



富水沟谷区浅埋煤层导水裂隙演化特征

来兴平 乔浩 单鹏飞 吴龙泉 朱浩宇 赵浩州 戴自强

引用本文:

来兴平, 乔浩, 单鹏飞, 等. 富水沟谷区浅埋煤层导水裂隙演化特征[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 1-11.

LAI Xingping, QIAO Hao, SHAN Pengfei. Evolution characteristics of water flowing fracture in shallow buried coal seam in water abundance gully valley area[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 1-11.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1985>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

黄土沟谷区浅埋煤层开采覆岩破坏与地表损伤特征研究

Study on overburden and surface damage characteristics of shallow-buried coal seam mining in loess gully area

煤炭科学技术. 2022, 50(5) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/e2e70fbd-d9b8-40b4-993b-4015877a7e95>

浅埋煤层过沟开采覆岩破坏特征及裂隙演化规律研究

Study on overburden failure characteristics and fracture evolution law of shallow buried coal seam through trench mining

煤炭科学技术. 2021, 49(10): 185-192 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/d749e872-e15c-4dff-b196-aa45fb971793>

河下浅埋厚煤层采动覆岩裂隙涌水量时空演化的FDEM-CFD耦合分析

FDEM-CFD coupling analysis of spatiotemporal evolution of mining-induced overburden fracture-water inflow in shallow and thick coal seam under river

煤炭科学技术. 2024, 52(6): 176-184 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1161>

浅埋煤层群裂隙演化规律及组合承载结构载荷研究

Research on the fracture evolution law and combined bearing structure load of shallow buried coal seam group

煤炭科学技术. 2023, 51(9): 65-76 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1108>

沟谷区多煤层开采覆岩破坏及径流水害防治研究

Study on overburden damage and prevention of runoff disaster in multiseam mining of gully region

煤炭科学技术. 2023, 51(7): 243-254 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0353>

深部煤层非充分采动下覆岩裂隙场可视化探测研究

Study on visual exploration of fissure field of overlying strata in deep coal seam under subcritical extraction

煤炭科学技术. 2020, 48(3) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/c499572d-a6e9-4ad2-b404-73729ad60719>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

“低碳减损绿色开采新技术与实践”专题



移动扫码阅读

来兴平, 乔 浩, 单鹏飞, 等. 富水沟谷区浅埋煤层导水裂隙演化特征[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 1–11.

LAI Xingping, QIAO Hao, SHAN Pengfei, *et al.* Evolution characteristics of water flowing fracture in shallow buried coal seam in water abundance gully valley area[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 1–11.

富水沟谷区浅埋煤层导水裂隙演化特征

来兴平^{1,2}, 乔 浩¹, 单鹏飞^{1,2}, 吴龙泉¹, 朱浩宇¹, 赵浩州¹, 戴自强¹

(1. 西安科技大学 能源学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安科技大学 教育部西部矿井开采及灾害防治重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘 要: 富水沟谷区域下浅埋煤层赋存条件特殊, 采场上覆岩层导水裂隙发育演化特征复杂。为了揭示沟谷区浅埋煤层在回采扰动作用下覆岩裂隙演化规律, 以朱家峁煤矿 1305-2 工作面过沟谷区回采阶段为工程背景, 采用理论分析、物理相似模拟、数值模拟与现场效果验证的方法, 建立了覆岩裂隙-渗流场概念模型, 开展了覆岩结构发育与微震能量演化研究, 分析了覆岩变形与塑性破坏分布特征, 提出了针对沟谷区下浅埋煤层导水裂隙防治措施, 并应用于现场工程实践。结果表明: 开采扰动下裂隙-渗流场模型呈“梯台”结构, 并依次划分为初渗区域、稳渗区域、紊渗区域 3 个区域; 将所研究矿井的工况数据代入模型结构, 计算出各个渗透区域范围, 并根据计算结果对矿井的稳渗区域采取注浆措施。工作面回采至沟谷区段, 覆岩裂隙域形态呈现“拱形—梯形—复合梯形”的扩展演化特征, 裂隙纵向发育高度达到 163 m, 并与沟谷区地表贯通。随工作面推进, 地表裂隙依次经历“滑移—挤压—撕裂”过程; 沟谷区域位移云图呈现出滞后开采“高位梯形”破断形态, 在沟底处下沉位移最大, 达 3.47 m。针对开采导致的裂隙大范围扩展贯通, 提出在地面进行采动裂缝注浆处理, 在工作面上覆岩层进行注浆封堵, 实现过沟谷区开采“井上—井下”联合防治, 保证安全开采。该研究结果可为浅埋煤层的过沟谷区开采、采动裂隙防治及富水区“保水采煤”提供新的科学依据。

关键词: 浅埋煤层; 覆岩裂隙; 发育形态; 裂隙治理; 沟谷区开采**中图分类号:** TD82**文献标志码:** A**文章编号:** 0253-2336(2024)04-0001-11

Evolution characteristics of water flowing fracture in shallow buried coal seam in water abundance gully valley area

LAI Xingping^{1,2}, QIAO Hao¹, SHAN Pengfei^{1,2}, WU Longquan¹, ZHU Haoyu¹, ZHAO Haozhou¹, DAI Ziqiang¹

(1. College of Energy Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Western Mines and Hazard Prevention of China Ministry of Education, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: The occurrence conditions of shallow buried coal seams under the water-rich gully region are special, and the development and evolution characteristics of water-conducting fractures in the overlying strata of the stope are complex. In order to reveal the evolution law of overlying rock fracture in shallow buried coal seam under mining disturbance in gully area, taking the mining stage of 1305-2 working face in Zhujiamao Coal Mine as the engineering background, the conceptual model of overlying rock fracture-seepage field was established by means of theoretical analysis, physical similarity simulation, numerical simulation and field effect verification. The development of overlying rock structure and the evolution of microseismic energy were studied, the distribution characteristics of overlying rock deformation and plastic failure were analyzed, and the prevention and control measures of water flowing fracture in shallow buried coal seam under gully area were put forward and applied to field engineering practice. The results show that the fracture-seepage field model under mining disturbance is a ‘terrace’ structure, which is divided into three regions: initial seepage region, stable seepage region and turbulent seepage region. Substituting the working condition data of the studied mine into the model structure, the range of each infiltration area is

收稿日期: 2023-12-20

责任编辑: 黄小雨

DOI: 10.12438/cst.2023-1985

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52274138); 陕西省创新能力支撑计划资助项目 (2022KJXX-58)

作者简介: 来兴平 (1971—), 男, 宁夏平罗人, 教授, 博士生导师。E-mail: laixp@xust.edu.cn

通讯作者: 乔 浩 (1999—), 男, 陕西榆林人, 硕士研究生。E-mail: 22203077025@stu.xust.edu.cn

calculated, and the grouting measures are taken for the stable infiltration area of the mine according to the calculation results. When the working face is mined to the valley section, the shape of the overburden fracture domain presents the expansion and evolution characteristics of “arch-trapezoid-composite trapezoid”. The longitudinal development height of the fracture reaches 163 m and is connected with the surface of the valley area. With the advance of the working face, the surface cracks experience the process of “slip-extrusion-tearing” in turn. The displacement cloud map of the valley area shows a “high trapezoidal” fracture pattern of lagging mining, and the subsidence displacement value at the bottom of the ditch is the largest, reaching 3.47 m. In view of the large-scale expansion and penetration of cracks caused by mining, it is proposed to carry out grouting treatment of mining-induced cracks on the ground and grouting plugging in the overlying strata of the working face, so as to realize the joint prevention and control of “up-hole-down-hole” mining in the gully area and ensure safe mining. The results of this study can provide a new scientific basis for the mining of shallow coal seams in the valley area, the prevention and control of mining-induced cracks, and the “water-preserved coal mining” in water-rich areas.

Key words: shallow coal seam; overlying rock fissure; development morphology; fissure treatment; mining in loess gully area

0 引言

陕北沟谷地貌属于我国西部典型的区域地貌,其上覆岩层历经第四纪以来多次黄土堆积和侵蚀作用,导致岩层破碎、沟壑发育,地表起伏较大,且地表常有季节性河流通过。陕北矿区开采过程中,其上覆岩层裂隙发育不同于常规地层且受到含水层影响,因此对矿井的实际生产造成较大影响。

目前国内通过采用理论分析、现场检测、开采规划、数值计算、相似模拟等方法与手段,从不同方面研究上覆岩层裂隙发育规律,研究成果对于常规地层的矿井具有重要的科学指导意义^[1-4]。陕北矿区由于其处于黄河流域,地质条件复杂且生态环境脆弱,矿区地表多为黄土梁峁及沟谷地貌,因受地貌的影响,矿井采动所造成的裂隙带发育较常规地形有较大差异。因此,近年来多位学者针对沟谷型地貌特征条件下的煤层开采过程所造成的裂隙发育情况开展了深入研究。通过分析覆岩力链演化、块体分布、地表破坏等特征,揭示裂缝形成机理及发育的影响规律,阐明覆岩裂隙对地表非连续损害的控制效果及范围预测^[5-9]。

在水资源保护方面,包括矿井突水防治及保水采煤等多方面研究对西部生态脆弱区煤炭开采提供了依据。众多学者通过建立方程及模型,分析裂隙发育规律及采动裂隙影响下形成的导水通道网络诱发涌水形态特征^[10-13]。同时,基于传统理论基础,利用多种手段相结合的研究方法,可以得到多视角下的导水裂隙演化特征,并且可以依据研究结果对开采方案及时更正,保证安全开采^[14-16]。其他学者通过研究采动裂隙、覆岩运移等,针对不同的矿井实际问题展开研究,如程详等^[17]针对软岩保护层开采后上覆被保护煤层卸压瓦斯治理问题,采用综合研究方法研究软岩保护层开采覆岩采动裂隙带演化特征;刘一龙等^[18]综合应用集 InSAR 动态观测、地表勘察、

微震监测和数值模拟为一体的地表变形监测与分析体系,探讨山区多煤层下行开采地表变形特征;孟祥军等^[19]综合运用相似模拟、理论分析与现场实测相结合的方法,揭示了2类典型表土层-基岩组合条件下的覆岩结构运移演化规律及采动应力传递形成机制;单鹏飞等^[20]通过建立研究煤岩内部裂隙时空演化规律的力学试验系统,初步揭示裂隙煤岩流固耦合特性;刘志高等^[21]采用 UDEC 数值模拟和理论分析等方法分析了倾斜煤层工作面开采后上覆岩层移动变形规律。

前人的研究成果主要集中在常规地质条件下覆岩裂隙发育形态特征与空间分布方面。然而,陕北矿区所处区域多为黄土高原及沟谷发育区,因此在矿井煤层开采过程中极易引发工作面上覆岩层采动裂隙的大范围扩展,造成工作面裂缝贯通发生溃水灾害及地表损伤。因此,研究富水沟谷区域浅埋煤层导水裂隙演化特征,掌握煤层覆岩导水断裂带发育高度对矿井的安全生产有着重要意义。笔者以朱家崙煤矿为工程背景,针对矿井实际问题,开展深入研究。

1 工程概况

朱家崙煤矿位于陕西省榆林市,属于黄土梁峁沟谷区域,工作面区内地形起伏较大,沟壑纵横。工作面中部有2条沟谷通过,河沟处基岩被冲蚀,缺失厚度15~30 m,矿井煤层埋深125~205 m。对矿区1305-2工作面有影响的主要含水层为侏罗系碎屑岩类风化壳裂隙水和碎屑岩类裂隙承压水,与隔水层相间分布,岩性多为直罗组砂岩、泥岩,厚度一般为30~50 m。

1305-2工作面开采至沟谷区段,矿井排水量较大,涌水量达80 m³/h,在井下采用抽水泵进行排水工作,影响了矿井的正常推进效率,且在巷道煤壁出现渗水现象,如图1所示,煤壁渗水造成巷道中锚杆、

锚网等支护设施及底板受水浸泡,严重影响了巷道的支护效果。工作面的回采使得上覆岩层受到动载影响,造成覆岩裂隙不确定因素增加,难以准确实测裂隙发育的具体过程。同时,工作面回采后,该区域地表水可能通过采动裂隙进入采空区,造成生产中断,影响矿井的安全生产。

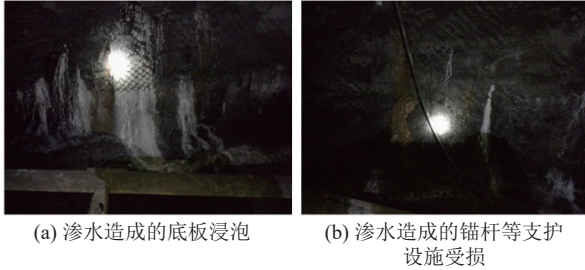


图1 井下渗水现象

Fig.1 Underground water seepage phenomenon

2 覆岩裂隙-渗流场概念模型

概念模型可根据实际水文、地质条件,将覆岩结构、含水介质及水文地质参数的时空分布,概化为易于进行数学与数值模拟的形式,将复杂的问题简化,通过模型刻画导水裂隙带区含水层渗流在区域下渗的物理过程,为研究覆岩裂隙发育特征提供参考。

2.1 覆岩“梯台”结构模型

工作面的推进,直接影响了覆岩的裂隙发育;覆岩形态发育经过开采扰动形成“梯台”结构,该结构为含水层渗流提供了导水通道。覆岩开采扰动形成“梯台”结构,其结构两腰倾角分别为沿开切眼上方破断覆岩与开采面上方破断覆岩呈一定的破断角;模型上下底边的边界距离分别为含水层扰动距离与工作面推进距离;工作面开采长度表现为“梯台”宽度,如图2所示。

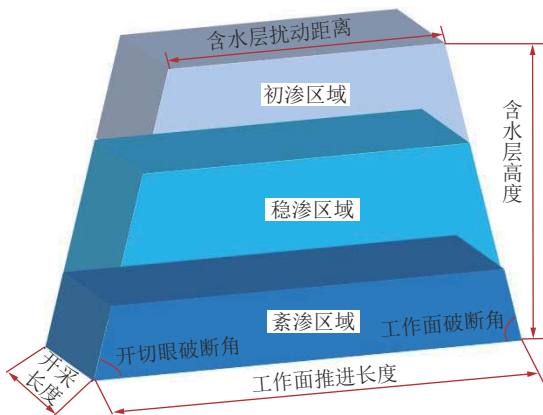


图2 “梯台”结构模型

Fig.2 “trapezoidal zone” structural model

2.2 覆岩渗流区域划分

依据裂隙结构特征与渗流形式判定,可将覆岩“梯台”空间结构划分3个区域,分别为初渗区域、稳渗区域、紊渗区域。

2.2.1 初渗区域

当裂隙发育至含水层底部,裂隙开始接触含水层,对含水层进行侵入,工作面继续推进,导致含水层底部产生裂隙,地下水沿裂隙垂直方向产生垂直渗流,此时流速及裂隙尺度较小,压力梯度的增加小于流量的比例增加。此时的流动为非达西流动,满足非线性流动特征。该区域裂隙流体惯性作用造成的影响较小并且发展较慢,但随着流量的增大,则裂隙的水力隙宽开始增大。

2.2.2 稳渗区域

随着渗流量的增大,所造成隙宽不断增大,抑制了流体惯性作用的增长速度。流体的惯性作用造成的非线性压力梯度增量增长缓慢,则裂隙呈现出近似线性渗流特性。流体沿导水裂隙带向下渗流,流体流速由低速初渗到高速湍(紊)渗的过渡段阶段,该阶段属于稳渗区域。

2.2.3 紊渗区域

流体向下渗流的过程中,随着水力梯度、水深的增大,且流体流经区域到达垮落带,该区域的裂隙尺度增大,同时受到重力及惯性力的影响都会导致流动逐渐向湍流发展,压力梯度的增加大于流量的比例增加,这时惯性效应将起主要作用,出现紊流现象。

2.3 裂隙-渗流场模型建立

矿井开采活动中,随着采动影响范围的不断扩大,上覆岩层导水裂隙带不断扩展,直至含水层位置,导致地下水沿裂隙渗流,引发渗水现象。基于采动裂隙发育特征和“时-空-强”变化特点,建立覆岩裂隙场和渗流场的概念模型。概念模型的建立降低了研究区域结构的复杂程度。

裂隙扰动距离到达含水层高度后,含水层扰动距离满足:

$$H_w = H_G - h_w \left(\frac{1}{\tan \theta_1} - \frac{1}{\tan \theta_2} \right) \quad (1)$$

式中: H_G 为工作面推进距离; h_w 为含水层高度; θ_1 为开切眼上方覆岩破断角; θ_2 为工作面上方覆岩破断角。

结合材料力学和弹性力学,根据的基岩初次破断及周期破断时的断裂步距,计算覆岩的破断角^[14]如下:

$$\begin{cases} \theta_1 = 45^\circ - \frac{\varphi}{2} + \frac{1}{2} \arctan \sqrt{\frac{18\sigma_t}{q}} \\ \theta_2 = 45^\circ - \frac{\varphi}{2} - \frac{1}{2} \arctan \left(-\sqrt{\frac{12\sigma_t}{q}} \right) \end{cases} \quad (2)$$

式中: φ 为岩石内摩擦角; σ_t 为岩石抗拉强度; q 为岩层上方载荷。

根据式(1)含水层扰动距离与式(2)的破断角公式,并结合朱家崙煤矿实际开采及推进长度,可得出基于1305-2工作面覆岩裂隙-渗流场“梯台”模型的结构数据;同时根据流量及流速的判定,对渗流区域进行划分。如图3所示,按照覆岩裂隙的岩层承载结构破坏及渗流形成区域的划分,可采取相关治理及防治措施,减少地表水的汇集,导水通道下渗至含水层,易使得含水层得到补给,造成导水通道内产生突破性的大量涌水,使形成新的贯穿性强渗透涌水通道。

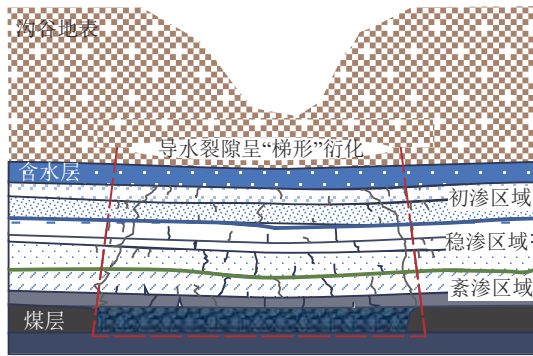


图3 渗流区域层位图

Fig.3 Seepage flow area division

3 覆岩裂隙演化规律相似模拟

3.1 模拟试验设计

为进一步研究富水沟谷区域导水裂隙发育问题,依据朱家崙煤矿1305-2工作面覆岩结构,搭建物理相似模型,探究覆岩发育的裂隙结构。

试验采用外形尺寸(长×宽×高)为3.0 m×0.2 m×2 m的平面应变模型架,确定模拟试验的几何相似比例为1:150,按照相似定理,时间相似比为1:14,泊松比、内摩擦角相似比为1:1,应力相似比为1:300。本次物理相似模拟试验采用微震设备对模型回采过程中工作面上覆岩层能量进行实时联合监测,实现走向回采过程中工作面覆岩物理、力学与损伤等综合信息指标参数的实时测试。在模型中铺装6个微震探头,均为速度探头,尺寸如图4a中模型所示。速度探头编号为1号、2号、3号、4号、5号、

6号,开挖过程通过应力相似、体积相似完成,逐步开采,工作面沿走向推进。每次推进8.0 cm,开挖高度为2 cm,总共开挖30步,每次推进单位长度的过程中,监测开采扰动条件下的岩覆岩裂隙能量演化规律。

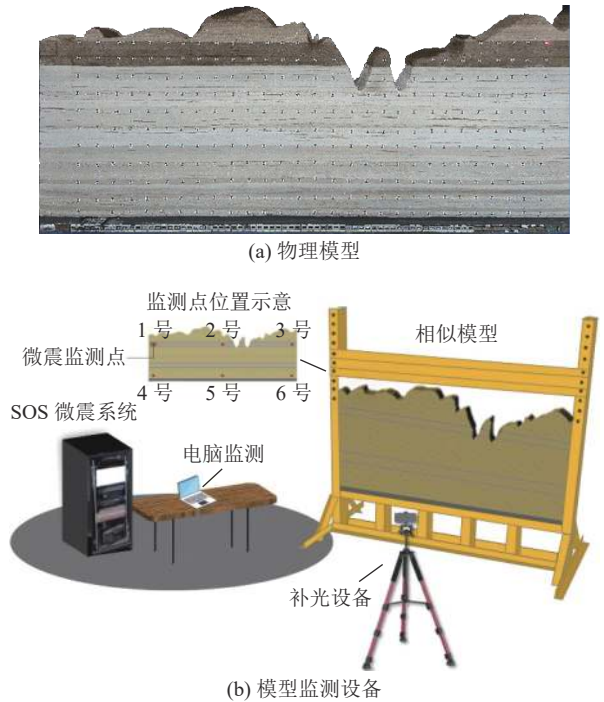


图4 相似模拟试验台

Fig.4 Similar simulation test bench

3.2 试验结果与分析

3.2.1 覆岩结构演化特征分析

图5展示了不同推进度时覆岩结构演化过程,根据相似模拟试验结果可得:工作面逐步推进到32 m时,直接顶受采动影响初次垮落,垮落高度接近采煤厚度,垮落块体呈拱形散布,拱形轨迹线沿着采空区岩层端部和弯曲下沉带岩层的分界线。随着工作面继续推进,裂隙不断发育,拱形轨迹线逐渐向上移动,直接顶上覆岩层下沉位移逐渐减小,直接顶上覆岩并未发生明显的离层现象。直接顶垮落后工作面继续向前推进,裂隙扩展现象较为明显,纵向裂隙与水平裂隙明显增多,裂隙垮落轨迹线由“拱形”逐渐转变为“梯形”,多条裂隙拓展贯通。当工作面推进至126 m时,基本顶达到其极限跨距,发生断裂。继续推进至150.0 m,充分采动高度发育至上部亚关键层,覆岩沉降范围突然增大。亚关键层与下方层系之间离层裂隙的增大,层系间沉降值不断增加,当达到承载极限,亚关键层发生破断,层系间横向裂隙逐渐闭合,纵向裂隙逐渐增多。

裂隙发育的同时,为地下水的渗流形成了下渗通道,工作面的持续推进使得通道网络进一步完善。

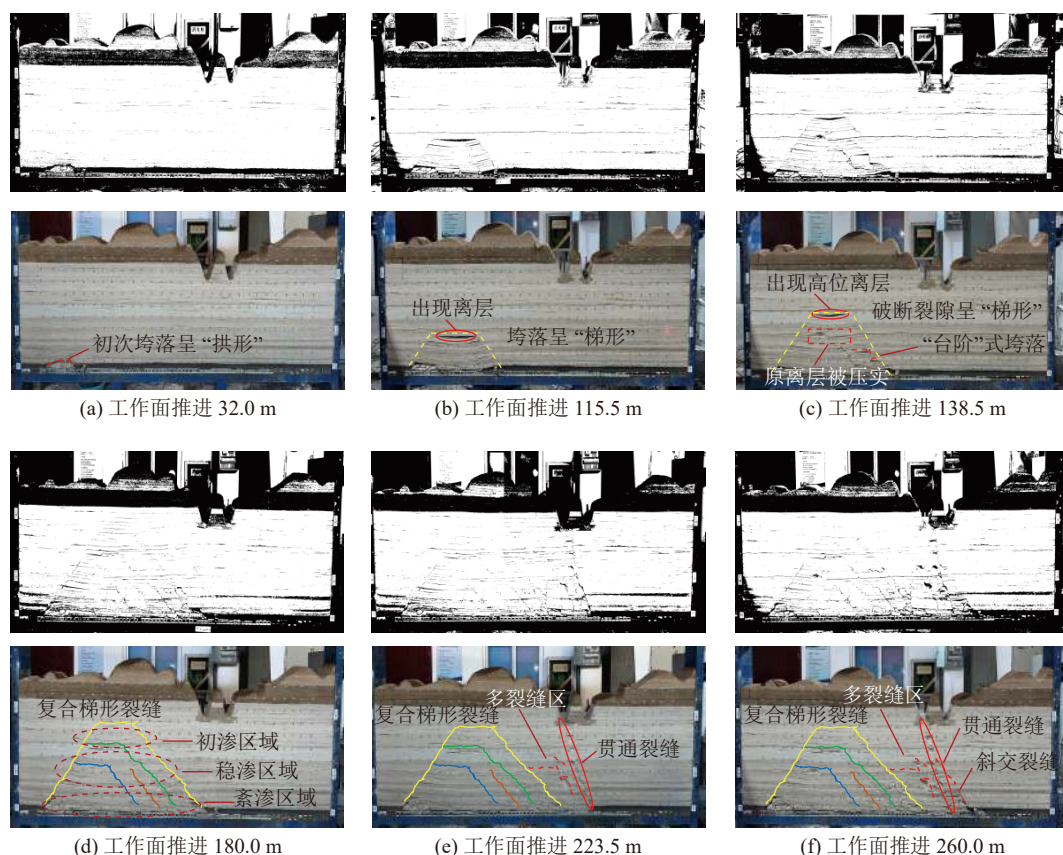


图5 不同推进度时覆岩结构演化特征

Fig.5 Evolution characteristics of overburden structure at different advance degrees

随着工作面的推进,覆岩的垮落以及裂隙的扩张,工作面上覆顶板的无规则垮落形成紊渗区域;裂隙的继续发育,因受岩层节理发育及覆岩岩性的影响,裂隙发育呈现出较为规律性的扩张,形成了“梯台”渗流结构中的稳渗区域;而覆岩裂隙未扩展至含水层,此时工作面的渗水现象较少。当工作面的推进造成含水层的扰动破坏,“梯台”渗流空间结构中的初渗区域形成,初渗区域内的渗流通道含水层通过形成的“梯台”结构通道,渗流至含水层下的岩层裂隙中,直至工作面。由于开采范围增加,受采动影响的岩层范围扩大,裂隙不断继续扩展,使得导水通道网络更加发育。同时,由于覆岩中仍存在较厚的弯曲下沉带岩层,起到承载上覆基岩载荷的作用,故采动影响下导水裂隙未能贯通至地表。依据试验结果:上覆岩层垮落带高度为 28 m,裂隙带高度为 42 m。此时由于工作面未推进至沟谷区段,故其上覆导水裂隙带高度为 42 m,根据《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程》统计经验公式中基于实测统计的预计方法,得到 1305-2 工作面导水裂隙带高度分别为 32.44 ~ 43.64 m,试验所得符合经验公式得出的理论计算值。

当工作面推进到 223.5 m,工作面进至沟谷区段,

沟谷区段主关键层由于地质运动及常年水冲风蚀,导致这一区段主关键层缺失。因此工作面推进至该区段,裂隙受采动影响,继续向上扩展,发育至主关键层位置,上覆表土层在采动及重力作用下不断向下发生沉降,而主关键层的缺失导致其无法承载上覆表土层重量,主关键层随工作面推进持续出现应力集中和应力向周围岩体转移的过程,关键层应力场的变化,反作用于上覆岩层的活动,导致了沟谷区域覆岩裂隙纵向长度、密度、张开度等几何特性的不同。采动后的沟谷区域覆岩横向和纵向裂隙显著扩展,覆岩纵向裂隙更为发育,裂隙密度分布增大,纵向裂隙贯通地表,裂隙高度达 163 m,沟谷区域主要表现为大范围的拉伸裂隙。

沟谷区域由于主关键层的缺失,经工作面采动后,裂隙扩展现象明显,裂隙垮落轨迹线的变化呈现“拱形—梯形—复合梯形”状;“复合梯形”轨迹线沿着采空区岩层裂隙压实端部和覆岩层间的分界线,在沟谷区域形成多裂缝区;同时在该区段,导水裂隙在地表发生贯通,引起地表沉降。裂隙的扩张为导水通道的形成创造了条件,受采动影响,沟谷区域地表出现裂隙,易导致地表水通过导水裂隙渗入到地下,地下水沿导水通道向下渗流进入工作面及采空

区,造成井下的渗水现象。

3.2.2 覆岩微震能量演化规律

微震事件的发生主要反映了岩层裂隙的产生、

发育和断裂^[22]。模拟工作面向前推进,记录沟谷区发生裂隙或断裂时引发的微震信号。图6为工作面回采全过程中的微震事件特征。

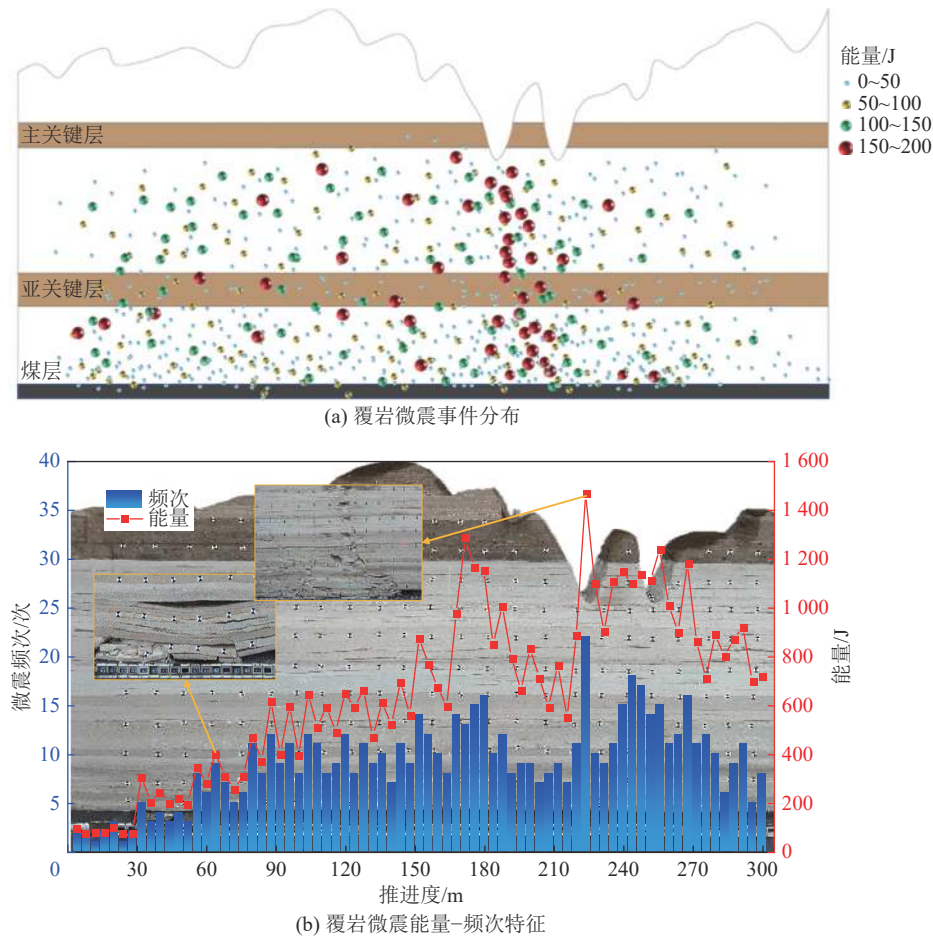


图6 工作面回采全过程微震事件特征

Fig.6 Characteristics of microseismic events in whole mining process of working face

工作面向前推进的过程中,覆岩周期性垮落及关键层的破断,造成大尺度的裂隙扩张,引发强烈的微震信号。当关键层发生破断,破断的关键层向下运动而发生垮落,引起连锁反应,造成覆岩的持续性破断,覆岩在断裂时积聚的能量,会产生较大能量的微震信号,关键层所控制的岩层垮落高度上升,覆岩离层高度升高,在覆岩更高位置产生较小能量的微震事件,微震事件能量较高的点主要集中在开采前方的破断线附近。由于工作面的持续推进,上覆岩层达到极限承载尺寸后发生破断,造成覆岩周期性垮落,故在覆岩微震能量-频次特征图中,随着周期性垮落,能量与频次呈锯齿状的变化。工作面未推进至沟谷区段,微震平均频次为7次,微震能量最大值为1346J。

工作面开挖至沟谷区段时,沟谷区工作面上覆岩层发生整体性切断,发生大面积垮落,伴随大能量

事件,造成工作面上覆岩层大范围的微震事件,微震事件数量剧增,微震能量值集中在500~1000J和1000~1500J,微震事件能量最大为1566J,频次达22次。模型开挖至沟谷区段,上覆岩层切断导致微震事件频发且聚集在切断面及贯通裂隙,切断导致的微震事件分布范围较大。裂隙由主关键层上升至沟谷区地表,在沟谷地表附近仍伴有大能量微震事件。沟谷地表产生大范围拉裂后,后续工作面推进时未出现明显垮落,大能量微震事件数量减少。

综上分析可知,随着工作面的推进,上覆裂隙不断扩张发育,使得微震事件频发,发育范围不断扩大。沟谷区域裂隙贯通至地表,引起地表发生沉降。裂隙的扩张为导水通道的形成创造了条件,受采动影响,当开采区域地表为特殊的沟谷区,地表出现的裂隙易导致地表水通过导水裂隙渗入到地下。地表水经开采造成的地表裂隙向下渗入,加剧了地下水在

“梯台”渗流通道的流通,地下水的渗流不断通过初渗、稳渗、紊渗区域并沿导水通道向下渗流涌入工作面及采空区。

4 数值模拟计算分析

针对工作面在沟谷区的推进造成较大的覆岩裂隙发育特点,运用离散元数值模拟方法进行裂隙扩展及发育研究,进一步分析沟谷区域裂隙的具体扩展特征。离散元软件 3DEC,采用动态松弛离散元法,通过数值模型的构建及对各覆岩结构面力学参数的赋值,可以从宏观、细观、微观 3 个尺度来分析裂隙面非线性变形和破坏的动态运动过程,特别是需要研究考虑复杂结构面的交叉影响时,可以更好的描述上覆岩层力学行为及裂隙扩展直至破坏的渐进过程。

4.1 数值模型建立

以 1305-2 工作面地质条件为背景,依据矿井地质钻孔资料,采用数值模拟软件 3DEC,模拟研究工作面过第 1 道沟谷开采时覆岩裂隙、导水裂隙带发

育高度情况,构建上覆岩层的数值计算模型,模型尺寸为 500 m(X) × 5 m(Y) × 260 m(Z),数值模型如图 7 所示。

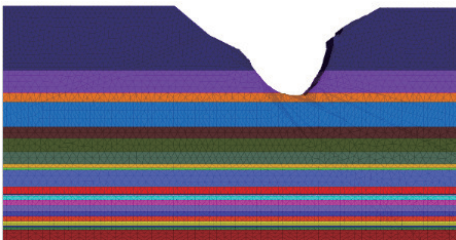


图 7 数值计算模型

Fig.7 Numerical calculation model

煤层开挖方案分 3 000 步开挖,每次开挖 50 m,模拟过程中覆岩采用摩尔-库仑本构模型,通过 hist 命令监测模型的不平衡力及垂向位移等数据。根据矿井地质报告、现场地质调查和岩石力学试验结果,确定数值模拟试验的煤岩力学参数,煤岩力学参数详见表 1。

表 1 煤岩力学参数

Table 1 Coal rock mechanics parameter table

| 岩层 | 密度/(kg·m ⁻³) | 体积模量/GPa | 剪切模量/GPa | 黏聚力/MPa | 内摩擦角/(°) | 抗拉强度/MPa |
|-------|--------------------------|----------|----------|---------|----------|----------|
| 表土层 | 2 350 | 0.55 | 1.58 | 2.25 | 33.46 | 1.86 |
| 粉砂岩 | 2 560 | 1.14 | 7.08 | 11.22 | 33.3 | 1.51 |
| 中粗砂岩 | 2 577 | 0.70 | 1.73 | 10.08 | 33.6 | 1.03 |
| 砂质泥岩 | 2 530 | 1.15 | 4.76 | 2.90 | 33 | 1.28 |
| 泥岩 | 2 753 | 0.80 | 3.15 | 4.26 | 33 | 1.05 |
| 煤层 | 1 420 | 0.78 | 2.56 | 2.11 | 29.5 | 0.26 |
| 细砂岩 | 2 582 | 3.60 | 11.25 | 10.22 | 33.4 | 1.95 |
| 含砾粗砂岩 | 2 653 | 2.76 | 5.88 | 10.11 | 33.4 | 1.20 |

4.2 数值模拟结果及分析

煤层推进过程中,围岩原始应力状态受到扰动,上覆岩层弯曲、断裂进而发生裂隙贯通。采用 3DEC 数值模拟,且根据煤层开采后上覆岩层的塑性区分布特征及位移幅度确定,研究沟谷区域导水裂隙带分布特征。

4.2.1 覆岩变形运移分布特征

煤层开采过程中,围岩原始应力状态改变,随着应力的释放及重新分布,采空区直接顶开始变形、下沉,随着工作面逐步向前推进,直接顶下沉量逐渐增大,上覆岩层弯曲、断裂并不断形成连续、贯通的裂隙,覆岩裂隙不断向上波及,直至地表。图 8 分别模拟了开挖至沟谷区 50、100、150、200、250 和 300 m

的上覆岩层运移演化结果。随着工作面的推进,覆岩发育直至沟谷区地表,沟谷区域位移云图呈现出滞后开采“高位梯形”破断形态,位移峰值主要位于下坡段和沟底处,在上坡段的下沉位移强度有所减弱,沟谷区域下沉位移值最大达 3.47 m。

4.2.2 覆岩塑性破坏分布特征

1305-2 工作面回采覆岩塑性破坏分布如图 9 所示,沟谷区上覆岩层受采动影响产生贯通裂缝和较大的破断裂隙。开采至沟谷区域下坡段时,地表裂隙宽度由于拉应力及坡面受开采及重力出现滑移的影响逐渐增大。当工作面开挖至坡底段,坡底的裂隙由于下坡段岩层挤压的影响有所减小。继续推进至上坡段时,地表表现为“撕裂式”的裂隙扩展,裂隙

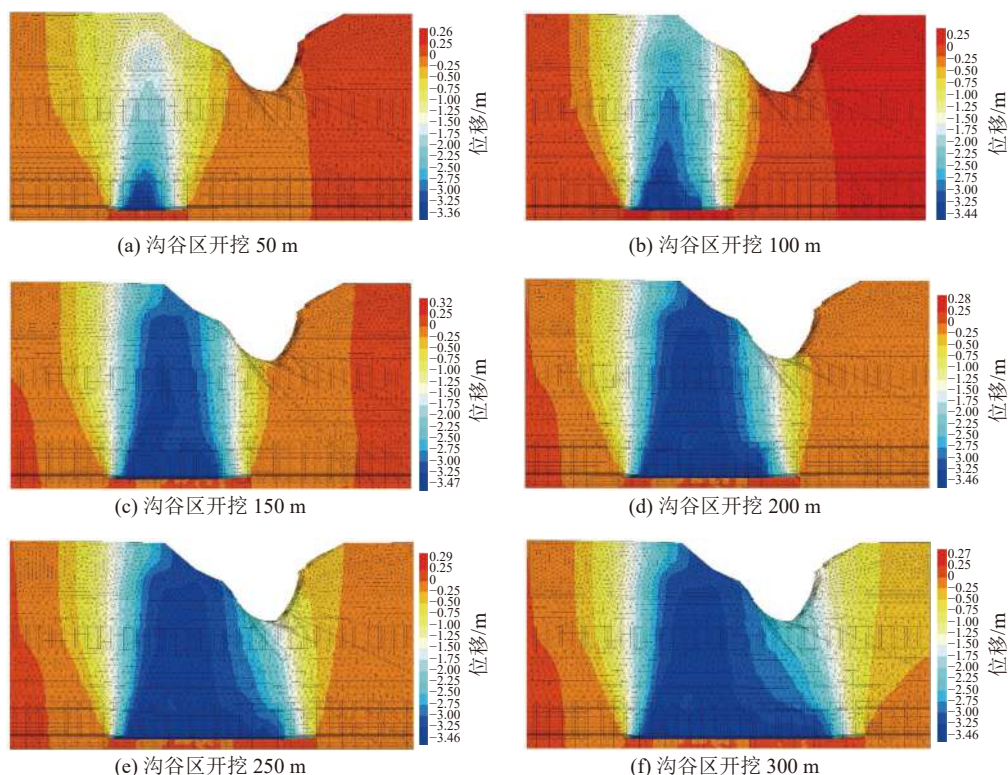


图 8 覆岩位移场演化分布特征

Fig.8 evolution and distribution characteristics of cover rock displacement field

宽度较大。工作面通过沟谷区域,覆岩塑性破坏主要表现为切向的剪切与拉伸破坏,坡底段的开采,出现较大的切向破坏。地表覆岩经过了“滑移—挤压—撕裂”,形成稳定的垮落结构裂隙发育区域分布,最终通过沟谷区域。

结合前述分析,沟谷区工作面开采覆岩裂隙发育明显,根据塑性区情况大致确定了工作面顶板覆岩的宏观裂隙带范围,可为现场监测所得“竖向两带”分布范围作辅助参考。覆岩裂隙发育形成“高位梯形”,受工程扰动与动静载作用,致使“高位梯形”内岩体结构发生变形移动及切向拉剪破坏,引发覆岩导水裂隙沿纵向进一步发育。此外,沟谷区段含水层上方覆岩存在部分缺失,工作面过沟谷区段时地表产生裂隙,形成高位“梯台”渗流空间结构。在经过沟谷区段时,裂隙受切向拉剪破坏较为严重,地表水的下渗为含水层产生垂向的水流量补给。工作面回采经过上、下坡段及坡底后,覆岩裂隙受到拉剪破坏减缓,地表向含水层补给量减少,上覆岩层恢复为常规性的“梯台”渗流空间结构。

5 沟谷区域裂隙防治

5.1 沟谷区域治理措施

依据前文研究,沟谷区域的开采导致上覆岩层导

水裂隙带发育至地表,基于地表裂隙治理及矿井水防治技术思路,对采动裂隙区域进行注浆处理^[23],同时对工作面上覆岩层进行注浆封堵,实现沟谷区域“井上—井下”联合防治。地表沟道采动裂缝主要通过复合三合土介质填充物和地面钻孔对发生裂隙的覆岩及离层区进行地表注浆充填,防止地表水经过裂隙通道,不断向下渗流,进入工作面。同时,对于采动造成的覆岩裂隙,重点针对稳渗区域,通过利用钻孔技术向覆岩裂隙中注入浆料进行封堵。将治理位置放在稳渗区域,在该区域对地下水的渗流进行截阻,可以实现对渗流场的渗流强度的减缓,裂隙中注入的浆料能够有效减少地下水及地表水经由导水裂隙带进入采空区,防治工作面水害,沟谷区裂隙治理图如图 10 所示。

5.2 防治效果验证

为验证对于沟谷区域裂隙的防治效果,根据朱家崙煤矿 1305-2 工作面采煤工序并结合工作面地质条件,监测区具体选择在工作面运输巷侧,距开切眼 400 ~ 600 m,监测对比 500 m 前后的采空区域,如图 11 所示。在 500 m 前,低阻区域范围较大,且有明显低阻区,图中的蓝色区域为含水区域;在探测区右侧电阻率明显升高,低阻区域明显减少,说明该范围富水性减弱。

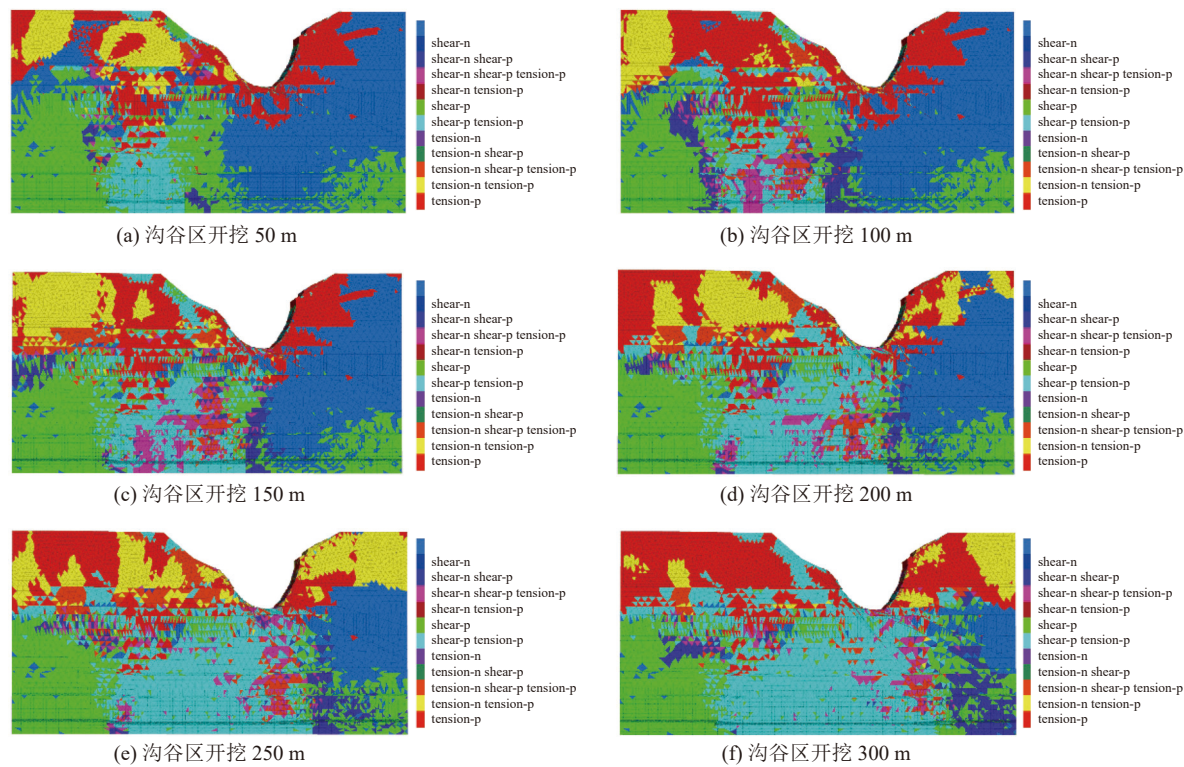


图 9 工作面过沟谷区塑性破坏分布特征

Fig.9 Distribution characteristics of plastic failure in loess gully area of working face

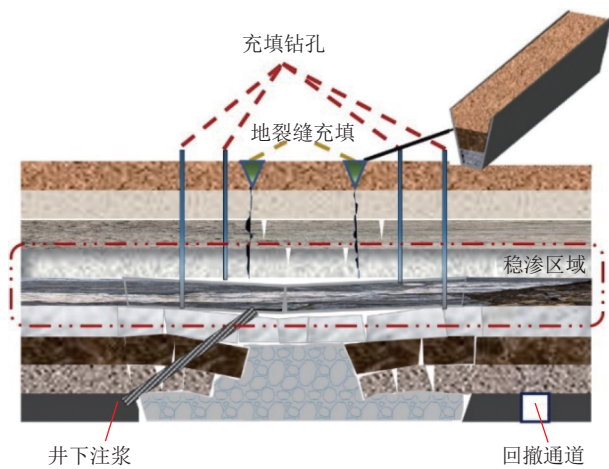


图 10 沟谷区裂隙治理图

Fig.10 Fissure treatment map of loess gully area

根据井下抽水管道的抽水量进行科学评价分析,通过对稳渗区域采取处理措施,井下实时出水量监测数据如图 12 所示,井下抽水量明显减少,最高涌水量减少 $30 \text{ m}^3/\text{h}$, 经过措施处理后的出水量显著降低。经过监测研究,对于稳渗区域采取的治理措施效果明显,可为下一个沟谷区段提供施工方案参考。同时,在下一段沟谷下开采前,应修筑堤坝和泄洪渠,防止地表水通过采动裂隙进入采空区,采后及时做好钻孔注浆。根据情况留设防隔水煤柱,超前疏放水,利用瞬变电磁设备对采空区积水情况进行探测,

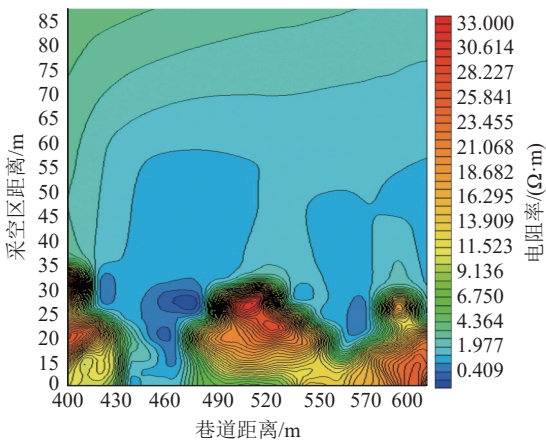


图 11 瞬变电磁探测图

Fig.11 Transient electromagnetic detection map

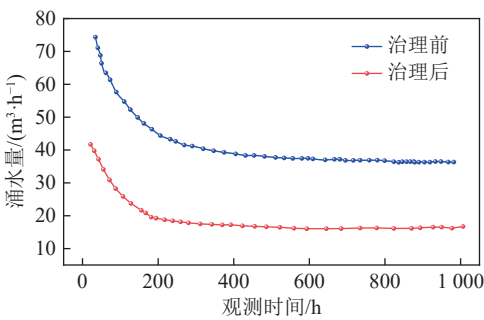


图 12 井下出水量监测

Fig.12 Monitoring of underground water output

对防隔水煤柱的安全状态进行监测。

6 结 论

1)通过裂隙结构特征分析与渗流形式判定,建立了采场覆岩“梯台”空间结构,并将其划分为初渗、稳渗和紊渗三个区域。基于采动裂隙发育特征和“时-空-强”变化特点,建立了覆岩裂隙场和渗流场的概念模型。

2)相似模拟试验结果表明,工作面未推进至沟谷区段,其上覆裂隙带发育正常,最大高度为42 m;当工作面推进至沟谷区段,其覆岩结构形态产生贯通裂缝,同时在沟谷区域下方形成斜交、水平、纵向等多条裂缝构成的多裂缝区;通过微震监测技术,分析沟谷区域能量演化规律,微震能量值集中在50~100 J和100~150 J,微震事件总能量为1 566 J,频次达22次;裂隙最大高度达163 m,纵向裂隙贯通地表,裂隙形态经历“拱形—梯形—复合梯形”的演化过程。

3)3DEC数值模型的模拟结果,呈现了覆岩导水裂隙的分布特征。沟谷区域下开采覆岩形成“高位梯形”破断形态,其下沉位移最大值达3.47 m,裂隙发育至地表,塑性破坏主要表现为切向的拉剪破坏,覆岩经历“滑移—挤压—撕裂”过程,裂隙在沟谷区段形成了高位“梯台”渗流空间结构。

4)提出了地面采动裂缝注浆充填措施,并且在工作面覆岩稳渗区域进行注浆封堵,以达到裂隙治理,减少地下水的渗流的目的。经过现场验证,防治效果明显。沟谷区域采取的“井上—井下”联合防治举措,不仅可以对矿井的安全生产起到防范作用,同时对黄河流域地表水的保护具有重要意义,为实现西部生态脆弱区的“保水开采”模式提供借鉴。

参考文献(References):

- [1] 王双明,黄庆享,范立民,等.生态脆弱矿区含(隔)水层特征及保水开采分区研究[J].煤炭学报,2010,35(1):7-14.
WANG Shuangming, HUANG Qingxiang, FAN Limin, *et al.* Study on overburden aquiclude and water protection mining regionization in the ecological fragile mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(1): 7-14.
- [2] 许家林,朱卫兵,王晓振.基于关键层位置的导水裂隙带高度预计方法[J].煤炭学报,2012,37(5):762-769.
XU Jialin, ZHU Weibing, WANG Xiaozhen. New method to predict the height of fractured water-conducting zone by location of key strata[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(5): 762-769.
- [3] 李树刚,林海飞,赵鹏翔,等.采动裂隙带动态演化及煤与甲烷共采[J].煤炭学报,2014,39(8):1455-1462.
LI Shugang, LIN Haifei, ZHAO Pengxiang, *et al.* Dynamic evolution of mining fissure elliptic paraboloid zone and extraction coal and gas[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1455-1462.
- [4] 胡国忠,李康,许家林,等.覆岩采动裂隙空间形态反演方法及在瓦斯抽采中的应用[J].煤炭学报,2023,48(2):750-762.
HU Guozhong, LI Kang, XU Jialin, *et al.* Spatial morphology inversion method of mining-induced fractures of overburden and its application in gas drainage[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 750-762.
- [5] 王双明,魏江波,宋世杰,等.黄土沟谷区浅埋煤层开采覆岩破坏与地表损伤特征研究[J].煤炭科学技术,2022,50(5):1-9.
WANG Shuangming, WEI Jiangbo, SONG Shijie, *et al.* Study on overburden and surface damage characteristics of shallow-buried coal seam mining in loess gully area[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(5): 1-9.
- [6] 赵金贵,岳科杉,李彦荣,等.韩咀煤矿32101工作面采动地裂缝走向与黄土地貌关系探讨[J].煤炭学报,2021,46(S2):898-906.
ZHAO Jingui, YUE Keshan, LI Yanrong, *et al.* Discussion on the relationship between mining-induced ground fractures strike and loess landform at 32101 face of Hanzui coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(S2): 898-906.
- [7] 肖鹏,韩凯,双海清,等.基于微震监测的覆岩裂隙演化规律相似模拟试验研究[J].煤炭科学技术,2022,50(9):48-56.
XIAO Peng, HAN Kai, SHUANG Haiping, *et al.* Similar material simulation test study on evolution law of overburden fracture based on microseismic monitoring[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(9): 48-56.
- [8] 侯恩科,谢晓深,冯栋,等.浅埋煤层开采地面塌陷裂缝规律及防治方法[J].煤田地质与勘探,2022,50(12):30-40.
HOU Enke, XIE Xiaoshen, FENG Dong, *et al.* Laws and prevention methods of ground cracks in shallow coal seam mining[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(12): 30-40.
- [9] 李树刚,刘李东,赵鹏翔,等.综采工作面覆岩压实区裂隙动态演化规律影响因素分析[J].煤炭科学技术,2022,50(1):95-104.
LI Shugang, LIU Lidong, ZHAO Pengxiang, *et al.* Analysis and application of fracture evolution law of overburden compacted area on fully-mechanized mining face under multiple factors[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 95-104.
- [10] 杨杨,朱慧聪,张士川,等.采动诱发的含原生裂隙覆岩运移及涌(淋)水时空特征分析[J].煤炭科学技术,2023,51(7):129-139.
YANG Yang, ZHU Huicong, ZHANG Shichuan, *et al.* Study on overlying strata containing primary fractures migration and spatial-temporal characteristics of water gushing (leaching) caused by mining field disturbance[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 129-139.
- [11] 王婉洁,高富强.工作面覆岩采动裂隙演化规律物理及数值模拟研究[J].采矿与岩层控制工程学报,2023,5(2):17-26.
WANG Wanjie, GAO Fuqiang. Study of the evolution of mining-induced fractures with longwall face proceeds-insight from phys-

- ical and numerical modeling[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2023, 5(2): 17–26.
- [12] 余伊河, 马立强, 张东升, 等. 长壁工作面采动覆岩层理开裂机理及侧向裂隙发育规律[J/OL]. *煤炭学报*: 1-15[2024-04-16]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2022.1307>.
YU Yihe, MA Liqiang, ZHANG Dongsheng, *et al.* The mechanism of bedding cracking and development laws of lateral fracture in overlying strata induced by longwall mining[J/OL]. *Journal of China Coal Society*: 1-15[2024-04-16]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2022.1307>.
- [13] 王旭, 尹尚先, 徐斌, 等. 综采工作条件下覆岩导水裂隙带高度预测模型优化[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(S1): 284–297.
WANG Xu, YIN Shangxian, XU Bin, *et al.* Study on height optimization prediction model of overburden water-conducting fracture zone under fully mechanized mining[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(S1): 284–297.
- [14] 来兴平, 张旭东, 单鹏飞, 等. 厚松散层下三软煤层开采覆岩导水裂隙发育规律[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(9): 1739–1750.
LAI Xingping, ZHANG Xudong, SHAN Pengfei, *et al.* Study on development law of water-conducting fractures in overlying strata of three soft coal seam mining under thick loose layers[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(9): 1739–1750.
- [15] 李振华, 李松涛, 杜锋, 等. 西南岩溶矿区采动影响下溶洞对导水裂隙发育规律研究[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(7): 106–117.
LI Zhenhua, LI Songtao, DU Feng, *et al.* Research on the development law of karst caves on water conducting fractures under the influence of mining in Southwest Karst Mining Areas[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(7): 106–117.
- [16] 李星亮, 黄庆享. 水体下特厚煤层综放开采导水裂隙带高度发育特征研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2022, 39(1): 54–61.
LI Xingliang, HUANG Qingxiang. High development characteristics of water flowing fractured zone in fully-mechanized top-caving mining of extremely thick coal seam under water[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2022, 39(1): 54–61.
- [17] 程详, 赵光明, 李英明, 等. 软岩保护层开采覆岩采动裂隙带演化及卸压瓦斯抽采研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2020, 37(3): 533–542.
CHENG Xiang, ZHAO Guangming, LI Yingming, *et al.* Evolution of overburden mining-induced fractured zone and pressure-relief gas drainage in soft rock protective seam[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2020, 37(3): 533–542.
- [18] 刘一龙, 杨天鸿, 叶强, 等. 山区多煤层重复采动下地表变形特征[J]. *采矿与安全工程学报*, 2022, 39(3): 507–516.
LIU Yilong, YANG Tianhong, YE Qiang, *et al.* Characteristics of surface deformation under repeated mining in mountainous area[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2022, 39(3): 507–516.
- [19] 孟祥军, 张广超, 李友, 等. 深厚表土覆岩结构运移演化及高应力突变致灾机理[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(5): 1919–1931.
MENG Xiangjun, ZHANG Guangchao, LI You, *et al.* Migration evolution laws of overburden structure with deep-lying thick surface soil and disaster mechanism induced by high stress mutation[J]. *Journal of China Coal Society*: 2023, 48(5): 1919–1931.
- [20] 单鹏飞, 崔峰, 曹建涛, 等. 考虑区域地应力特征的裂隙煤岩流固耦合特性实验[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(1): 105–117.
SHAN Pengfei, CUI Feng, CAO Jiantao, *et al.* Testing on fluid-solid coupling characteristics of fractured coal-rock mass considering regional geostress characteristics[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(1): 105–117.
- [21] 刘志高, 张守宝, 皇甫龙. 腾达煤矿倾斜煤层覆岩运移规律及“上三带”高度的确定[J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2022, 4(3): 70–79.
LIU Zhigao, ZHANG Shoubao, HUANGFU Long. Overburden migration law of inclined coal seam and determination of "upper three zones" height in Tengda Coal Mine[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2022, 4(3): 70–79.
- [22] 崔峰, 杨彦斌, 来兴平, 等. 基于微震监测关键层破断诱发冲击地压的物理相似材料模拟实验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(4): 803–814.
CUI Feng, YANG Yanbin, LAI Xingping, *et al.* Similar material simulation experimental study on rockbursts induced by key stratum breaking based on microseismic monitoring[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(4): 803–814.
- [23] 侯恩科, 车晓阳, 龙天文, 等. 浅埋煤层地表沟道采动裂缝溃水量预测方法[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(12): 4154–4162.
HOU Enke, CHE Xiaoyang, LONG Tianwen, *et al.* Prediction method of water inrush from ground cracks in shallow buried seams[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(12): 4154–4162.