



# 深埋大采高相邻工作面强矿压发生机理研究

雷照源 赵茂平 李团结 李峰 李磊

## 引用本文：

雷照源, 赵茂平, 李团结, 等. 深埋大采高相邻工作面强矿压发生机理研究[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(5): 13–22.  
LEI Zhaoyuan, ZHAO Maoping, LI Tuanjie. Strong mine pressure appearing mechanism and control at deep buried working face with large mining height[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(5): 13–22.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/est.2024-0324>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 大采高工作面矿压规律自动分析与仿真研究

Study on automatic analysis and simulation of ground pressure law in large mining height working face  
煤炭科学技术. 2021, 49(4): 186–192 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2021.04.022>

#### 采动影响下大倾角复合顶板工作面矿压规律研究

Study on mine pressure law of compound roof working face with large dip angle under the influence of mining  
煤炭科学技术. 2022, 50(11): 58–66 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/064c07b2-7f12-4a5f-bd2b-06def6693ae2>

#### 深埋超长综采工作面矿压规律及支架适应性研究

Sturdy on ground pressure law and support adaptability of deep-buried and ultra-long fully-mechanized longwall mining face  
煤炭科学技术. 2021, 49(3): 43–48 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2021.03.004>

#### 大采高工作面过空巷群顶板破断及矿压规律研究

Study on the law of roof breakage and mine pressure passing large cross-section gob group in the fully-mechanized face with high mining height  
煤炭科学技术. 2020, 48(2) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/c37f57cc-76f5-4343-8e5d-f7c96cb9cc45>

#### 8.8 m超大采高工作面矿压显现规律实测及机理分析

Analysis and measured of strata behavior law and mechanism of 8.8 m ultra-high mining height working face  
煤炭科学技术. 2020, 48(1) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/7ce83a77-2574-4c6f-a622-c97441ce7f03>

#### 大采高工作面片帮机理及控制技术研究

Study on mechanism and control technology of rib spalling in large mining height working face  
煤炭科学技术. 2020, 48(3) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/23d59cfb-857b-41bf-b4aa-3c6e060c6a81>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

雷照源,赵茂平,李团结,等.深埋大采高相邻工作面强矿压发生机理研究[J].煤炭科学技术,2025,53(5):13-22.

LEI Zhaoyuan, ZHAO Maoping, LI Tuanjie, et al. Strong mine pressure appearing mechanism and control at deep buried working face with large mining height[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(5): 13-22.

## 深埋大采高相邻工作面强矿压发生机理研究

雷照源<sup>1,2</sup>,赵茂平<sup>3</sup>,李团结<sup>4</sup>,李 峰<sup>2</sup>,李 磊<sup>4</sup>

(1.延安大学 陕西省能源产业绿色低碳发展软科学研究中心,陕西 延安 716000;2.延安能源(化工)集团有限责任公司,陕西 延安 717300;

3.太原煤炭气化(集团)有限责任公司,山西 太原 030024;4.陕西陕煤黄陵矿业公司,陕西 延安 727307)

**摘要:**受上一深埋大采高工作面采动影响,相邻工作面开采过程中坚硬厚顶板引发的强矿压显现具有明显的分区性。相邻工作面作为矿井开采的主要类型,揭示其强矿压发生机理是实现矿井安全高效开采的基础。以黄陵二矿深埋大采高工作面为背景,采用地质条件调查、理论分析、数值计算等手段,分析强矿压显现特征、坚硬厚顶板破断特征、能量和应力的演化关系等,揭示坚硬厚顶板诱发深埋大采高相邻工作面强矿压的发生机理,从而形成强矿压防控的方向。研究结果表明:坚硬厚顶板产生的微震事件数及能量分别约占总事件数、总能量的52.12%、69.4%,沿工作面倾向形成临空侧能量释放量值大、实体侧顶板内部基本完整的分区显现特征。21422相邻工作面“两固支一简一自由”的坚硬厚顶板约束边界条件,在工作面倾向距临空区段煤柱约108 m处发生破断;同时21422工作面开采扰动下的坚硬厚顶能量与应力由临空侧至实体侧形成降低分布特征。根据集中差值系数得出了应力与能量分布分区性与顶板的非对称破断具有一致性,其中坚硬厚顶板在临空侧110 m范围的释放程度高、距实体侧边界煤柱约70 m范围处于蓄能状态。根据研究结果形成了“弱化临空侧顶板的应力集中,阻断实体侧应力的传递”的强矿压显现治理策略,为深埋大采高工作面强矿压的有效防控提供了参考依据。

**关键词:**深埋大采高;相邻工作面;坚硬厚顶板;强矿压

**中图分类号:**TD323      **文献标志码:**A      **文章编号:**0253-2336(2025)05-0013-10

## Strong mine pressure appearing mechanism and control at deep buried working face with large mining height

LEI Zhaoyuan<sup>1,2</sup>, ZHAO Maoping<sup>3</sup>, LI Tuanjie<sup>4</sup>, LI Feng<sup>2</sup>, LI Lei<sup>4</sup>

(1. Shaanxi Energy Industry Green and Low Carbon Development Soft Science Research Base, Yanan University, Yanan 716000, China;

2. Yanan Energy and Chemical Group Co., Ltd., Yanan 717300, China; 3. Shanxi Coking Coal Electricity Coal Gasification Co., Ltd., Taiyuan, 030024, China; 4. Shaanxi Huangling Mining Group Co., Ltd., Yanan 727307, China)

**Abstract:** During the mining of the adjacent working face, the strong mine pressure caused by the hard thick roof has obvious zoning characteristics due to the mining of the previous deeply buried large mining height working face. The mechanism of the strong mine pressure at the adjacent working face is the basis for realizing safe and efficient mining. This paper takes the deeply buried large mining height working face at Huangling No.2 Mine as the background, and adopts the methods of geological investigation, theoretical analysis and numerical calculation to analyze the characteristics of the strong mine pressure, the breaking characteristics of the hard thick roof, and the evolution relationship between energy and stress, so as to reveal the occurrence mechanism of strong mine pressure at the adjacent working face of the deep-buried large mining height, and specifies the prevention and control direction of the strong mine pressure. The results show that the number and energy of microseismic events generated by the hard thick roof accounted for 52.12% and 69.4% of the total number of

收稿日期:2024-03-15    策划编辑:朱恩光    责任编辑:李雅楠    DOI: 10.12438/cst.2024-0324

基金项目:延安市重点产业链资助项目(2024SLZDCY-041)

作者简介:雷照源(1990—),男,陕西岐山人,高级工程师,博士。E-mail: 645129855@qq.com

通讯作者:赵茂平(1969—),男,山西高平人,高级工程师。E-mail: 953737981@qq.com

events and total energy, respectively. Zoning display feature was formed in which the value of the energy release on the proximal side was large, and the interior of the roof plate on the solid side was basically intact along the tendency of the working face. The hard thick roof plate constraint boundary conditions of “two solid support, one simple and one free” breaks at the working face tends to be about 108m from the coal pillar of the adjacent section of the breakage. The energy and stress of the hard thick roof under the mining disturbance of 21422 working face form a reduced distribution characteristics from the airside to the solid side. The zonality of the stress and energy distribution is consistently related to the asymmetric breaking of the roof, as derived from the concentration difference coefficient. The hard thick roof has a high degree of release in the 110m range on the air side, and is in a energy storage stage in the range of about 70m from the coal pillar on the boundary of the solid side. According to the results, the strategy of weakening the stress concentration of the roof plate on the airside and blocking the transmission of stress on the solid side has been formed, which provides a reference basis for the effective prevention and control of the strong mine pressure in the deeply buried large mining height working face.

**Key words:** deep-buried large mining height; adjacent working face; hard thick roof; strong mine pressure

## 0 引言

深埋环境下大采高工作面的强扰动,造成应力扰动范围广、应力集中程度高,易形成工作面的强矿压现象<sup>[1]</sup>。受盘区内相邻两工作面依次开采势必改变了下一工作面顶板的约束边界条件,造成在工作面倾向呈现不同位置、不同程度的矿压显现特征,进一步增加了矿井安全高效开采的危险系数。因此分析深埋大采高相邻工作面强采动下坚硬厚顶板破断特征,对其强矿压的防治具有现实必要性。

坚硬厚顶板作为覆岩内部存在的一类关键层,起到“承上压下”的作用,其走向破断前后形成“块体”的过程中,应力的“集中-释放”决定了工作面来压的强弱程度<sup>[2]</sup>。工作面上覆岩层往往存在多个坚硬岩层,其不同的破断特征影响着工作面矿压分布情况<sup>[3]</sup>,同时不同层位、数量的坚硬顶板造成的强矿压显现也具有较大差异<sup>[4-6]</sup>。王金东等<sup>[7]</sup>认为由坚硬顶板组成的复合关键层破断,导致应力拱失稳,引发了工作面的强矿压。张培鹏等<sup>[8]</sup>对比分析单层和两层高位硬厚岩层的破断特征,揭示了上覆岩层的破断规律与强矿压分布的关系。夏彬伟等<sup>[9]</sup>对比工作面覆岩上、下两组坚硬顶板,认为上层坚硬顶板断裂步距大致为下层较薄坚硬顶板断裂步距的2倍,坚硬老顶变形对应支承压力峰值变化呈现出“前快、中稳、后慢”的阶段性变化影响下。王拓等<sup>[10]</sup>认为多层坚硬岩破断引发覆岩的结构失稳,易造成工作面静载区形成叠加,诱发顶板冲击。霍丙杰等<sup>[11]</sup>基于多层坚硬顶板的破断特征构建了坚硬覆岩“拱壳”平衡结构模型,揭示回采过程中大小周期来压、采动影响范围大和强矿压等特殊矿压现象。而坚硬厚顶板作为直接影响工作面矿压分布一类的重要,于斌等<sup>[12-13]</sup>通过建立坚硬厚顶板破断及受力的力学模型,刻画出坚硬厚顶板在煤壁前方破断块体受力特征,

认为顶板临界失稳是强矿压显现主要原因。曹胜根等<sup>[14]</sup>认为坚硬岩层距煤层0 m时,岩层断裂后的台阶下沉现象造成来压强度较大。将顶板视为“板结构”,浦海等<sup>[15]</sup>建立四边固支的弹性薄板力学模型,得出顶板沿厚度方向形成空间“O”并沿顶板长短边演化,顶板下底面的中心破坏呈层层剥离现象,形成了空间“X”型裂纹形态。朱卫兵等<sup>[16]</sup>得出关键层板裂缝贯通形成“横 O-X”型初次破断和“横 U-Y”型周期破断,并在工作面上方形成“弧形三角板”和巷道上方形成“梯形板”的破断块体结构。近年来众多学者充分考虑不同类型矿井的地质构造、工作面空间、采煤工艺等因素,分析了坚硬顶板断裂位置及断裂前后在煤岩体内所引起的力学变化<sup>[17-18]</sup>及矿压分布的科学问题<sup>[19-21]</sup>。

相邻工作面作为各类矿井存在的主要形式,受临空区及采动影响,顶板约束边界条件发生改变,传统的理论分析坚硬厚顶板的极限承载力和破断距结果与现场存在偏离。因此结合黄陵二矿大采高相邻工作面赋存情况,分析21422相邻大采高工作面矿压显现特征。依据极限承载分析法构建了工作面坚硬厚顶板铰接模型,分析坚硬厚顶板工作面的破断特征。并根据三维数值计算得出相邻工作面应力场、能量场的演化规律,进一步得出了深埋大采高相邻工作面强矿压的发生机理。对形成强矿压的防控具有指导意义。

## 1 矿井概况

### 1.1 工程背景

黄陵二号矿地处陕北黄土高原南部,地表山林茂密,回采2号煤层。井下标高在+713.5~+732.3 m之间,地表标高+1120~+1492.5 m。二矿四盘区为单翼开采工作面,东南是采空区,其余为实体煤,如图1所示,埋深在425~767 m。21422为盘区内第

二工作面, 平均埋深约 608 m, 煤层厚度约 6 m, 煤层走向平缓, 倾角 0~5°, 设计工作面宽度约 300 m, 走向长度约 2 626 m, 区段煤柱约 35 m。

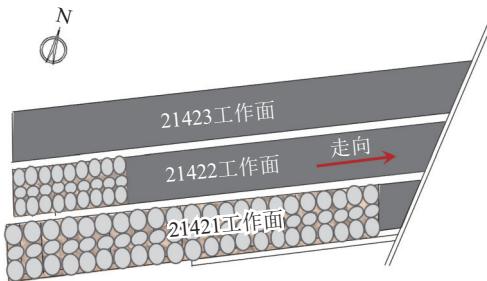


图 1 工作面开采布局示意

Fig.1 Schematic diagram of working face mining layout

21422 工作面采用后退式一次采全高生产工艺, 全部垮落法管理顶板。工作面选用型号为 ZY-12000/28/63D 的双柱掩护式支架, 工作面初撑力为 7 200~8 400 kN。每天推采 11~13 刀, 一刀截割 0.9 m, 平均每日推采 10.8 m, 一刀截割 0.9 m, 平均月产 50 万 t, 属高强度开采<sup>[22]</sup>。21422 工作面生产参数见表 1, 21422 工作面煤层柱状如图 2 所示。在 21422 工作面 2 号煤层、底板及 30 m 范围顶板取样, 其围岩的力学特征见表 2。

根据关键层判别式(1)<sup>[23]</sup>, 式(2)~式(3)为计算岩层载荷及破断距理论公式。

$$\text{变形判别条件: } q_{1/n+1} < q_{1/n} \quad (1)$$

$$\text{破断判别条件: } l_{1/n+1} > l_{1/n}$$

$$q_{i/n} = \frac{E_i h_i^3 (\gamma_i h_i + \gamma_{i+1} h_{i+1} + \dots + \gamma_{i+n} h_{i+n})}{E_i h_i^3 + E_{i+1} h_{i+1}^3 + \dots + E_{i+n} h_{i+n}^3} \quad (2)$$

$$L_i = h_i \sqrt{\frac{2\sigma_n}{q_i}} \quad (3)$$

式中:  $E_i$  为弹性层模量, N/m<sup>2</sup>;  $h_i$  为岩层厚度, m;  $q_i$



图 2 工作面煤层柱状图

Fig.2 Histogram of coal seam

为上覆载荷, kN/m<sup>3</sup>;  $r_i$  为岩层容重, kg/m<sup>3</sup>;  $L_i$  为破断距, m。

通过式(2)计算结果可知: 22.45 m 粉砂岩、35.39 m 泥岩、43.67 m 粗砂岩、43.27 m 泥岩、190.74 m 中粒砂岩为工作面上部坚硬岩层。通过式

表 1 21422 工作面生产参数

Table 1 Manufacturing parameters of 24 122 working face

埋深/m	煤层倾角/(°)	走向长度/m	倾向长度/m	来压最大强度/MPa	煤层厚度/m	采高/m	煤层节理	初次来压步距/m
580~636	0~5	2 626	300	48.8	5.2~6.8	6	发育	35~40

表 2 煤层围岩力学参数

Table 2 Mechanical parameters of surrounding rock

岩性	弹性模量/GPa	孔隙率/%	含水率/%	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	内摩擦角/(°)	凝聚力/MPa	泊松比	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )
泥岩	2.64	8.69	1.25	24.94	1.13	35.15	2.93	0.24	2.33
2号煤	2.21	6.82	3.55	25.4	0.81	36.22	4.38	0.19	1.305
细砂岩	10.66	8.72	0.95	53.52	2.45	38.17	2.28	0.19	2.58
粉砂岩	11.33	7.55	0.96	62.15	4.02	40.92	7.68	0.13	2.57

(3)计算可知：22.45 m 粉砂岩、35.39 m 泥岩、43.67 m 粗砂岩、43.27 m 泥岩、190.74 m 中粒砂岩的破断距分别约为 37.58、31.63、31.21、28.91、90.68 m。通过判别式(1)得出，22.45 m 粉砂岩和 190.74 m 中粒砂岩为工作面关键层。根据工作面煤层柱状图及“三带划分”(垮落带高度约为 32.88 m、导水裂隙带为 129.4 m)，可知 22.45 m 粉砂岩是影响工作面强矿压分布的主控岩层。

## 1.2 工作面强矿压显现特征

### 1.2.1 工作面覆岩运动微震分布特征

21422 工作面目前已连续回采约 850 m，沿工面倾向呈现不同的强矿压显现特征。提取 21422 工作面 850 m(达到充分采动)后一个自然月覆岩发生的微震信号，如图 3 所示。累计发生微震事件 1337 次，总能量为  $1.7 \times 10^6$  J，平均能量为  $1.3 \times 10^3$  J，最大能量为  $7.17 \times 10^4$  J。

通过  $xz$  面投影可知，微震事件数垂直方向主要集中工作面上方约 170 m 范围内的覆岩。通过  $yz$  面投影可知，微震事件数水平走向主要集中在 600 m 范围左右；并以开采位置为界，采空区内的微震事件均处在坚硬厚顶板内部。通过  $xy$  投影可知，沿煤层水平倾向的微震事件主要集中在 21422 工作面临空侧一定范围。

21422 工作面上部坚硬厚顶板、21~50 m、50~100 m、100~170 m 4 处层位覆岩微震的事件数、总

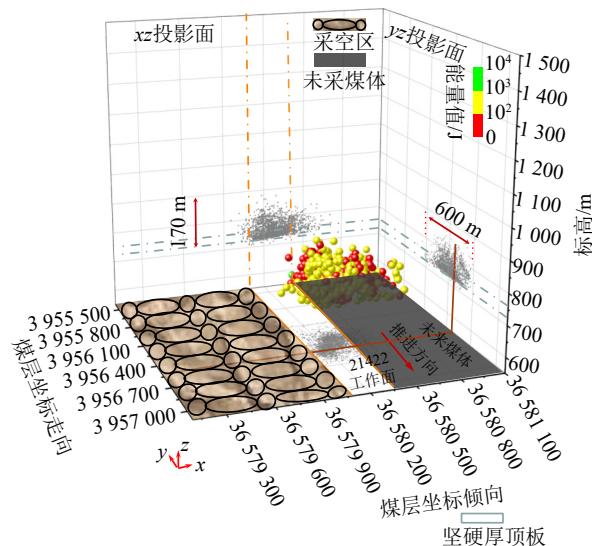


图 3 21422 工作面微震分布特征

Fig.3 Microseismic distribution characteristics of 21422 working face

能量、能量占比见表 3。

由表 3 可知，覆岩产生的微震事件及能量值随着层位的升高而减小，并向工作面未采煤体发生转移。坚硬厚顶板运动总共产生了 695 个微震事件数(占总事件数的 52.12%)，释放能量  $1.18 \times 10^6$  J(占总能量的 69.4%)。据统计回采过程中坚硬厚顶板释放能量大于  $1.0 \times 10^4$  J 的事件共计 29 次，其中大于  $5.0 \times 10^4$  J 的能量事件 9 次。4 处层位覆岩微震的分布特征如图 4 所示。

表 3 各层位微震事件分布指标特征

Table 3 Distribution index characteristics of microseismic events in each layer

工作面覆岩层位	最大能量值/J	总能量/J	能量占比/%	事件数/个	事件数占比/%
坚硬厚顶板	71 724.16	$1.18 \times 10^6$	69.4	695	52.15
21~50 m 岩层	27 391.73	$9.75 \times 10^4$	5.73	175	13.11
50~100 m 岩层	11 039.71	$4.49 \times 10^4$	2.64	46	3.45
100~170 m 岩层	1 281.61	$3.03 \times 10^3$	0.18	9	0.67

坚硬厚顶板产生的微震事件沿工作面倾向实体侧、临空侧水平距离分别约为 460、310 m 分布如图 4a 所示，沿工作面走向水平距离约 180 m，大于  $1.0 \times 10^4$  J 微震事件均发生在 21422 工作面坚硬厚顶板内部。

21~50 m 覆岩产生的微震事件主要集中在 21422 工作面上部，走向影响范围主要集中在距工作面超前约 180 m，能量值集中在  $1.0 \times 10^2 \sim 1.0 \times 10^4$  J，如图 4b 所示。50~100 m 覆岩产生的微震事件在 21422 工作面中部分布，能量值集中在  $1.0 \times 10^2 \sim$

$1.0 \times 10^3$  J；12 个微震事件影响至下一工作面，如图 4c 所示。100~170 m 覆岩产生的微震事件共 9 次，并靠近 21422 工作面实体侧，6 次微震事件影响至下一工作面；最近的微震事件距工作面垂直方向约 163 m，大于  $1.00 \times 10^3$  J 的微震事件数 1 次，如图 4d 所示。

微震信号作为监测影响工作面强矿压显现特征的有效手段，由此可知坚硬厚顶板破断是影响工作面强矿压显现的主要岩层，且释放的大能量事件易发生在工作面倾向的临空一侧。

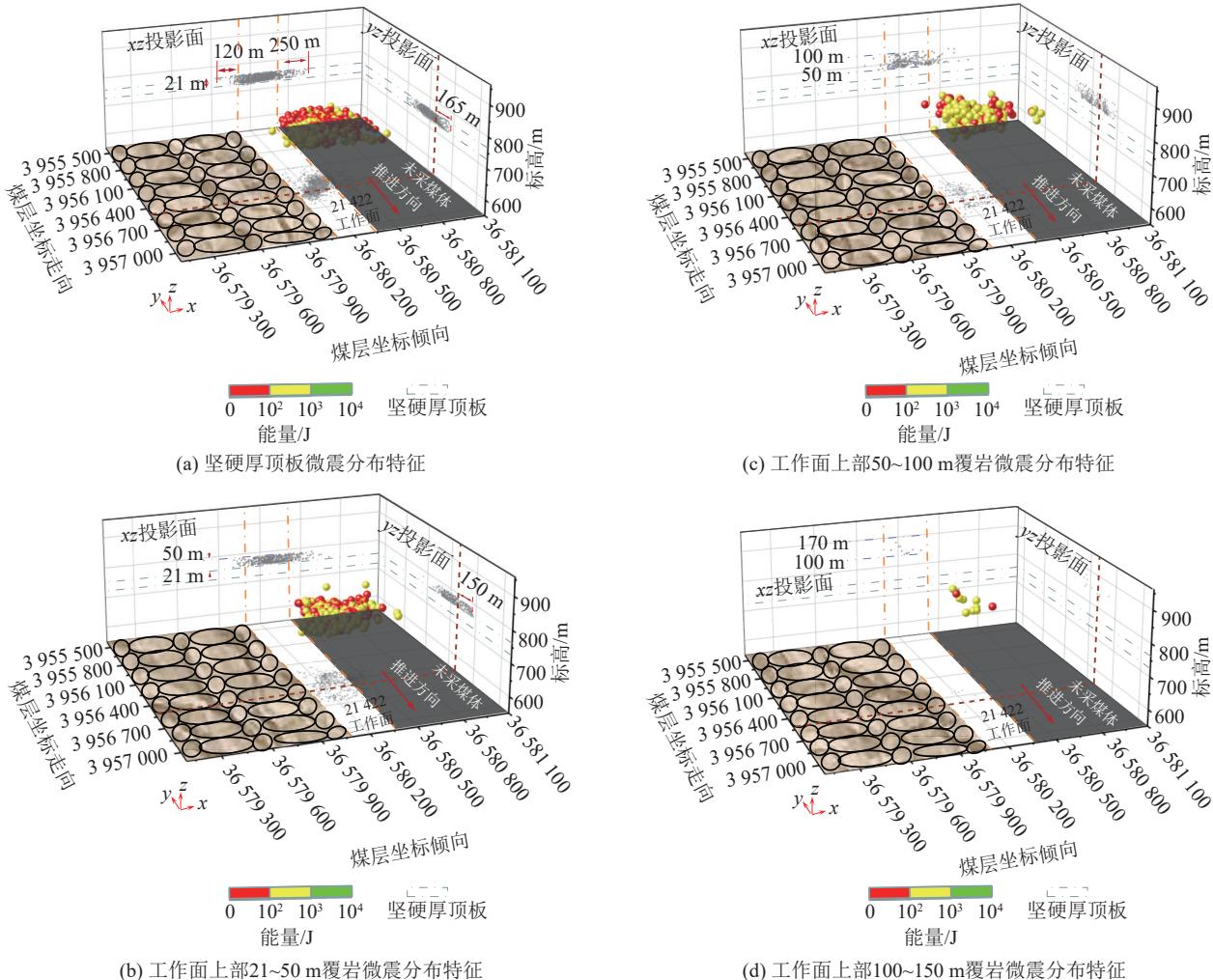


图4 四处覆岩微震事件分布特征  
Fig.4 Microseismic events distribution characteristics at four overlying strata

### 1.2.2 工作面强矿压显现特征

通过对21421首采工作面来压情况观测,工作面中部出现个别切顶现象,周期来压步距在18~22 m,支架压力整体维持在35 MPa左右。随着21422大采高工作面开采扰动,坚硬厚顶板沿工作面走向易出现切顶现象;工作面倾向出现了临空侧与实体侧不同的矿压现象特征,如图5所示。

工作面临空巷道在煤炮的作用下易形成崩落,如图5a所示。115号支架至临空侧区段煤柱位置易出现煤墙大面积片帮等强矿压现象,其中片帮深度约2 m,且来压步距不明显如图5b所示;坚硬厚顶板易在此位置发生切顶,导致115号支架附近出现冒顶,进一步引发工作面临空侧区域整体冒落,如图5c所示;此区域范围内的微震信号数量及能量值较大,且支架压力大于40 MPa。工作面40号至实体侧区段煤柱坚硬厚顶板内部基本完整,裂隙不发育(图5d),产生悬顶长度超过30 m(图5e),且悬顶处顶板随着

持续推采在采空区内垮落,其上覆岩层的力作用在巷道底板上,导致巷道底鼓量大并出现贯穿式开裂的显现状态,如图5f所示。

为保障工作面安全生产,在工作面临空侧巷道采用“切顶孔”控顶技术防治坚硬顶板的突然垮落,但防治效果不佳。

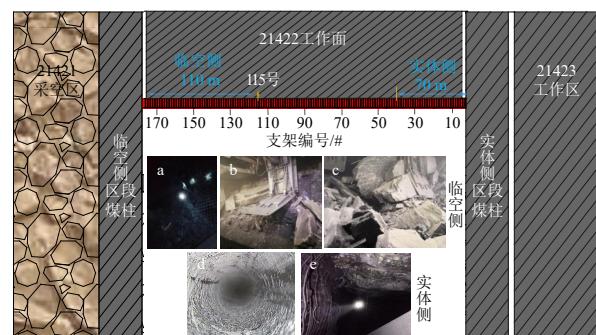


图5 21422工作面强矿压显现特征  
Fig.5 Strong ground pressure visualize feature at the 21422 working face

## 2 坚硬厚顶板破断极限条件

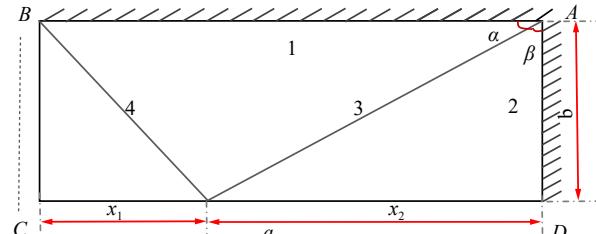
根据“防止老顶初次破断后‘砌体梁’结构产生滑落失稳岩块的高长比要小于0.4~0.5,即岩块长度要大于2~2.5倍岩块厚度”<sup>[23]</sup>。认为黄陵二矿21422工作面坚硬厚顶板破断高长比大于0.4~0.5。同时根据大采高综采面关键层“悬臂梁”结构形成的条件(式(3))<sup>[24]</sup>,则坚硬厚顶板破断产生的“悬臂梁”结构并直接垮落,无法在采空区一侧形成铰接,形成自由边界。

$$M + (1 - K_p) \sum h_i > h - \sqrt{\frac{2q l_s^2}{\sigma_c}} \quad (4)$$

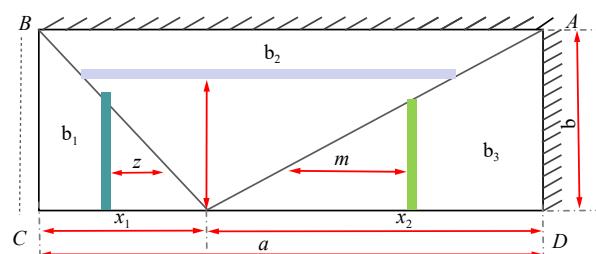
式中: $M$ 为煤层采高,  $K_p$ 为直接顶垮落岩块碎胀系数, 取0;  $h_i$ 为关键层厚,  $m$ ;  $l_s$ 为关键层断裂步距,  $m$ ;  $q$ 为关键层及其上覆载荷, MPa;  $\sigma_c$ 为关键层破断岩块抗压强度, MPa。

笔者通过对35 m煤柱稳定性分析中发现, 在两工作面扰动下形成的“动”载荷作用, 在煤柱及在中间位置最大, 且各应力值大于煤体及顶板的强度, 易在煤柱中部发生破裂<sup>[25]</sup>。则该煤柱尺寸不能满足隔离采空区顶板联动所需的宽度。由此可知, 黄陵二矿21422工作面坚硬厚顶板推采下顶板约束边界为“两边固支一边简支一边自由”型。该类顶板铰接模型及极限载荷积分求解模型, 如图6所示。

表4为所求边界条件下板结构塑性铰线位置所对应的内力功和板结构破断结构在覆岩载荷下所对



(a) 两边固支一边简支板破断结构



(b) 两边固支一边简支板内力功和外力功积分计算

注:  $\alpha$ 、 $\beta$ 为破断线与边界夹角; 1、2、3、4为顶板破断线;  $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$ 为破断块体

图6 顶板结构塑性铰线及破断结构

Fig.6 Plastic hinge line and fracture structure of top plate  
应的外力功, 利用Maple进行求解。表4中坚硬岩层极限弯矩按照式(4)进行计算。根据黄陵二矿生产参数及围岩情况, 可得顶板结构的几何破断尺寸, 见表5。

$$M_p = \frac{h^2}{4} \sigma_t \quad (5)$$

式中:  $M_p$ 为岩层极限弯矩;  $h$ 为岩层厚度,  $m$ ;  $\sigma_t$ 为抗拉强度, MPa。

表4 相邻工作面顶板极限承载条件

Table 4 Limit bearing conditions of top plate at the adjacent working face

约束边界条件	内力功	外力功	极限承载条件
两边固支一边 简支一边自由	$W_{i1} = M_p \frac{\delta}{b} a = M_p \frac{\delta a}{b}$	$W_{eb1} = \int_0^{x_1} q \frac{zb}{x_1} dz \frac{x_1 - z}{x_1} \delta$	$\frac{M_p (2a^2 x_1 + ab^2 - 2ax_1^2 + b^2 x_1)}{bx_1 x_2} - \frac{1}{3} qab = 0$
	$W_{i2} = M_p \frac{b\delta}{x_2}$	$W_{eb2} = \int_0^{x_1} q \left[ \frac{jx_1}{b} + \frac{j}{b} x_2 \right] dz \frac{b-j}{b} \delta$	
	$W_{i3} = M_p \delta \left( \frac{b}{x_2} + \frac{x_2}{b} \right)$	$W_{eb3} = \int_0^{x_2} q \frac{mb}{x_2} dm \frac{x_2 - m}{x_2} \delta$	
	$W_{i4} = M_p \delta \left( \frac{b}{x_1} + \frac{x_1}{b} \right)$		

表5 21422工作面顶板破断特征计算结果

Table 5 Calculation results of top plate breaking characteristics

工作面	块体走向长度 $b_{min}/m$	临空侧块体宽度 $x_1/m$
21422	18.39	108.41

由此可知坚硬厚顶板沿21422工作面倾向的破断位置距简支边界(临空区段煤柱)约108 m处。

## 3 坚硬厚顶板能量与应力演化关系

### 3.1 三维数值模型构建

以黄陵二矿大采高工作面覆岩结构、开采布局为背景, 根据图2设计如图7所示的大型三维FLAC<sup>3D</sup>数值计算模型, 尺寸为845 m×800 m×295 m, 模型模拟至工作面上部275 m岩层顶部。设计21421和21422两个工作面, 各工作面设走向长度650 m、宽度300 m, 区段煤柱35 m, 边界煤柱100 m。

重点分析 21421 工作面开挖计算后, 21422 工作面采动下坚硬厚顶板的应力及能量的演化规律。

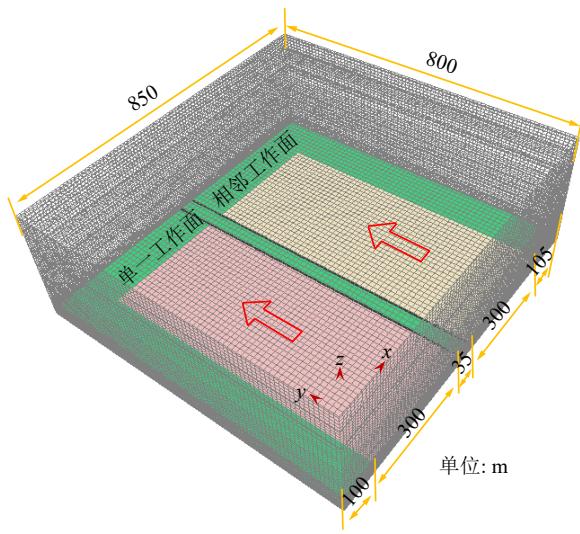


图 7 FLAC<sup>3D</sup> 计算模型  
Fig.7 FLAC<sup>3D</sup> calculation model

利用表 2 对模拟岩层进行附参, 根据煤、顶板力学参数, 在数值计算中进行标定, 如图 8 所示。

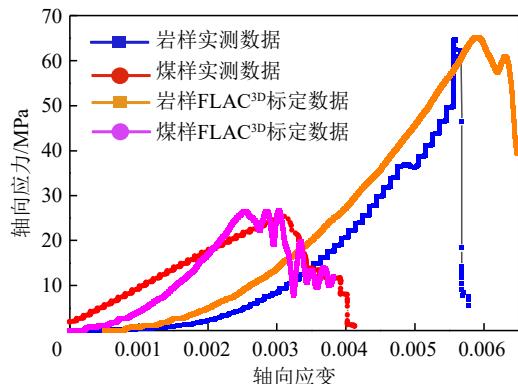


图 8 数值模拟参数标定  
Fig.8 Numerical simulation parameter calibration

根据对矿井地应力的测定结果, 在模拟岩层顶部边界上施加均布载荷替代其余覆岩重力, 约 7.5 MPa, 其余方向对边界固定。每次模拟开挖步距为 10 m, 累计开挖 650 m。

### 3.2 顶板能量演化特征

21422 工作面开采至 450 m(达到充分采动) 能量分布特征如图 9 所示。21422 工作面回采下产生的能量密度在工作面上部覆岩内部形成的分层现象, 且临空侧能量密度值大于实体侧, 其中能量密度集中在煤层上部 80 m 范围的临空侧内, 如图 9a 所示。能量密度值沿工作面临空侧向实体侧倾向降低分布, 并在工作面 250 ~ 300 m 位置的能量密度约为  $5.0 \times 10^4 \text{ J/m}^3$ , 并趋于稳定。

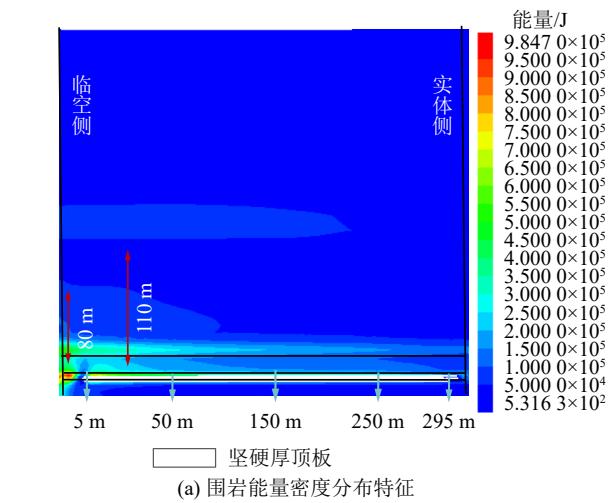


图 9 21422 工作面采动下能量密度分布特征  
Fig.9 Energy distribution characteristics at 21422 working face  
10<sup>4</sup> J/m<sup>3</sup>, 并趋于稳定。

坚硬厚顶板能量密度值明显大于其他位置岩层, 如图 9b 所示。能量密度相差一个能量级, 能量范围在  $3.63 \times 10^5 \sim 0.74 \times 10^5 \text{ J/m}^3$  之间。21422 工作面开采位置超前的出现的降低分布的能量集中, 如图 10 所示。坚硬厚顶板在开采位置实体侧出现了不同程度的能量集中分布, 能量密度值约为  $7.5 \times 10^4 \text{ J/m}^3$ , 并

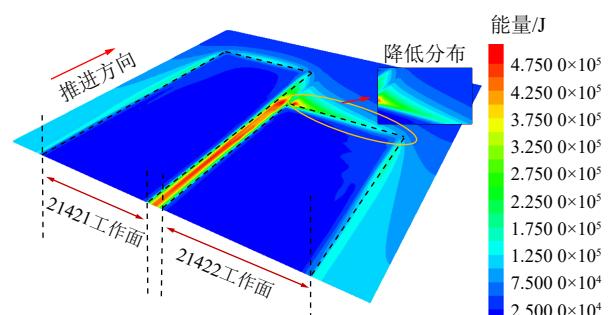


图 10 顶板能量分布演化特征  
Fig.10 Energy distribution evolution characteristics of roof

影响至实体煤处。

### 3.3 顶板应力演化特征

提取与能量相同步距的覆岩垂直分布情况如图11所示。受开采布局影响,21422工作面开采不同位置的应力分布存在明显差异,但坚硬厚顶板始终处于集中状态(应力在20~63 MPa),且由临空侧向实体侧降低的分布特征,其中临空侧80 m范围的应力在45~63 MPa。

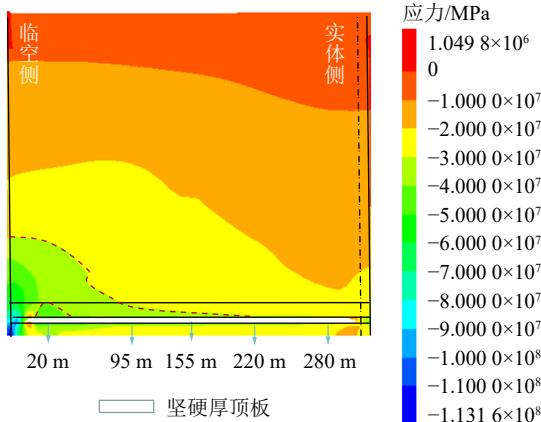


图11 21422工作面围岩垂直应力演化特征

Fig.11 Vertical stress evolution characteristic of surrounding rock at 21422 working face

工作面120 m范围内覆岩垂直应力随着层位的升高而降低,呈现分层显现(图12)。工作面上部80 m内覆岩的应力分布形态相似;100~120 m覆岩应力沿工作面倾向呈现升高-降低-平稳的分布特征。坚硬厚顶板的扰动应力值变化最大,呈幂数分布特征;100 m处的扰动应力呈多项式降低分布特征。

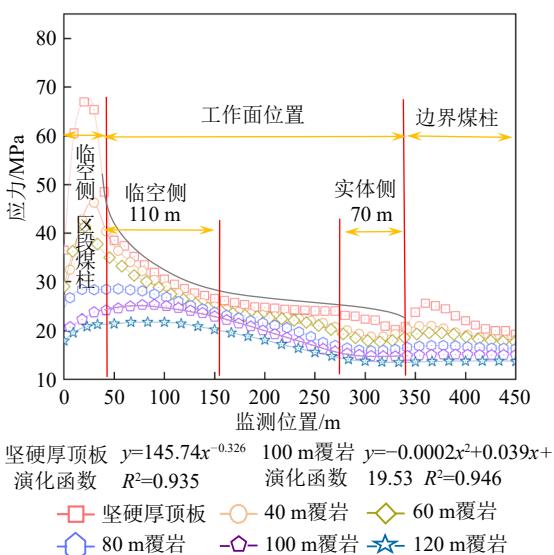


图12 21422工作面采动下覆岩垂直应力演化特征

Fig.12 Vertical stress evolution characteristics of overburden under mining

两工作面之间区段煤柱顶板应力集中最大,应力峰值约70 MPa;21422工作面超前的应力集中程度、影响范围、应力峰值均沿工作面临空侧至实体侧降低,如图13所示。

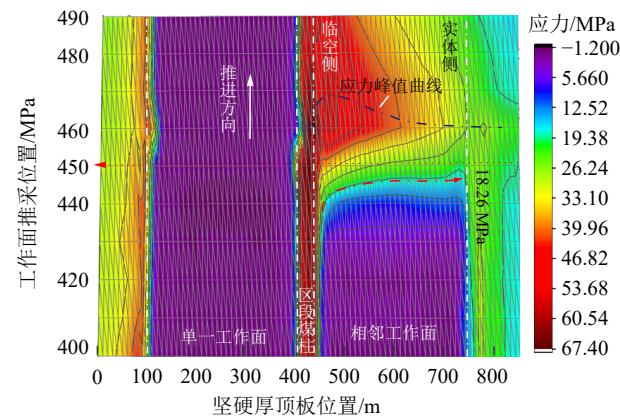


图13 顶板垂直应力分布投影

Fig.13 Vertical stress distribution projection of roof

### 4 坚硬厚顶板失稳机理分析

坚硬厚顶板作为工作面矿压显现的主控岩层,受21422工作面开采布局影响,坚硬厚顶板“两边固支一边简支一边自由”的约束边界条件导致扰动应力及能量分布为由临空侧向实体侧逐渐减弱的演化过程(开采扰动的垂直应力与能量分布沿工作面倾向具有相似性)。21422工作面推进过程中坚硬厚顶板沿工作面倾向应力演化特征如图14所示。

21422工作面随着采动过程的变化应力峰值由区段煤柱处转移至临空侧约20 m处,再转移至煤柱处(峰值为 $\sigma_{3,max} > \sigma_{2,max} > \sigma_{1,max}$ )。通过引入集中差值系数( $\sigma_x$ ),即工作面倾向坚硬顶板各位置的集中应力值(能量值)与应力(能量)平均值的比值系数。当 $\sigma_x \geq 1$ 时,坚硬厚顶板应力(能量)释放程度高;当 $\sigma_x < 1$ 时,坚硬厚顶板应力(能量)释放程度低。故此距临空侧区段煤柱约110 m位置为应力分布临界点(临空侧110 m范围的变化速率快);距实体侧边界煤柱约70 m处低于 $\sigma_x$ 值,处于蓄能状态。由此可知:坚硬厚顶板在深埋大采高相邻工作面采动下,沿工作面倾向呈现分区演化特征。其中坚硬厚顶板在临空侧110 m范围的释放程度高,强矿压显现剧烈;距实体侧边界煤柱约70 m范围处于蓄能状态,导致巷道变形量大。

通过上述分析可知:黄陵二矿21422工作面走向的垂直支承应力分布由临空侧向实体侧分为五个区(应力集中范围及峰值依次降低),如图15所示。

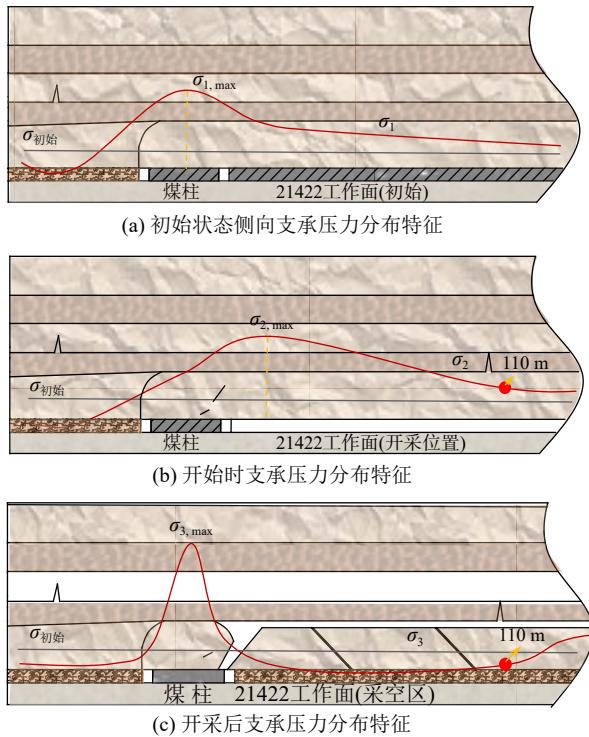


图 14 工作面开采过程中支承压力演化特征

Fig.14 Evolution characteristics of abutment pressure during mining

I 区为 21421 工作面采空区稳定区, II 区为 21421 采空区与区段煤柱应力升高区, III 区为区段 21422 工作面临空侧应力集中区, IV 区为 21422 工作面实体侧应力减少区, V 区为 21422 工作面实体侧(至下一工作面)应力平稳区。支承应力沿工作面倾向的分区性导致工作面矿压显现的剧烈程度不同。坚硬厚顶板在 21422 相邻工作面两侧的非对称破断块体, 形成了临空侧与实体侧的 III 区和 V 区(集中区、平稳区)。因此在相邻工作面两侧开展“分区”控制技术手段, 形成“降低临空侧应力集中程度, 阻断实体侧应力传递”的防控思路, 达到控制顶板的技术。

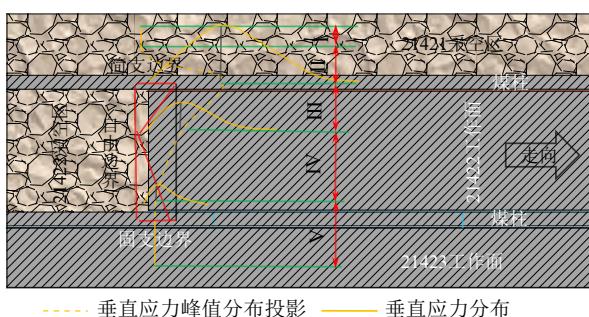


图 15 21422 工作面顶板垂直应力分布特征

Fig.15 Vertical stress distribution characteristics of top plate

根据 21422 工作面覆岩结构及接续安排, 其临空侧、实体侧巷道分别采用水力压裂与爆破致裂的

防控技术, 实现强矿压的防治, 同时为 21423 工作面强矿压的防控打下良好基础。现场实践表明: 分区防治技术增加了坚硬厚顶板的裂隙, 改变了 21422 工作面坚硬厚顶板的边界条件; 微震信号沿工作面开采位置平均分布, 未出现大能量事件, 有效控制了坚硬厚顶板对工作面的作用, 取得了较好的应用成果。

## 5 结 论

1) 坚硬厚顶板作为影响工作面矿压显现的力源层。在深埋、大采高、强采动等因素影响下, 21422 相邻工作面沿工作面开采位置具形成了工作面临空侧来压剧烈和实体侧长距离悬顶两种强矿压表现类型。其中临空 110 m 范围为微震事件集中分布, 并产生了大于  $1.0 \times 10^4$  J 的微震事件。

2) 明确了 21422 工作面坚硬厚顶板为“两边固支一边简支一边自由”的约束边界铰接模型, 通过内外功得出了坚硬厚顶板极限承载条件, 确定了工作面倾向的破断位置在工作面临空侧约 108.41 m 处。同时 21422 工作面开采扰动下的能量与应力沿工作面倾向由临空侧向实体侧降低分布。其中坚硬厚顶板在临空侧 110 m 范围的释放程度高; 距实体侧边界煤柱约 70 m 范围处于蓄能状态, 并影响至下一工作面的。

3) 受开采布局影响, 21422 相邻工作面坚硬厚顶板边界约束条件改变下引发沿工作面倾向的非对称破断, 并造成垂直支承应力分布由临空侧向实体侧的分区性, 这是诱发工作面强矿压的机理。故此形成“降低临空侧应力集中程度, 阻断实体侧应力传递”的防控思路, 达到控制坚硬厚顶板诱发强矿压的目的。

## 参考文献(References):

- [1] 蔡美峰. 岩石力学与工程 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [2] 钱鸣高, 许家林. 煤炭开采与岩层运动 [J]. 煤炭学报, 2019, 44(4): 973–984.  
QIAN Minggao, XU Jialin. Behaviors of strata movement in coal mining [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(4): 973–984.
- [3] JU J F, XU J L. Structural characteristics of key strata and strata behaviour of a fully mechanized longwall face with 7.0m height chocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, 58: 46–54.
- [4] 王普, 周海勇, 万广绪, 等. 硬厚顶板下邻断层工作面不同推采方向应力特征分析 [J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2021, 3(4): 63–71.  
WANG Pu, ZHOU Haiyong, WAN Guangxu, et al. Stress characteristics of different mining directions adjacent fault under hard thick roof[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2021, 3(4): 63–71.
- [5] 卜膝膝. 深井厚煤层综放工作面顶板运动与沿空巷道围岩变形

- 动态响应关系[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2021, 3(2): 23–31.
- BU Tengteng. Dynamic response relationship between roof movement and deformation of roadway in fully mechanized caving face of deep and thick coal seam[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2021, 3(2): 23–31.
- [6] 高学鹏, 于凤海, 任强, 等. 西部鄂尔多斯矿区强矿压显现及顶板运动规律[J]. 金属矿山, 2020(6): 191–197.
- GAO Xuepeng, YU Fenghai, REN Qiang, et al. Strata movement law and strong ground behavior in western Ordos Coalfield[J]. Metal Mine, 2020(6): 191–197.
- [7] 王金东. 综放开采覆岩高位结构稳定性及强矿压形成机理研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2015.
- WANG Jindong. Study on structural stability of overlying strata and formation mechanism of strong ground pressure in fully mechanized top-coal caving mining[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2015.
- [8] 张培鹏, 蒋力帅, 刘绪峰, 等. 高位硬厚岩层采动覆岩结构演化特征及致灾规律[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(5): 852–860.
- ZHANG Peipeng, JIANG Lishuai, LIU Xufeng, et al. Mining-induced overlying strata structure evolution characteristics and disaster-triggering under high level hard thick strata[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(5): 852–860.
- [9] 夏彬伟, 李晓龙, 卢义玉, 等. 大同矿区坚硬顶板破断步距及变形规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(6): 1038–1044.
- XIA Binwei, LI Xiaolong, LU Yiyu, et al. Study on the breaking span and deformation of hard roof in Datong mining area[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2016, 33(6): 1038–1044.
- [10] 王拓, 常聚才, 张兵, 等. 综采面多层坚硬顶板破断特征及其安全控制研究[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(S1): 339–343.
- WANG Tuo, CHANG Jucai, ZHANG Bing, et al. Study on fracture characteristics and safety control of multi-layer hard roof in fully mechanized mining face[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(S1): 339–343.
- [11] 霍丙杰, 于斌, 张宏伟, 等. 多层坚硬顶板采场覆岩“拱壳”大结构形成机理研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(11): 18–23.
- HUO Bingjie, YU Bin, ZHANG Hongwei, et al. Study on formation mechanism of arch shell large structure of overburden in coal mining face with multi layer hard roof[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(11): 18–23.
- [12] 于斌, 刘长友, 杨敬轩, 等. 坚硬厚层顶板的破断失稳及其控制研究[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(3): 342–348.
- YU Bin, LIU Changyou, YANG Jingxuan, et al. Research on the fracture instability and its control technique of hard and thick roof[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, 42(3): 342–348.
- [13] YU B. Behaviors of overlying strata in extra-thick coal seams using top-coal caving method[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2016, 8(2): 238–247.
- [14] 曹胜根, 姜海军, 王福海, 等. 采场上覆坚硬岩层破断的数值模拟研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(2): 205–210.
- CAO Shenggen, JIANG Haijun, WANG Fuhai, et al. Numerical simulation of overlying hard strata rupture in a coal face[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2013, 30(2): 205–210.
- [15] 浦海, 黄耀光, 陈荣华. 采场顶板X-O型断裂形态力学分析[J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(6): 835–840.
- PU Hai, HUANG Yaoguang, CHEN Ronghua. Mechanical analysis for X-O type fracture morphology of stope roof[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2011, 40(6): 835–840.
- [16] 朱卫兵, 于斌, 鞠金峰, 等. 采场顶板关键层“横U-Y”型周期破断特征的试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(2): 36–43.
- ZHU Weibing, YU Bin, JU Jinfeng, et al. Experimental study on “horizontal U-Y” periodical breakage characteristics of key strata in stope roof[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(2): 36–43.
- [17] 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. Near-far strata structure instability and associate strata behaviors in large space and corresponding control technology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(5): 1134–1145.
- [18] 王树仁, 贾会会, 武崇福. 动荷载作用下采空区顶板安全厚度确定方法及其工程应用[J]. 煤炭学报, 2010, 35(8): 1263–1268.
- WANG Shuren, JIA Huihui, WU Chongfu. Determination method of roof safety thickness in the mined-out regions under dynamic loading and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(8): 1263–1268.
- [19] 徐刚, 于健浩, 范忠志, 等. 国内典型顶板条件工作面矿压显现规律[J]. 煤炭学报, 2021, 46(S1): 25–37.
- XU Gang, YU Jianhao, FAN Zhizhong, et al. Characteristics of strata pressure behavior of working face under typical roof conditions in China[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(S1): 25–37.
- [20] 黄耀光, 浦海. 不同边界下的坚硬顶板极限承载分析及破断距确定[J]. 煤矿开采, 2012(2): 12–16.
- HUANG Yaoguang, PU Hai. Analysis of roof limit load and broken pace under different boundary conditions[J]. Coal Mining Technology, 2012(2): 12–16.
- [21] 李铁, 张山林, 李守峰, 等. 华亭煤矿强矿压力学机制与防治对策[J]. 煤炭学报, 2016, 41(5): 1093–1098.
- LI Tie, ZHANG Shanlin, LI Shoufeng, et al. Mechanism and control measures of rockburst in Huating coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(5): 1093–1098.
- [22] 崔峰, 冯港归, 来兴平, 等. 巨厚强冲击倾向性煤层高强度开采特征与高强度开采定义[J]. 煤炭学报, 2023, 48(2): 649–665.
- CUI Feng, FENG Ganggui, LAI Xingping, et al. Characteristics and definition of high-intensity mining in extremely thick coal seam with strong impact tendency[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 649–665.
- [23] 钱鸣高, 石平五, 许家林. 矿山压力与岩层控制 [M]. 2 版. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2010.
- [24] 许家林, 鞠金峰. 特大采高综采面关键层结构形态及其对矿压显现的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(8): 1547–1556.
- XU Jialin, JU Jinfeng. Structural morphology of key stratum and its influence on strata behaviors in fully-mechanized face with super-large mining height[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(8): 1547–1556.
- [25] 雷照源, 李团结, 崔峰, 等. 深部厚煤层动静载荷下区段煤柱损伤演化分析[J]. 西安科技大学学报, 2022, 42(1): 91–98.
- LEI Zhao yuan, LI Tuanjie, CUI Feng, et al. Damage evolution analysis of section coal pillar under dynamic and static load in deep thick coal seam[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2022, 42(1): 91–98.