

微震监测在复合坚硬砂岩体顶板控制策略优化中的应用

张寅 李家俊 赵乾 杨晨晨 刘家麒 周雨

引用本文:

张寅, 李家俊, 赵乾, 等. 微震监测在复合坚硬砂岩体顶板控制策略优化中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(12): 179–189.

ZHANG Yin, LI Jiajun, ZHAO Qian, et al. Application of microseismic monitoring in the optimization of control strategy for roofs composed of composite hard sandstone masses[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024, 52(12): 179–189.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.12363/issn.1001-1986.24.04.0248>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

煤矿微震监测系统在回采工作面顶板水害防治中的应用

Application of microseismic monitoring system for coal mines to the prevention and control of water disasters on working face roofs
煤田地质与勘探. 2024, 52(6): 115–127 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.24.03.0230>

基于微震监测的深埋煤层顶板导水裂隙带发育特征

Development characteristics of water-conducting fractured zone in deep coal seam based on microseismic monitoring
煤田地质与勘探. 2020, 48(5): 89–96 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2020.05.011>

坚硬顶板强矿压动力灾害演化机理与超前区域防治技术

Dynamic disaster evolution mechanism of high mine pressure at hard roof and advance area prevention and control technology
煤田地质与勘探. 2022, 50(8): 62–71 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.22.04.0222>

煤矿井下水力压裂范围微震监测技术及其影响因素

Microseismic monitoring of underground hydraulic fracturing range in coal seam and analysis of influencing factors
煤田地质与勘探. 2019, 47(S1): 92–97 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2019.S1.018>

井-孔联合微震技术在工作面底板破坏深度监测中的应用

Application of mine-hole joint microseismic technology in monitoring the damage depth of working face floor
煤田地质与勘探. 2020, 48(1): 208–213,220 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2020.01.028>

复合关键层厚硬顶板诱冲机制与防治技术模式

Rock bursts induced by thick-hard roof with compound key strata: Mechanisms and technical modes for prevention
煤田地质与勘探. 2024, 52(10): 14–24 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.23.11.0788>



移动阅读

张寅, 李家俊, 赵乾, 等. 微震监测在复合坚硬砂岩体顶板控制策略优化中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(12): 179–189. doi: 10.12363/issn.1001-1986.24.04.0248

ZHANG Yin, LI Jiajun, ZHAO Qian, et al. Application of microseismic monitoring in the optimization of control strategy for roofs composed of composite hard sandstone masses[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(12): 179–189. doi: 10.12363/issn.1001-1986.24.04.0248

微震监测在复合坚硬砂岩体顶板控制策略优化中的应用

张 寅¹, 李家俊¹, 赵 乾², 杨晨晨¹, 刘家麒¹, 周 雨¹

(1. 辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000;

2. 中天合创能源有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017010)

摘要: 【目的】随着我国煤炭开采深度不断增加, 上覆厚层坚硬岩层运动对矿压的影响愈加复杂, 而鄂尔多斯矿井多数工作面上覆岩层赋存复合坚硬砂岩体, 该类型关键层特点是厚、硬、近, 这导致工作面矿震与动力显现风险并存。【方法】以鄂尔多斯地区某矿 11-3106 工作面为工程背景, 基于微震聚集演化特征, 采用理论分析和数值模拟的方法, 对复合坚硬砂岩体顶板破断裂隙发育进行了研究, 探讨了复合坚硬砂岩体顶板控制措施。【结果和结论】研究结果表明: (1) 随着工作面的推采, 上覆复合坚硬砂岩体在微震显著聚集区域发生破断, 并可基于微震聚集特征演化规律来判识复合坚硬砂岩体的断裂位置, 该工作面微震聚集高密度区呈现“高频率-高能量”的特征, 并出现区域峰值大能量事件; (2) 11-3106 工作面在推采至一次见方和二次见方附近, 复合坚硬砂岩体呈现 2~3 个小周期和 1 个大周期的破断特征, 微震聚集在工作面走向方向动态变化; (3) 基于微震聚集演化特征, 优化了深孔预裂爆破的破断步距, 回风巷微震聚集程度显著减少, 采动影响范围缩小, 效果显著。根据工作面微震聚集特征演化的复合坚硬砂岩体动态迁移现象, 对复合坚硬砂岩体顶板控制措施进行优化, 对鄂尔多斯矿区相似覆岩结构的工作面的顶板防治具有参考意义。

关键词: 微震监测; 复合坚硬砂岩体; 破断规律; 采动应力; 运动来压

中图分类号: TD324 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1986(2024)12-0179-11

Application of microseismic monitoring in the optimization of control strategy for roofs composed of composite hard sandstone masses

ZHANG Yin¹, LI Jiajun¹, ZHAO Qian², YANG Chenchen¹, LIU Jiaqi¹, ZHOU Yu¹

(1. School of Mechanics & Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;

2. Zhongtian Hechuang Energy Co., Ltd., Ordos 017010, China)

Abstract: [Objective] With a gradual increase in the coal mining depth in China, the movement of overlying thick and hard rock layers exerts increasingly complex impacts on the mine pressure. [Methods] In the Ordos area, the overburden of the mining face of most mines hosts composite hard sandstone masses, serving as key layers characterized by considerable thicknesses, high hardness, and close proximity. [Results and Conclusions] As a result, the risks of mine earthquakes and dynamic manifestation co-exist in the mining face. With the roof of mining face 11-3106 in a coal mine within the Ordos mining area as the engineering background, this study investigated roofs composed of composite hard sandstone masses. Based on the evolution of microseismic monitoring characteristics and using methods like theoretical analysis and numerical simulation, this study investigated the breaking-induced fracture development in the roofs and explored the control measures for the roofs. The results indicate that as the mining face advanced, the overlying composite hard sandstone masses broke in the zone with significant microseismic monitoring. The breaking positions can be identified based on the evolutionary patterns of microseismic monitoring characteristics. The high-density microseismic monitoring zone in the mining face manifested high microseismic frequency and energy, accompanied by regional peak high-

收稿日期: 2024-04-14; 接收日期: 2024-10-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(52174116)

第一作者: 张寅, 1974 年生, 男, 陕西安康人, 博士, 教授。E-mail: zhangyin740314@163.com

© Editorial Office of Coal Geology & Exploration. OA under CC BY-NC-ND

energy events. As mining face 11-3106 advanced to the first and second square states (i.e., the first advancing distance of the mining face equals its length, and the second advancing distance of the mining face equals twice its length), the breaking characteristics of the composite hard sandstone masses exhibited two to three small cycles and a large cycle, with dynamic microseismic monitoring occurring along the strike of the mining face. The breaking span for deep-hole pre-splitting blasting was optimized based on the evolutionary characteristics of microseismic monitoring, significantly reducing microseismic monitoring in the air-return roadway and the mining influence range. The control measures for the roof composed of composite hard sandstone masses were optimized based on the dynamic migration of composite hard sandstone masses derived using the microseismic monitoring in the mining face. This study can serve as a reference for controlling the mining face roofs with similar overburden structures in the Ordos mining area.

Keywords: microseismic monitoring; composite hard sandstone mass; fracture regularity; mining stress; movement weighting

近年来随着我国煤炭浅部资源的枯竭,生产重心逐渐向深部转移^[1],我国煤炭事故中,上覆岩层赋存坚硬岩层的工作面分布广,坚硬顶板是诱发冲击地压的主控因素之一^[2],普遍具有分层厚度大、强度高、整体性好、自稳能力强等特点^[3-4]。而在赋存厚硬顶板的工作面,总是发生未知的矿压显现,对安全生产造成威胁,而多层厚硬岩层中,复合坚硬砂岩体在鄂尔多斯矿区中具有代表性,该类型的坚硬顶板破断和矿压显现规律尚不明确,导致冲击地压灾害呈现复杂的趋势。

在探讨复合坚硬砂岩体的断裂行为时,以往的研究中主要采用经典公式^[5-6]、理论分析^[7]、数值模拟、相似模拟^[8]和工程运用^[9]等方法对坚硬顶板的断裂行为进行了分析,但这些研究多数集中于单一岩层的断裂规律。例如,一些研究通过对现场数据的宏观分析,揭示了上覆厚关键层的断裂规律^[10];部分研究基于板理论分别构建了不同条件顶板的断裂的力学模型^[11-13];此外,还有研究通过试验结果分析了坚硬顶板断裂对工作面稳定性的影响^[14],建立了厚硬覆岩结构破断模型^[15],发现了厚硬岩层顶板裂缝特征和失稳机理^[16]。然而,对于复合坚硬顶板裂隙发育和破断规律的研究还相对较少。尽管有研究开始关注复合坚硬顶板的变形特征和应力演化^[17-19],但这些研究并未完全揭示复合坚硬砂岩体的破断特征。

微震监测技术作为一种新兴的研究手段,已被用于分析岩层裂隙发育和破裂过程,显示出巨大的潜力^[20]。微震事件的时空相关性使其成为研究岩层损伤和破坏演化过程的重要工具^[21]。通过微震监测,能够识别微震事件的活动区域与应力集中区域的一致性,进而揭示这些区域与复合坚硬岩体断裂的密切联系^[22-23]。此外,微震事件的动态演化分析为覆岩裂隙演化特征提供了深入见解^[24-25],而微震事件的时空分布及能量聚集分析则为预测工作面冲击地压危险区域提供了可能^[26-30]。尽管微震聚集特征与岩层破断存在一定的联系,但如何利用这些特征来揭示复合坚硬砂岩体的破断特征,仍是一个值得深入研究的课题。

本研究以鄂尔多斯矿区的典型工作面为背景,通过

微震监测数据分析和数值模拟,旨在深入探究复合坚硬砂岩体的微震事件聚集特征和破断规律,提高对复合坚硬砂岩体所致动力灾害的认识,为类似覆岩结构工作面的冲击地压防治提供借鉴。

1 工作面概况

鄂尔多斯地区某矿 11-3106 工作面 3-1 煤具有强冲击倾向性,工作面长度 320 m,推进长度 2 927 m,埋深约 680 m,倾角 1°~3°,煤层厚度 4.60~4.83 m,平均厚度 4.72 m。工作面所在区域整体上属于高应力区。工作面顶底板综合柱状如图 1 所示,结合地质勘探报告及综合柱状图可知,该矿井典型工作面上覆岩层中存在多层厚硬岩层,有时会出现多层坚硬岩层发生同步运动的情况,即复合坚硬砂岩体。主要由砂岩层和泥岩类复合组成,其中 7、8、9 层与 11、12、13 层被划分为低、中位复合坚硬砂岩体。该工作面北侧是 11-3104 工作面采空区,南侧为实体煤。

2 复合坚硬砂岩体微震聚集特征演化规律

2.1 微震数据处理

微震是岩体破裂扰动产生微小的震动并呈现散点分布的特征,为了探究中低位复合坚硬砂岩体破断规律,采用微震监测系统对 11-3106 工作面上覆岩层进行实测,地下数据通过环网实时传输至地面调度室,进行数据处理,确定微震事件的位置、时间和能量等参数。

根据工作面地质勘探资料,确定低位和中位复合坚硬砂岩体的埋深,提取出各个岩层的微震数据,基于估计散点密度的统计方法,分别对低位和中位的复合坚硬砂岩体分析微震在某区域的活跃与聚集程度。根据已有数据点贡献估计整个数据区域内的潜在概率,得到数据点密度的总体图。高斯核函数是最为经典、应用最广泛的核密度估计函数,其二维表达式^[31]为:

$$f(x, y, X_i, Y_i, h_x, h_y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\pi h_x h_y} \exp\left(-\frac{(x - X_i)^2}{2h_x^2} - \frac{(y - Y_i)^2}{2h_y^2}\right) \quad (1)$$

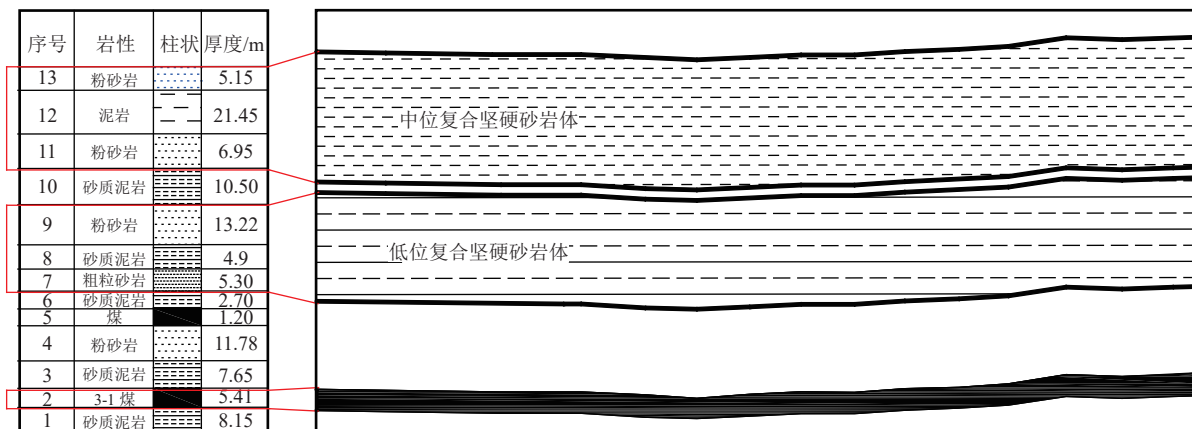


图 1 上覆岩层剖面图

Fig.1 Profile of the overburden

基于线性扩散过程计算带宽, h_x 和 h_y 的估计可以简单地通过以下公式计算:

$$h_x = \frac{\sigma_x}{2\sqrt{|X|}} \quad (2)$$

$$h_y = \frac{\sigma_y}{2\sqrt{|Y|}}$$

对数据空间进行网格划分,并在 (x,y) 点上对微震数据进行整合,获得具有数据计数的二维矩阵,利用快速傅里叶变换计算离散卷积,计算每个网格的密度值,综合 11-3106 工作面微震数据处理结果,选取 11-3106 工作面初采前 6 个月的中低位复合坚硬砂岩体微震数据,主要涉及微震事件时间、定位点、能量等参数。

2.2 微震聚集时空演化规律

针对 11-3106 工作面上覆低位复合坚硬砂岩体内破断激发的微震事件进行以上方法统计计算,绘制工作面前 6 个月的核密度分布图(图 2),微震事件主要聚集在开采区域附近的强扰动区且大部分分布在采空区,通过对微震事件密度分布情况,分析工作面开采过程中微震的聚集特征。

由图 2 可知,2021 年 9—12 月以及 2022 年 1—2 月在①—⑬处微震事件呈现显著聚集,在开采扰动作用下低位复合坚硬砂岩体在工作面采空区侧,较实体煤侧微震事件聚集程度更高且影响范围更大,这是由于 11-3104 工作面开采造成 11-3106 工作面采空区侧上覆岩层应力大量聚集,造成采空区侧应力值大于实体煤侧;随着工作面的推进,开采扰动效应与高应力的叠加,导致 11-3106 工作面微震事件集中分布靠近 11-3104 采空区侧,在监测周期内,2021 年 9 月微震事件密度分布情况如图 2a 所示,微震事件在工作面②与③处形成聚集,聚集核密度呈现两侧大中部小,此时超前区域微震事件聚集初期在采空侧走向 380 m 附近,这是由于岩层裂隙发育激发小范围微震事件聚集,微震事件聚集范围通常代表该区域破断裂隙发育的位置,聚集的密度值

代表着岩石破坏的程度,而超前小范围微震事件聚集预示着该区域可能发生岩层的破断;当工作面推采距离增加到 189.6 m 时(图 2b),微震事件聚集出现在工作面两侧,2021 年 9 月②和③处的微震事件聚集在走向 120 m 倾向 75 m 附近,随着推采的接续在⑤处微震事件的显著聚集;④处复岩层微震事件聚集呈现走向长条状的分布特征,超前影响区域在走向 380 m 采空区侧微震事件聚集程度,较 2021 年 9 月该区域微震事件聚集密度值发生显著增加,随着开采至一次见方附近(图 2c),微震事件聚集呈现由两侧向采空区侧转移的趋势且影响范围扩大,并发生了大于 10^5 J 的大能量事件,造成覆岩层的大尺度破断;当工作面推进距离达到 458 m 时(图 2d),微震事件聚集至中部和采空区侧,岩层在走向 420 m 出现倾向长条状的破断裂隙,该区域在工作面开采 2021 年 9 月和 10 月时出现破断裂隙发育,并在工作面采动至 458 m 时发生了断裂;随着工作面开采至二次见方附近(图 2e 和图 2f),低位复合砂岩体内发生多处大能量事件,并伴随着范围更大的岩层移移。

11-3106 工作面前 6 个月期间微震事件的聚集沿回采方向呈现动态变化特征,表明该工作面低位复合坚硬砂岩体沿工作面发生多次局部破断裂隙的发育,微震事件整体上呈现工作面两端聚集,大能量事件时常发生在工作面回风巷和中部,而大能量事件通常预示着大尺度破断的发生,不难发现开采扰动主要对 11-3106 工作面回风巷道造成影响,并且工作面超前的微震事件聚集区预示着岩石裂隙的萌生,由于超前微震事件聚集影响着后续微震事件分布趋势,在走向 380 m 采空区侧微震事件自 2021 年 9—10 月显著增加,但 2021 年 11—12 月微震在该区域聚集特征不明显,分析认为是工作面开采至一次见方附近,低位复合坚硬岩层中部弯曲变形直至破断,从而改变复岩层的破断特征。同样在工作面二次见方附近,2021 年 12 月在采空区侧同样发生了

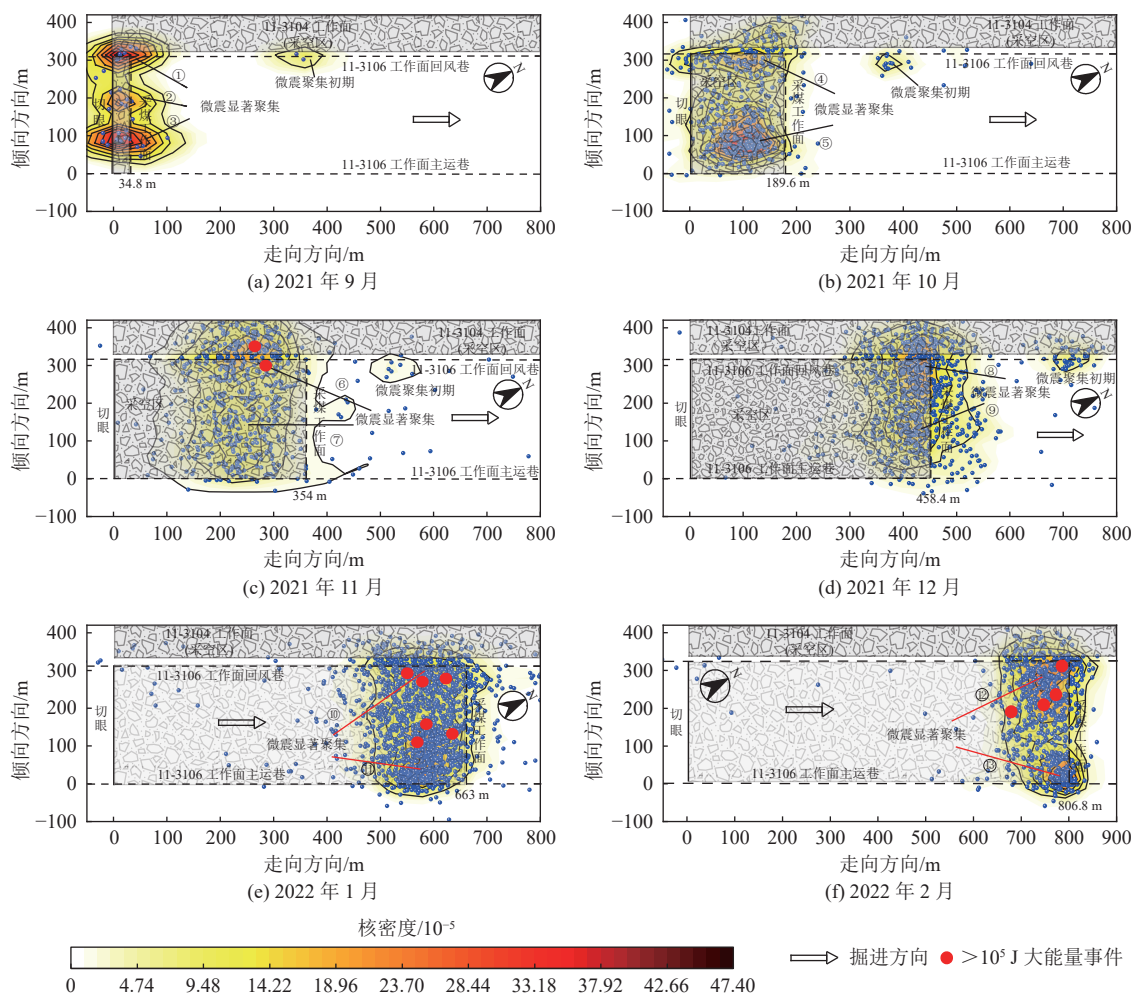


图 2 开采扰动作用下低位复合坚硬砂岩体微震聚集特征演化

Fig.2 Evolution of microseismic monitoring characteristics in the lowstand composite hard sandstone masses under mining disturbances

微震事件的初次聚集,并在 2022 年 1—2 月微震事件在该处附近发生显著聚集;在 11-3106 工作面回采期间,微震事件聚集在走向 20、120、270、420、530、640、760 m,微震活动的增强通常是引起微震事件在空间上聚集,岩层大尺度的破断激发大能量的微震事件,此现象是强矿震孕育的主要特征,可能与上部中位复合坚硬砂岩体破断相关。

如图 3b 所示,通常把微震能量大于 10^5 J 的大能量事件看作是灾害的前兆,基于中位复合坚硬砂岩体破断激发高能量微震事件发生在工作面一次见方和二次见方采空区侧,高能量微震事件代表破断位置的起始位置,该处破断瞬间释放大于 10^5 J 的能量,并在 11 月伴随着多次大于 10^5 J 大能量事件,相较于低位复合坚硬砂岩体,中位复合坚硬砂岩体较低位复合坚硬砂岩体微震事件明显减少,但大能量事件显著增加。随着工作面开采至 2021 年 11—12 月,在走向 300~400 m、倾向 250~300 m 微震大量聚集,走向 248~310 m 采空侧有多处大于 10^5 J 的大能量事件如图 3b 所示;如图 3c 所示,2022 年 1—2 月中位复合坚硬砂岩体,大能量事件密集出现,分

析认为由于岩体中应力的集中、弹性能的积蓄超过其极限而发生断裂,形成远离采掘空间的大能量事件,大尺度破断并瞬间释放弹性应变能,对下方岩层造成动态加载,使回风巷道变形与片帮,解释了 2021 年 11 月低位砂岩体的微震事件在走向 200~300 m 采空区侧显著聚集,以及 2022 年 1 月在走向 550~650 m 采空区侧微震事件显著聚集,该区域的聚集为中位砂岩的破断所致。

2.3 微震总能量与总频次分析

单位时间内微震事件的聚集程度,在一定的情况下反映了岩石破坏的程度,而微震事件的能量是叙述岩石破裂的程度,微震事件频次代表着在该时间段岩石发生破裂的频率,为了进一步研究岩层破断的情况并对微震事件聚集原因提出解释,对工作面上覆岩层单位时间内的总频次与总能量进行统计。

针对 11-3106 工作面复合坚硬砂岩体微震事件总频次的统计,分析岩体来压临界值,并对前 6 个月每日回采距离进行标记,结合复合坚硬岩层微震事件聚集情况以及现场情况,为了方便叙述,定义复合坚硬砂岩体来压判据为:

$$\begin{cases} P_0 > \rho_p + 0.95\sigma_p & \text{中位复合坚硬砂岩体来压} \\ P_0 \leq \rho_p + 0.95\sigma_p & \text{低位复合坚硬砂岩体来压} \end{cases} \quad (3)$$

并对微震总频次进行划分:

$$\begin{cases} P_0 > \rho_p & \text{高频次} \\ P_0 \leq \rho_p & \text{高能量} \end{cases} \quad (4)$$

以相同的方式对复合坚硬砂岩体微震总能量进行统计,并对大于 $\rho_1 + \sigma_1$ 的微震总能量区域峰值进行标记,将总能量划分为:

$$\begin{cases} L_0 > \rho_1 & \text{高能量} \\ L_0 \leq \rho_1 & \text{低能量} \end{cases} \quad (5)$$

11-3106 工作面复合坚硬砂岩体总能量与总频次统计结果如图 4 所示,微震总能量在岩层发生断裂的位置呈现区域峰值,由于复岩层受采动应力发生弯曲变形使得采场应力重新分布,岩体某些区域内部储蓄大量的弹性应变能,当储蓄的能量大于岩体破坏的能量时,岩体就可能发生破断,使得上部岩体直接作用于下部岩体,造成运动来压的现象;在 11-3106 工作面上覆复合坚硬砂岩体运动来压区域,微震事件总是伴随着“高频率-高能量”的特征并出现区域峰值大能量事件,这是由于更高位岩体发生大尺度的破断,造成岩体产生断裂激发大范围的微震事件;如图 3、图 4 所示,该工作面微震事件聚集区域的总频次和总能量呈现“高频率-高能量”的特征,且随着复合坚硬顶板的破断又恢复至“低频率-低能量”,解释了微震事件聚集区随着工作面的推进动态迁移的现象。在低位复合坚硬砂岩体运动来压时,微震总是伴随着“高频率-高能量”,且发生大于 10^5 J 大能量事件,低位复合砂岩体裂隙聚集在 75~120、200~300、500~600 和 750~780 m 附近,微震聚集特征相一致;在中位复合砂岩体运动来压时,结合该时间段内微震聚集核密度分布,不难发现中位复合坚硬砂岩体在一次见方和二次见方附近发生了大尺度破断。

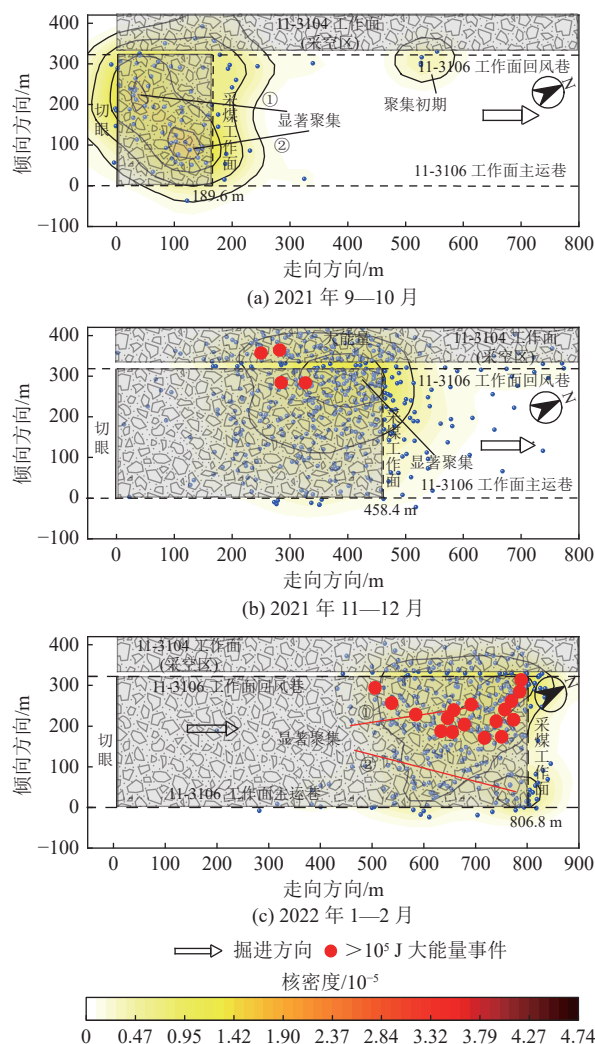


图 3 开采扰动作用下中位坚硬砂岩体微震聚集特征演化
Fig.3 Evolution of microseismic monitoring characteristics of the moderate-stand composite hard sandstone masses

由于鄂尔多斯矿区中,多数工作面上覆岩层赋存类似复合坚硬砂岩体^[30],与其他工作面上覆岩层赋存复合坚硬砂岩体的工作面相同,一次见方后,微震总能量波动随之增加,上覆岩层的运动愈加复杂,工作面在二

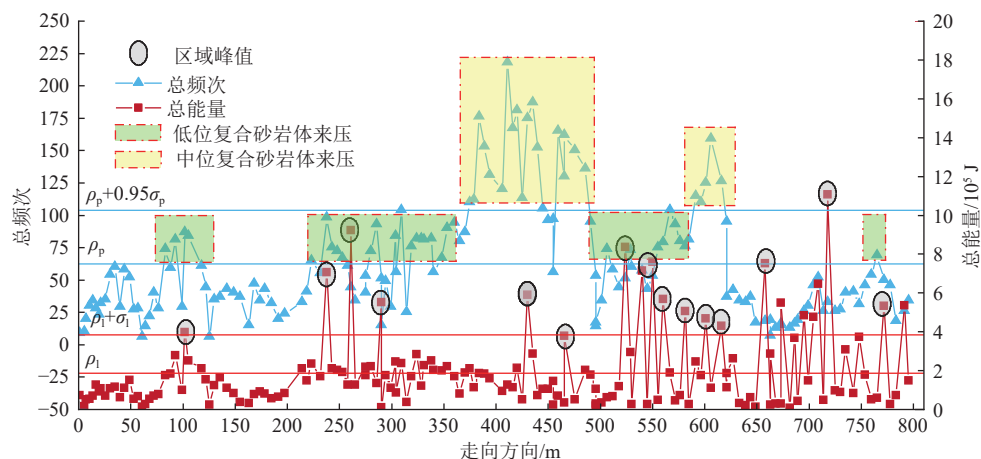


图 4 走向方向微震事件总能量与总频次

Fig.4 Analysis of the total energy and frequency of microseismic events along the strike of the mining face

次见方前,微震发生频率逐渐增加,大能量事件时有发生,直至发生大尺度破断,在该区域上覆岩层赋存复合坚硬砂岩体的工作面发生运动来压时,微震事件可能呈现“高频率-高能量”的特征。

3 复合坚硬砂岩体裂隙发育及采场应力演化

3.1 复合坚硬砂岩体断裂弹性能释放

坚硬岩层的破断方式通常被简化为悬臂梁和砌体梁两种,当两复合坚硬砂岩体距离较近时,随着开采的接续,中低位复合坚硬砂岩体破断相互影响。基于微震聚集特征演化对中低位复合坚硬砂岩体破断特征的分析,从能量的角度可知,破断裂隙的孕育是能量缓慢积累和突然释放的过程,具体可分为 4 个阶段,第一阶段,煤层开采前,在原岩应力的作用下,上覆复合坚硬砂岩体具有一定的弹性应变能;第二阶段,煤层开采过程中,随着低位复合坚硬砂岩体暴露,下方水平应力转移到上覆坚硬岩层,水平应力增大,复合坚硬砂岩体弹性能继续积累变大;第三阶段,工作面继续推进,暴露步距加大,在水平应力和自重的作用下,复合坚硬砂岩体开始弯曲,继续积累能量;第四阶段,复合坚硬砂岩体能量积累达到极限发生破断,能量得到释放。因此,复合坚硬砂岩体断裂释放的能量可以近似地简化为 E_i :

$$E_i = \lambda(E_g + E_t + E_m) \quad (6)$$

随着复合坚硬砂岩体由于重力最终破断位置产生的势能为:

$$E_g = mgh_0 = \rho Vgh_0 = \rho lgh_0 dh \quad (7)$$

煤层及煤层上方的复合坚硬砂岩体可认为是一个弹性体,根据弹性力学理论,外力对弹性体所做的功全部转化为弹性体的应变能,并储存在弹性体内,当发生断裂时,释放弹性能为 E_t :

$$E_t = \iiint_V U dV = \iiint_V \left[\frac{1}{2e} (\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2) - 2\mu(\sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_z\sigma_x) + 2(1+\mu)(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \right] dV \quad (8)$$

随着纵向裂隙的发育,低位复合坚硬岩层发生破断时,其弹性应变能将转移到下位和上位未断裂的岩层中,转移实际释放的弹性能是理论计算值的 ξ 倍(ξ 为应变能转化系数, $0 \leq \xi < 1$); 当中位复合坚硬岩层破断时,因其下方为已经存在大范围断裂的岩层,所以,可以近似地认为,其弹性应变能将仅转移到上位岩层中。因此,当中位复合坚硬砂岩体发生破断时,来自下方的低位复合坚硬砂岩体转移来的应变能 E_m :

$$E_m = \kappa E_{i-1} \quad (9)$$

如图 5 所示,随着工作面的推进,上覆岩层开始暴露、弯曲、破断,当达到低位复合坚硬砂体的极限垮落步距时,低位复合坚硬砂岩体断裂释放能量 E_1 。

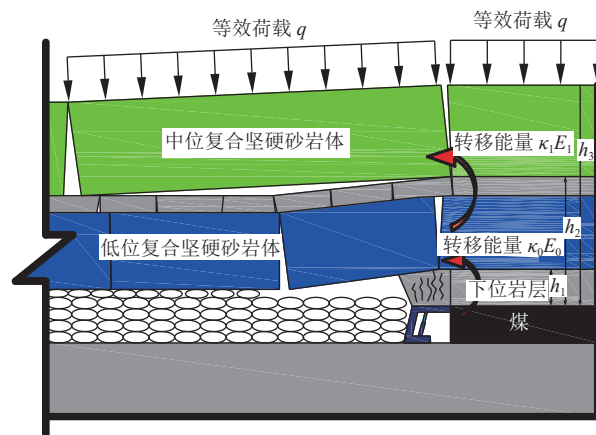


图 5 复合坚硬砂岩体弹性能转移过程

Fig.5 Transfer process of elastic energy in composite hard sandstone masses

根据式(6)—式(9)低位复合坚硬砂岩体断裂时,释放的能量 E_1 为:

$$E_1 = \lambda(E_g + E_t + E_m) = \lambda(E_g + \xi E_t + \kappa E_m) = \lambda s_1 d \left\{ \rho g(h_2 - h_1)h_0 + \frac{\xi}{2e} [(\sigma_{1x}^2 + \sigma_{1y}^2 + \sigma_{1z}^2) - 2\mu(\sigma_{1x}\sigma_{1y} + \sigma_{1y}\sigma_{1z} + \sigma_{1z}\sigma_{1x})] (h_2 - h_1) + \frac{\kappa}{2e} [(\sigma_{0x}^2 + \sigma_{0y}^2 + \sigma_{0z}^2) - 2\mu(\sigma_{0x}\sigma_{0y} + \sigma_{0y}\sigma_{0z} + \sigma_{0z}\sigma_{0x})] S \right\} \quad (10)$$

中位复合坚硬砂岩体断裂时,释放的能量为 E_2 :

$$E_2 = \lambda(E_g + E_t + E_m) = \lambda(E_g + \xi E_t + \kappa E_m) = \lambda s_2 d \left\{ \rho g(h_3 - h_2)h_1 + \frac{\xi}{2e} [(\sigma_{2x}^2 + \sigma_{2y}^2 + \sigma_{2z}^2) - 2\mu(\sigma_{2x}\sigma_{2y} + \sigma_{2y}\sigma_{2z} + \sigma_{2z}\sigma_{2x})] (h_3 - h_2) + \frac{\kappa}{2e} [(\sigma_{1x}^2 + \sigma_{1y}^2 + \sigma_{1z}^2) - 2\mu(\sigma_{1x}\sigma_{1y} + \sigma_{1y}\sigma_{1z} + \sigma_{1z}\sigma_{1x})] S \right\} \quad (11)$$

3.2 复合坚硬砂岩体离散元数值模型

基于 11-3106 工作面开采的地质条件,研究复合坚硬砂岩体破坏的裂隙发育以及采动应力的加载特征,基于离散单元法作为基本理论以描述离散介质力学行为的计算分析程序,是将非连续介质等价为一组离散块体的集合,块体是可变形或者刚体,块体之间交互面来模拟薄弱面,3DEC 主要模拟倾向于从薄弱面破裂的介质,所以采用 3DEC 离散元数值软件构建复合坚硬砂岩体的数值计算模拟,模型边界条件与尺寸如图 6 所示,基于 Mohr-Coulomb 力学模型,计算分析采动应力影响范围以及接触面的破坏过程,模型长×宽×高=500 m×3 m×130 m,在模型顶部添加 11.976 MPa 等效荷载,模

型左右预留 50 m 的煤柱消除边界相应,底部约束横向和纵向位移,两侧约束纵向位移。为提高模型的计算精度,对煤层直接顶与基本顶模型岩块结构面加密。模拟岩石参数,详见表 1。

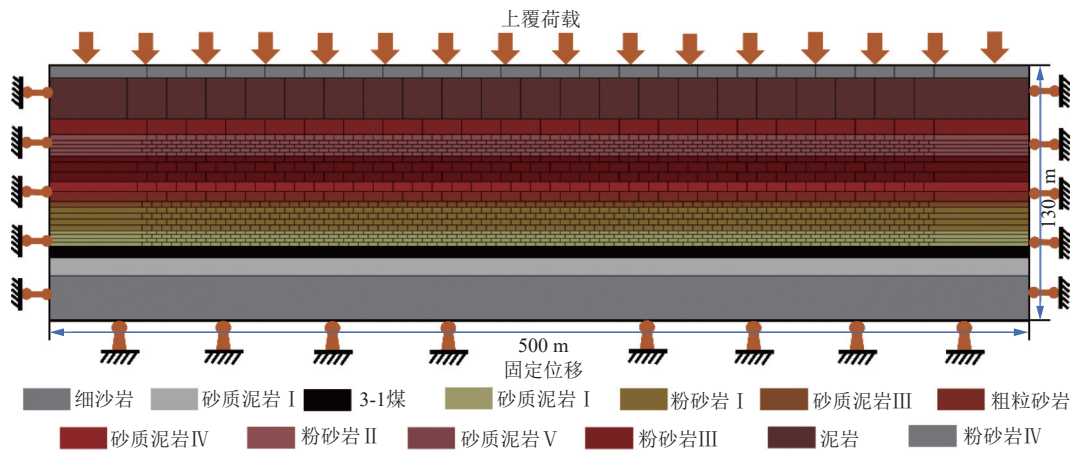


图 6 离散元数值模型
Fig.6 Discrete-element numerical model

表 1 岩石力学参数
Table 1 Rock mechanical parameters

序号	岩性	模拟厚度/m	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa
13	粉砂岩	6	2 550	19.2	0.23	10	38	5
12	泥岩	21	2 550	20.1	0.24	6.6	30	4
11	粉砂岩	8	2 600	21.6	0.25	10	38	2.7
10	砂质泥岩	11	2 580	15.3	0.26	6.6	35	2.8
9	粉砂岩	13	2 600	21.6	0.25	6.7	38	2.7
8	砂质泥岩	5	2 580	15.3	0.26	6.5	35	2.7
7	粗粒砂岩	5	2 550	19.2	0.23	10	38	5
6	砂质泥岩	3	2 580	15.3	0.26	6.5	35	2.7
5	粉砂岩	12	2 600	21.6	0.25	5.5	38	3.12
4	砂质泥岩	8	2 580	15.3	0.26	6.5	35	2.7
3	3-1煤	6	1 600	12	0.3	4.5	30	1.68
2	砂质泥岩	9	2 580	15.3	0.26	6.2	35	2.2
1	细砂岩	23	2 550	21.6	0.25	7.2	38	2.7

3.3 复杂空间上覆岩层裂隙发育分析

工作面开采过程中,为明确工作面开采过程中引起的微震变化特征,分析复合坚硬砂岩体开采过程中岩层顶板裂隙发育情况。如图 7 所示,当工作面开采至 100 m 时采空区直接顶开始垮落,基本顶砂岩层弯曲变形,形成高度为 28 m 的明显断裂区,并伴随着纵向裂隙发展;随着顶板的垮落,推采至 150 m,基本顶砂岩层初次破断,低位复合砂岩体开始发生弯曲变形并出现明显的离层现象,形成“悬臂梁”结构,岩层裂隙逐渐发育至 37 m,随着煤层开采的接续,上覆岩层破碎区随工作面的推进不断向前移动,但随着低位复合砂岩体在推采至 180 m 发生初次破断,初次破断步距为 73 m,破碎区高度开始稳定在 64 m,低位复合砂岩体开始周期性破断,直至推采至一次见方附近,中位复合坚硬砂岩体在 144 m 处

发生初次断裂,且伴随着低位复合坚硬砂岩体的破断,最终复合坚硬砂岩体大致形成 2~3 个小周期 1 个大周期的破断特征,最大下沉量达到 5.5 m。随着推采距离的增加,上覆岩层破裂高度不断向上发展,岩层受采动影响范围扩大,复合坚硬砂岩体不断发生断裂或滑移,在开采至一次见方附近,中低位复合坚硬砂岩体同时破断,易诱发动力灾害。

3.4 复合坚硬砂岩体采场应力演化分析

为了进一步探究中低位复合坚硬砂岩体的加载特征,随着开采的进行,工作面围岩中的应力集中可达到原岩应力的 2~5 倍。

由于 11-3106 工作面属于高应力区域且上覆岩层运动规律复杂,基于相对集中系数叠加法^[32],在 3DEC 中编写相关公式;高应力区通常代表顶板破碎区,如图 8

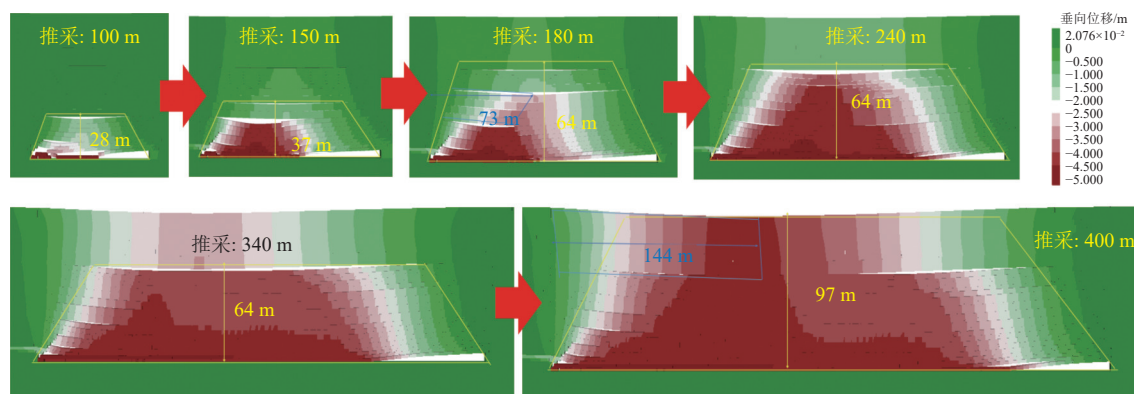


图 7 工作面上覆岩层裂隙发育演化

Fig.7 Developmental evolution of fractures in the overburden of the mining face

所示,高应力区主要集中在采煤工作面前方 60 m 附近,随着基本顶的垮落与能量的释放,采动影响区域成逐步增加,形成采空区上覆岩层卸压区、两侧围岩高应力区和超前采动影响区,应力峰值在工作面超前 20 m 左右,随着开采的接续,应力峰值逐渐增加,直到推采至 150 m 低位复合坚硬砂岩体初次破断,释放弹性应变能,应力峰值停止增加,此时围岩应力峰值是原岩应力值的 2.7 倍,对于超前高应力区走向影响距离也随之缩小,而随着工作面的推采,超前高应力区垂向衍生至中位复合坚硬砂岩体,高应力区逐步稳定在 50~60 m,高采动应力驱动下,复合坚硬砂岩体萌生超前采动裂隙,影响岩层的破断模式,解释了 11-3106 工作面超前微震事件的聚集。

在低位复合坚硬砂岩体初次破断后,逐步趋于 50~60 m;当工作面推进至一次见方附近,复合坚硬砂岩体的同时破断,造成采场应力峰值是初始应力的 4.39 倍,由于中位复合坚硬顶板的破断,破断位置如图 8 红色标记处,高应力区垂向衍生至低位复合坚硬砂岩体以及工作面,对下位岩层形成动力荷载,此时易诱发冲击地压的发生。

4 复合坚硬砂岩体顶板控制措施方案

根据微震聚集特征演化特征与中低位复合坚硬砂岩体数值模拟分析,采场受采动应力与岩层运动影响产生超前裂隙并激发微震聚集,超前微震聚集特征可以预测岩层破断位置,从而提前对复合坚硬砂岩体进行干预,预防冲击地压的发生。

该工作面通过深孔预裂爆破控制复合砂岩体的力学结构,防治工作面上方复合坚硬砂岩体同时破断,预防动力灾害的发生,保证矿井安全生产。基于中低位复合坚硬砂岩体微震聚集特征,对工作面走向 20、120、270、420、530、640、760 m 上覆低位复合坚硬砂岩体设计卸压措施,并设计中低位砂岩体预裂爆破循环步距,因工作面周期来压步距平均值为 30 m,根据实际监测

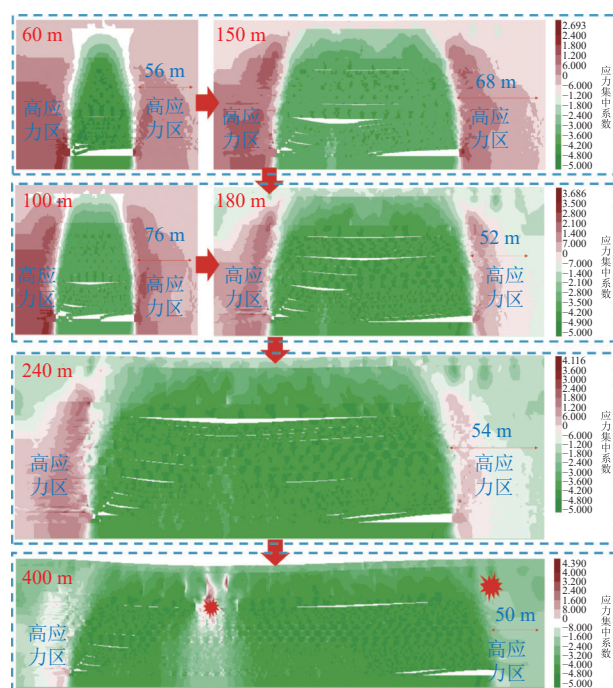


图 8 工作面上覆岩层采场应力演化

Fig.8 Evolution of the mining stress in the overburden of the mining face

按照“2~3 个小周期、1 个大周期”进行估算,低位复合砂岩体的周期来压步距 77~110 m,中位复合砂岩体来压初次破断步距为 248~310 m,结合工程现场实际,建议设计中低位复合砂岩体预裂爆破循环步距为 100 m 如图 9 所示,从而预防中低位复合坚硬砂岩体破断造成的动力灾害。

11-3106 工作面复合坚硬顶板的破断不稳定时高应力多位于超 60 m 范围内,因此,对超前工作面 60 m 内的坚硬顶板进行爆破预裂,结合顶板爆破的可行性、现在钻孔综合柱状图和控制效果,确定最终爆破方案如图 10 所示。

针对 11-3106 工作面顶板预裂爆破,现场实际对工作面回采至 148.4 m 回风巷采取顶板爆破措施,基于该时间段的微震聚集程度如图所示,回风巷侧最大核密度

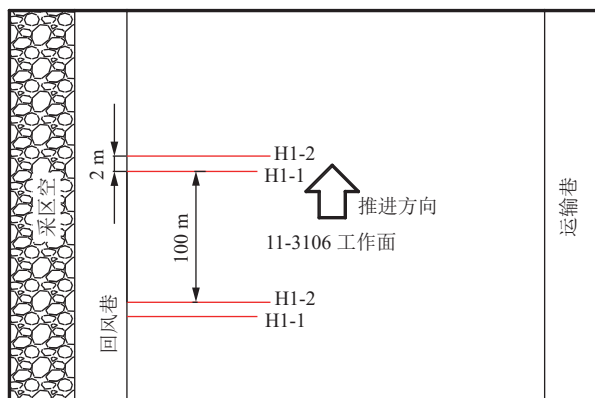


图 9 11-3106 工作面深孔预裂爆破步距

Fig.9 Breaking span for deep-hole pre-splitting blasting of mining face 11-3106

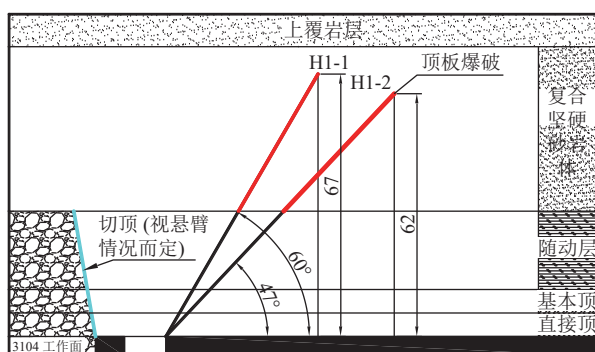


图 10 11-3106 工作面爆破剖面

Fig.10 Blasting profile of mining face 11-3106

值为 1.856×10^{-5} , 主运巷侧最大密度值为 2.896×10^{-5} , 如图 11 所示, 回风巷微震聚集程度显著减少, 采动影响范围缩小, 效果显著。顶板深孔爆破削弱了顶板能量积累和岩层能量的集中释放, 将微震事件减弱为多个小能量事件的缓慢释放, 降低了微震事件聚集区的顶板活动强

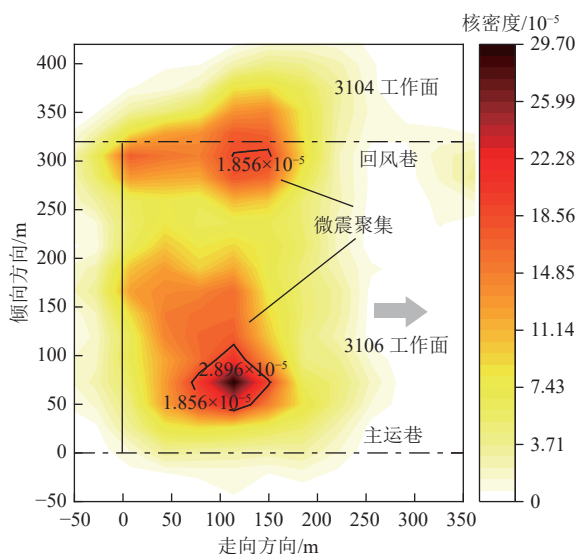


图 11 推采至 148.4 m 的微震事件聚集特征

Fig.11 Microseismic event accumulation characteristics as the mining face advanced to 148.4 m

度, 减少了大能事件的发生, 降低了坚硬岩层易诱发较大冲击危险的特征。

综上所述, 基于微震聚集特征演化特征的分析, 预测破断裂隙的发展, 进而反映覆岩破断情况, 对相应微震聚集初始区域提前进行爆破预裂, 对冲击地压防治具有一定的指导意义。

5 结论

(1) 结合理论分析和数值模拟方法, 揭示了鄂尔多斯某矿区 11-3106 工作面复合坚硬砂岩体断裂行为与微震聚集特征。

(2) 复合坚硬砂岩体的断裂行为与微震事件的时空分布密切相关, 工作面推采至不同阶段时, 微震聚集区呈现动态迁移, 伴随着“高频率-高能量”的特征并出现区域峰值大能量事件。

(3) 微震事件的能量和频率分布可用于预测复合坚硬砂岩体的破断位置和强度, 通过对微震事件的时空分析, 揭示了微震聚集的核密度值与复合坚硬砂岩体运动活跃程度成正相关。

(4) 在工作面推进过程中, 微震数据揭示了复合坚硬砂岩体的破断能量释放规律, 基于微震事件总能量与频次的统计分析, 工作面微震能量密度最高可达 10^6 J, 表明该区域存在较高的破断风险。通过优化预裂爆破步距, 避免中低位复合坚硬砂岩体同时破断, 降低了微震事件聚集区的顶板活动强度, 减少了大能事件的发生。

符号注释:

d 为工作面的宽度, m; e 为弹性模量; E_g 为关键层重力势能, J; E_l 为复合坚硬砂岩体弹性应变能, J; E_m 为关键层转移应变能, J; E_l 为低位复合坚硬砂岩体断裂释放的能量, J; E_i 和 E_{i-1} 分别为第 i 层和 $i-1$ 层复合坚硬砂岩体断裂释放的能量, J; g 为重力加速度, m/s^2 ; h 为关键层及其控制岩层的厚度, m; h_0 为复合坚硬岩层及其控制的岩层向下运动的距离(一般取 0~1/2 的采高), m; h_1 、 h_2 、 h_3 为低位、中位、更高位复合坚硬砂岩体到煤层顶板的距离, m; h_x 和 h_y 为最佳带宽值, m; l 为工作面推进距离, m; L_0 为当日发生微震事件的总能量, J; m 为运动岩层的质量, kg; n 为集合 X 或 Y 中的元素个数; P_0 为当日的总频次; s_1 、 s_2 分别为采空区上方低位、中位复合坚硬砂岩体沿开采方向的剖面面积, m^2 ; S 为采高, m; U 为应变能密度, J/m^3 ; V 为运动岩层的体积, m^3 ; X 、 Y 为所有微震事件的坐标集合, $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$, $Y = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_n\}$; X_i 和 Y_i 分别为集合 X 和 Y 中的第 i 个元素; κ 为应变能转移系数, $0 \leq \kappa < \xi < 1$; λ 为重力势能和应变能转化为震动能量的转化系数, $\lambda < 1$ (部分能量以

热能、声能等形式耗散); μ 为泊松比; v 为弹性体的体积, m^3 ; ξ 为应变能转化系数, $0 \leq \xi < 1$; ρ 为运动岩层的密度, kg/m^3 ; ρ_1 为该工作面前 6 月总能量的平均值, J ; ρ_p 为该工作面前 6 月微震总频次的平均值; σ_x 和 σ_y 为数据集 X 、 Y 的样本标准差; σ_p 为每天复合微震总频次的标准差; σ_x 、 σ_y 、 σ_z 为煤层及煤层上方复合坚硬砂岩体的各个方向主应力, Pa ; σ_{0x} 、 σ_{0y} 、 σ_{0z} 为煤层及煤层上方复合坚硬砂岩体的各个方向主应力, Pa ; σ_{1x} 、 σ_{1y} 、 σ_{1z} 为低位复合砂岩体各个方向的主应力, Pa ; σ_{2x} 、 σ_{2y} 、 σ_{2z} 为中位复合砂岩体各个方向的主应力, Pa ; τ_{xy} 、 τ_{yz} 、 τ_{zx} 为各个方向的剪切应力, Pa 。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References)

- [1] WU Shaokang, ZHANG Junwen, SONG Zhixiang, et al. Review of the development status of rock burst disaster prevention system in China[J]. *Journal of Central South University*, 2023, 30(11): 3763–3789.
- [2] 于斌. 大同矿区特厚煤层综放开采强矿压显现机理及顶板控制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
YU Bin. Study on the mechanism of strong ground pressure and roof control in fully mechanized top-coal caving mining of extra-thick coal seam in Datong mining area[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.
- [3] 杜建, 左建平, 吴根水, 等. 产气具弱化坚硬顶板力学机制及损伤特征分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(9): 2224–2236.
DU Jian, ZUO Jianping, WU Genshui, et al. Analysis of mechanical mechanism and damage characteristics of new fracturing device gas producing tool weakening hard roof[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(9): 2224–2236.
- [4] 何杰, 程蓬, 吴乐, 等. 坚硬顶板动压巷道远近应力场演化规律及调控技术研究[J]. *煤炭科学技术*, 1-12[2024-10-08].
HE Jie, CHENG Peng, WU Le, et al. Evolution laws and control technology of near and far stress field in hard roof mining roadway[J]. *Coal Science and Technology*, 1-12[2024-10-08].
- [5] 崔峰, 陆长亮, 王昊, 等. 缓倾斜煤层坚硬顶板断层活化微震时空演化规律及诱冲机制[J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2024, 6(3): 5–19.
CUI Feng, LU Changliang, WANG Hao, et al. Spatio-temporal evolution of microseismic activation of hard-roof faults in gently dipping coal seams and the mechanism of induced shocks[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2024, 6(3): 5–19.
- [6] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林. 岩层控制中的关键层理论研究[J]. *煤炭学报*, 1996, 21(3): 2–7.
QIAN Minggao, MIAO Xiexing, XU Jialin. Theoretical study of key stratum in ground control[J]. *Journal of China Coal Society*, 1996, 21(3): 2–7.
- [7] 王炯, 李文飞, 刘雨兴, 等. 塔山煤矿复合坚硬顶板切顶留巷围岩变形机理及控制技术研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2020, 37(5): 871–880.
WANG Jiong, LI Wenfei, LIU Yuxing, et al. Deformation mechanism and control technology of surrounding rock in gob-side entry retaining by roof cutting of composite hard roof in the Tashan coal mine[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2020, 37(5): 871–880.
- [8] 王宏伟, 邓代新, 姜耀东, 等. 巨厚坚硬顶板变形及垮落的动态演化特征研究[J]. *矿业科学学报*, 2021, 6(5): 548–557.
WANG Hongwei, DENG Daixin, JIANG Yaodong, et al. Study on the dynamic evolution characteristics of deformation and collapse of the extra-thick hard roof[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2021, 6(5): 548–557.
- [9] 樊鑫, 程建远, 栗升, 等. 煤矿微震监测系统在回采工作面顶板水害防治中的应用[J]. *煤田地质与勘探*, 2024, 52(6): 115–127.
FAN Xin, CHENG Jianyuan, LI Sheng, et al. Application of microseismic monitoring system for coal mines to the prevention and control of water disasters on working face roofs[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024, 52(6): 115–127.
- [10] JIANG Lishuai, WU Quansen, WU Quanlin, et al. Fracture failure analysis of hard and thick key layer and its dynamic response characteristics[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2019, 98: 118–130.
- [11] ZUO Jianping, YU Meilu, LI Chunyuan, et al. Analysis of surface cracking and fracture behavior of a single thick main roof based on similar model experiments in western coal mine, China[J]. *Natural Resources Research*, 2021, 30(1): 657–680.
- [12] 马新根. 塔山煤矿复合坚硬顶板 110 工法关键技术及矿压规律研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2019.
MA Xingen. Study on key technology and ground pressure law of compound hard roof 110 construction method in Tashan Coal Mine[D]. Beijing: China University of Mining & Technology (Beijing), 2019.
- [13] YU Meilu, ZUO Jianping, SUN Yunjiang, et al. Investigation on fracture models and ground pressure distribution of thick hard rock strata including weak interlayer[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2022, 32(1): 137–153.
- [14] JIA Jinlong, CAO Liwen, ZHANG Dianji, et al. Study on the fracture characteristics of thick-hard limestone roof and its controlling technique[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(17): 605.
- [15] 翁明月, 苏士杰, 孙如达, 等. 多关键层窄煤柱冲击地压发生机理与三级协同防治技术[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(增刊 1): 45–56.
WENG Mingyue, SU Shijie, SUN Ruda, et al. Research on Rock burst generation mechanism and three-level collaborative control technology of multi-key strata narrow coal pillar[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(Sup.1): 45–56.
- [16] ZHAO Tong, GONG Peilin, YETILMEZSOY K, et al. Dynamic failure and stability model analysis of thick and hard rock with wedge-structure immediate roof occurrence[J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2021, 7(3): 80.
- [17] 杨胜利. 基于中厚板理论的坚硬厚顶板破断致灾机制与控制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
YANG Shengli. Study on disaster mechanism and control of hard

- thick roof fracture based on plate theory[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [18] WANG Hongwei, JIAO Jianqiang, WU Yongping, et al. Deformation characteristics and stress evolution law of composite hard roof under presplitting weakening[J]. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 2023, 40(3): 839–850.
- [19] 郑凯歌, 袁亮, 杨森, 等. 基于分区弱化的复合坚硬顶板冲击地压分段压裂区域防治研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2023, 40(2): 322–333.
- ZHENG Kaige, YUAN Liang, YANG Sen, et al. Study on prevention and control of rock burst staged fracturing area of composite hard roof based on zoning weakening[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2023, 40(2): 322–333.
- [20] WANG Shuyu, SI Guangyao, WANG Changbin, et al. Quantitative assessment of the spatio-temporal correlations of seismic events induced by longwall coal mining[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2022, 14(5): 1406–1420.
- [21] 胡静云, 张茹, 任利, 等. 矿山微震波形特征自动模式识别算法研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(2): 346–361.
- HU Jingyun, ZHANG Ru, REN Li, et al. Research on automatic pattern recognition algorithm of micro-seismic waveform characteristics in mines[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(2): 346–361.
- [22] ZHAO Jinshuai, JIANG Quan, PEI Shufeng, et al. Microseismicity and focal mechanism of blasting-induced block falling of intersecting chamber of large underground cavern under high geostress[J]. *Journal of Central South University*, 2023, 30(2): 542–554.
- [23] 周金艳, 杨洪增, 高杰涛. 煤矿不等长工作面微震事件空间分布特征及其影响因素[J]. *煤田地质与勘探*, 2024, 52(6): 128–136.
- ZHOU Jinyan, YANG Hongzeng, GAO Jietao. Spatial distribution and influencing factors of microseismic events in unequal-length mining faces in coal mines[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024, 52(6): 128–136.
- [24] LU Caiping, LIU Yang, WANG Hongyu, et al. Microseismic signals of double-layer hard and thick igneous strata separation and fracturing[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2016, 160: 28–41.
- [25] 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 Haiqing, 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.
- [26] 王家臣, 唐岳松, 王兆会, 等. 千米深井综采工作面覆岩微震显现特征与损伤度计算方法[J]. *中国矿业大学学报*, 2023, 52(3): 417–431.
- WANG Jiachen, TANG Yuesong, WANG Zhaohui, et al. Characteristics of microseismic events and damage degree calculation method in kilometer deep fully mechanical longwall panel[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2023, 52(3): 417–431.
- [27] 潘一山, 宋义敏, 朱晨利, 等. 冲击地压预测的煤岩变形局部化方法[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(1): 185–198.
- PAN Yishan, SONG Yimin, ZHU Chenli, et al. Localization method of coal rock deformation for rock burst prediction[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(1): 185–198.
- [28] 王桂峰, 窦林名, 蔡武, 等. 冲击地压的不稳定能量触发机制研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2018, 47(1): 190–196.
- WANG Guifeng, DOU Linming, CAI Wu, et al. Unstable energy triggering mechanism of rock burst[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2018, 47(1): 190–196.
- [29] LI Xuelong, LI Zhonghui, WANG Enyuan, et al. Pattern recognition of mine microseismic and blasting events based on wave fractal features[J]. *Fractals*, 2018, 26(3): 1850029.
- [30] FENG Guangliang, CHEN Bingrui, XIAO Yaxun, et al. Microseismic characteristics of rockburst development in deep TBM tunnels with alternating soft-hard strata and application to rockburst warning: A case study of the Neelum–Jhelum hydropower project[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2022, 122: 104398.
- [31] 扈海波, 张西雅, 王瑛. 基于二维高斯核密度方法的多空间尺度地闪密度推算[J]. *自然灾害学报*, 2019, 28(5): 172–180.
- HU Haibo, ZHANG Xiya, WANG Ying. Using 2D Gaussian kernel density method to deduce the CG flash density in multi-spatial resolution[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2019, 28(5): 172–180.
- [32] 窦林名, 贺虎, 何江, 等. 冲击危险评价的相对应力集中系数叠加法[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(2): 327–332.
- DOU Linming, HE Hu, HE Jiang, et al. New method of rockburst risk assessment using relative stress concentration factor superposition[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(2): 327–332.

(责任编辑 聂爱兰)