起潜水分损失量的定量评价方法[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 169–174.
- ZHAO Chunhu, HU Weiyue, JIN Dewu. Method of quantitative evaluation on amount of groundwater loss from unconfined aquifer caused by mining disturbance in the arid area of Western China[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 169–174.
- [32] 赵春虎, 靳德武, 李智学, 等. 陕北榆神矿区煤层开采顶板涌水规律分析[J]. 煤炭学报, 2021, 46(2): 523–533.
- ZHAO Chunhu, JIN Dewu, LI Zhixue, et al. Analysis of overlying aquifer water inrush above mining seam in Yushen mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(2): 523–533.