



坚硬覆岩预裂弱化改性效应及导水裂缝带控制机理

张玉军 李友伟 肖杰 张志巍 李嘉伟

引用本文:

张玉军, 李友伟, 肖杰, 等. 坚硬覆岩预裂弱化改性效应及导水裂缝带控制机理[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 105–118.
ZHANG Yujun, LI Youwei, XIAO Jie. Pre-splitting weakening failure characteristics of hard overburden and height control mechanism of water-conducting fracture zone[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 105–118.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1618>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

我国厚及特厚煤层高强度开采导水裂缝带发育高度区域分布规律

Regional distribution law of water-conducting fractured zone height in high-strength mining of thick and extra-thick coal seams in China

煤炭科学技术. 2022, 50(5) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/e6931a0d-2d77-4f62-8b29-73b29a04bafa>

综采工作条件下覆岩导水裂隙带高度预测模型优化

Study on height optimization prediction model of overburden water-conducting fracture zone under fully mechanized mining

煤炭科学技术. 2023, 51(S1): 284–297 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1530>

分段水力压裂弱化采场坚硬顶板围岩控制技术研究

Study on surrounding rock control technology for weakened hard roof of stope by staged hydraulic fracturing

煤炭科学技术. 2022, 50(8): 50–59 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/0776b09b-df68-43fc-9911-6c9b63865d6b>

导水裂隙带发育高度预测模型对比研究

Comparison of prediction models for the development height of water-conducting fractured zone

煤炭科学技术. 2023, 51(3): 190–200 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-0557>

黄陇侏罗纪煤田导水裂隙带高度预测研究

Research on prediction of the height of water-conducting fracture zone in Huanglong Jurassic Coalfield

煤炭科学技术. 2023, 51(S1): 231–241 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-0151>

厚松散层薄基岩坚硬顶板工作面覆岩破坏电法监测

Electrical monitoring of overburden failure in hard roof working face with thick loose layer and thin bedrock

煤炭科学技术. 2020, 48(1) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/c2b9a518-fdca-4f93-9f37-99c610105dc0>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

张玉军, 李友伟, 肖杰, 等. 坚硬覆岩预裂弱化改性效应及导水裂缝带控制机理[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 105–118.

ZHANG Yujun, LI Youwei, XIAO Jie, *et al.* Pre-splitting weakening failure characteristics of hard overburden and height control mechanism of water-conducting fracture zone[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 105–118.

坚硬覆岩预裂弱化改性效应及导水裂缝带控制机理

张玉军^{1,2,3}, 李友伟¹, 肖杰⁴, 张志巍¹, 李嘉伟⁴

(1. 中煤科工开采研究院有限公司, 北京 100013; 2. 天地科技股份有限公司 开采设计事业部, 北京 100013;
3. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室, 北京 100013; 4. 煤炭科学研究总院 开采研究院, 北京 100013)

摘要: 针对深部煤层开采坚硬覆岩条件下导水裂缝带控制问题, 充分借鉴坚硬顶板预裂弱化技术, 提出预裂弱化坚硬主控覆岩控制导水裂缝带高度的新方法。综合采用实验室试验、理论分析、数值模拟等方法, 研究了坚硬主控覆岩预裂弱化改性效应, 详细阐述了不同弱化层位对导水裂缝带的控制机理, 并进行了实测验证。研究结果表明: 预制裂缝可以使坚硬岩石往强度低的方向进行转变, 并将完整岩样的劈裂破坏特征转变为以预制裂缝为主控的张拉剪切破坏, 坚硬岩石的破坏程度由剧烈趋于缓和; 揭示了预制裂缝对坚硬岩体的弱化改性效应, 计算得到应力与裂缝耦合的损伤变量, 定性的分析了弱化程度与岩性转变的关系, 改性后岩体能量存储能力降低, 耗散能力增强; 数值模拟了不同弱化层位对导水裂缝带的控制效果, 综合对比覆岩破坏形态、裂隙数量及破坏高度动态演化规律, 发现“马鞍形”破坏形态随着弱化层位的升高而逐渐减弱, 覆岩裂隙数量演化基本呈现“缓增-突增”的演化趋势, 未弱化以及中、高位弱化覆岩破坏高度动态演化近似呈现“S”形, 而中位弱化呈“半抛形”, 综合分析得出低位弱化对导水裂缝带的控制效果最好; 在分析高、中、低位坚硬岩层破坏特征的基础上, 揭示了不同预裂弱化层位控制导水裂缝带发育机理; 钻孔实测孟村矿顶板压裂条件下的“两带”发育高度, 对比发现预裂弱化条件下裂采比降低, 初步验证了顶板预裂弱化对导水裂缝带发育的抑制性。研究成果将为深部矿区耦合灾害防控、水资源及生态保护等领域提供理论和科学依据。

关键词: 坚硬覆岩; 预裂弱化; 岩层控制; 导水裂缝带高度; 改性效应

中图分类号: TD745

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2024)04-0105-14

Pre-splitting weakening failure characteristics of hard overburden and height control mechanism of water-conducting fracture zone

ZHANG Yujun^{1,2,3}, LI Youwei¹, XIAO Jie⁴, ZHANG Zhiwei¹, LI Jiawei⁴

(1. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 2. Coal Mining and Designing Department, Tiandi Science and Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China; 3. State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization, Beijing 100013, China;
4. CCTEG Coal Mining Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: In order to address the issue of high development of hard overlying rock water-conducting fracture zones in deep coal mining and achieve water-preserved coal mining by reducing the height of water-conducting fracture zones, a new method is proposed in this study, which combines the techniques of pre-fracturing and weakening of hard main controlling overlying strata. This study comprehensively investigates the modification effect of pre-fracturing and weakening of hard main controlling overlying strata through laboratory experiments, theoretical analysis, and numerical simulation. The control mechanisms of different weakening layers on water-conducting fracture zones are elaborated and validated through field measurements. The results demonstrate that pre-existing fractures can induce the rock mass to shift its failure mode from intact rock fracturing to tension-shear failure controlled by pre-existing fractures, leading to a reduction

收稿日期: 2023-11-16

责任编辑: 周子博

DOI: 10.12438/cst.2023-1618

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(52174079)

作者简介: 张玉军(1978—), 男, 河北张家口人, 研究员, 博士生导师。E-mail: zhangyujun@tdkcsj.com

in the severity of rock mass failure. The weakening effect of pre-existing fractures on the hard rock mass is revealed, and the damage variables coupled with stress and fractures are calculated. The relationship between the degree of weakening and the transformation of rock properties is qualitatively analyzed. It is found that the energy storage capacity of the rock mass is reduced while the dissipation capacity is enhanced after the modification. Numerical simulations are conducted to evaluate the control effect of different weakening layers on water-conducting fracture zones. By comparing the dynamic evolution of overlying rock failure modes, fracture counts, and failure heights, it is observed that the “saddle-shaped” failure mode gradually weakens with the increase of weakening layer height, and the evolution trend of fracture counts follows a pattern of “slow increase-sudden increase”. The dynamic evolution of failure height for unweakened and moderately to highly weakened overlying strata approximately exhibits an “S” shape, while the moderately weakened overlying strata exhibit a “semi-ejection” shape. Based on the analysis of the characteristics of failure in hard rock layers at different positions, the mechanisms of controlling the development of water-conducting fracture zones by different pre-fracturing weakening layers are revealed. Furthermore, using the borehole measurement method, the development height of the “two zones” under the condition of top plate fracturing in Mengcun mine is obtained. It is observed that the fracture extraction ratio is reduced under the condition of pre-fracturing weakening, thus preliminarily validating the inhibitory effect of top plate pre-fracturing weakening on the development of water-conducting fracture zones. It provides theoretical and scientific basis for coupling disaster prevention and control, water resources and ecological protection.

Key words: hard overburden; pre-cracking weakening; rock control; height of water-conducting fracture zone; failure characteristics

0 引言

目前,深部侏罗系煤层巨厚洛河组含水层下特厚煤层开采面临水害防控和水资源保护双重困局,埋深大、煤层厚、巨厚含水层等多因素致使难以形成针对性强和科学有效的防治水措施^[1-2]。顶板水害防治与水资源保护技术的核心就是控制导水裂缝带高度来减小对上覆含水层的波及扰动程度,而现有的控制技术多以牺牲回采率和开采效率为代价,不符合绿色开采需求^[3-4]。例如针对彬长矿区巨厚洛河组含水层的防控,在采取限厚开采和宽条带开采方法后,制约了矿井高产高效生产,工作面涌水量依旧较大。由此可见,目前深埋煤层顶板水害防治缺少在不牺牲采出率和降低开采效率前提下主动控制导水裂缝带发育的方法,因此,如何主动有效控制和降低导水裂缝带高度成为水害防控与水资源保护的关键。

针对导水裂缝带的控制问题,从“三下”采煤角度常用的技术手段主要有:限厚开采、充填开采、部分开采、协调开采、分层间歇开采、覆岩离层注浆等^[5-12]。这类方法主要通过改变采煤方法来间接控制,适用性受到限制。覆岩岩性及结构是影响导水裂缝发育的关键因素之一^[13-14],大量实测结果已经证实坚硬覆岩导水裂缝带发育较高^[15],导水裂缝带发育高度随着岩层完整性和强度的降低而显著降低,而预裂弱化技术作为处理坚硬顶板、防治冲击矿压等问题的有效技术手段^[16],可有效削弱坚硬岩层的整体强度和完整性,改变采场覆岩岩性及结构,因此理论上预裂弱化作用对导水裂缝带的发育具有一定的抑制作用。相关专家、学者从不同角度对预裂弱

化技术的应用进行了深入研究:康红普院士团队^[17-18]开展了定向水力压裂井下试验,有效解决了采场坚硬顶板难以垮落的问题;于斌等^[19-20]通过对采前远、近场坚硬岩层实施预裂弱化,有效降低了工作面强矿压和巷道破坏程度;潘俊锋等^[21]针对上覆坚硬主控岩层引起的冲击地压,提出“人造解放层”卸压防治方法,建立工程力学模型揭示了区域性卸压防治机理;高富强等^[22]采用数值模拟研究了坚硬顶板水力压裂后采动应力变化情况,发现预裂弱化主要从采场覆岩大结构的角度来影响支撑压力分布特征。上述研究结果表明,顶板预裂弱化技术无论是在井下还是在井上都相对较为成熟,但针对预裂弱化技术的研究主要立足于揭示采场矿压弱化机理等问题,而对于预裂弱化后的采动破坏特征以及对导水裂缝带发育的控制机理研究不足。

综上所述,笔者针对深埋侏罗系煤层开采面临的顶板水害防治与水资源保护问题,充分借鉴预裂弱化技术,提出预裂弱化坚硬主控覆岩控制导水裂缝带发育高度的技术方法,主要从基础实验室试验出发,结合理论分析、数值模拟以及现场实测等方法,对坚硬覆岩预裂弱化改性效应以及弱化后采场破坏特征和止裂控水机制进行深入研究,以期对控制顶板裂隙带发育高度、实现保水开采提供理论支撑和指导。

1 预制裂缝对坚硬岩石强度及破坏特征的影响

顶板预裂弱化技术中,裂缝的存在不仅会降低煤岩体力学性能,也会改变其破坏特征。为定量分析裂缝对坚硬岩体强度及破坏特征的影响,最大程

度排除其他因素对试验结果的影响,采用密集取心法获得坚硬砂岩试样,结合实验室试验和数值模拟,开展了预制裂缝岩石的单轴压缩试验,从应力-应变曲线、声发射特征以及微裂隙数量演化3个方面,对比分析了完整与含裂缝岩石在力学性能和破坏特征上的差异性,为揭示坚硬覆岩预裂弱化改性效应提供数据支撑。

实验室试验获得完整和含裂缝岩石应力-应变曲线与声发射特征如图1所示。由应力-应变曲线可知岩石加载过程主要呈现出3个阶段:压密阶段、弹性阶段、塑性阶段。含裂缝岩石与完整岩石应力-应变曲线存在明显差异,完整岩石应力-应变曲线呈高陡趋势,峰值强度高达62 MPa,弹性模量为11.8 GPa,含裂缝岩石应力-应变曲线相对平缓,峰值强度降为32.7 MPa,弹性模量为5.9 GPa,直观表明了预制裂缝对坚硬岩石力学性能的降低效果。声发射事件数与应力-应变曲线表现出明显对应关系,累计声发射事件数逐级递增,整体呈现“缓增-突增”变化趋势。完整与含裂缝岩石的主要区别在于塑性阶段:该阶段完整岩石声发射事件数以及破坏瞬间释放的能量均

较大,而含裂缝岩石相对较小;在破坏特征方面,完整岩石两端面最先起裂扩展,最终形成劈裂破坏,而含缝岩石最先在裂缝尖端衍生出翼型纹,并沿加载方向扩展向两端扩展,最终形成连通预制裂缝的宏观裂纹。

数值模拟获得完整和含裂缝岩石应力-应变曲线与裂隙数量演化规律如图2所示。可知加载过程产生的裂隙主要以剪切裂隙为主,裂隙数量演化呈现出“缓增-突增”的演化规律,在压密阶段几乎没有新裂隙生成,在塑性阶段开始产生少量微裂隙,增长速度缓慢,但在达到峰值强度后微裂隙数量开始突增,其中含裂缝岩石的微裂隙数量增加幅度相对较低,在相同应变条件下含裂缝岩石产生的微裂隙数量较少,并在模拟过程中发现裂缝尖端会出现应力集中的现象,同时最先起裂扩展。

由应力-应变曲线、声发射特征以及微裂隙数量演化规律综合分析表明预制裂缝在降低坚硬岩石的力学性能的同时,对破坏也起到主控作用,改变了完整岩石的劈裂破坏模式,使得坚硬岩石在加载过程的宏-细观破坏由剧烈趋于缓和。

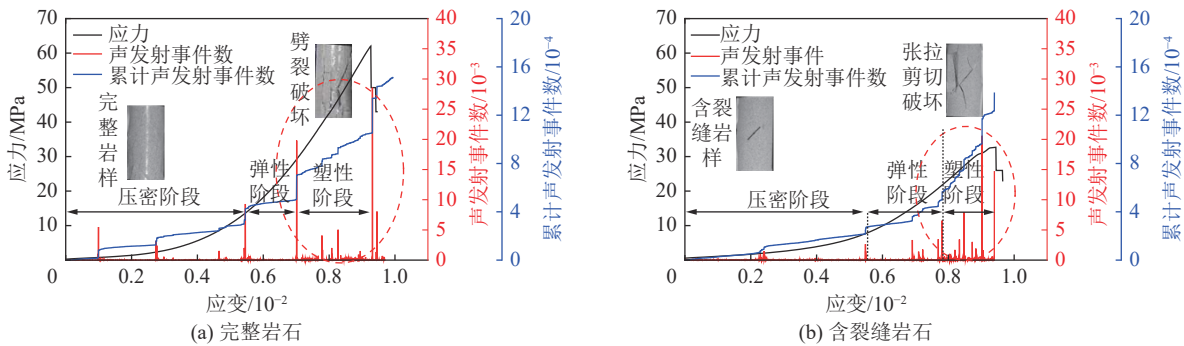


图1 应力-应变及声发射特征曲线

Fig.1 Stress-strain and acoustic emission characteristics

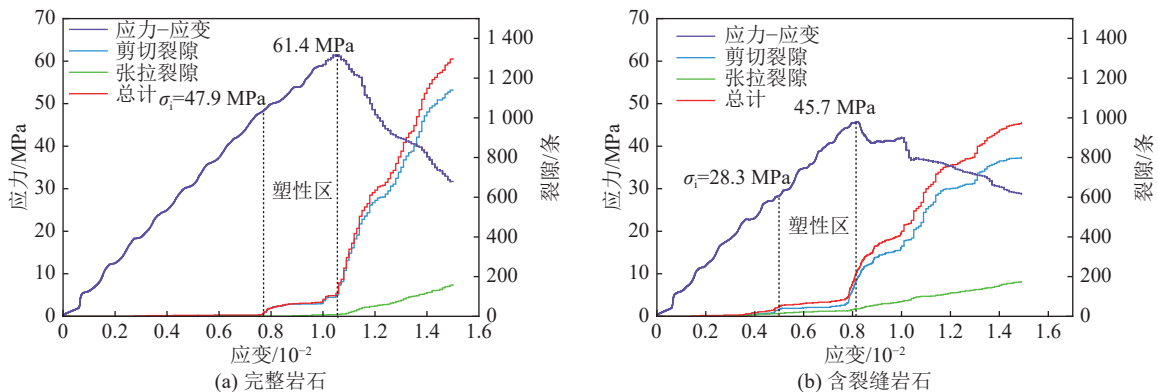


图2 微裂隙数量演化规律

Fig.2 Evolution law of number of cracks

2 预制裂缝对坚硬岩体的弱化改性效应

由实验室试验和数值模拟结果可知, 预制裂缝对坚硬岩石存在明显的软化作用, 若将含裂缝岩石等效为力学性能和变形特性完全相同的完整连续介质材料, 则可视作“岩性改变”。因此为分析预制裂缝对坚硬岩体的弱化改性效应, 通过计算应力与裂缝耦合条件下的损伤变量, 定性分析了裂缝对岩体的损伤程度与力学特性的对应关系以及改性后岩体能量存储和耗散特性。

2.1 应力与裂缝耦合的损伤变量计算

坚硬岩体一般处于三向受力状态, 同时裂缝多以结构面的形式呈现, 转化为以裂缝为主体的受力状态时可简化为平面应力问题, 因此构建应力与裂缝耦合的力学模型, 如图3所示。计算裂缝对坚硬岩体强度的损伤变量 D , 作为评价裂缝对坚硬岩体强度弱化程度的指标。

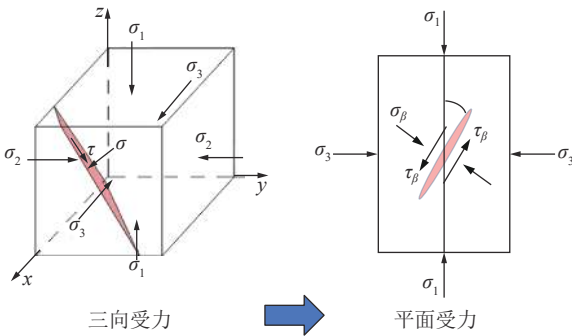


图3 含裂缝岩体力学模型

Fig.3 Mechanical model of fractured rock mass

在双轴应力 σ_1 和 σ_3 作用下, 含裂缝岩体损伤应变能释放率 Y 为^[22]

$$Y = -\frac{\sigma_{eq}^2}{2E(1-D)^2} \left[\frac{2}{3}(1+\nu) + 3(1-2\nu) \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} \right)^2 \right] \quad (1)$$

式中, E 、 ν 分别为弹性模量和泊松比; σ_m 、 σ_{eq} 分别为平均应力和有效应力。

储存在岩体内单位体积弹性应变能 U^E 为

$$U^E = -(1-D)Y \quad (2)$$

其中, 损伤变量 $D=0$ 与 $D \neq 0$ 时弹性应变能差值即为裂缝引起坚硬岩体弹性应变能改变量 ΔU^E :

$$\Delta U^E = \left[\frac{\sigma_{eq}^2}{2E(1-D)} - \frac{\sigma_{eq}^2}{2E} \right] \left[\frac{2}{3}(1+\nu) + 3(1-2\nu) \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} \right)^2 \right] \quad (3)$$

由断裂力学理论, 对于平面应力问题, 裂缝引起的附加应变能增加量 U_1 为^[23]:

$$U_1 = \rho_v \int_0^A G dA = \frac{1-\nu^2}{E} \int_0^A (K_I^2 + K_{II}^2) dA \quad (4)$$

式中, K_I 、 K_{II} 分别为裂缝尖端 I、II 型应力强度因子; A 为裂缝表面积; ρ_v 为裂缝密度。

U_1 、 ΔU^E 均为裂缝引起岩体的弹性能改变量, 根据能量互等定理, 则有:

$$U_1 = \Delta U^E \quad (5)$$

将式 (3) 和 (4) 代入式 (5) 可得在应力条件下裂缝引起岩体的损伤变量:

$$D = 1 - \frac{1}{1 + \frac{2\rho_v}{\sigma_{eq}^2} \left[\frac{2}{3}(1+\nu) + 3(1-2\nu) \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} \right)^2 \right] \int_0^A (K_I^2 + K_{II}^2) dA} \quad (6)$$

由式 (6) 可以看出, 损伤变量的大小受裂缝形态、密度等因素的影响, 理论上可以通过改变裂缝的几何形态来实现对岩体损伤程度的控制。以不同裂缝长度对坚硬岩石单轴抗压强度的影响为例, 见表1, L 为预制裂隙长度, cm, 随着裂缝长度的增加完整试块强度逐渐由坚硬转变为中硬、软弱, 同理也适用于角度、密度等其他几何因素, 即裂缝可以使坚硬岩体往强度低的岩性方向进行转变, 并可通过控制裂缝几何形态等人为可控条件来实现对岩体不同程度的改性效果, 如图4所示。

表1 不同裂缝长度对坚硬岩石岩性的改变

Table 1 Changes in lithology of hard rock with different fracture lengths

类型	裂隙形态	单轴抗压强度/MPa	损伤程度	等效岩性
完整	完整试块	62.19	0	坚硬
含裂缝	$L=0.8$ cm	58.27	6.3%	坚硬
	$L=1.6$ cm	55.22	11.2%	中硬
	$L=2.4$ cm	45.08	27.5%	
	$L=3.2$ cm	24.50	60.6%	软弱
	$L=4.0$ cm	14.02	77.5%	

2.2 弱化改性岩体的能量存储及耗散特性

假设外部荷载对岩体输入的总能量 U 全部转化为弹性应变能和耗散能, 由热力学第一定律可知:

$$U = U_e + U_d \quad (7)$$

式中, U_e 为岩体内部的弹性应变能, 具有可逆性, 与岩石的弹性模量和泊松比有关; U_d 为岩体内部耗散能, 主要用于岩体内部裂隙起裂、扩展及宏观裂隙的贯通, 具有不可逆性。

结合应力-应变曲线对弱化前后的弹性应变能和耗散能进行分析, 如图5所示。峰值强度前曲线与横轴围成的投影面积即岩体吸收的总能量 U , 其主

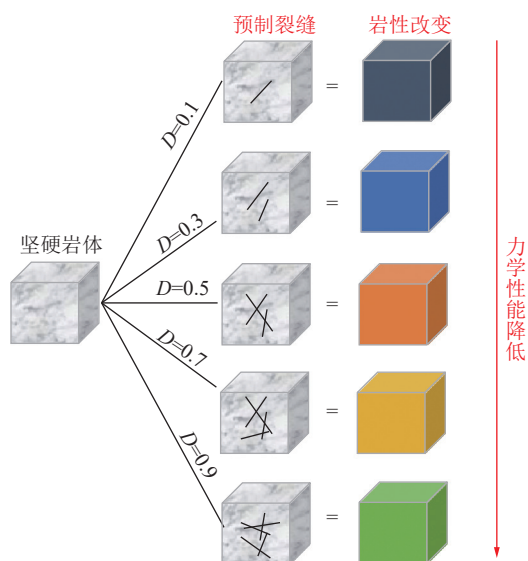


图 4 损伤程度与力学性能关系

Fig.4 Relationship between damage degree and mechanical properties

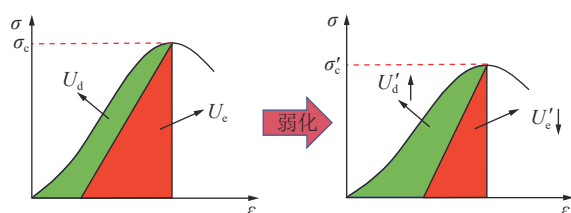
图 5 弱化前后单位体积弹性能 U_e 和耗散能 U_d 量值关系

Fig.5 Relationship between elastic energy and dissipated energy per unit volume of rock before and after weakening

要由可释放弹性能 U_e (红色阴影) 和耗散能 U_d (黄色阴影) 组成, 当应力-应变曲线发生变化时, 各部分面积发生改变, 意味着其代表的能量也发生相应改变。

弱化前后弹性能和耗散能演化关系: 由前文试验数据定量分析可知, 弱化后岩体的峰值强度由 σ_c 降低为 σ'_c , 同时弹性模量降低, 应力-应变曲线变为平缓, 整体吸收的总能量减少, 可释放弹性能 U_e 降低为 U'_e , 耗散能 U_d 增加为 U'_d 。这主要是因为岩体预裂弱化后, 其内部结构完整性降低, 集聚的弹性能促使裂隙衍生、扩展、贯通, 裂隙的扩展增加了其能量的耗散。

3 坚硬覆岩预裂弱化控制导水裂缝带高度数值模拟分析

为研究坚硬岩层预裂弱化对覆岩破坏特征及采场空间大结构的影响, 采用 UDEC 模拟了预裂弱化和未弱化两种情况下覆岩破坏演化规律, 通过对比分析工作面推进过程中覆岩破坏高度变化、裂隙发育特征以及最终覆岩破坏形态三方面特征, 揭示了坚硬覆岩预裂弱化作用对导水裂缝的控制机理。

3.1 数值模拟建立与模拟方案

建立二维采场数值模型如图 6 所示, 模型尺寸为 $500\text{ m} \times 251\text{ m}$, 煤层厚度 5 m , 一次采全高, 每次开挖步距为 20 m , 共开挖 300 m 。为消除边界影响左右各留 100 m 煤柱, 将开切眼设于距左边界 100 m 处。模型底部及两侧为固定边界, 顶部为自由边界, 考虑模拟的目的性, 在距离煤层顶界 20 、 60 、 100 m

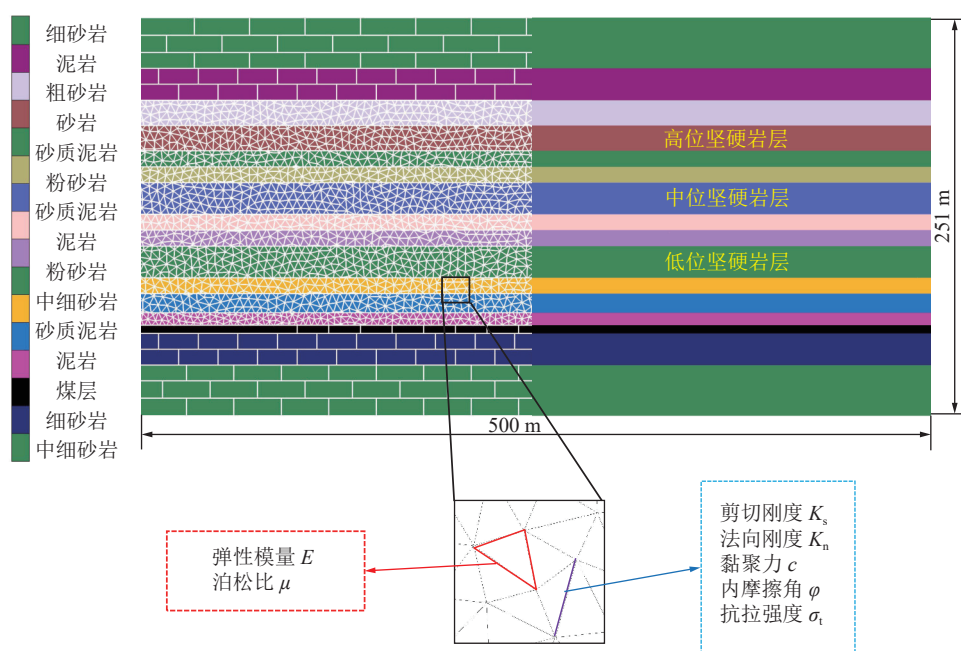


图 6 数值模型及节理力学准则

Fig.6 Numerical model and joint mechanics criterion

处分别设置厚度为20、20、16 m的坚硬岩层,充当低、中、高3个不同层位的坚硬岩层。

未弱化及高、中、低位弱化共4种模拟方案,其中对于坚硬岩层的弱化,采用了预制裂缝的方式,在坚硬岩层每间隔30 m预制一条竖向裂缝,共预制10条裂缝,将裂缝的各项力学参数设为0,来实现弱化效果,此种弱化方法主要是考虑工程实际中采用水平孔分段压裂技术纵向切断岩层来降低其强度和完整性。

3.2 数值模拟结果分析

3.2.1 覆岩破坏形态特征

提取不同开挖步距下覆岩破坏特征如图7所示。

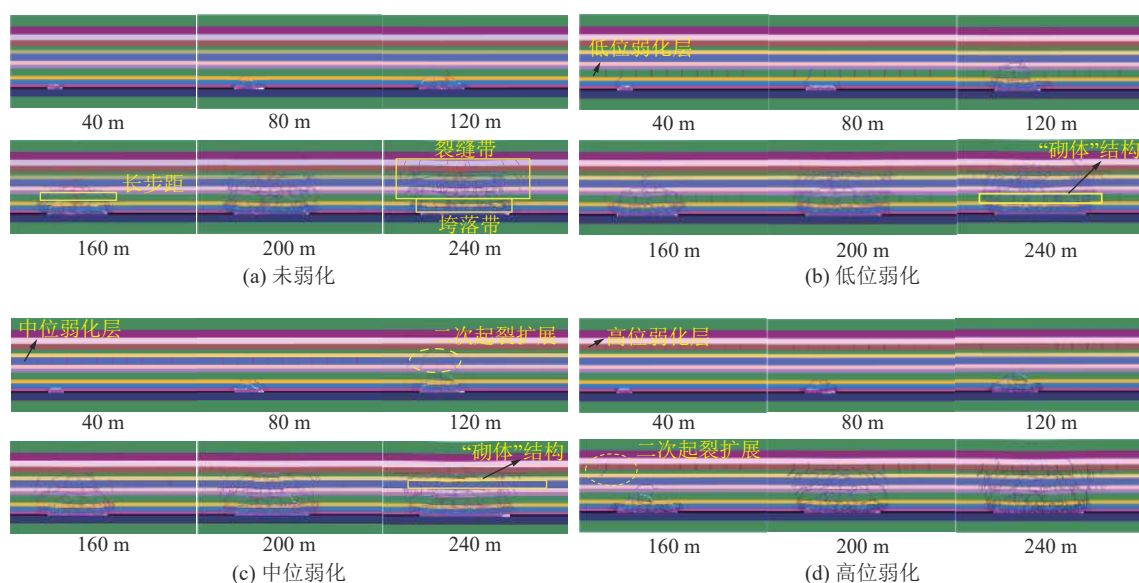


图7 不同推进距离下覆岩破坏演化过程

Fig.7 Overburden rock failure evolution process under different advance distance

低、中、高位弱化条件下,覆岩破坏形态特征发生了明显的改变。其中低位弱化条件下:工作面推进至40 m时,直接顶泥岩垮落,同时采动裂隙与预裂裂缝直接形成贯通;推进至120 m时,弱化后的坚硬粉砂岩随同其上方软岩同时垮落充填采空区,此后随工作面继续推进采动裂隙不断上向发育;在工作面推进至220 m时,覆岩破坏至高位坚硬砂岩,覆岩破坏高度增加缓慢并逐渐趋于稳定。中位弱化条件下:在工作面推进前80 m,覆岩破坏未达到弱化层位,覆岩破坏特征与未弱化条件下近似;当工作面推进至120 m时,预裂裂缝开始二次起裂并向下延申;直至推进至160 m时,上向采动裂隙与预裂裂缝发生贯通,覆岩破坏高度骤增。在预裂裂缝的主控作用下,弱化层整体裂隙发育减少,由于移动空间受限,与低位相比碎胀效果减弱,但最终易于形成“砌体梁”

未弱化条件下:当工作面推进至40 m时,直接顶泥岩垮落充填采空区,覆岩破坏高度8 m;推进至80 m时,砂质泥岩和中细砂岩开始相继断裂垮落,而上方坚硬粉砂岩由于其厚度和强度均较高则处于稳定状态;随工作面继续推进,泥岩、砂质泥岩、中细砂岩发生周期性垮落,直至推进至160 m时坚硬粉砂岩出现贯穿整层的竖向裂隙,覆岩破坏高度达到50 m;推进至200 m时,坚硬粉砂岩完成初次断裂并与上方相邻软弱层形成联动,覆岩破坏高度达到110 m;推进至240 m时,覆岩破坏高度达到最大142 m,此后随推进距离的增加,覆岩破坏范围横向增加而破坏高度不再增加。

结构支撑上方岩层。高位弱化条件下:在工作面推进前120 m,覆岩主要以垮落破坏为主,与未弱化条件下近似;当工作面推进至160 m时,预裂裂缝逐渐开始发生二次起裂,直至工作面推进至200 m时,采动裂隙与预裂裂缝发生贯通,此后采动裂隙向上发育缓慢。

提取最终的覆岩破坏形态,如图8所示。可知未弱化时覆岩裂隙分布形态近似为“马鞍形”,从下往上裂隙的密集度逐渐减小,符合严重开裂区、一般开裂区、微小开裂区的分布规律。坚硬岩层由于其强度高厚度大破坏后形成块度大裂隙长,且随时间的推移不易闭合,而软弱岩层由于其强度低破坏后形成的块体较小,因此裂隙发育密集,但由于其塑性能力强随时间的推移易发生闭合。

低、中、高位弱化条件下,覆岩破坏形态的不同

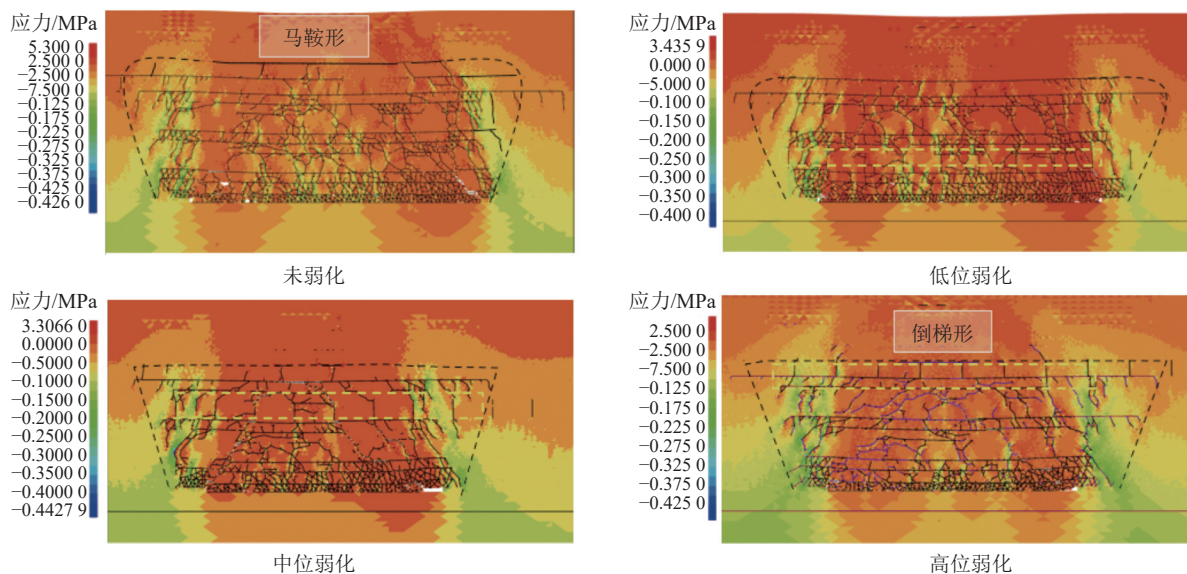


图8 覆岩破坏形态与应力分布特征

Fig.8 Failure mode and stress distribution characteristics of overburden rock

之处主要有：①预制裂缝对坚硬粉砂岩破坏起主要控制作用，坚硬岩层弱化后整体塑性能力增强，且随工作面的推进能及时发生垮落，垮断步距受预制裂缝间距大小控制；②预制裂缝后的坚硬岩层在破坏时易形成支撑上方覆岩的“砌体梁”结构，一定程度上也增强了其碎胀性，弥补了采出空间，导致最终垮落带高度增加裂缝带高度降低的效果；③坚硬岩层弱化后影响了覆岩整体的平均强度和采场破坏结构，导致最终的“马鞍形”破坏形态减弱，且随着弱化层位的升高“马鞍形”破坏形态逐渐减弱。

通过数值模拟发现，覆岩破坏向上发育过程中，直接顶以垮落的形式充填采空区，坚硬岩层由于强度高厚度大不易垮落，起到关键层的作用，而预裂弱化后在裂缝的主控作用下发生规律性破坏，易于形成“砌体”结构支撑上方岩层。综合对比分析各弱化层位对导水裂缝带发育高度的控制效果存在如下关系：低位弱化>中位弱化>高位弱化。

3.2.2 覆岩裂隙发育特征

采用 fish 语言统计采场覆岩中剪切和张拉裂隙，模拟过程中，对模型中接触面的力学条件进行遍历，当特定力学参数小于临界值时，则判定为剪切裂隙或张拉裂隙，并对其数量进行累加，随计算时步覆岩内剪切、张拉裂隙数量变化规律如图9所示。

由图可知，未弱化条件下覆岩内裂隙数量演化可划分为3个阶段：缓慢增长、加速增长、周期递增。各阶段裂隙数量变化与顶板岩层移动密切相关，其中缓慢增长阶段裂隙数量呈阶梯型增加，这主要是由于煤层上方泥岩、砂质泥岩、中细砂岩发生周期性

垮落，同时粉砂岩强度相对偏大未及时发生破坏，延缓了裂隙数量的增加；加速增长阶段裂隙数量呈线性增加，这主要是因为推进到一定距离后，坚硬粉砂岩达到极限垮断距而发生断裂，同时带动了上方相邻软岩（泥岩、砂质泥岩）发生破坏，随推进距离的增加，覆岩破坏范围在横、纵两个方向同时增加，因此裂隙数量呈现快速增加的状态；周期增长阶段裂隙数量呈周期跳跃式增加，这是因为推进到一定距离后覆岩达到充分采动，覆岩破坏高度达到最大，覆岩破坏范围随推进距离增加只发生横向增加，因此裂隙数量呈周期跳跃式增加。

低位弱化条件下，采动裂隙增长幅度呈现出“缓增—加速—再加速”的演化趋势，裂隙数量从6万步（工作面推进距离60m）开始进入加速阶段，并在16万步（工作面推进距离160m）进一步加速，与未弱化时相比，裂隙数量提前进入加速阶段，这主要是因为的低位坚硬岩层预裂弱化后能够及时垮落，使得裂隙发育速度加快，而中、高位弱化条件下与未弱化时区别并不明显。

3.3 覆岩破坏高度演化规律

结合覆岩破坏特征和裂隙数量演化规律，得出覆岩破坏高度随推进距离的动态变化规律，如图10所示。可知，未弱化条件下覆岩破坏高度随工作面推进距离呈现“缓增—突增—稳定”的变化趋势，其中工作面推进前100m处于缓增阶段，从100m推进到240m过程中处于加速阶段，240m之后则处于稳定，最终覆岩破坏高度为142m，采用 doseresp 回归函数对覆岩破坏高度（ H_0 ）与推进距离（ x ）的关系

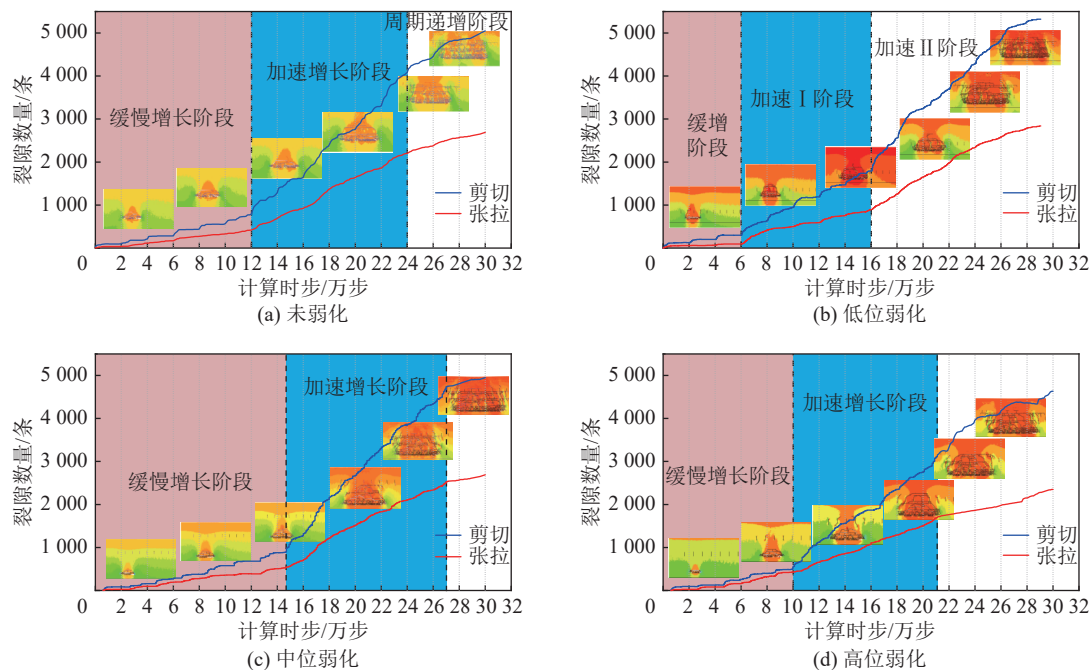


图9 不同开挖步距下覆岩裂隙数量演化规律

Fig.9 The evolution law of the number of cracks in overburden rock under different excavation steps

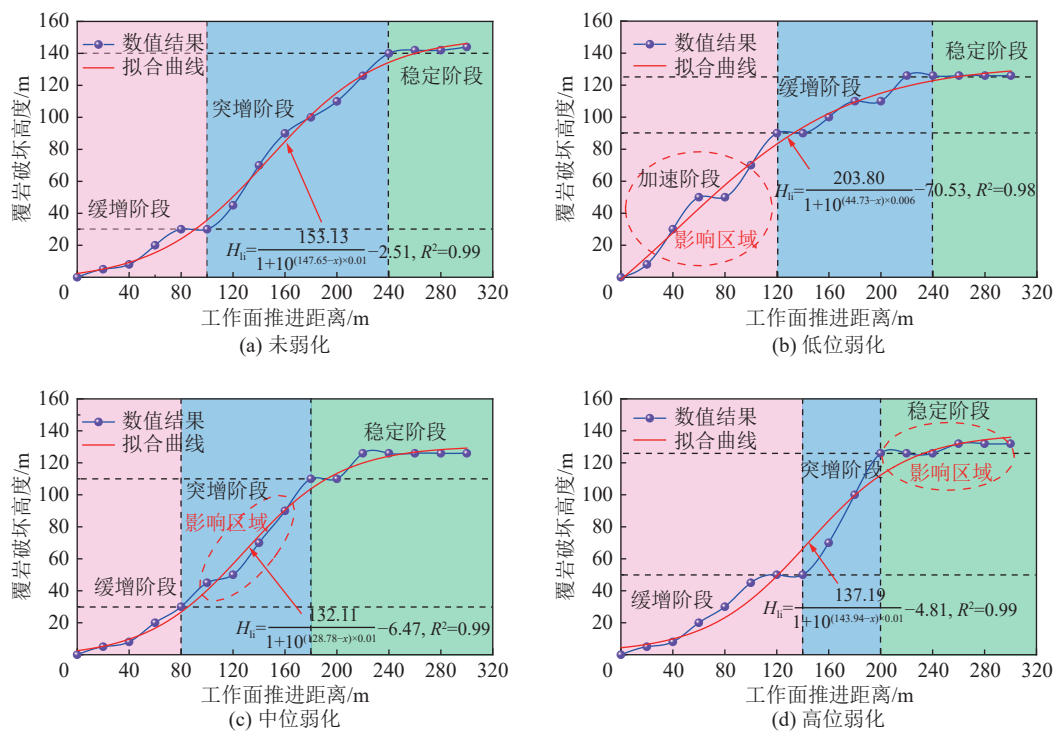


图10 不同开挖步距下覆岩破坏高度

Fig.10 Failure height of overburden rock under different excavation steps

进行表征,拟合函数为:

$$H_{li} = \frac{153.13}{1+10^{(147.65-x) \times 0.01}} - 2.51, R^2 = 0.99 \quad (8)$$

低位弱化条件下,覆岩破坏高度的动态发育趋势发生改变,由“缓增—加速—稳定”转变为“加速—缓增—稳定”,影响区域主要处于工作面推进初

期,最大破坏高度有所降低,与未弱化条件下相比,拟合曲线的形态由近“S”形转变为“半抛物线型”。中、高位弱化条件下,覆岩破坏高度的动态发育趋势与未弱化时相似,均呈现出“S”形态,影响区域分为位于工作面推进中期和末期。低、中、高位弱化条件下,覆岩破坏高度演化过程的拟合函数依次为

$$H_{li} = \frac{203.80}{1 + 10^{(44.73-x) \times 0.006}} - 70.53, R^2 = 0.98 \quad (9)$$

$$H_{li} = \frac{132.11}{1 + 10^{(128.78-x) \times 0.01}} - 6.47, R^2 = 0.99 \quad (10)$$

$$H_{li} = \frac{137.19}{1 + 10^{(143.94-x) \times 0.01}} - 4.81, R^2 = 0.99 \quad (11)$$

由拟合曲线可直观看出覆岩弱化后破坏高度的变化趋势发生了明显的改变,且低、中、高位弱化主要的影响区域分别位于破坏高度演化过程的前中后期。

4 坚硬覆岩预裂弱化对导水裂缝的控制机理

导水裂缝带的控制效果是取得含水层控水开采的关键,而不同的预裂弱化层位在采动响应下对导水裂缝带的控制效果不同,根据坚硬岩层与煤层位置不同,划分3种预裂弱化层位:低位弱化(弱化层位位于垮落带范围之内);中位弱化(弱化层位位于导水裂缝带中部);高位弱化(弱化层位位于导水裂缝带上部微小开裂区)。结合上述试验及模拟,在分析高、中、低层位坚硬覆岩的破坏特征的基础上,基于预裂弱化效应揭示不同弱化层位对导水裂缝带的控制机理。

4.1 低位弱化对导水裂缝带的控制机理

由数值模拟和相似模拟得到低位岩层的运动破坏特征,如图11所示。可知,低位岩层在垮落移动的过程中形成的块体离散程度较大,碎胀效果明显,垮落岩层此时主要起到2方面的作用:①充填采空区弥补采出空间;②支撑上覆岩层减少其破坏程度。采空区不同位置处垮落岩层的闭合特征也不相同,采空区边界在煤壁的支撑作用下闭合度较差,而采空区中部在上方岩层垂向压应力作用下压实闭合程度较好。受强度的影响,软弱岩层强度低充分压实周期短,坚硬岩层强度高破断块体大充分压实周期长,因此同等高度的垮落带,岩性较为坚硬的条件下,对采空区上方岩层支撑和减沉效果最好。

在低位岩层破坏特性基础之上,结合低位弱化数值模拟结果,发现对于低位岩层弱化即将位于裂缝带下部不易垮落的岩层垮落增加其碎胀效果,使其更好的充填采空区,及时快速的弥补采出空间,对采空区上方岩层起到支撑作用,使得裂缝带破坏范围减小,最终达到降低导水裂缝带发育高度的目的。

4.2 中位弱化对导水裂缝带的控制机理

为揭示中位坚硬岩层导水裂缝发育机理,构建中位坚硬岩层断裂的力学模型,如图12所示,将岩层初次断裂时假设为均布荷载下的固支梁模型。

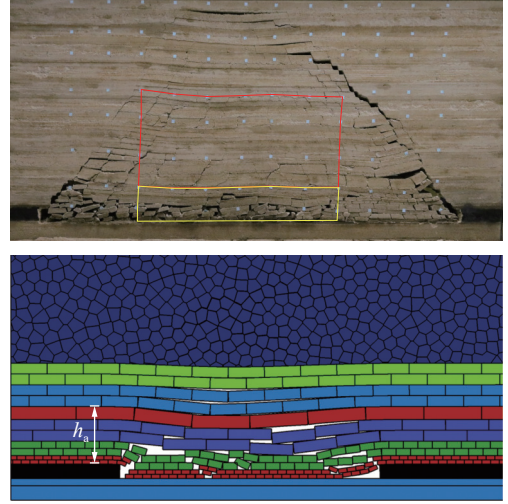


图11 垮落带岩层破坏及压实特征
Fig.11 Characteristics of rock failure and compaction in caving zone

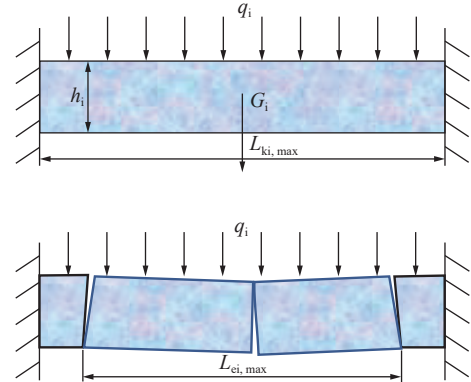


图12 坚硬岩层断裂力学模型
Fig.12 Hard rock fracture mechanics model

图12中, G_i 为坚硬主控岩层悬空段自重, kN; q_i 为悬空段所受的载荷集度, kN/m; h_i 为岩层的厚度, m; $L_{ki, max}$ 、 $L_{ei, max}$ 分别为极限悬空距和极限跨段距, m。

假设坚硬岩层破断时会在两端和中部形成拉应力集中,从而形成断裂裂缝,为验证这一假设,对岩层内部的主应力分布规律进行求解,再结合最大拉应力准则判断出断裂迹线位置。根据弹性力学理论可以得到固支梁内任意一点的应力分量表达式^[24-25]:

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{6qy}{h^3}(l^2 - x^2) + \frac{qy}{h}\left(\frac{4y^2}{h^2} - \frac{3}{5}\right) \\ \sigma_y = -\frac{q}{2}\left(1 + \frac{y}{h}\right)\left(1 - \frac{2y}{h}\right)^2 \\ \tau_{xy} = -\frac{6qx}{h^3}\left(\frac{h^2}{4} - y^2\right) \end{cases} \quad (12)$$

式中: σ_x 、 σ_y 分别为x轴和y轴方向的应力分量; τ_{xy} 为切应力分量; h 为梁的厚度; $2l$ 为梁的跨距。

根据主应力与应力分量之间的关系可得到梁上

任一点的主拉应力 σ_1 和主压应力 σ_3 的表达式:

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \\ \sigma_3 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \end{cases} \quad (13)$$

将公式(11)代入(12)可得到梁内部主拉应力 σ_1 (实线)和主压应力 σ_3 (虚线)的分布规律,运用Matlab分析得到岩层破断前应力分布迹线如图13所示。

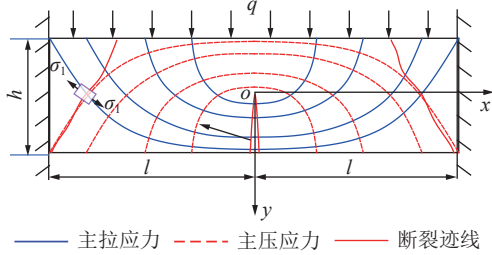


图13 坚硬岩层断裂应力分布

Fig.13 Fracture stress distribution of hard rock strata

由图13可知,坚硬岩层内部压应力和拉应力分布迹线沿中轴呈对称分布,在中部上下边缘处应力分布较为集中,根据最大拉应力准则可知,坚硬岩层抗拉能力弱,破坏时会沿着垂直于主拉应力的方向产生断裂缝,最终在中部出现垂向上扩展的竖向裂缝,在两侧出现向下扩展的倾斜裂缝。同时还可以看出强度较高的坚硬岩层,其极限跨断距离较长,形成的块度较大,裂缝密度小,这与上文数值模拟未弱化条件下坚硬岩层的断裂规律相一致(图7)。

构建中位岩层弱化采场应力转移物理模型,如图14所示。对模型进行简化处理,假设工作面回采过程中,煤壁—采空区—煤壁上方的覆岩应力呈对称分布,并将其放于横轴为距离 x 、纵轴为应力 σ 的直

角坐标系中。预裂弱化前,可将其从采空区中部向两侧依次划分为:塑性区、弹性区、原岩应力区。其中塑性区对应采空区中部岩层,主要发生垮落、断裂等塑性破坏,应力相对较低且在压实过程中逐渐均匀化;弹性区对应煤壁支撑区上方岩层,应力峰值集中区域,即横坐标 x_2 和 x_3 处,且主要处于压剪受力状态;原岩应力区则是未受到采动影响的区域,应力分布较为均衡。预裂弱化后,弱化区域内的坚硬岩层强度降低,承载能力减弱,而上覆岩层荷载固定不变,导致应力峰值转移到原岩应力区与预裂弱化区的交界处,即横坐标 x_1 和 x_4 处,且应力峰值较弱化前降低,并且由于弱化后岩体的塑性能力较强,应力不易集中呈现应力“均化”现象。

综上所述,对中位岩层弱化主要通过改变采场整体的应力分布特征来实现对导水裂缝带的控制作用,具体为减弱其对上部岩层的荷载传递作用,使得工作面边界处的采动应力峰值降低,并向深部原岩应力区转移,而导水裂缝往往在应力集中区域发育明显,因此抑制了工作面两侧导水裂缝通道的形成,最终改变导水裂缝带两侧发育较高的现象,即“马鞍型”破坏形态减弱。

4.3 高位弱化对导水裂缝带的控制机理

如图15所示,将导水裂缝带顶点在坚硬岩层中发育较长的现象称为导水裂缝带发育的“尖端效应”:坚硬脆性岩体塑性能力差,受力过程中容易出现应力集中,在应力集中作用下易发生断裂形成裂缝,而裂缝扩展不易消耗集聚的高弹性能,最终形成较长的裂缝。

为实现对导水裂缝带发育“尖端效应”的控制,降低导水裂缝带的发育高度,对理论预计的导水裂

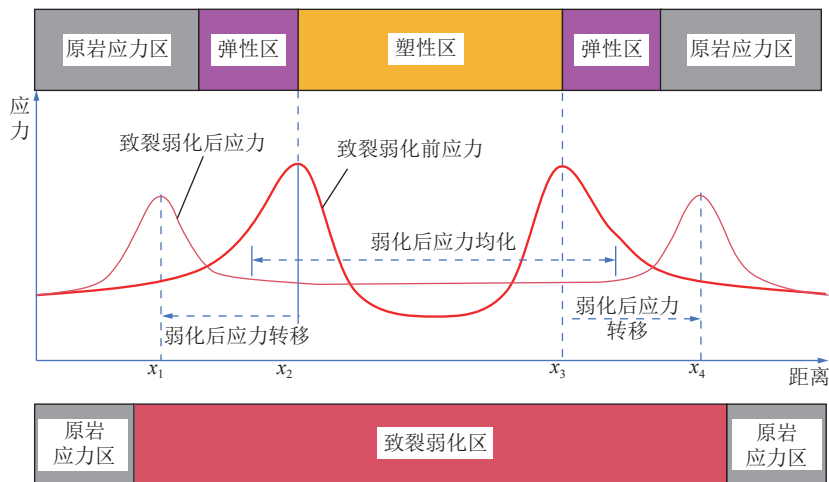


图14 预裂弱化坚硬岩体采场应力转移物理模型

Fig.14 Physical model of stress transfer in hard rock mass weakened by fracturing

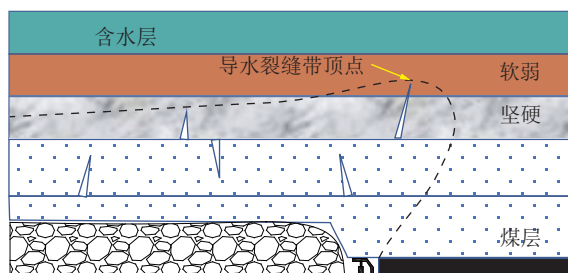


图 15 导水裂缝带的尖端效应

Fig.15 Tip effect of water flowing fractured zone

缝带发育中上部范围内的坚硬岩层进行预裂弱化,通过地面水力压裂将连续性好的坚硬岩层预裂弱化为非连续性的“软弱岩层”,被弱化的坚硬岩层不仅

强度降低,塑性能力增强,而且预裂缝二次起裂形成的裂缝网络对采动裂隙发育的上向发育具有一定的拦截作用,从而削弱采动裂隙上向发育的趋势。

因此,对高位岩层弱化即将处于裂缝尖端下部的岩层提前形成裂缝,在采动应力作用下二次起裂扩展形成裂缝网络(裂缝网络发育过程如图 16 所示),当采动裂缝由下逐渐发育至弱结构体时,采动裂缝尖端会与裂缝网络融合,同时弱结构体通过塑性变形对应力进行均化,通过裂缝网络对能量进行耗散,采动裂缝尖端的受力状态往不利于其扩展的方向进行转变,从而抑制裂缝尖端的向上扩展,削弱裂缝尖端效应,如图 17 所示。

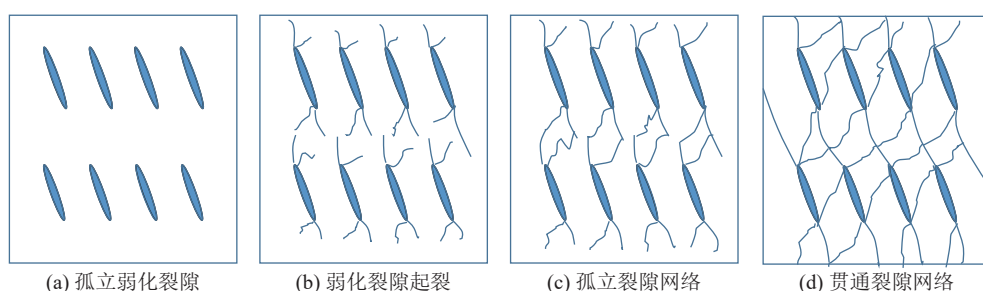


图 16 坚硬覆岩弱化裂隙网络演化发育过程

Fig.16 Evolution process of weakened fracture network of hard overburden

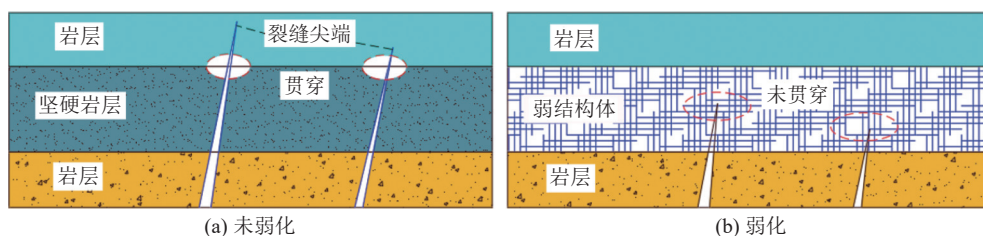


图 17 高位弱化止裂机制

Fig.17 Crack-stopping mechanism of high-position weakening

5 坚硬覆岩预裂弱化条件下导水裂缝带高度实测分析

5.1 工程概况

以陕西彬县孟村煤矿 401102 工作面为工程背景,401102 工作面为 401 盘区的第 2 个回采工作面,可采走向长度 1 713 m,倾向长度 180 m,煤层厚度 18.0~23.9 m,平均厚度 20.9 m,采厚约为 14.5 m,采煤工艺均为走向长壁后退式综合机械化放顶煤开采,全部垮落法管理顶板。采用地面钻孔法实测导水裂缝带高度,如图 18 所示。地面钻孔法观测“两带”发育高度是目前较为准确的实测方法,通过在采空区上方布置一定数量的钻孔,根据钻进过程冲洗液漏失量、孔内水位变化、取心完整程度及各种钻进异常

等现象,同时结合钻孔电视,对孔内采动覆岩裂隙进行定量化描述,综合分析确定导水裂缝带和垮落带高度。

5.2 导水裂缝带高度实测结果分析

401102 工作面实测钻孔位置及预裂弱化区域如图 19 所示,采用地面水平井分段水力压裂技术对顶板安定组岩层进行预裂,整体弱化范围较大,弱化层位距离煤层上边界约 151 m,属于中位弱化。在工作面弱化区域内部靠近回风巷内侧布置一个采后观测孔 LD,通过观测孔 LD 钻进过程中水位、冲洗液消耗量,并结合钻孔电视,综合判断 401102 工作面导水裂缝高度约 279 m,按采厚 14.5 m 计算,裂采比为 19.24。

为进一步论证弱化对导水裂缝带高度有一定的

控制作用,收集了彬长矿区未弱化条件不同矿井的
导水裂缝带高度实测值,见表 2,对比可知在同等坚

硬覆岩类型下,未采取弱化措施矿井的裂采比普遍
偏大,均大于 20,而采取弱化措施的孟村矿裂采比偏

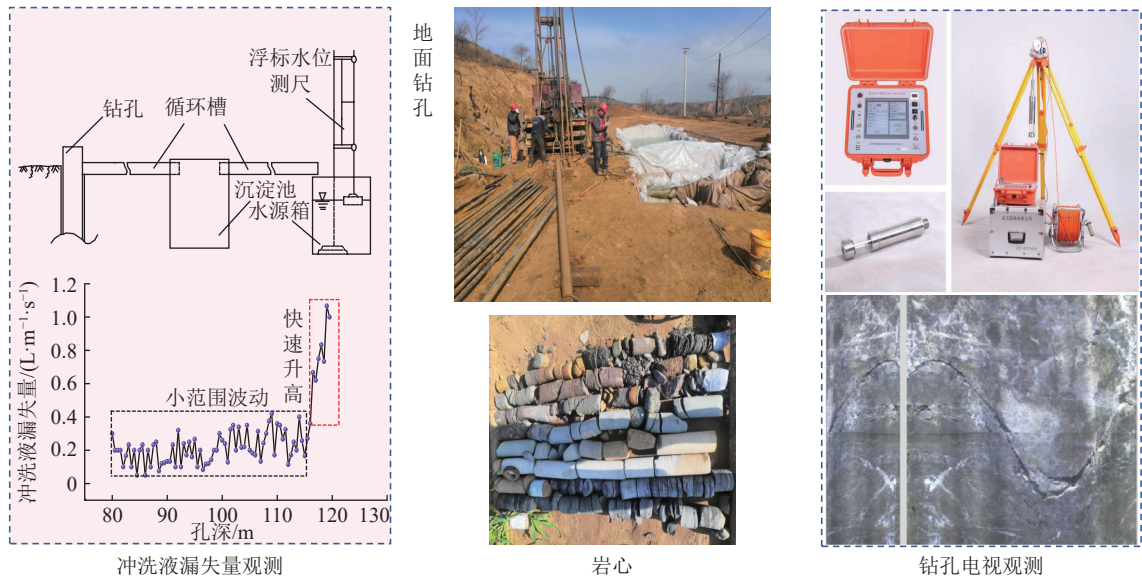


图 18 地面钻孔实测系统
Fig.18 Ground drilling measurement system

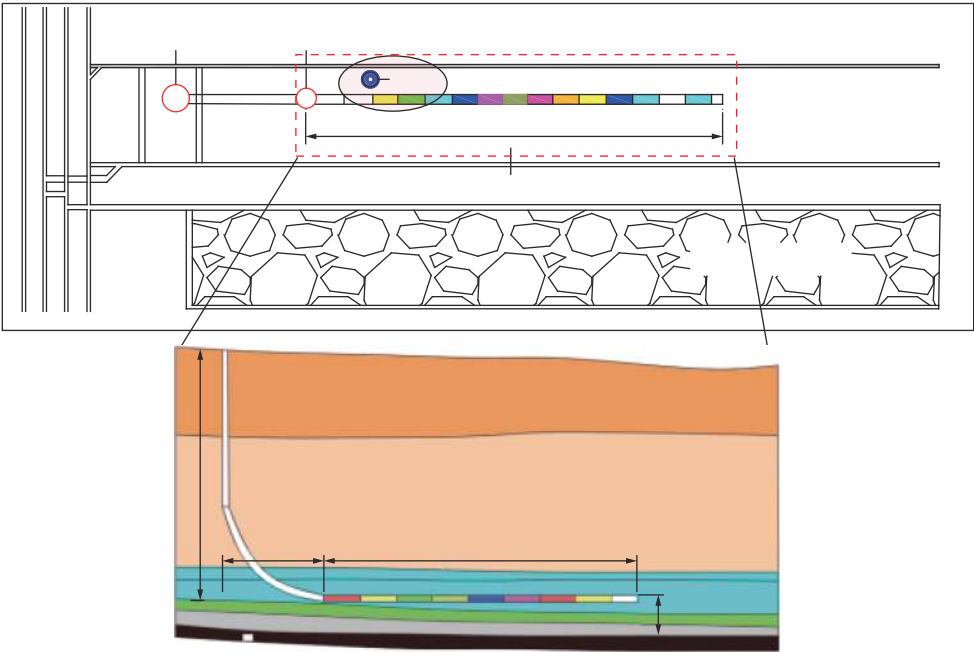


图 19 401102 工作面弱化区域及弱化层位
Fig.19 Weakening area and weakening layer of No.401102 working face

表 2 弱化与未弱化导水裂缝带高度实测

Table 2 The measured height of water flowing fractured zone in overlying strata

矿井	孟村	孟村	胡家河	亭南	高家堡	大佛寺	下沟
条件	弱化	弱化	未弱化	未弱化	未弱化	未弱化	未弱化
覆岩类型	坚硬	坚硬	坚硬	坚硬	坚硬	坚硬	坚硬
采厚/m	14.7	14.5	10.00	9.10	4.89	11.00	11.00
裂采比	18.58	19.24	23.32	27.90	23.07	26.98	27.00

低,初步验证了顶板预裂弱化对导水裂缝带发育高度有一定的控制作用。

6 结 论

1)从实验室尺度结合数值模拟,分析了预制裂缝对坚硬岩石强度及破坏特征的影响,综合应力-应变曲线、声发射特征、裂隙数量演化等规律,表明预制裂缝增强了岩石的塑性变形能力,对岩石的破坏起到主控作用,改变了完整岩石的劈裂破坏模式。基于应力与裂缝耦合的岩体损伤变量,分析了通过控制预制裂缝形态实现对坚硬岩体不同程度的弱化,并进一步从能量存储和耗散特性角度,揭示了坚硬岩体预裂弱化改性效应。

2)模拟了不同弱化层位对导水裂缝带的相对控制效果,并从覆岩破坏形态特征、裂隙数量演化、破坏高度动态变化3方面进行对比分析,得出各弱化层位对导水裂缝带发育高度的控制效果存在如下关系:低位弱化>中位弱化>高位弱化。

3)基于“弱化改性”效应揭示了高、中、低3种弱化层位对导水裂缝带的控制机理:低位弱化将位于裂缝带下部不易垮落的岩层垮落增加其碎胀效果,及时快速的弥补采出空间;中位弱化则是对采场应力的转移,减弱了工作面边界处覆岩的破坏程度;高位弱化主要通过削弱导水裂缝带在坚硬覆岩中的“尖端效应”来控制其发育高度。

4)通过对导水裂缝带高度实测,初步验证了预裂弱化对导水裂缝带发育高度存在一定的控制作用,但实际过程中影响因素复杂,因此为获得一般性规律,还需大量数据进一步验证。

参考文献(References):

- [1] 武 强. 我国矿井水防控与资源化利用的研究进展、问题和展望[J]. 煤炭学报, 2014, 39(5): 795–805.
WU Qing. Progress, problems and prospects of prevention and control technology of mine water and reutilization in China[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(5): 795–805.
- [2] 刘 洋, 杨 建, 周建军. 蒙陕深埋矿区工作面涌水量全生命周期演化规律[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(12): 152–158.
LIU Yang, YANG Jian, ZHOU Jianjun. Evolution law of water inflow in full life cycle of working face in deep buried Inner Mongolia-Shaanxi mining area[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(12): 152–158.
- [3] 张玉军, 张志巍. 煤层采动覆岩破坏规律与控制技术研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(11): 85–97.
ZHANG Yujun, ZHANG Zhiwei. Research progress of mining overlying stratas failure law and control technology[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(11): 85–97.
- [4] 杜文刚, 柴 敬, 张丁丁, 等. 采动覆岩导水裂隙发育光纤感测与表征模型试验研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(5): 1565–1575.
DU Wengang, CHAI Jing, ZHANG Dingding, et al. Optical fiber sensing and characterization of water flowing fracture development in mining overburden[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(5): 1565–1575.
- [5] 张东升, 范钢伟, 张世忠, 等. 保水开采覆岩等效阻水厚度的内涵、算法与应用[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 128–136.
ZHANG Dongsheng, FAN Gangwei, ZHANG Shizhong, et al. Equivalent water-resisting overburden thickness for water-conservation mining: Conception, method and application[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 128–136.
- [6] 黄庆享, 赖锦琪. 条带充填保水开采隔水岩组力学模型研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(4): 592–596.
HUANG Qingxiang, LAI Jinqi. Study on mechanical model of water-barrier rock formation for strip filling and water retention[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2016, 33(4): 592–596.
- [7] 张文泉, 刘海林, 赵 凯. 厚松散层薄基岩条带开采地表沉陷影响因素研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(6): 1065–1071.
ZHANG Wenquan, LIU Hailin, ZHAO Kai. Study on influencing factors of surface subsidence in mining of thin bedrock strips with thick loose layer[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2016, 33(6): 1065–1071.
- [8] 张吉雄, 张 强, 巨 峰, 等. 深部煤炭资源采选充绿色化开采理论与技术[J]. 煤炭学报, 2018, 43(2): 377–389.
ZHANG Jixiong, ZHANG Qiang, JU Feng, et al. Theory and technique of greening mining integrating mining, separating and back-filling indeep coal resources[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2): 377–389.
- [9] 杨艳国, 王 军, 于永江. 河下多煤层安全开采顺序对导水裂隙带高度的影响[J]. 煤炭学报, 2015, 40(S1): 27–32.
YANG Yanguo, WANG Jun, YU Yongjiang. Effects of different coal safe mining sequence under river on height of water flowing fracture zone[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(S1): 27–32.
- [10] 杨俊哲. 浅埋坚硬厚煤层预采顶分层综放技术研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(5): 1108–1116.
YANG Junzhe. Research on fully mechanized caving mining technology of pre mining top slicing in shallow hard coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(5): 1108–1116.
- [11] 余学义, 穆 驰, 李剑锋. 孟巴矿强含水水体下分层开采覆岩导水裂隙带发育规律[J]. 煤炭学报, 2022, 47(S1): 29–38.
YUN Xueyi, MU Chi, LI Jianfeng. Development law of water-conducting fracture zone in overlying rock with layered mining under strong water-bearing body in Barapukuria coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(S1): 29–38.
- [12] 许家林, 秦 伟, 轩大洋, 等. 采动覆岩卸荷膨胀累积效应[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 35–43.
XU Jialin, QIN Wei, XUAN Dayang, et al. Accumulative effect of overburden strata expansion induced by stress relief[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 35–43.
- [13] 李江华, 王东昊, 黎 灵, 等. 不同覆岩类型高强度采动裂隙发

- 育特征对比研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(10): 9-15.
- LI Jianghua, WANG Donghao, LI Ling, *et al.* Comparative study on development characteristics of high-intensive min-ing fissures in different overburden types[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(10): 9-15.
- [14] 曹祖宝, 王庆涛. 基于覆岩结构效应的导水裂隙带发育特征[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(3): 145-151.
- CAO Zubao, WANG Qingtao. Development characteristics of water conducted fracture zone based on overburden structural effect[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(3): 145-151.
- [15] 张玉军, 申晨辉, 张志巍, 等. 我国厚及特厚煤层高强度开采导水裂隙带发育高度区域分布规律[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(5): 38-48.
- ZHANG Yujun, SHEN Chenhui, ZHANG Zhiwei, *et al.* Regional distribution law of water-conducting fractured zone height in high-strength mining of thick and extra-thick coal seams in China[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(5): 38-48.
- [16] 黄炳香, 赵兴龙, 陈树亮, 等. 坚硬顶板水压致裂控制理论与成套技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(12): 2954-2970.
- HUANG Bingxiang, ZHAO Xinglong, CHEN Shuliang, *et al.* Theory and technology of controlling hard roof with hydraulic fracturing in underground mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(12): 2954-2970.
- [17] 康红普, 冯彦军. 定向水力压裂工作面煤体应力监测及其演化规律[J]. 煤炭学报, 2012, 37(12): 1953-1959.
- KANG Hongpu, FENG Yanjun. Monitoring of stress change in coal seam caused by directional hydraulic fracturing in working face with strong roof and its evolution[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(12): 1953-1959.
- [18] 康红普, 张 镇, 黄志增. 我国煤矿顶板灾害的特点及防控技术[J]. 煤矿安全, 2020, 51(10): 24-33, 38.
- KANG Hongpu, ZHANG Zhen, HUANG Zhizeng. Characteristics of roof disasters and controlling techniques of coal mine in China[J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(10): 24-33, 38.
- [19] 于 斌, 高 瑞, 孟祥斌, 等. 大空间远近场结构失稳矿压作用与控制技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5): 1134-1145.
- YU Bin, GAO Rui, MENG Xiangbin, *et al.* Large-space near-field structure instability ore pressure action and control technology[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(5): 1134-1145.
- [20] 于 斌, 高 瑞, 夏彬伟, 等. 大空间坚硬顶板地面压裂技术与应用[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 800-811.
- YU Bin, GAO Rui, XIA Binwei, *et al.* Ground fracturing technology and application of hard roof in large space[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 800-811.
- [21] 潘俊锋, 康红普, 闫耀东, 等. 顶板“人造解放层”防治冲击地压方法、机理及应用[J]. 煤炭学报, 2023, 48(2): 636-648.
- PAN Junfeng, KANG Hongpu, YAN Yaodong, *et al.* The method, mechanism and application of preventing rock burst by artificial liberation layer of roof[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 636-648.
- [22] 高富强. 工作面坚硬顶板水力压裂对采动应力影响的数值模拟研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2021, 3(2): 23-32.
- GAO Fuqiang. Influence of hydraulic fracturing of strong roof on mining-induced stress-insight from numerical simulation[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2021, 3(2): 23-32.
- [23] HUANG C Y, SUBHASH G, VITTON S J. A dynamic damage growth model for uniaxial compressive response of rock aggregates. Mechanics of Materials, 2002, 34(5): 267-277.
- [24] 楼志文. 损伤力学基础[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1991.
- [25] 徐芝纶. 弹性力学-上册[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 3-20.