

中厚缓倾斜煤层覆岩导水裂隙带形态特征研究

田波¹, 邓云驰², 杨守振³, 张涛⁴, 张培森²

(1. 山东能源集团有限公司, 山东 济南 250000; 2. 山东科技大学 能源与矿业工程学院, 山东 青岛 266590;

3. 枣庄矿业(集团)有限责任公司, 山东 枣庄 277000; 4. 山东能源集团鲁西矿业有限公司, 山东 菏泽 274700)

摘要: 水害是制约煤矿安全开采的主要灾害之一, 覆岩导水裂隙带作为地下水涌入采场的核心通道, 其形态特征对矿井水害防治至关重要。本研究旨在通过定量表征导水裂隙带形态特征, 为矿井水害风险防控提供理论依据。以中厚缓倾斜煤层为研究对象, 通过数值模拟分析不同采高(1.3~3.5 m)条件下覆岩应力场和塑性区演化规律, 并提出基于覆岩破坏角 α 对导水裂隙带形态特征进行定量表征。研究表明: 导水裂隙带高度和侧向宽度均随采高增加呈正相关性, 且上山侧发育程度高于下山侧; 覆岩破坏角 α 随采高增加逐渐减小, 非对称性差异随采高增大而减弱; 通过阳泉三矿K8404工作面实测数据验证显示, 基于覆岩破坏角模型的侧向宽度预测误差小于3 m(采高不超过6 m), 表明该方法具有较高的可靠性。基于覆岩破坏角 α 的定量表征方法, 实现了导水裂隙带形态从经验判断到定量预测的转变, 揭示了采高与裂隙带形态的非线性关系, 为类似地质条件矿井水害防治提供了新思路。

关键词: 中厚缓倾斜煤层; 导水裂隙带; 覆岩破坏角; 数值模拟

中图分类号: TD325

文献标志码: A

Study on morphological characteristics of water-conducting fracture zones in overlying strata of medium-thick gently inclined coal seams

TIAN Bo¹, DENG Yunchi², YANG Shouzheng³, ZHANG Tao⁴, ZHANG Peisen²

(1. Shandong Energy Group Co., Ltd., Jinan 250000, China;

2. College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

3. Zaozhuang Mining (Group) Co., Ltd., Zaozhuang 277000, China;

4. Shandong Energy Group Luxi Mining Co., Ltd., Heze 274700, China)

Abstract: Water hazard is one of the primary disasters that constrain coal mine safety exploitation. Water-conducting fracture zones in overlying strata serve as the critical channel for groundwater influx into mining faces and their morphological characteristics are crucial for mine water hazard prevention. This study aims to provide theoretical basis for mine water hazard risk control through quantitative characterization of fracture zone morphology. Focusing on medium-thick gently inclined coal seams, it conducted numerical simulations to analyze the evolution patterns of stress fields and plastic zones in overlying strata under different mining heights (1.3~3.5 m), and proposed a quantitative characterization method based on overburden rock failure angle α . The results indicate that both the vertical height and lateral width of water-conducting fracture zones show positive correlations with mining heights, with more pronounced development on the upslope side than the downslope side. With the increase of mining heights, the overburden rock failure angle α decreases gradually and its asymmetric difference diminishes. The field

收稿日期: 2025-02-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51379119); 国家重点研发计划项目(2018YFC0604702); 山东省自然科学基金项目(ZR2021ME086)

作者简介: 田波(1982—), 男, 重庆秀山人, 高级工程师, 主要从事煤矿防治水工作. E-mail: tianbo57714@163.com

张培森(1977—), 男, 山东曹县人, 教授, 博士生导师, 主要从事采矿工程与岩石力学等方面的研究工作, 本文通信作者. E-mail: peisen_sky@163.com

measurements from K8404 working face in Yangquan No. 3 Mine show that the prediction errors of lateral width is less than 3 m (when mining height ≤ 6 m), which illustrates the higher reliability of the proposed method. The α -based quantitative characterization achieves a transition from empirical judgment to quantitative prediction of fracture zone morphology, revealing the nonlinear relationships between mining height and fracture zone morphology, thereby providing novel insights for water hazard prevention in mines with similar geological conditions.

Key words: medium-thick gently inclined coal seam; water-conducting fracture zone; overburden rock failure angle; numerical simulation

水害作为煤矿五大灾害之一,严重制约我国煤炭资源的安全经济开采^[1]。煤炭开采过程中,覆岩导水裂隙带作为地下水涌入采场的核心通道,其形态特征是关系到是否引起地下水渗漏的决定性因素^[2]。我国华北、西北等煤炭主产区,中厚缓倾斜煤层分布较为广泛,研究其上覆岩层破坏特征和导水裂隙带发育规律对指导矿井安全高效生产具有重要意义。

覆岩变形破坏规律受多种因素影响,包括煤层倾角、采高、覆岩岩性等。例如,在倾斜煤层开采中,导水裂隙带发育高度通常呈现上边界大于下边界的非对称性特征,该现象与煤层倾角密切相关^[3]。近年来,研究者们对覆岩导水裂隙带形态特征进行了深入研究,如徐树媛等^[4]对近年来导水裂隙带发育范围、影响因素及预测方法等研究成果进行了总结,较为全面地阐述了导水裂隙带发育规律研究进展;孟海伦等^[5]通过有限元模拟和分形几何理论,定量评估了覆岩裂隙场发育特征和演化规律;Lai等^[6]基于物理模型试验,分析了覆岩导水裂隙带发育高度与裂隙发育特征;黄万朋等^[7]根据导水裂隙带发育规律与岩层运动特征的相关性,提出了基于覆岩组合结构与岩层拉伸变形计算的导水裂隙带发育高度预测方法;Fan等^[8]基于导水裂隙横向边界分布特征明确了上覆岩层阻水机理,提出了覆岩内渗流区、阻水区和塑性区3个区域的破坏模式;孙斌杨等^[9]以永陇矿区某矿为研究背景,基于相似物理模型试验,揭示了覆岩变形主要表现为“大裂高”、“台阶状”、“滞后垮落”的时空演化规律;康国彪等^[10]以补连塔煤矿为研究背景,基于理论分析、数值模拟与工程类比相结合的方法,指出导水裂隙带发育形状由“S型”向“台型”演化;陈连军等^[11]基于通用离散元程序(universal distinct element code, UDEC)数值模拟与现场实测结果,分析了导水裂隙带侧向宽度的形成机理及发育特点,指出张开型裂隙致使导水裂隙带侧向边界外凸;He等^[12]基于相似模拟、理论分析与工程验证相结合的方法,系统研究了层状覆岩导水裂隙带发育规律;Huang等^[13]基于覆岩组合结构理论提出了导水裂隙带高度预测方法,确定了导水裂隙带高度与边界形态。上述研究从覆岩导水裂隙带高度预测、形态演化等角度进行了深入分析,明晰了裂隙带形态演化过程中裂隙发育阶段性变化特征与变形破坏机制的内在联系,对矿井水害防治、水资源保护及矿山灾害防控理论体系完善等起到了极大的推动作用。

覆岩变形破坏特征呈现区域性,不仅需要关注导水裂隙带发育高度,也需关注导水裂隙带侧向边界。然而,目前研究多集中于导水裂隙带发育高度,而对导水裂隙带侧向边界发育特点的关注相对较少,且研究多停留在定性描述层面。因此,本研究以中厚缓倾斜煤层为例,通过构建导水裂隙带发育高度与侧向边界间的定量关系,将导水裂隙带高度与侧向宽度的关联参数提升为具有明确物理意义的角值函数,实现了裂隙带形态的定量化预测。研究成果可为类似地质条件矿井突水风险评价提供理论依据,对推动矿山灾害防控从“经验判断”向“定量预测”转型具有借鉴意义。

1 中厚缓倾斜煤层开采数值模拟研究

1.1 数值模型建立

数值模拟方法操作简单、计算较快,节约人力物力,且具有动态演化过程可视化、参数可调等优势,在矿业工程等领域被广泛应用。本研究以七五煤业43_下06工作面为背景建立数值模型,43_下06工作面位于43采区中部,为采区首采面,开采煤层为3_下煤层,走向长度为960 m,倾斜长度为260 m,工作面标高为-620.5~ -707.4 m,工作面巷道布置平面图及综合柱状图分别如图1和图2所示。数值模型采用Mohr-Coulomb本构模型,模型前、后、左、右面均进行水平位移约束,底部进行垂直位移约束,模型顶部为自

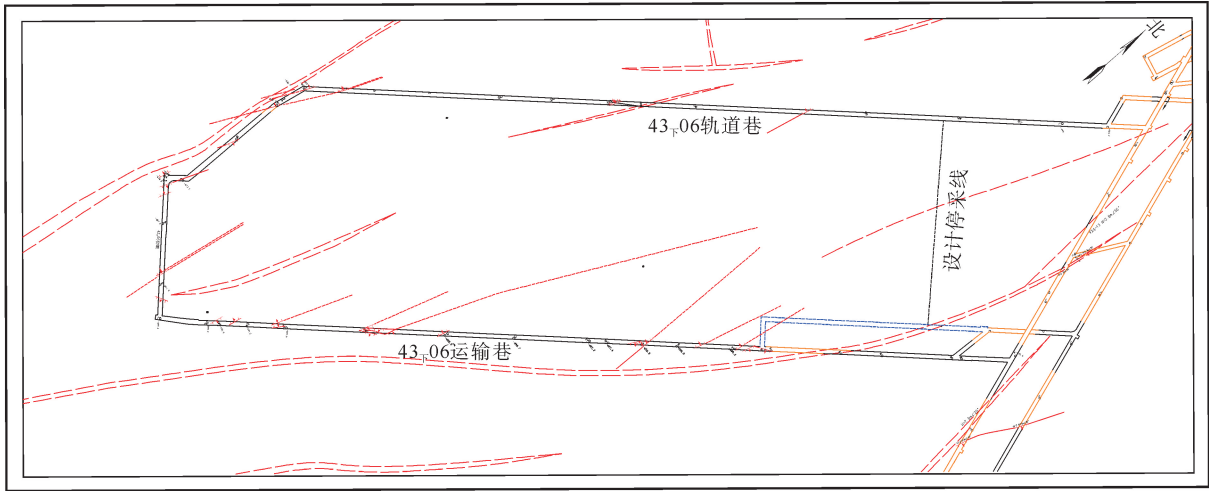


图 1 工作面巷道布置平面图

Fig. 1 Layout plan of the working face roadway

由面,不进行约束。为明确中厚缓倾斜覆岩导水裂隙带形态特征,本次数值模拟煤层倾角为 12° ,并设计了5种采高(1.3、2.0、2.5、3.0和3.5 m)。模型尺寸设置为长 $\times$ 宽 $\times$ 高=1 900 m $\times$ 1 000 m $\times$ 945 m,采用六面体结构化网格,煤层区域网格进行了加密处理。模型岩层构建参考七五煤业实际钻孔资料,煤层顶底板主要岩层力学参数见表1。

数值模拟计算步数设置为动态自适应步长,以平衡精度与效率。收敛判断标准为节点不平衡力比率小于 1×10^{-5} ,各工况具体模拟步数取决于采高与覆岩变形速率。其中,当塑性区体积增量连续10步增长判定为不可逆破坏阶段;当塑性区体积增量连续50步无显著变化(波动 $<5\%$)时认为覆岩变形趋于稳定。文中所给数值模拟结果均为稳定阶段结果。

1.2 采动覆岩应力演化特征

采动应力演化能直接反映覆岩承载能力变化和失稳风险。研究采动覆岩应力演化特征,既是实现矿山安全高效开采的“科学基础”,也是灾害防控的“决策依据”,其意义在于通过量化应力动态响应规律,指导工程实践从经验决策向科学调控跨越。因此,图3以煤层倾角 12° 、采高1.3~3.5 m为例,给出了采动覆岩应力分布图,图中应力单位为Pa。

由图3可知,中厚缓倾斜煤层开采在切眼两侧产生了明显应力集中现象,但覆岩应力场整体呈现出非对称“蝶形”分布。受上覆岩层自重及倾角效应影响,导致上山侧覆岩应力集中程度较低,应力集中范围相对较小,而下山侧覆岩应力集中程度较高,应力变化及应力集中范

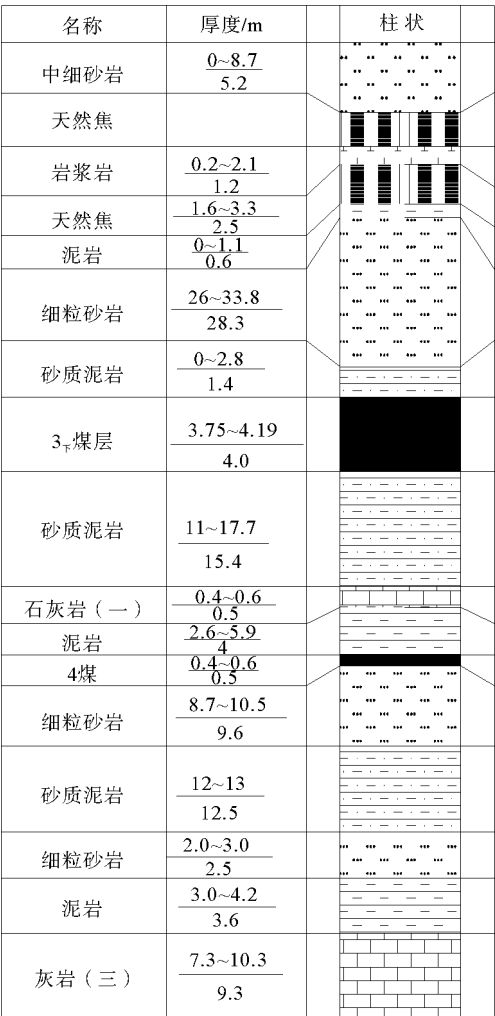


图 2 综合柱状图

Fig. 2 Comprehensive bar chart

围相对较大^[14-15]。当采高 1.3~2.5 m 时,由于直接顶岩层破断范围有限,导致下山侧垂直应力快速升高,最大集中应力达到了 9.895×10^7 Pa;上山侧则以水平应力调整为主,应力集中区主要分布于切眼两侧。当采高达到 3 m 及以上时,基本顶破断范围增大,覆岩应力场具有向深部转移的趋势,因顶板垮落卸荷效应影响,导致上山侧覆岩应力显著释放,应力集中程度显著降低;下山侧则在卸荷效应、上覆岩层自重及倾角效应共同影响下,形成二次应力集中区,其最大集中应力较采高 2.5 m 时有所减小。

表 1 主要岩层力学参数

Table 1 Main rock mechanics parameters

岩层	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	黏聚力/MPa	抗拉强度/MPa	内摩擦角/(°)	密度/(kg·m ⁻³)
灰岩	10.40	9.87	3.90	1.84	40.0	2.76
粉砂岩	11.60	9.03	3.20	1.50	35.0	2.60
煤	1.52	0.79	1.00	0.30	20.0	1.38
泥岩	2.96	1.86	2.00	0.89	30.0	2.46
细砂岩	5.67	4.25	2.20	1.10	32.0	2.62
中砂岩	20.50	10.60	2.90	1.22	40.0	2.65
松散层	0.14	0.09	0.80	0.85	28.0	2.10

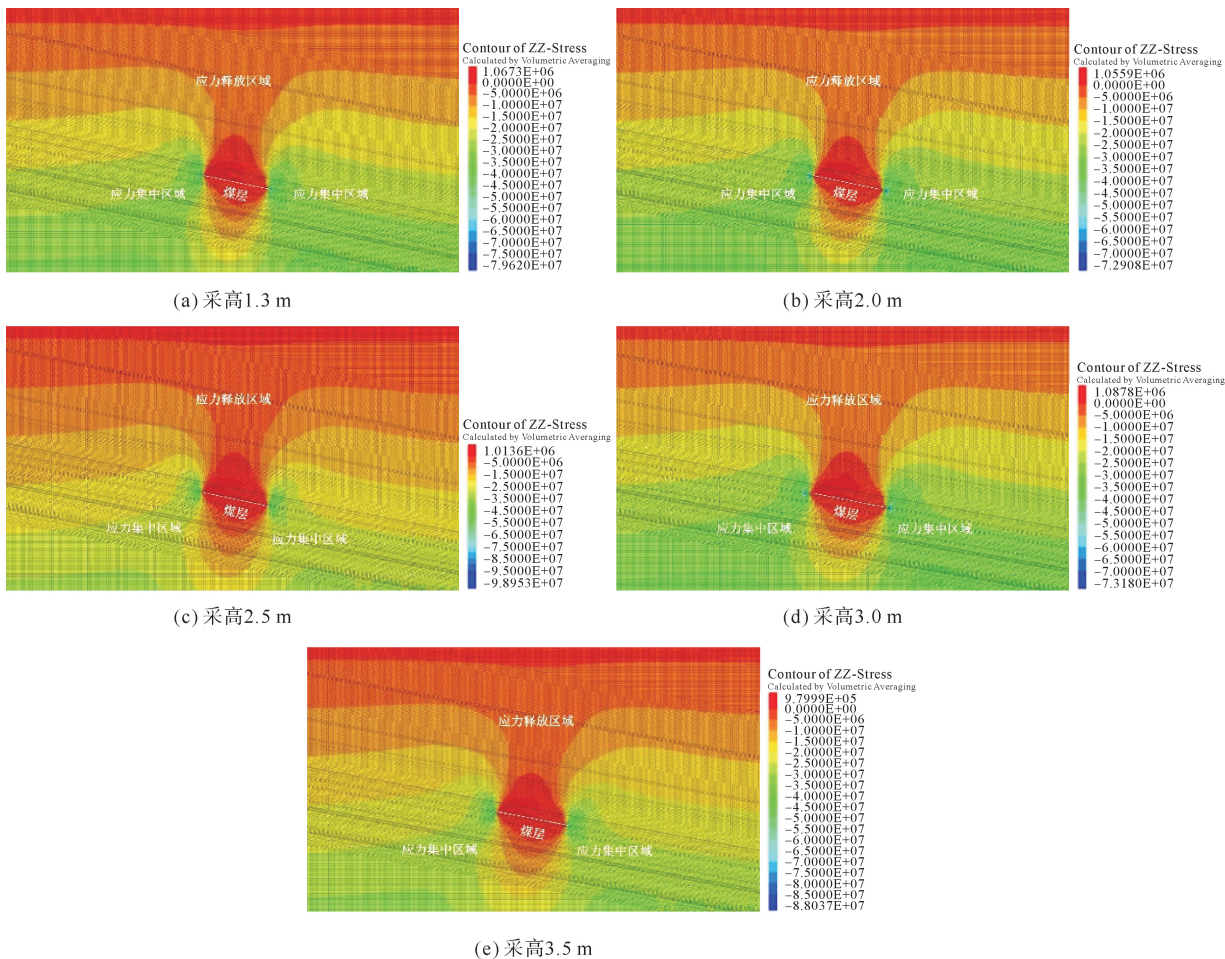


图 3 采动覆岩应力分布图

Fig. 3 Mining overburden stress distribution map

1.3 采动覆岩塑性区演化特征

塑性区是采动应力作用下岩体进入塑性变形(不可逆破坏)的区域,其演化规律直接反映覆岩失稳的临界状态,塑性区内连通裂隙是诱发突水、瓦斯渗流等的直接通道。研究采动覆岩塑性区演化特征,其意义在于通过揭示岩体破坏的时空演化规律,实现从被动治理到主动防控的转变。因此,图4以中厚缓倾斜煤层开采为例,给出了采动覆岩塑性区分布图,其中None表示未破坏单元, shear-n、shear-p 分别表示当前与以前循环中的剪切破坏单元, tension-n、tension-p 分别表示当前与以前循环中的张拉破坏单元。

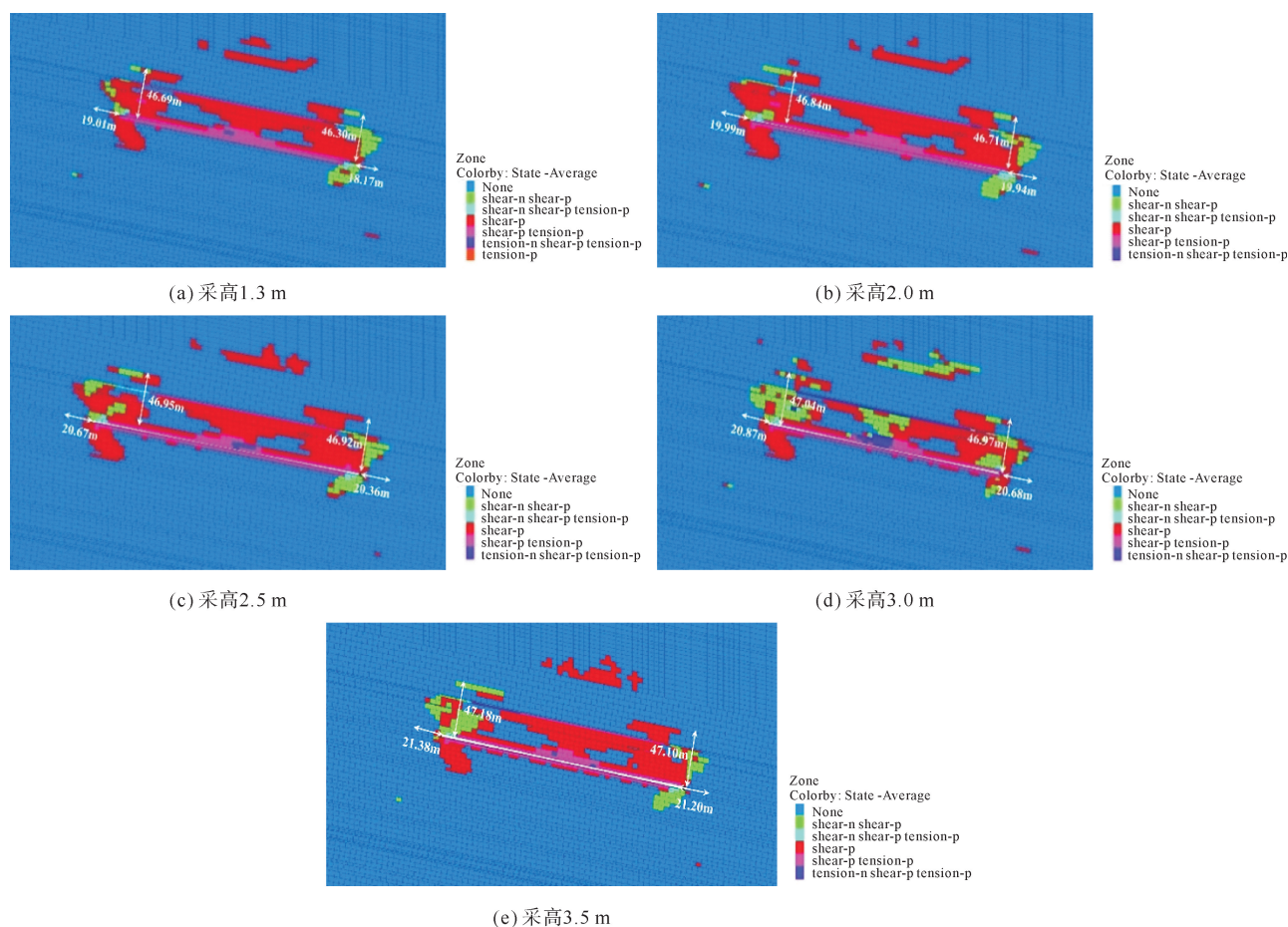


图4 采动覆岩塑性区分布图

Fig. 4 Distribution of plastic zone of mining overburden rock

由图4可知,不同采高条件下塑性区分布形态无明显差别,均近似呈现中间低两边高的“马鞍形”,这是由于覆岩受开采扰动影响,其内部应力重新分布和集中所导致。切眼两端表现出明显应力集中,覆岩破坏程度及范围更大,而在中部位置则以应力释放为主,覆岩破坏程度及范围相对较小,进而出现“马鞍形”破坏形态。此外,发现在这种缓倾斜煤层开采中,覆岩破坏程度在上山侧更大,而在下山侧相对较小,体现出非对称性破坏特征。分析认为,这种非对称性破坏特征与垮落岩块的运动特性、应力分布等密切相关^[16],受上覆岩层自重及倾角效应影响,上山侧覆岩具有“下滑”的运动趋势,当覆岩超过其临界破坏条件,垮落岩块将下滑充填至下山侧,使下山侧覆岩运动空间受限,造成下山侧顶板垮落不充分,呈现非对称性破坏特征。

1.4 采动覆岩塑性区演化规律

为定量分析中厚缓倾斜开采导水裂隙带形态特征,表2给出了不同开采高度下导水裂隙带发育高度及侧向边界超出开采边界的宽度,其中上山导高、上山侧宽表示位于上山侧导水裂隙带的高度(导高)与侧向宽度(侧宽),下山导高、下山侧宽则对应下山侧。

表2 不同开采高度下导水裂隙带参数

Table 2 Parameters of water-conducting fracture zone under different mining heights

m

序号	采高	上山导高	下山导高	上山侧宽	下山侧宽
1	1.3	46.69	46.30	19.01	18.17
2	2.0	46.84	46.71	19.99	19.94
3	2.5	46.95	46.92	20.67	20.36
4	3.0	47.04	46.97	20.87	20.68
5	3.5	47.18	47.10	21.38	21.20

由表2可知,基于覆岩非对称性破坏特征,在不同采高条件下,上山侧导水裂隙带高度与侧向边界宽度整体大于下山侧。为进一步阐述采高与导水裂隙带之间的关系,图5、图6分别给出了导水裂隙带高度与侧向边界宽度随采高的演化规律。

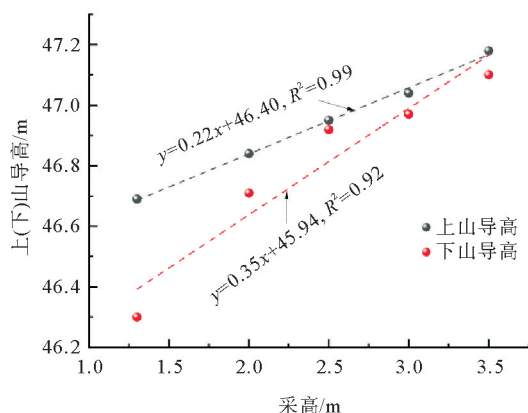


图5 裂隙带高度演化规律

Fig. 5 Evolution law of fracture zone height

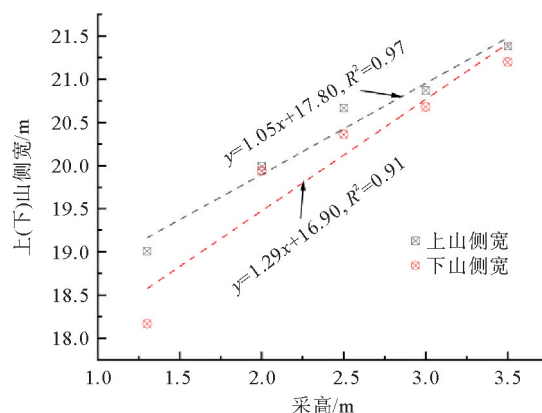


图6 侧向边界宽度演化规律

Fig. 6 Evolution law of lateral boundary width

由图5~6可知,采高与导水裂隙带高度、侧向边界宽度均呈现正相关性。分析认为,由于采高增加,上覆岩层垂向运动空间增大,更易达到岩层强度极限而导致弯曲垮落。基于线性拟合结果,上山侧采高与导水裂隙带高度、侧向边界宽度拟合效果整体优于下山侧。此外,无论导水裂隙带高度还是侧向边界宽度,均随采高增加,上山和下山侧差距逐渐呈减小趋势。分析认为,煤层厚度较小时,覆岩破坏程度及范围分布不均,导水裂隙带高度及侧向边界宽度在上山和下山侧存在较大差异;随开采高度增加,覆岩破坏范围变大,应力分布趋于均匀化,减少了因局部应力集中而导致裂隙发育差异,进而缩小了导水裂隙带高度及侧向边界宽度在上山侧和下山侧的差异。

1.5 非对称差异系数变化规律分析

基于导水裂隙带发育高度及侧向边界发育宽度在上山侧和下山侧的非对称性差异问题,对其进行定量分析。引入非对称差异系数 μ :

$$\mu = \frac{|h_{\text{上山}} - h_{\text{下山}}|}{(h_{\text{上山}} + h_{\text{下山}})/2} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $h_{\text{上山}}$ 、 $h_{\text{下山}}$ 分别为上山侧和下山侧的导水裂隙带高度或侧向宽度,m。非对称差异系数 μ 越大,表明上山侧与下山侧差异越显著。基于上述分析,计算给出了不同采高条件下的非对称差异系数,导水裂隙带高度非对称差异系数为 μ_1 ,导水裂隙带侧向宽度非对称差异系数为 μ_2 ,见表3。

由表 3 可知,随着采高增加,非对称差异系数 μ_1 、 μ_2 整体呈下降趋势。在采高为 1.3 m 时,导水裂隙带高度非对称差异系数 μ_1 为 0.83%,侧向宽度非对称差异系数 μ_2 为 4.42%;采高 3.5 m 时,导水裂隙带高度非对称差异系数 μ_1 为 0.17%,侧向宽度非对称差异系数 μ_2 为 0.85%。分析认为,当采高较小时(如 1.3 m),覆岩破坏范围受限,上山侧因重力分异作用更易形成拉伸裂隙,导致非对称差异系数 μ_1 、 μ_2 较大;随着采高增加(如 ≥ 3.0 m),覆岩整体垮落范围扩大,应力分布趋于均匀,上山侧与下山侧差异显著降低,非对称差异系数 μ_1 、 μ_2 较小。综上,从定量分析角度,进一步验证了“非对称性差异随采高增大而减弱”的结论。

2 导水裂隙带形态特征分析

2.1 几何参数定量表征

目前,相关规定只给出了导水裂隙带发育高度计算公式,而侧向边界的判定方式暂无统一标准,仅以 5 mm/m 的最小水平变形作为导水裂隙带侧向边界参考指标^[17],且导水裂隙带发育高度与侧向边界发育宽度之间的量化表征目前关注较少。导水裂隙带形态特征是矿井水害防治的关键参数,研究导水裂隙带的形态特征不仅要关注导水裂隙带发育高度,也要关注导水裂隙带侧向边界发育宽度,通过量化表征,可以准确评估采煤活动对上覆含水层及老空水等的影响,从而制定合理的采煤措施。基于此,定义覆岩破坏角 α 为导水裂隙带发育高度与导水裂隙带侧向边界发育宽度的比值的反正切值(示意图见图 7)。其物理意义在于两个方面,其一为表征裂隙带形态斜率, α 反映了导水裂隙带从采空区边界向覆岩内部的扩展倾角,直观描述裂隙带整体形态的陡缓程度;其二为定量参数关联,通过 α 可将高度与侧向宽度统一为单一参数,便于定量分析不同采高下裂隙带形态的动态演化规律。

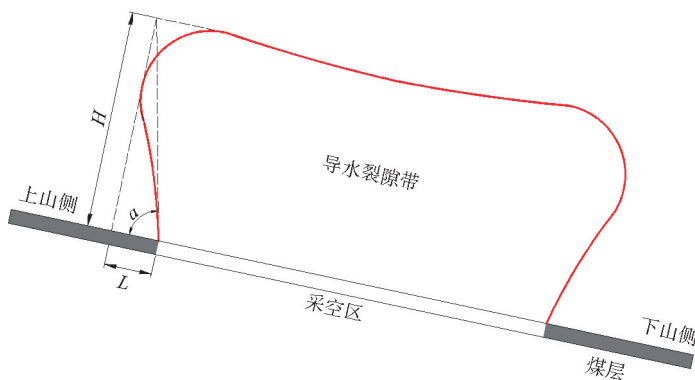


图 7 覆岩破坏角 α 示意图

Fig. 7 Schematic diagram of overburden rock failure angle α

导水裂隙带发育高度 H 与导水裂隙带侧向边界发育宽度 L 构成直角三角形的两条直角边, α 为斜边与水平方向的夹角, H 与 L 的比值为覆岩破坏角 α 的正切值(式(2)),式(3)定义覆岩破坏角 α 。

$$\tan \alpha = \frac{H}{L}, \quad (2)$$

$$\alpha = \arctan \frac{H}{L}. \quad (3)$$

如图 7 所示,覆岩破坏角 α 既受导水裂隙带高度影响,又受到侧向边界发育宽度影响,可以整体把握导水裂隙带形态特征,进而明确不同开采参数下导水裂隙带的形态特征规律。

2.2 覆岩破坏角变化规律分析

据实测资料可知,导水裂隙带范围与覆岩移动变形有密切联系。煤层开采后,上覆岩层断裂垮落形成导水裂隙带,导水裂隙带以上直至地表的岩层一定程度上会发生弯曲下沉,呈整体移动,地表各点会向采空区

中心方向移动,形成地表移动盆地,通常用边界角、移动角等圈定移动盆地边界。目前研究多集中于覆岩运动和导水裂隙带发育高度的关系以及覆岩运动与地表下沉的联系,然而关于导水裂隙带形态特征与地表移动盆地范围是否存在联系却鲜有涉及。由此选取地表移动盆地边界角与移动角参数,分析地表移动盆地边界角、移动角与覆岩破坏角 α 之间的关系。经查阅相关资料,表 4 给出了开采水平及缓倾斜煤层时的采高、边界角与移动角参数;根据式(3)计算得到不同采高度条件下覆岩破坏角 α ,见表 5;覆岩破坏角 α 与采高之间的关系见图 8。

表 4 实测参数统计表

Table 4 Statistical table of measured parameters

序号	观测站	采高/m	边界角/(°)	移动角/(°)
1	4110(枣矿)	1.45	67.5	70.7
2	2042(枣矿)	1.45	62.5	64.4
3	2439(枣矿)	1.17	69.5	88.9
4	331(枣矿)	1.85	62.0	71.0
5	12211(新安矿)	1.40	65.0	73.0

表 5 不同开采高度下覆岩破坏角 α

Table 5 Failure angle α of overburden rock under different mining heights

序号	采高/m	上山侧 $\alpha/(^{\circ})$	下山侧 $\alpha/(^{\circ})$
1	1.3	67.85	68.57
2	2.0	66.89	66.88
3	2.5	66.24	66.54
4	3.0	66.07	66.24
5	3.5	65.62	65.77

由表 4 数据可知,在采高为 1.40~1.85 m 时,边界角为 62°~67.5°,移动角为 64.4°~73°。由本研究模拟结果可知,采高为 1.3~2.0 m 时,上山侧与下山侧覆岩破坏角 α 介于 66.88°~68.57°。综上,均取其范围均值作为参考,即当采高为 1.6 m 时,边界角约 64.5°,移动角约 69.5°,覆岩破坏角 α 约 67.5°。由此,推断地表移动盆地边界角、移动角参数与导水裂隙带覆岩破坏角 α 的关系:

$$\beta_0 = \alpha - 3, \quad (4)$$

$$\beta = \alpha + 2. \quad (5)$$

式中: β_0 为边界角, β 为移动角。

如图 8 所示,图中虚线表示非线性拟合趋势线,随采高增加,覆岩破坏角呈下降趋势。上山侧和下山侧覆岩破坏角随采高变化趋势相似,但上山侧破坏角整体略低于下山侧。此外,图中还显示了两个拟合方程 R^2 值,分别为 0.99 和 0.96,表明两个非线性拟合模型都能较好地描述采高与覆岩破坏角之间的关系。其中,上山侧拟合模型拟合度更高。基于前文分析可知,上山侧破坏程度整体大于下山侧,且覆岩破坏角 α 与采高的拟合程度更高,因此在后文分析验证中均以上山侧拟合结果为准。

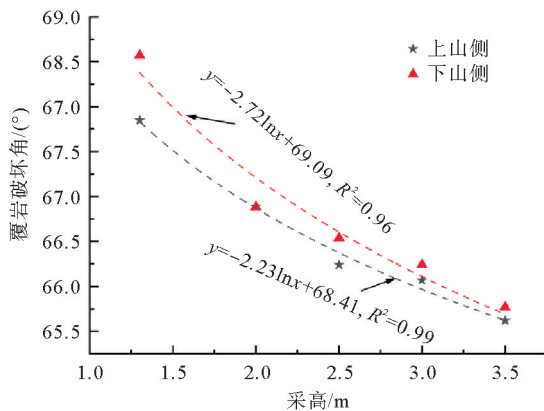


图 8 不同采高下覆岩破坏角 α

Fig. 8 Failure angle α of overburden rock under different mining heights

3 工程验证

徐光等^[17-18]以阳泉三矿 K8404 工作面为研究背景,对导水裂隙带侧向发育宽度进行研究。阳泉三矿 K8404 工作面与七五煤业 43_下 06 工作面地质条件匹配度较高,且相关数据具有较高的完整性与权威性,可为模型误差分析提供可靠支撑,同时跨区域(山东与山西)验证也可进一步检验模型的普适性。因此,以阳泉三矿 K8404 工作面为例进行相关验证说明。表 6 中采高、导水裂隙带高度与导水裂隙带侧向宽度数据来源于文献[17-18],首先基于图 8 上山侧非线性拟合方程得出了不同采高条件下的覆岩破坏角 α ,然后将覆岩破坏角 α 与实际导水裂隙带高度代入式(1),反算得出预测导水裂隙带侧向宽度,误差分析见图 9,具体计算结果见表 6。

表 6 导水裂隙带侧向宽度实际值与预测值对比

Table 6 Comparison of the actual value and the predicted value of the lateral width of the water-conducting fracture zone

序号	采高/m	导水裂隙带高度/m	导水裂隙带侧向宽度/m	覆岩破坏角 $\alpha/(^{\circ})$	预测导水裂隙带侧向宽度/m	预测误差/m
1	2	44.5	21.0	66.86	19.01	1.99
2	4	59.5	25.7	65.32	27.34	1.64
3	6	71.7	35.6	64.41	34.33	1.27
4	8	89.3	48.9	63.77	43.99	4.91

由图 9 及表 6 可知,在采高为 2、4、6 m 时,实际导水裂隙带侧向宽度与预测值差距较小,预测误差小于 2 m;当采高为 8 m 时,实际导水裂隙带侧向宽度与预测值差距相对较大,预测误差为 4.91 m。鉴于保德煤矿 81306 工作面研究结果^[19],采高 4 m 时,侧向影响范围 24.7 m。基于表 6,采高 4 m 时的预测导水裂隙带侧向宽度为 27.34 m,由此可见,预测值与实际值误差在 3 m 以内。考虑到覆岩破坏形态受煤层实际赋存条件影响,包括采高、煤层倾角、覆岩岩性及组构等,上述两个工程实例的预测误差均在可接受范围之内。但从防水煤柱优化角度来看,基于覆岩破坏角

α 模型指导防水煤柱留设宽度时,建议预留 3~5 m 安全冗余,即建议煤柱留设宽度=预测侧宽+安全冗余。针对厚及特厚煤层或覆岩含软弱夹层的工作面,需实施“一矿一策”差异化防控策略。

综上可知,基于本研究所给拟合方程及计算式可以很好地表征导水裂隙带高度与侧向宽度之间的关系,进而实现了从定性到定量的过渡,从“经验判断”走向“定量预测”。值得注意的是,从科学严谨角度出发,本研究量化表征方法适用于中厚(1.3~3.5 m)缓倾斜(8~25°)且覆岩岩性相对均质的煤层条件,对于其他地质条件,模型适用性有待进一步验证。

4 讨论

4.1 局限性分析

1) 本研究假设覆岩为均质 Mohr-Coulomb 介质,未考虑软弱夹层或高渗透砂岩层的局部弱化效应。若覆岩中存在泥岩夹层,可能因层间滑移导致导水裂隙带高度异常增大。此外,模型中未预设先存节理或断层,而实际岩体常包含节理网络,由于节理或断层会改变应力传递路径,其发育方向与密度会显著影响裂隙贯通路径,可能导致裂隙带侧向扩展偏离模拟预测。

2) 当开采厚及特厚煤层时,覆岩破坏范围显著扩大,可能触发多层级关键层的协同破断,导致导水裂隙带侧向边界扩展路径复杂化。本研究模型基于单层均质覆岩假设,未考虑多层结构间的相互作用,可能低估了裂隙带侧向扩展的非线性特征。大采高条件下,覆岩垮落岩块在重力作用下发生旋转、滑移与二次充填^[20],这一过程会改变裂隙带的连通性与渗透率分布。本研究模型未引入流变本构描述岩体时效变形,也未考虑垮落岩块动态充填对裂隙闭合的影响,导致侧向边界预测值可能偏小。

4.2 适应性及改进方向

1) 当前模型适用于覆岩岩性均质且无显著流变效应的中厚缓倾斜煤层,对于采高较大情况或存在软弱

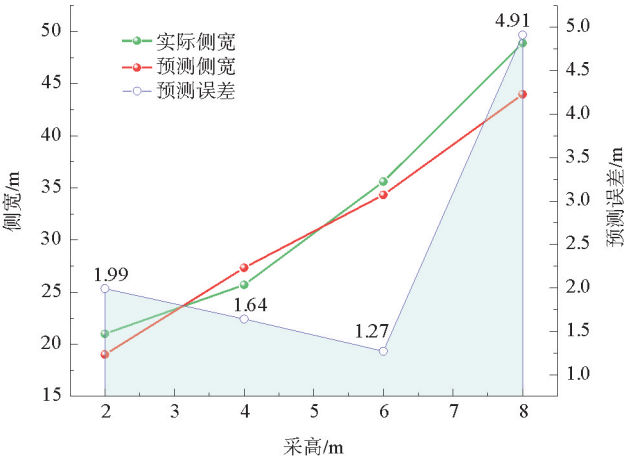


图 9 预测值与实际值对比图

Fig. 9 Comparison between predicted value and actual value

夹层的条件,需结合现场实测数据进行区域性修正。

2) 从模型优化角度,可以针对厚及特厚煤层,采用分层开采模拟,以更精确描述覆岩破坏的阶段性特征,也可以从多场耦合建模角度进行深入分析,例如引入渗流-应力-损伤耦合模型,定量表征岩性差异与节理网络对裂隙发育的影响。从动态修正角度,可以建立考虑岩块旋转与充填的裂隙闭合修正系数,动态调整侧向边界预测算式。

5 结论

1) 导水裂隙带形态与采高的关系。导水裂隙带发育高度及侧向边界宽度均与采高呈显著正相关性,且上山侧参数值整体高于下山侧,需重点监测上山侧导水裂隙带发育区域。采高增加导致覆岩破坏范围扩大,应力分布趋于均匀化,减小了上山侧与下山侧的发育差异。

2) 覆岩破坏角定量表征。提出的覆岩破坏角 α 能够综合反映导水裂隙带高度与侧向边界宽度的动态关系。随采高增加, α 值呈非线性下降趋势,上山侧与下山侧差异逐渐减小,拟合模型确定系数分别达0.99(上山侧)和0.96(下山侧)。

3) 工程应用验证。经阳泉三矿K8404工作面实测数据验证可知,基于覆岩破坏角模型预测的导水裂隙带侧向宽度与实际值误差小于2 m(采高 ≤ 6 m),验证了模型的可靠性,但防水煤柱留设宽度设计建议预留3~5 m安全冗余。针对厚及特厚煤层或覆岩含软弱夹层工作面,需实施“一矿一策”差异化防控。该方法突破了传统经验判据的局限性,为矿井水害定量预测与防控提供了新思路。

参考文献:

- [1] 曾一凡,武强,赵苏启,等.我国煤矿水害事故特征、成因与防治对策[J].煤炭科学技术,2023,51(7):1-14.
ZENG Yifan, WU Qiang, ZHAO Suqi, et al. Characteristics, causes, and prevention measures of coal mine water hazard accidents in China[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 1-14.
- [2] 侯恩科,袁峰,王双明,等.导水裂隙带发育特征地震识别方法[J].煤炭学报,2023,48(1):414-429.
HOU Enke, YUAN Feng, WANG Shuangming, et al. Seismic identification and development characteristics of water conducting fissure zone in goaf[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 414-429.
- [3] 李晓斌,李全生,李金松,等.煤矿导水裂隙带影响因素敏感性及其高度预测研究[J].中国矿业,2024,33(10):193-201.
LI Xiaobin, LI Quansheng, LI Jinsong, et al. Study on influencing factors sensitivity and height prediction of water conducting fractured zone in coal mine[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(10): 193-201.
- [4] 徐树媛,张永波,时红,等.采动覆岩导水裂隙带发育高度研究进展[J].科学技术与工程,2018,18(34):139-148.
XU Shuyuan, ZHANG Yongbo, SHI Hong, et al. Advances in the height of fractured water-conducting zone of mining overburden[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(34): 139-148.
- [5] 孟海伦,程香港,乔伟.巨厚煤层分层开采覆岩导水裂隙带高度演化及其预测研究[J].工矿自动化,2024,50(12):67-75.
MENG Hailun, CHENG Xianggang, QIAO Wei. Research on the evolution and prediction of the heights of water-conducting fracture zones in overlying rocks during layered mining of extremely thick coal seams[J]. Journal of Mine Automation, 2024, 50(12): 67-75.
- [6] LAI X P, LIU B W, SHAN P F, et al. Study on the prediction of the height of two zones in the overlying strata under a strong shock[J/OL]. Geofluids, 2021. DOI:10.1155/2021/4237061.
- [7] 黄万朋,高延法,王波,等.覆岩组合结构下导水裂隙带演化规律与发育高度分析[J].采矿与安全工程学报,2017,34(2):330-335.
HUANG Wanpeng, GAO Yanfa, WANG Bo, et al. Evolution rule and development height of permeable fractured zone under combined-strata structure[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2017, 34(2): 330-335.
- [8] FAN J Y, LI Z, FENG G R, et al. Failure analysis of coal pillars and overburden from underground water reservoir under the mining-water invasion coupling effect[J/OL]. Engineering Failure Analysis, 2023, 151. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2023.107406.
- [9] 孙斌杨,袁亮,张平松,等.巨厚砾岩下采场覆岩运移与离层演化的光-电感知试验研究[J].中国矿业大学学报,2024,53

- (5):977-992.
- SUN Binyang, YUAN Liang, ZHANG Pingsong, et al. Study on the optic-electric perception experiment of overburden movement and separation evolution in the mining area under super-thick conglomerates[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2024, 53(5):977-992.
- [10] 康国彪, 卞涛, 蒲平武. 大采高工作面覆岩导水裂隙带发育高度及其影响因素研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(增2):19-24.
- KANG Guobiao, BIAN Tao, PU Pingwu. Study on development height and influencing factors of overburden water conducting fracture zone in large mining height face[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(S2):19-24.
- [11] 陈连军, 李天斌, 王刚, 等. 水下采煤覆岩裂隙扩展判断方法及其应用[J]. 煤炭学报, 2014, 39(增2):301-307.
- CHEN Lianjun, LI Tianbin, WANG Gang, et al. Study on crack expansion judgment method in overlying strata and its application for coal mining under aquifers[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(S2):301-307.
- [12] HE C C, LU W Y, ZHA W H, et al. A geomechanical method for predicting the height of a water-flowing fractured zone in a layered overburden of longwall coal mining[J/OL]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 143. DOI:10.1016/j.ijrmms.2021.104798.
- [13] HUANG W P, LI C, ZHANG L W, et al. In situ identification of water-permeable fractured zone in overlying composite strata[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 105:85-97.
- [14] 冉启灿, 梁运培, 邹全乐, 等. 倾斜煤层群覆岩“三场”非对称特征及靶向抽采机制[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4):177-192.
- RAN Qican, LIANG Yunpei, ZOU Quanle, et al. Asymmetric characteristics of “three-field” in overburden of inclined coal seam groups and target extraction mechanism[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4):177-192.
- [15] 胡昌硕, 李东, 周法乐, 等. 多因素耦合诱发孤立煤体冲击地压机理研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2022, 41(5):40-50.
- HU Changshuo, LI Dong, ZHOU Fale, et al. Research on mechanism of rock burst induced by multi-factor coupling in isolated coal body[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2022, 41(5):40-50.
- [16] 罗生虎, 田程阳, 伍永平, 等. 大倾角煤层长壁开采覆岩走向受载与破坏特征[J]. 煤炭学报, 2021, 46(7):2227-2236.
- LUO Shenghu, TIAN Chengyang, WU Yongping, et al. Characteristics of loading and failure of overlying rock at working face advancing direction in longwall mining of steeply inclined seam[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7):2227-2236.
- [17] 徐光, 许家林, 吕维赞, 等. 采空区顶板导水裂隙侧向边界预测及应用研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(5):724-730.
- XU Guang, XU Jialin, LÜ Weiyun, et al. Lateral boundary prediction of water conducting fracture formed in roof and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(5):724-730.
- [18] 徐光, 许家林, 余北建, 等. 采空区顶板导水裂隙侧向边界发育规律研究[J]. 中国煤炭, 2009, 35(5):71-73.
- XU Guang, XU Jialin, YU Beijian, et al. Study on lateral boundary of roof water flowing fracture development regularity[J]. China Coal, 2009, 35(5):71-73.
- [19] 王捞捞. 保德矿综放开采导水裂隙与地表沉陷规律研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2021.
- WANG Laolao. Study on water flowing fracture and surface subsidence law of fully-mechanized caving mining in Baode[D]. Xuzhou:China University of Mining and Technology, 2021.
- [20] 解盘石, 黄宝发, 伍永平, 等. 大倾角工作面覆岩三维破断运移演化规律[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(2):12-26.
- XIE Panshi, HUANG Baofa, WU Yongping, et al. Three-dimensional fracture migration evolution law of overburden rock in steeply dipping working face[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(2):12-26.
- [21] 何吉清, 李猛, 安博超, 等. 大采高工作面覆岩运动与煤壁片帮规律[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2024, 43(2):135-142.
- HE Jiqing, LI Meng, AN Bochao, et al. Overlying strata movement and rib spalling law of large mining height working face[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2024, 43(2):135-142.

(责任编辑:吕海亮)