

DOI: 10.11779/CJGE20211194

覆岩厚度变化应力异常机制及冲击矿压诱发机理

曹安业¹, 白贤栖^{*1}, 蔡武¹, 温颖远^{1,2}, 李许伟¹, 马祥^{1,3}, 黄锐^{1,3}

(1. 中国矿业大学矿业工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 新疆大学地质与矿业工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047;

3. 伊泰广联煤化有限责任公司红庆河煤矿, 内蒙古 鄂尔多斯 017202)

摘要: 顶板覆岩结构是影响煤矿冲击矿压发生的主要因素之一, 在坚硬覆岩厚度变化区也容易诱发冲击矿压, 这一现象在内蒙古深部矿区逐渐凸显。基于弹性力学理论分析了覆岩厚度变化区煤层应力异常的力学机制, 采用FLAC^{3D}数值模拟方法研究了覆岩厚度变化对煤层应力分布特征和能量演化的影响规律, 揭示了坚硬覆岩厚度变化区煤层开采诱发冲击矿压的机理。研究表明: 坚硬覆岩较厚区的构造应力比较薄区大, 覆岩厚度变化越大或覆岩性质差异越大, 构造应力变化越大; 工作面在覆岩厚度变化区开采时, 受超前支承压力与突变的构造应力叠加影响, 覆岩厚度变化区至较厚区应力集中程度较大, 该区域积聚的弹性能主要向工作面前方巷道释放, 冲击矿压危险更大。两例覆岩厚度变化区工程案例分析表明, 在坚硬覆岩厚度变化区及变化区向较厚区过渡时微震事件分布较多, 能量释放剧烈, 巷道破坏明显, 与理论分析较为吻合。

关键词: 冲击矿压; 覆岩厚度; 构造应力; 异常; 微震活动; 案例分析

中图分类号: TD713 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)03-0512-09

作者简介: 曹安业(1982—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事煤岩冲击动力灾害机理与防控、采矿地球物理监测与智能预警等方面的科研与教学工作。E-mail: caoanye@163.com。

Mechanism for stress abnormality and rock burst in variation zone of roof-stratum thickness

CAO Anye¹, BAI Xianxi¹, CAI Wu¹, WEN Yingyuan^{1,2}, LI Xuwei¹, MA Xiang^{1,3}, HUANG Rui^{1,3}

(1. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. School of Geological and Mining Engineering,

Xinjiang University, Urumqi 830047, China; 3. Inner Mongolia Yitai Coal Group Ltd., Ordos 017202, China)

Abstract: The roof stratum structure is one of the main factors affecting coal burst, and the coal burst is also easily induced in the variation zone of roof-stratum thickness. This phenomenon is gradually severe in deep mining areas in Inner Mongolia. The stress distribution in the variation zone of roof-stratum thickness is analyzed based on the theory of elastic mechanics. The FLAC^{3D} numerical modeling is then performed to investigate the influences of the variation of stratum thickness on the stress distribution characteristics and energy evolution in the coal seam. The coal burst mechanism due to the variation of stratum thickness is finally released. The results show that the tectonic stress in the thick roof zone is larger than that in the thin roof zone, and the stress gradient increases with the increasing variation in the stratum thickness or the roof properties. In the variation zone of roof-stratum thickness, the superposition of the advanced abutment pressure and the increasing tectonic stress results in a high-stress concentration area. A higher coal burst risk might thus occur in the roadway near the longwall in the roof variation zone to the thicker roof zone, where more intensive elastic energy is released in the coal/rock mass. The comparative analysis of two field cases shows that more seismic activities occur in the variation zone of stratum thickness and from the variation zone to the thicker stratum zone, and the roadway damage is obvious, which is consistent with the theoretical analysis.

Key words: rock burst; overburden thickness; tectonic stress; abnormality; micro seismic activity; case analysis

0 引言

随着中国煤炭资源开采大范围向深部转移, 冲击矿压(也称“冲击地压”)灾害日益凸显, 严重影响煤矿安全生产^[1]。冲击矿压主要是由采矿活动引起的煤岩结构局部应力集中引起, 大量研究表明, 在应力

异常集中区(如断层、褶曲、煤柱区等), 更容易发

基金项目: 国家自然科学基金项目(51734009, 51804303); 山东省重大科技创新工程项目(2019SDZY02); 江苏省自然科学基金项目(BK20180643)

收稿日期: 2021-10-13

*通信作者(E-mail: baixianxi@163.com)

生冲击矿压^[2]。

此外, 相变构造区似乎也会增加煤层的异常应力集中^[3]。国内外学者针对相变构造区诱发冲击矿压的研究, 大多集中在煤层厚度变化诱发冲击矿压方面, 针对坚硬覆岩厚度变化导致应力异常及诱冲效应的研究较少。孙振武^[4]根据地应力场测量和矿压观测结果, 发现在局部煤层厚度变化的区域往往会发生构造应力异常现象; Álvarez-Fernández 等^[5]运用数值模拟分析了分段崩落法开采煤层时, 由于煤层厚度变薄导致在某超前巷道应力显著增大、变形较大的具体情况; Zhu 等^[6]通过现场观测和数值分析, 研究了煤厚变化区初始应力场及采动应力场的分布规律; 南存全等^[7]研究发现, 当工作面接近煤厚变异区时, 煤厚变异区对工作面超前支承压力分布特征影响显著; 王勇等^[8]分析了不同煤层厚度变化条件下应力及能量分布规律; 赵同彬等^[9]研究了煤层厚度变化对超前支承压力及能量演化规律的影响, 揭示了煤厚变异区冲击矿压发生的力学机制。

关于坚硬覆岩厚度变化与煤层厚度变化诱发冲击矿压机理的问题, 其实质都是在厚度变化区产生局部应力集中, 但是覆岩厚度变化不像煤厚变化能随着工作面的推进直观表现出来, 只能从部分钻孔了解覆岩的分布情况。因此, 坚硬覆岩厚度变化诱发冲击矿压的问题很难引起研究人员的注意。

针对现有研究成果的局限性, 本文针对中国内蒙深部矿区坚硬覆岩厚度变化区煤层开采诱发冲击矿压机理问题, 采用弹性力学理论对坚硬覆岩厚度变化区的构造应力特征进行力学分析, 试图揭示覆岩厚度变化区应力异常分布的成因机制; 并利用 FLAC^{3D} 数值模拟研究覆岩厚度变化区工作面超前支承压力分布特征以及煤壁前方的能量演化规律, 进一步探讨坚硬覆岩厚度变化区煤层开采诱发冲击矿压的机理。

1 覆岩厚度变化区煤层应力异常形成机制

当煤岩体的应力不超过弹性范围时, 最适宜用弹性力学的方法解析煤岩地下工程的力学行为^[10]。原岩应力条件下, 煤层及顶底板未受采掘扰动影响, 假设煤岩体均未超过其弹性范围, 可将覆岩厚度变化区简化为覆岩 1、覆岩 2 两个组合的弹性元件^[9]。其整体力学属性由两个弹性元件串联、并联组合表示, 模型如图 1 所示。

由图 1 可知, 在覆岩厚度变化区, 区域一、区域二、区域三的弹性模量均为覆岩 1、覆岩 2 的弹性模量串联组成, 其等效弹性模量 E 为

$$\frac{1}{E} = \frac{H_1}{H \cdot E_{R1}} + \frac{H_2}{H \cdot E_{R2}}, \quad (1)$$

式中: H_1 , H_2 分别为区域一覆岩 1、覆岩 2 的厚度; E_{R1} , E_{R2} 分别为覆岩 1、覆岩 2 的弹性模量。

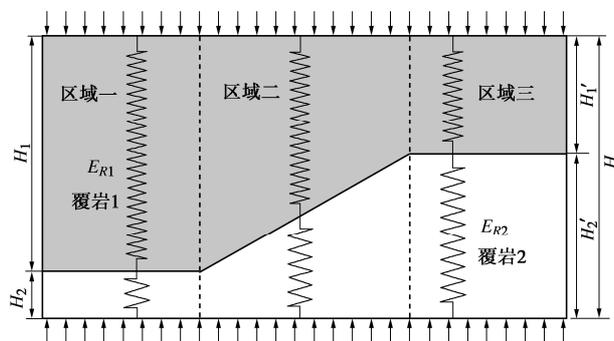


图1 覆岩厚度变化区组合力学模型

Fig. 1 Mechanical model for variation zone of roof thickness

根据煤岩体应力应变关系可知:

$$\sigma = E\varepsilon. \quad (2)$$

本模型内区域一、区域二、区域三相互并联, 故区域一、区域二、区域三的应变 ε_a , ε_b , ε_c 相等; 同时串联部分应力相等, 联立式 (1), 式 (2) 可得覆岩变化区下方煤层应力关系为

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_c} = \frac{E_1}{E_3} = \frac{H'_2 \cdot E_{R1} + H'_1 \cdot E_{R2}}{H_2 \cdot E_{R1} + H_1 \cdot E_{R2}}, \quad (3)$$

式中: σ_a , σ_c 为区域一、区域三覆岩厚度变化区下方的应力, H'_1 , H'_2 为区域三覆岩 1、覆岩 2 的厚度。

为了定性分析覆岩厚度变化区下方的应力分布情况, 假设区域一覆岩 1 和覆岩 2 的厚度 H_1 和 H_2 保持不变, 将式 (3) 优化为 E_{R2}/E_{R1} 和 H'_1/H_1 的函数:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_c} = \left[\frac{H}{H_1} + \frac{H'_1}{H_1} \cdot \left(\frac{E_{R2}}{E_{R1}} - 1 \right) \right] / \left[\frac{H}{H_1} + \left(\frac{E_{R2}}{E_{R1}} - 1 \right) \right]. \quad (4)$$

对于坚硬顶板赋存条件 $E_{R1} > E_{R2}$, 区域一坚硬覆岩厚度 H_1 大于区域三坚硬覆岩厚度 H'_1 。由式 (4) 可知, 区域一所受的应力 σ_a 大于区域三所受的应力 σ_c , 即覆岩变厚区的构造应力比覆岩变薄区大。

为研究 E_{R2}/E_{R1} 与 H'_1/H_1 变化对 σ_a/σ_c 的影响, 控制式 (4) 中的自变量, 将 H/H_1 设为定值; 同时 E_{R2}/E_{R1} 与 H'_1/H_1 的数值仅代表覆岩性质及厚度变化的一个趋势, 不做实际情况下精确数值的讨论。图 2 (a) 为覆岩厚度比值一定的情况下, 构造应力比值与覆岩弹性模量比值关系图, H'_1/H_1 一定, σ_a/σ_c 随 E_{R2}/E_{R1} 增加呈反比例关系, 即两覆岩性质相差越大, 构造应力变化越大。图 2 (b) 为覆岩性质一定的情况下, 构造应力比值与覆岩厚度变化关系图, 当 E_{R2}/E_{R1} 一定, σ_a/σ_c 随 H'_1/H_1 增加呈线性递减关系, 说明坚硬覆岩厚度变化越大, 构造应力变化越大。

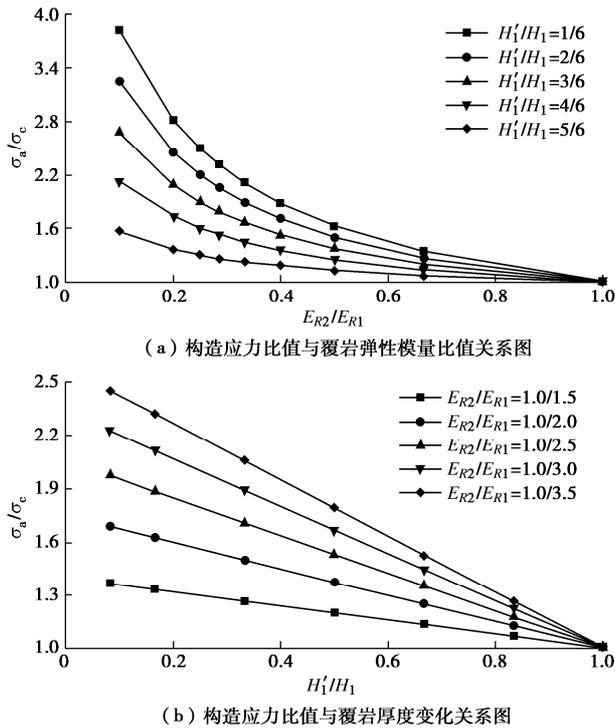


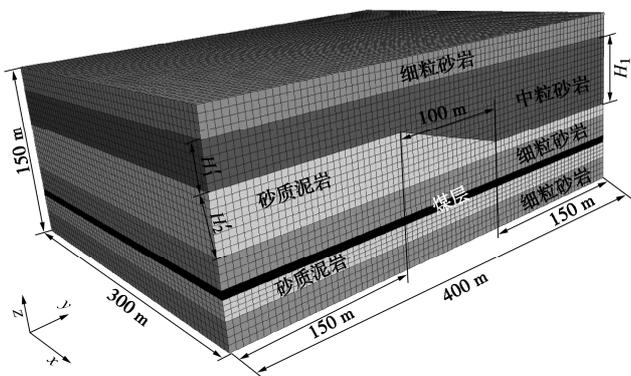
图2 构造应力比值与覆岩性质/厚度变化关系图

Fig. 2 Relationship between tectonic stress ratio and roof properties or variation of roof thickness

2 覆岩厚度变化区煤层开采应力与能量分布特征

2.1 覆岩厚度变化区煤层开采数值模型建立

为研究坚硬覆岩厚度及性质变化对煤层应力分布特征的影响,本文以某矿煤层基本顶的厚度及性质变化为例,利用FLAC^{3D}建立覆岩厚度变化区煤层开采数值计算模型。模型尺寸 $x \times y \times z$ 为 $300 \text{ m} \times 400 \text{ m} \times 150 \text{ m}$,覆岩变化区为 y 轴中部 100 m 范围,其它模型参数如图3所示。初始应力状态下,假设煤岩均处于线弹性状态,模型本构设置为Elastic弹性模型^[11]。

图3 FLAC^{3D}模型图Fig. 3 FLAC^{3D} model

许家林等^[12]基于岩层控制关键层理论指出,只有

关键层上部的载荷可以简化为均布载荷。因此,本文在模型顶部设置一层 20 m 厚的关键层;模拟煤层埋深约 700 m ,在模型顶部施加 15 MPa 的均布载荷,重力加速度为 10 m/s^2 ;底部固定 x, y, z 方向的位移; x, y 方向为固定边界,并在 x, y 方向施加水平渐变应力, x, y 方向应力系数分别设为 1.0 和 1.5 。

模型材料参数以某矿实际的煤岩力学参数为基准,对材料参数进行简化处理^[13],如表1所示。模拟方案主要为:方案一:模拟 $H_1=60 \text{ m}$, $H'_1=30 \text{ m}$, $E_{R2}=10 \text{ GPa}$, E_{R1} 为 $15, 20, 25, 30, 35 \text{ GPa}$ 5种情况下,覆岩性质变化对煤层初始应力分布特征的影响;方案二:模拟 $E_{R1}=30 \text{ GPa}$, $E_{R2}=10 \text{ GPa}$, $H_1=60 \text{ m}$, H'_1 为 $10, 20, 30, 40, 50 \text{ m}$ 5种情况下,覆岩厚度变化对煤层初始应力分布特征的影响。

表1 模型选用参数

Table 1 Model parameters

序号	岩性	厚度/m	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比
1	细粒砂岩	20	2400	20	0.20
2	中粒砂岩	30*	2500	30*	0.15
	砂质泥岩	30*	2200	10	0.25
3	砂质泥岩	10	2200	10	0.25
4	细粒砂岩	20	2400	20	0.20
5	煤层	6	1400	5	0.30
6	砂质泥岩	14	2200	10	0.25
7	细粒砂岩	20	2400	20	0.20

注:表中带“*”参数为方案一、方案二中的可变量。

2.2 覆岩厚度变化区煤层初始应力分布特征

图4所示为不同方案下煤层内初始应力分布规律,由图4(a)可知,由覆岩较薄区至覆岩较厚区,煤层内初始应力由均布状态逐渐减小,然后随着覆岩厚度的增加而增加,当处于覆岩较厚区时,初始应力又逐渐减小,最终恢复至均布状态;并且最大(最小)应力值随覆岩弹性模量比的增加而增加(减小)。由图4(b)可知,初始应力分布规律与方案一相似,最大(最小)应力值随覆岩厚度变化率的增加而增加(减小)。

由于在模型顶部施加了 15 MPa 的均布载荷,因此,坚硬覆岩性质及其厚度变化对煤层初始应力的影响程度为煤层内的应力值减模型顶部均布载荷之后的比值,如图5所示。方案一中 H'_1/H_1 不变,覆岩弹性模量 E_{R2}/E_{R1} 由 $10/35$ 增加至 $10/15$ 时,煤层内应力变化比值呈反比例函数由 1.70 降到 1.21 ;方案二中 E_{R2}/E_{R1} 不变,覆岩厚度情况 H'_1/H_1 由 $1/6$ 增加至 $5/6$,煤层内应力变化比值呈线性关系由 2.14 递减至 1.22 。这与理论分析式(4)所得规律一致。

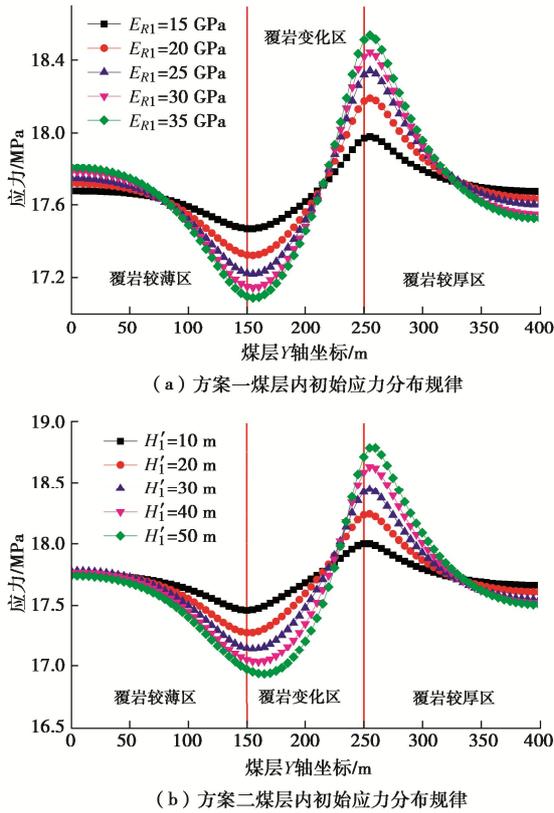


图4 煤层内初始应力分布规律

Fig. 4 Distribution laws of original rock stress in coal seam

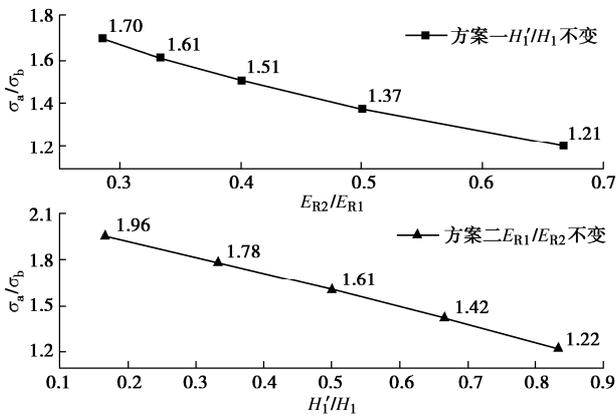


图5 覆岩性质及厚度变化对应力变化率的影响

Fig. 5 Influences of properties and thickness of overburden on change of stress rate

2.3 覆岩厚度变化区煤层采动应力分布特征

煤岩体所受应力在采动应力影响下会超过其峰值应力, 煤岩体进入全应力应变曲线的峰后阶段, 而应变软化模型能很好的反映煤岩体的峰后破坏阶段^[14]。因此, 将工作面回采过程中的煤岩体本构模型设置为应变软化模型, 煤岩体应变软化参数的设置参考文献^[14], 如表2所示, 其余模型参数见表1。

为研究覆岩厚度变化对工作面回采的影响, 采用的开挖模型为: $H_1=H'_1=60$ m, 覆岩厚度不变; $H_1=2H'_1=60$ m, 覆岩厚度发生改变。煤层回采方式包括

沿覆岩由厚向薄推进和沿覆岩由薄向厚推进, 如图6所示。为消除边界效应对工作面回采的影响, 在工作面两侧留50 m的边界煤柱。此外, 工作面每开挖20 m, 计算一次平衡。

表2 煤岩体应变软化参数

Table 2 Strain-softening parameters of coal and rock

塑性应变	中粒砂岩			砂质砂岩		
	黏聚力/MPa	摩擦角/(°)	剪胀角/(°)	黏聚力/MPa	摩擦角/(°)	剪胀角/(°)
0	10.00	36	18	5.00	28	12
1×10^{-4}	6.00	32	10	3.00	24	6
2×10^{-4}	4.00	28	5	2.00	22	2
5×10^{-4}	2.00	24	0	1.00	20	0
1	2.00	24	0	1.00	20	0

塑性应变	细粒砂岩			煤层		
	黏聚力/MPa	摩擦角/(°)	剪胀角/(°)	黏聚力/MPa	摩擦角/(°)	剪胀角/(°)
0	8.00	32	16	4.00	25	10
1×10^{-4}	5.00	28	8	2.00	22	5
2×10^{-4}	3.00	24	4	1.00	20	2
5×10^{-4}	1.50	22	0	0.50	18	0
1	1.50	22	0	0.50	18	0

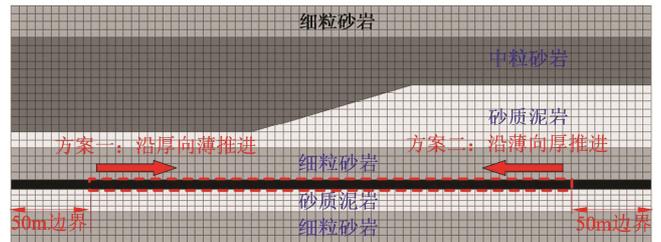


图6 覆岩厚度变化区工作面回采方案

Fig. 6 Mining scheme in variation zone of roof thickness

工作面回采过程中, 煤岩体内应力重新分布并在工作面超前区域形成应力集中区。为研究覆岩厚度变化对工作面回采超前支撑压力的影响, 在煤层中部, $x=150$ m, $z=37$ m处布置一条测线, 将工作面沿覆岩由薄向厚回采、由厚向薄回采与沿覆岩厚度不变回采的超前支撑压力进行对比分析。定义应力突变系数为工作面沿覆岩厚度变化推进的超前支撑压力与沿覆岩厚度不变推进的超前支撑压力之比。限于篇幅, 本文选用超前工作面10, 20, 30, 40, 50 m处的支撑压力进行对比分析, 如图7所示。

由图7(a)可以看出, 当工作面沿覆岩由薄向厚推进时, 应力突变系数呈先减小后升高再减小的趋势。工作面在覆岩较厚区, 应力突变系数最大, 平均为1.042; 在覆岩较薄区, 应力突变系数最小为0.947, 同时超前距离越近, 应力突变系数越接近1, 表明距离回采位置越近, 受超前支撑压力影响越大, 受覆岩厚度变化影响较小。

由图7(b)可得, 当工作面沿覆岩由厚向薄推进

时,超前工作面的应力突变系数有先增加后降低再升高的趋势。工作面在覆岩较厚区,应力突变系数最大约为 1.039;在覆岩较薄区,应力突变系数最小为 0.943,同时超前距离越近,受超前支承压力影响越大,受覆岩厚度变化影响较小。

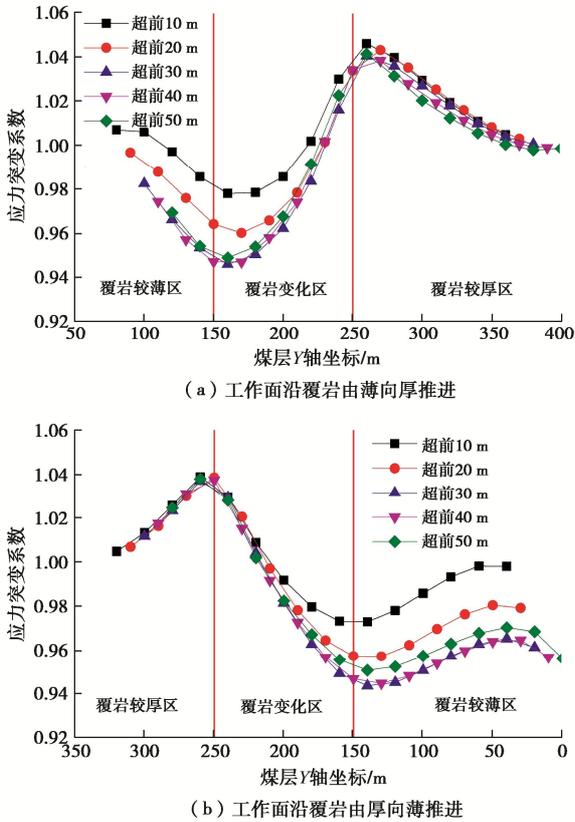


图7 不同推进方式工作面超前支承压力突变规律

Fig. 7 Abrupt change of abutment pressure in advance of working faces with different mining modes

通过分析可知,应力突变系数最大的区域,均在覆岩较厚区至覆岩变化区范围,当工作面推进至此区域时,超前支承压力与突变的构造应力进行叠加,增加了冲击矿压发生的可能性。因此,工作面在坚硬覆岩厚度变化区推进时,在覆岩较厚区至覆岩变化区应力集中系数最大,当工作面推进至此区域时,因重点关注此区域的应力异常情况,必要时进行卸压处理。

2.4 覆岩厚度变化区煤层开采能量分布特征

谢和平等^[15]指出,处于三向应力状态下的工程岩体常常面临卸载破坏的危险,并且煤岩体单元在卸载过程中释放的弹性能密度为

$$W_E = \frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2 - 2\nu \cdot \sigma_2 \cdot \sigma_3 - 2\nu \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_3}{2E} \quad (5)$$

式中: σ_1 , σ_2 , σ_3 为最大、中间、最小主应力; E 为弹性模量; ν 为泊松比。

为研究覆岩厚度变化对工作面回采煤壁前方积聚弹性应变能演化规律的影响,由式(5)得出了工作面

回采过程中模型内储存的弹性能密度。为了更直观地反映工作面回采过程中煤层内的能量聚积情况,将工作面回采过程中每一步的弹性能密度云图进行切片(切片取 $z=37\text{ m}$)、组合处理,如图8所示。

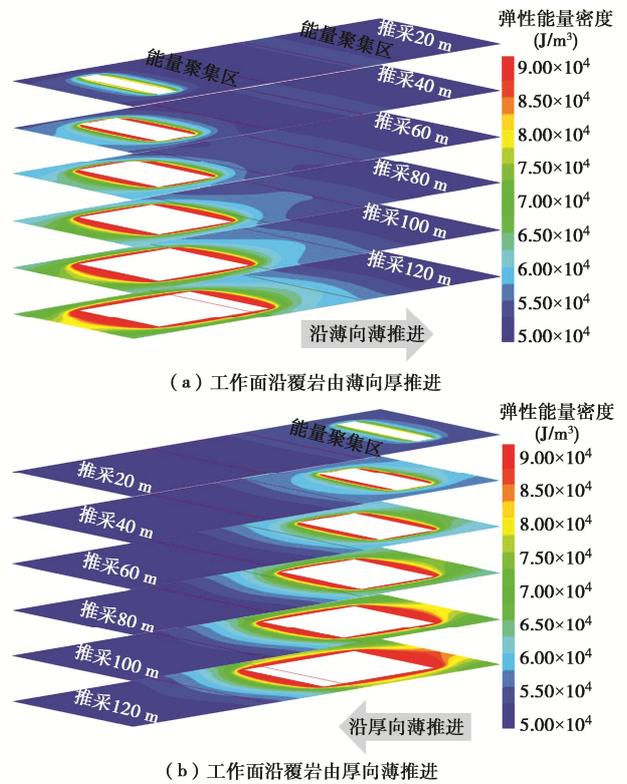


图8 不同推进方式下煤层弹性能密度切片云图

Fig. 8 Section cloud diagram of elastic energy density in different mining modes

工作面沿覆岩由薄向厚推进时,除了在工作面开挖附近出现了能量聚积区,还在覆岩较厚区出现第二个能量聚积区;随工作面继续向覆岩厚度变化区推进,能量聚集区范围增加,冲击危险性增加。工作面沿覆岩由厚向薄推进时,仅在工作面前方出现一个能量聚集区,该能量聚集区在覆岩较厚区至覆岩变化区范围较大,冲击危险性更高;随工作面继续推进,能量聚集区范围逐渐减小。

3 覆岩厚度变化区煤层开采诱发冲击矿压机理

冲击矿压发生的“动静载叠加诱冲原理”表示,采掘空间周围煤岩体中的静载荷与矿震形成的动载荷叠加超过煤岩体发生冲击的最小载荷时,就容易诱发冲击矿压^[16-17],即

$$\sigma_s + \sigma_d \geq \sigma_{\text{bmin}} \quad (6)$$

式中: σ_s 为煤岩体静载应力, σ_d 为矿震动载, σ_{bmin} 为冲击矿压的临界应力。

根据覆岩厚度变化区煤层开采过程中超前支承压

力分布特征及动静载叠加诱冲原理, 得出了不同回采方式下覆岩厚度变化区煤层开采诱发冲击矿压的机理, 如图 9 所示。

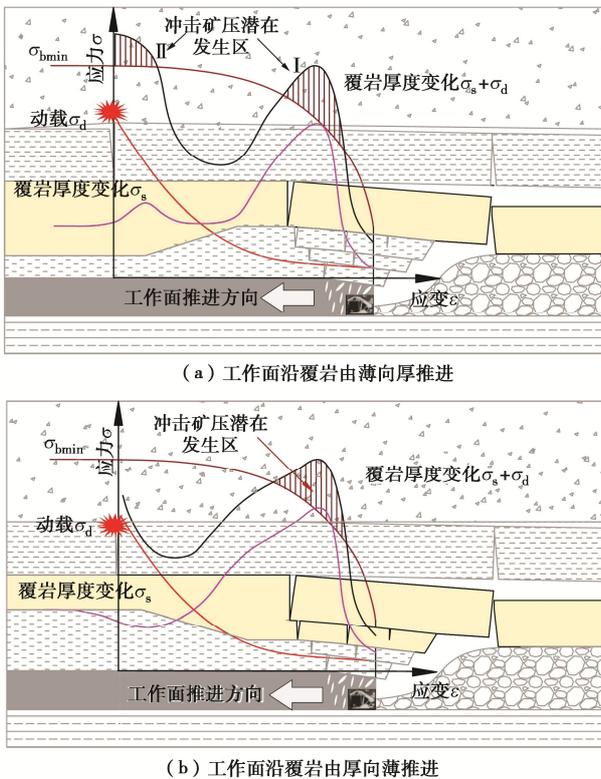


图 9 冲击矿压动静载叠加诱发机理示意图

Fig. 9 Schematic diagram of induced mechanism of dynamic and static load superposition under rock burst pressure

当工作面沿覆岩由薄向厚推进时, 超前支承压力由变薄区向变厚区传递, 煤层中的静载应力相比覆岩厚度不变时有先减小后升高的趋势, 在覆岩较厚区会形成应力的第二峰值区。当工作面前方覆岩破断诱发动载时, 动载荷与静载荷相互叠加, 可能会出现两个冲击矿压潜在发生区, 即: 工作面前方超前支承压力峰值区和应力第二峰值区与动载荷叠加诱冲区。其中第二峰值区与动载荷叠加诱冲区位于工作面前方, 产生的冲击能量将主要向工作面两巷或者工作面临空面释放, 冲击矿压影响范围增加。

当工作面沿覆岩由厚向薄推进时, 超前支承压力由变厚区向变薄区传递, 煤层中的静载应力相比覆岩厚度不变时先升高后减小, 仅在超前支承压力影响范围与覆岩较厚区形成一个峰值应力; 与动载荷叠加时, 形成一个冲击矿压潜在发生区, 但是该区域相对覆岩厚度不变时影响范围更大、冲击能量更高。

因此, 工作面在覆岩较厚区至覆岩厚度变化区回采时, 煤壁前方超前支承压力与突变的构造应力进行叠加, 积聚的弹性能增加, 更容易诱发冲击矿压。冲击矿压防治的主要工作是降低覆岩变化区第二峰值应

力, 将应力集中区向煤岩体深部转移。

4 覆岩厚度变化区工程案例

4.1 工作面沿覆岩由薄向厚推进案例分析

(1) 工程概况

伊泰某矿 103 工作面为矿井一采区的第 2 个回采工作面, 东南侧为实体煤; 西北侧为 101 采空区, 两者留有两个 30 m 宽的双煤柱; 东北邻南翼辅运大巷; 西南方向开切眼为实体煤柱。工作面设计推进长度 2480 m, 宽度 210 m, 主采 3-1 煤层, 煤层埋深平均 706.3 m, 煤层厚度约 6.7 m, 倾角 1°~3°, 平均倾角 2°, 为近水平煤层。

统计 103 工作面附近的钻孔, 并绘制出覆岩厚度变化等值线图, 发现在 3-1 煤层上方近 200 m 范围主要存在一层较厚的坚硬顶板, 该覆岩位于煤层上方 20 m 左右, 层厚在 60~110 m; 经计算可知, 该岩层为工作面覆岩结构的关键层。随着工作面的推进, 该覆岩由薄变厚, 如图 10 所示。

(2) 案例分析

103 工作面自 2018 年 3 月开始回采以来, 大能量事件频发, 103 辅运顺槽出现了不同程度的动力显现, 造成巷道多次破坏和设备损坏, 破坏以巷道底板的瞬间开裂、底鼓为主。通过分析微震监测数据, 可判断煤岩体的应力分布状态及覆岩运移规律^[18]。统计分析 103 工作面回采期间的微震数据与坚硬覆岩厚度变化的关系, 以 103 临空顺槽做剖面, 如图 11 所示。

103 工作面回采期间, 位于工作面前方的微震事件频次占比 87.7%, 微震能量占比 91.0%, 表明 103 工作面回采期间微震事件与工作面前方煤岩体应力分布状态关系较大。同时, 微震频次、能量的分布情况与覆岩厚度变化存在一定的对应关系, 工作面沿覆岩由薄向厚推进时, 工作面推进位置前方微震能量、频次均处于较大的水平, 工作面冲击危险性较高, 此时对应于冲击矿压的潜在发生区 I, 主要由工作面采动引起的超前支承压力造成; 在坚硬覆岩较厚区域, 微震频次及 10^3 J 的微震总能量存在极大值, 此时对应于冲击矿压的潜在发生区 II, 主要受超前支承压力与突变的构造应力叠加影响。

4.2 工作面沿覆岩由厚向薄推进案例分析

(1) 工程概况

中煤某矿 3102 工作面为矿井第 2 个回采工作面, 主采 3-1 煤层, 工作面走向长 5540 m, 倾向宽 300 m, 东侧为实体煤, 西侧与 3101 采空区相邻, 南侧为井田边界, 北侧为 3-1 煤辅助回风巷, 区段煤柱宽度 35 m。该工作面煤层埋深 690~700 m, 煤层厚度 4.35~5.47 m, 倾角 1°~4°, 平均倾角 2°, 为近水平煤层。

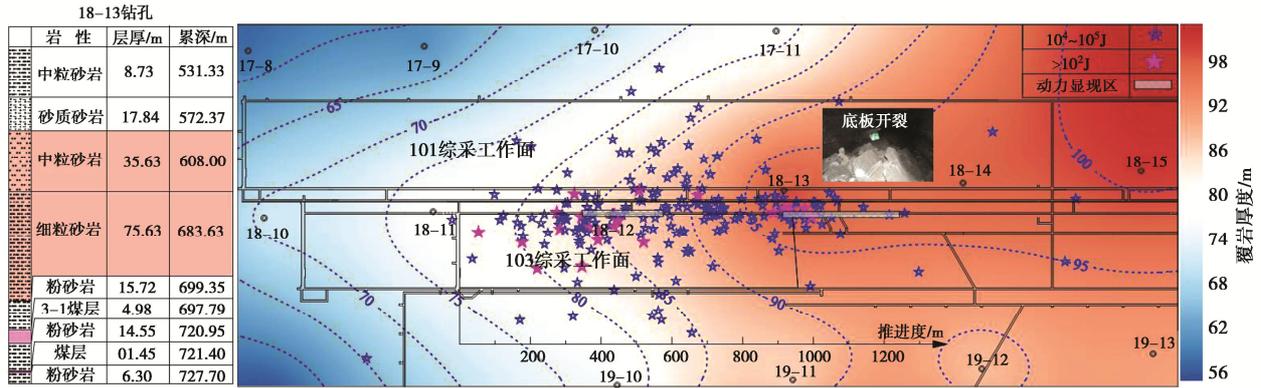


图 10 伊泰某矿 103 工作面覆岩厚度等值线及微震平面定位图

Fig. 10 Contours of roof thickness and distribution map of microseismic plane location of working face 103 in Yitai Mine

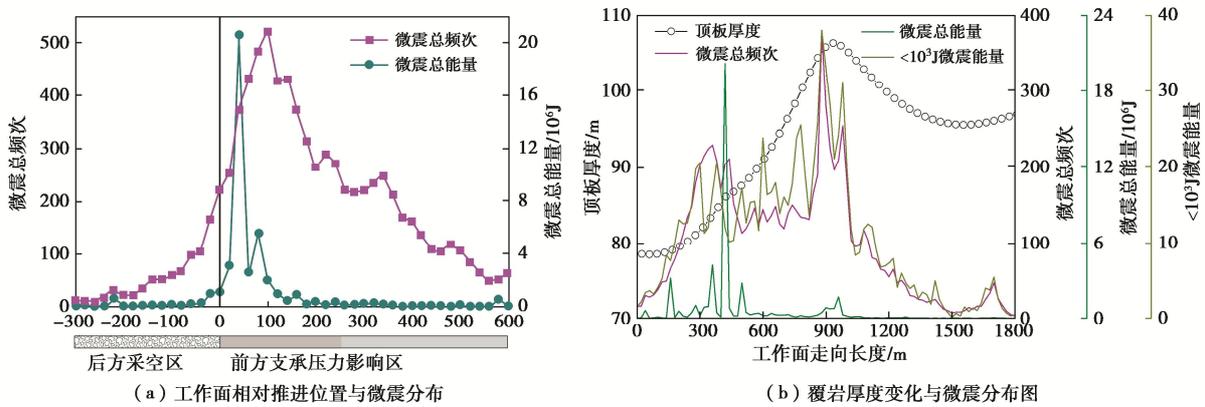


图 11 沿覆岩由薄向厚推进覆岩厚度变化与微震关系图

Fig. 11 Relationship between variation of roof thickness and microseismicity when working face advancing from thin to thick along roof

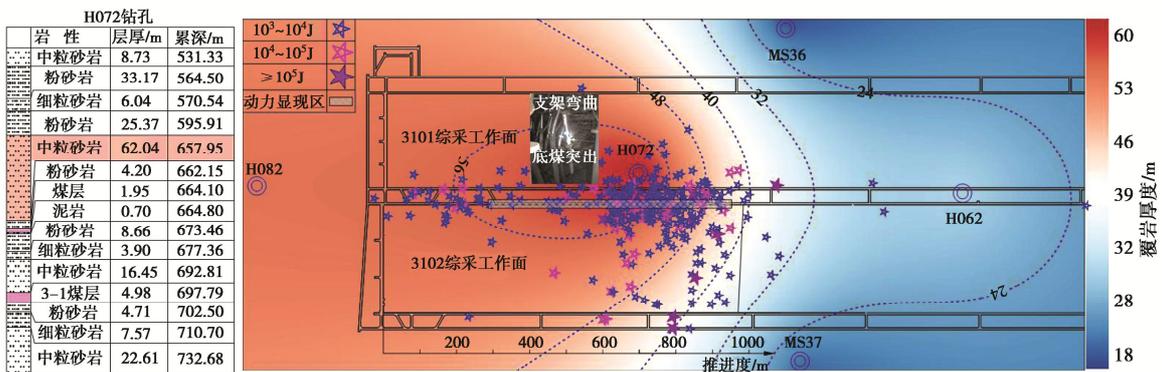


图 12 中煤某矿 3102 工作面覆岩厚度等值线及微震平面定位图

Fig. 12 Contours of roof thickness and distribution map of microseismic plane location of working face 3102 in China Coal Mine

统计3102工作面附近的钻孔，并绘制出覆岩厚度变化等值线图，发现在3-1煤层上方近200 m范围主要存在一层厚度变化较大的坚硬顶板，该覆岩位于煤层上方40 m左右，层厚在40~60 m。随着工作面的推进，该覆岩由厚变薄，如图12所示。

(2) 案例分析

3102工作面自2017年8月开始回采，大能量事件频发，3102回风巷出现了不同程度的帮鼓、顶板下

沉、底鼓、单体损坏等冲击显现情形。统计分析3102工作面回采期间所有的微震数据与坚硬厚度变化的关系，以3102临空巷做剖面，见图13。

3102工作面回采期间，微震事件大多位于工作面前方，其中微震事件频次占比62.3%，微震能量占比87.1%。工作面沿覆岩由厚向薄推进时，在坚硬覆岩较厚区至覆岩厚度变化区，微震总频次分布较多，极大值分布在坚硬覆岩厚度较大的区域；并且小于 10^3 J

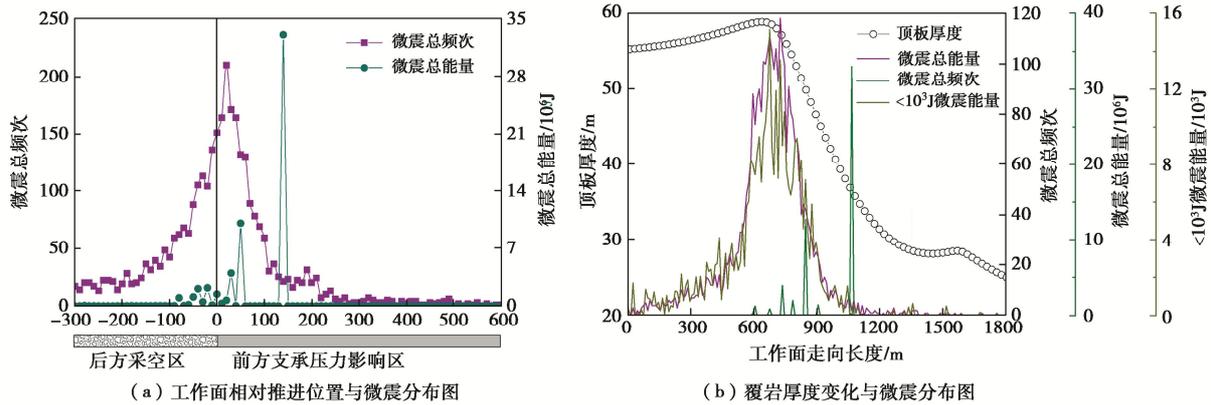


图 13 沿覆岩由厚向薄推进覆岩厚度变化与微震关系图

Fig. 13 Relationship between variation of roof thickness and microseismicity when working face advancing from thick to thin along roof 的震总能量与微震频次具有相似分布规律。表明在覆岩较厚区至覆岩厚度变化区的冲击危险性较高, 此时对应于工作面沿覆岩由厚向薄推进时的冲击矿压潜在发生区, 主要受超前支撑压力与突变的构造应力叠加影响。

以上分析可知, 工作面沿覆岩厚度变化区回采期间, 微震事件大多分布在工作面前方, 与煤岩体应力分布状态关系较大; 同时, 微震频次及能量小于 10^3 J 的微震总能量与坚硬覆岩厚度变化相关性较好。工作面受超前支撑压力与突变的构造应力叠加影响, 静载应力较大, 煤岩体产生较多的微裂隙, 导致坚硬覆岩厚度变化区至覆岩较厚区微震事件频发。这与前文研究成果相符。

5 结 论

(1) 基于弹性力学理论分析了坚硬覆岩厚度变化区的力学机制, 结果表明, 覆岩变厚区的构造应力比覆岩变薄区大, 覆岩厚度变化越大或覆岩之间弹性模量相差越大, 覆岩厚度变化区构造应力变化越大。

(2) 采用数值模拟方法研究了坚硬覆岩厚度及物理力学性质变化对煤层构造应力分布特征的影响, 结果表明, 自覆岩较薄区到覆岩较厚区, 构造应力均有先减小后增大再减小的趋势, 覆岩厚度变化越大或覆岩物理力学性质差异越大, 应力变化比值越大。

(3) 工作面在覆岩厚度变化区开采时, 受超前支撑压力与突变的构造应力叠加影响, 覆岩厚度变化区至覆岩较厚区应力集中程度较大, 该区域积聚的弹性能主要向工作面前方巷道释放, 冲击危险性更大; 冲击矿压防治思路是降低覆岩变化形成的第二应力峰值区。

(4) 现场案例表明, 工作面沿覆岩由薄向厚推进或沿覆岩由厚向薄推进时, 在坚硬覆岩厚度变化区及变化区向较厚区过渡时微震能量、频次较高, 冲击矿

压危险上升, 与理论与模拟分析较为吻合。

参考文献:

- [1] 窦林名, 周坤友, 宋士康, 等. 煤矿冲击矿压机理、监测预警及防控技术研究[J]. 工程地质学报, 2021, 29(4): 917-932. (DOU Linming, ZHOU Kunyou, SONG Shikang, et al. Occurrence mechanism, monitoring and prevention technology of rockburst in coal mines[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(4): 917-932. (in Chinese))
- [2] 李东, 姜福兴, 陈洋, 等. 深井富水工作面“动—静”应力效应诱发冲击地压机理研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(9): 1714-1722. (LI Dong, JIANG Fuxing, CHEN Yang, et al. Mechanism of rockburst induced by “dynamic-static” stress effect in water-rich working face of deep well[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(9): 1714-1722. (in Chinese))
- [3] GUO W Y, GU Q H, TAN Y L, et al. Case studies of rock bursts in tectonic areas with facies change[J]. Energies, 2019, 12(7): 1330-1341.
- [4] 孙振武. 煤层厚度局部变化区域地应力场分布的数值模拟[J]. 矿山压力与顶板管理, 2003, 20(3): 95-97, 100. (SUN Zhenwu. Numerical simulation on stress field distribution in partial transformation area of coal seam height[J]. Ground Pressure and Strata Control, 2003, 20(3): 95-97, 100. (in Chinese))
- [5] ÁLVAREZ-FERNÁNDEZ M I, GONZÁLEZ-NICIEZA C, ÁLVAREZ-VIGIL A E, et al. Numerical modelling and analysis of the influence of local variation in the thickness of a coal seam on surrounding stresses: application to a practical case[J]. International Journal of Coal Geology, 2009, 79(4): 157-166.
- [6] ZHU G G, DOU L M, LI Z L, et al. Mining-induced stress

- changes and rock burst control in a variable-thickness coal seam[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2016, **9**(5): 365.
- [7] 南存全, 丁维波, 吕进国, 等. 采动影响下煤厚变异区超前支承压力变化规律的数值模拟[J]. *安全与环境学报*, 2018, **18**(6): 2200-2204. (NAN Cunquan, DING Weibo, LÜ Jinguo, et al. Numerical simulation for the changing regularity of the leading support pressure in the coal seam variety region under the mining impact[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2018, **18**(6): 2200-2204. (in Chinese))
- [8] 王勇, 杨毕, 邓川, 等. 煤厚变化对冲击地压影响的数值模拟分析[J]. *煤矿安全*, 2017, **48**(5): 198-201. (WANG Yong, YANG Bi, DENG Chuan, et al. Numerical simulation analysis of influence of coal thickness change on rock burst[J]. *Safety in Coal Mines*, 2017, **48**(5): 198-201. (in Chinese))
- [9] 赵同彬, 郭伟耀, 谭云亮, 等. 煤厚变异区开采冲击地压发生的力学机制[J]. *煤炭学报*, 2016, **41**(7): 1659-1666. (ZHAO Tongbin, GUO Weiyao, TAN Yunliang, et al. Mechanics mechanism of rock burst caused by mining in the variable region of coal thickness[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, **41**(7): 1659-1666. (in Chinese))
- [10] 蔡美峰. 岩石力学与工程[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2013. (CAI Meifeng. *Rock Mechanics and Engineering*[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese))
- [11] CAO W Z, SHI J Q, DURUCAN S, et al. Gas-driven rapid fracture propagation under unloading conditions in coal and gas outbursts[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, **130**: 104325.
- [12] 许家林, 钱鸣高, 马文顶, 等. 岩层移动模拟研究中加载问题的探讨[J]. *中国矿业大学学报*, 2001, **30**(3): 252-255. (XU Jialin, QIAN Minggao, MA Wending, et al. Discussion on loading problem in physical and numerical simulation of strata movement[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2001, **30**(3): 252-255. (in Chinese))
- [13] 张朝鹏. 不同赋存深度煤岩力学参数差异性及采动力学行为研究[D]. 成都: 四川大学, 2017. (ZHANG Chaopeng. *Differences of Coal Mechanical Parameters and Mining Induced Mechanical Behavior Induced by Different Depths*[D]. Chengdu: Sichuan University, 2017. (in Chinese))
- [14] 王路军, 周宏伟, 荣腾龙, 等. 深部煤体采动应力场演化规律及扰动特征研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, **38**(增刊 1): 2944-2954. (WANG Lujun, ZHOU Hongwei, RONG Tenglong, et al. Stress field evolution law and disturbance characteristic of coal at depth under mining[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, **38**(S1): 2944-2954. (in Chinese))
- [15] 谢和平, 鞠杨, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, **24**(17): 3003-3010. (XIE Heping, JU Yang, LI Liyun. Criteria for strength and structural failure of rocks based on energy dissipation and energy release principles[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, **24**(17): 3003-3010. (in Chinese))
- [16] 窦林名, 何江, 曹安业, 等. 煤矿冲击矿压动静载叠加原理及其防治[J]. *煤炭学报*, 2015, **40**(7): 1469-1476. (DOU Linming, HE Jiang, CAO Anye, et al. Rock burst prevention methods based on theory of dynamic and static combined load induced in coal mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, **40**(7): 1469-1476. (in Chinese))
- [17] CAI W, DOU L M, SI G Y, et al. A new seismic-based strain energy methodology for coal burst forecasting in underground coal mines[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, **123**: 104086.
- [18] 苗小虎, 姜福兴, 王存文, 等. 微地震监测揭示的矿震诱发冲击地压机理研究[J]. *岩土工程学报*, 2011, **33**(6): 971-976. (MIAO Xiaohu, JIANG Fuxing, WANG Cunwen, et al. Mechanism of microseism-induced rock burst revealed by microseismic monitoring[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, **33**(6): 971-976. (in Chinese))