不同埋深下采煤工艺对采场应力调控及能量释放的影响机制

王　博[1,2],余卓成[1],冯国瑞[1],高　瑞[1],李占成[2,3],韩雨桐[1],姜　超[2,3],李如朋[2,4]
(1. 太原理工大学 矿业工程学院,山西 太原　030024;2. 兖矿能源集团股份有限公司,山东 济宁　273500;3. 鄂尔多斯市营盘壕煤炭有限公司,内蒙古 鄂尔多斯　017010;4. 内蒙古昊盛煤业有限公司,内蒙古 鄂尔多斯　017010)

摘要:随着我国煤炭资源深部开发程度提高,高地应力与复杂覆岩结构诱发冲击地压灾害日益突出,严重制约着矿井的安全、高效开采.鄂尔多斯矿区作为典型深部厚煤层富集区,综放与综采2种开采工艺下采场动力显现及巷道围岩响应特征存在显著差异,综放、综采与动力显现的关联效应及其在不同埋深区域的适应性有待深入研究.为此,以营盘壕煤矿2215综采工作面与2102综放工作面为研究对象,构建了采场支承压力理论模型,解析获得了不同开采工艺下支承压力峰值计算方法;通过PFC数值仿真计算,查明了不同开采工艺、不同埋深条件下不同层位岩层弹性应变能积聚与释放特征,揭示了综放与综采动力显现差异的形成机制.结果表明:综放开采能将部分近场岩层弯曲破断所突释的弹性能以顶煤损伤及破碎耗能机制缓冲,这种机制限制了近场弹性能向煤壁前方传递,从而在源头上降低了综放工作面超前支承压力峰值.在300～800 m埋深范围内,综放工作面超前支承压力峰值普遍降为综采工作面的87.9%～93.8%,顶煤在压缩破碎过程中有效吸收和消纳了近场岩层断裂释能,减弱了近场应力集中程度.相较于综采,综放开采时近场厚硬岩层不同区位弹性应变能释放量显著降低,这与两矿井现场微震实测结果即综放工作面在初次来压、单见方及双见方各阶段均呈现出"低能级、低频次"特征相一致.埋深超过600 m后,综放较综采在深部开采中表现出明显更优的近场能量调节与冲击地压防控作用.本研究可为深部厚煤层安全开采工艺选择与动力灾害防控提供参考.

关键词:深部;冲击地压;综放开采;综采开采;PFC
中图分类号:TD 324　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1000-1964(2026)03-0774-17

Influence mechanism of coal mining technology on stope stress regulation and energy release under different mining depths

WANG Bo[1,2], YU Zhuocheng[1], FENG Guorui[1], GAO Rui[1], LI Zhancheng[2,3], HAN Yutong[1], JIANG Chao[2,3], LI Rupeng[2,4]
(1. College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China; 2. Yankuang Energy Group Co., Ltd., Jining, Shandong 273500, China; 3. Ordos Yingpanhao Coal Co., Ltd., Ordos, Inner Mongolia 017010, China; 4. Inner Mongolia Haosheng Coal Industry Co., Ltd., Ordos, Inner Mongolia 017010, China)

收稿日期:2025-10-14　　**修回日期**:2025-12-17　　**DOI**:10.13247/j.cnki.jcumt.20250437
基金项目:国家自然科学基金项目(52204107,52525401);中国博士后科学基金第74批面上项目(2023M742944)
第一作者:王　博(1991—),山西省高平市人,副教授,博士生导师.E-mail:wangbo01@tyut.edu.cn
通信作者:冯国瑞(1976—),男,山西省阳城县人,教授,博士生导师.E-mail:fgr_tut@163.com
引用格式:王　博,余卓成,冯国瑞,等.不同埋深下采煤工艺对采场应力调控及能量释放的影响机制[J].中国矿业大学学报,2026,55(3):774-790.
WANG Bo, YU Zhuocheng, FENG Guorui, et al. Influence mechanism of coal mining technology on stope stress regulation and energy release under different mining depths[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2026, 55(3): 774-790.

Abstract: With the intensification of deep coal exploitation in China, rock burst hazards induced by high in-situ stress and complex overburden structures severely constrain safe and efficient mining. As a typical enrichment area of deep thick coal seams, the Ordos mining area exhibits significant differences in working face dynamic manifestations and roadway surrounding rock response characteristics under fully mechanized top coal caving (FMTCC) and fully mechanized mining (FMM) technologies. However, the correlation effects between different mining technologies and dynamic manifestations, alongside their depth adaptability, require further investigation. Taking the 2215 FMM and 2102 FMTCC working faces in Yingpanhao Coal Mine as case studies, a theoretical model of abutment pressure was established, and calculation methods for peak abutment pressure under different mining methods were derived. Based on PFC numerical simulations, elastic strain energy accumulation and release characteristics across strata under different technologies and depths were identified, revealing the formation mechanism of dynamic manifestation differences between FMTCC and FMM. The results indicate that FMTCC technology can buffer the elastic energy suddenly released by the bending and fracturing of near-field strata through the energy dissipation mechanism of top-coal damage and crushing. This mechanism restricts the transfer of near-field elastic energy to the front of the coal wall, thereby reducing the peak advanced abutment stress of the FMTCC working face from the source. At depths of 300—800 m, this peak pressure generally decreases to 87.9%—93.8% of FMM faces; during compression and crushing, the top coal effectively absorbs and dissipates the energy released by near-field strata fractures, weakening the near-field stress concentration. Compared with FMM, near-field thick hard strata energy release is significantly lower under FMTCC, consistent with microseismic observations showing "low energy and low frequency" features during initial weighting, single-square, and double-square stages. When the burial depth exceeds 600 m, FMTCC shows a significantly superior effect in near-field energy regulation and rock burst prevention in deep mining compared to FMM. This study provides a reference for the selection of safe mining technologies and dynamic disaster prevention and control.

Key words: deep; rock burst; fully mechanized top coal caving; fully mechanized mining; PFC

随着我国煤炭资源开发逐步向深部延伸，高地应力和复杂覆岩结构条件下的安全高效开采已成为制约矿井可持续发展的核心问题之一[1-3]. 鄂尔多斯矿区作为西部典型的资源富集区，其煤层赋存深、厚度大，覆岩构造复杂多变，易引发顶板垮落、煤壁片帮甚至冲击地压等灾害，严重威胁井下作业安全[4]. 深部厚煤层开采主要依靠综放和综采这2种工艺，已有研究证明综放与综采在能量积聚、应力传递路径以及动力扰动表现方面存在显著差异[5-6]. 然而，目前学术界尚未对不同埋深条件下不同工艺工作面超前应力分布规律、厚硬岩层断裂释能特征及冲击地压致灾机制形成系统认识.

近年来，国内学者围绕深部煤层开采及厚煤层覆岩结构响应机制开展了大量研究工作，逐步深化了对深部矿山动力灾害本质的理解. 文献[7-8]基于关键层理论，认为特大采高工作面易导致近煤层关键层进入垮落带而以“悬臂梁”结构形态运动；并通过理论分析与模拟试验，分析了大采高覆岩关键层“悬臂梁”结构的3种运动形式. 在此基础上，针对深部厚煤层开采所形成的大尺度采动空间特征，文献[9-15]深入研究了采场空间不同层位下覆岩的运动规律，认为上位远场岩层主要演化为“砌体梁”或“铰接岩梁”，维持宏观承载状态；而下位近场岩层（直接顶与基本顶）会因回采空间大而转化为“悬臂梁”结构，易发生破断并造成工作面强烈来压. 文献[16]认为放顶煤开采上覆巨厚岩层变形移动直接影响到采场矿压显现，其中下位岩层断裂时对综放面冲击最严重. 上述研究成果明确了不同层位岩层对工作面矿压显

现的控制作用，表明近场岩层直接影响着工作面支承压力的分布.

采场围岩应力响应特征及其能量演化行为与开采工艺密切相关. 文献[17-18]采用数值模拟及相似材料模拟等方法揭示了综放采场围岩宏观应力壳的力学特征，分析了顶煤层“垫层”缓冲效应的力学本质；文献[6]研究了厚煤层综放开采的降载减冲原理，认为综放开采能优化围岩应力分布并降低近场应力集中程度；文献[19]采用理论分析与数值模拟等方法，认为相较于综放开采，深部厚煤层综采开采会导致基本顶梁结构内积聚更高的弹性应变能，且受扰动围岩的能量释放强度显著增强.

综上所述，现有研究多侧重于单一地质条件或开采工艺下的矿压显现规律探讨，尚缺乏针对不同埋深条件下不同开采工艺对采场应力能量场演化规律的量化分析. 鉴于此，本文以鄂尔多斯营盘壕煤矿 2215 综采与 2102 综放工作面为工程背景，构建顶煤缓冲效应的采场支承压力理论模型，并结合 PFC 数值模拟方法，深入分析了 2 种开采工艺在不同埋深下的超前支承压力分布与能量演化规律. 本研究旨在探明综放与综采在不同埋深下适用性差异及其内在机理，为深部厚煤层开采方法的科学决策与动力灾害防控提供理论依据.

1 工程背景

1.1 矿井与工作面概况

营盘壕煤矿位于我国蒙陕深部矿区，具有埋深大、开采强度大、煤层上覆厚硬砂岩组以及煤层普遍具有冲击倾向性等特点[20]，受矿井动力灾害影响较为严重. 矿井按照采区式开采，其中 2215 工作面位于二采区，2102 工作面位于一采区，两工作面独立不相邻且均为相应采区的首个邻空工作面. 其中，2215 工作面平均埋深为 726.8 m，煤层平均厚度为 6.5 m，工作面长度为 300 m，推进长度为 2 709 m；2102 工作面平均埋深为 719.6 m，煤层平均厚度为 6.37 m，工作面长度为 330 m，推进长度为 2 614 m. 2215 工作面位于 2102 工作面北部，两工作面相距 1 306 m，且间隔着 2217 与 2101 这 2 个采空区，两工作面煤层均为近水平煤层，地质条件相似. 2215 及 2102 工作面空间位置关系与地层柱状如图 1～2 所示.

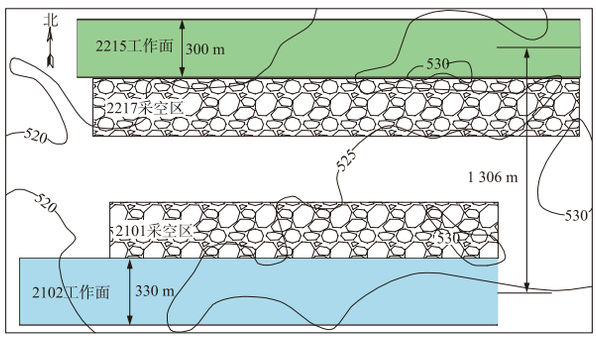


图 1 营盘壕煤矿 2215 与 2102 工作面空间位置关系示意

Fig. 1 Schematic of the spatial location relationship between the 2215 and 2102 working faces in the Yingpanhao coal mine

序号	岩性	岩层	岩层厚度/m
1	砂质泥岩与砂岩互层		—
2	粉砂岩		10.80
3	中粒砂岩		25.98
4	砂质泥岩		8.25
5	中粒砂岩		21.68
6	粉砂岩		13.91
7	泥岩		1.20
8	2-2煤		6.11
9	粉砂岩		5.58
10	粗粒砂岩		4.60

(a) 2215 工作面地层柱状图

序号	岩性	岩层	岩层厚度/m
1	砂质泥岩与砂岩互层		—
2	中粒砂岩		12.06
3	粗粒砂岩		27.42
4	砂质泥岩		7.10
5	中粒砂岩		19.65
6	粉砂岩		15.08
7	2-2煤		6.45
8	粉砂岩		9.51

(b) 2102 工作面地层柱状图

图 2 营盘壕煤矿 2215 与 2102 工作面地层柱状图

Fig. 2 Stratigraphic columns of the 2215 and 2102 working faces in Yingpanhao coal mine

1.2 不同开采工艺下冲击显现特征

2215 工作面采用综采一次采全高工艺，2102 工作面采用综放开采工艺，放煤期间顶煤自然垮落. 两工作面地质赋存条件高度相似，但采取不同开采工艺后表现出了截然不同的冲击响应特征，如图 3 所示. 2215 综采工作面回采期间巷道底鼓、煤壁片帮及支护失效等冲击显现频发，护帮金属网严重变形，被剥落的煤体不仅大幅压缩了作业空间，更加剧了顶板失稳风险与冒顶隐患. 相比之下，2102 综放工作面冲击显现更为平缓，围岩变形得到了有效控制，且现场并未观测到类似 2215 工作面的剧烈底鼓与片帮现象.

一般而言，浅部矿井的覆岩运移多表现为渐进式的弯曲与垮落，不同工艺下的应力重分布与能量释放特征趋于一致[21-22]. 且综放开采由于顶煤垫层效应，其破碎流动对顶板压力的吸纳和消散作用一定程度上缓和了冲击显现[23-25]. 然而，2102 综放面与 2215 综采工艺下差异化如此巨大的动力显现现象是始料未及的，究其原因，这正是营

盘壕煤矿深部高应力环境与顶板岩层结构叠加效应所致. 因此,厘清开采工艺对超前支承压力的影响规律及其关键影响因素,揭示综采与综放差异化动力显现形成机理,查明营盘壕煤矿综放与综采工艺的适用条件范围,对矿井后续工作面开采方法的科学选择具有重要意义.



(a) 2215工作面　　(b) 2102工作面

图 3　2215综采工作面与2102综放工作面现场显现

Fig. 3　Comparision of field-observed dynamic behaviors between the 2215 FMM and 2102 FMTCC faces

2　顶煤缓冲效应下采场支承压力理论模型

在深部厚煤层环境中,工作面回采所影响的范围显著增加,导致覆岩破断结构呈现明显的空间层位分化特征. 采高相同时,开采工艺的改变不会显著改变上覆远场岩层的宏观破断形态,其近场顶板以砌体梁、悬臂梁结构为主. 综放开采中破碎顶煤作为可压缩的弹性垫层,可吸收顶板岩层断裂释放的部分能量,将顶煤简化为Winkler弹性地基,建立不同工艺条件下的采场支承压力力学模型,如图4所示.

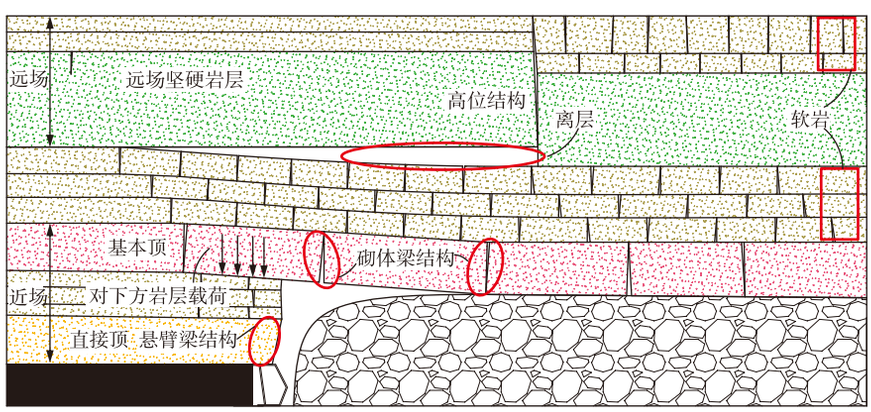


图 4　深部厚煤层采场远-近场覆岩结构

Fig. 4　Far- and near-field overburden structure for deep, thick coal-seam longwall workings

2.1　顶板岩梁挠曲变形力学分析

根据营盘壕煤矿顶板岩层结构形态,将煤层上方的部分坚硬直接顶简化为悬臂梁结构,并将砌体梁端部支承块体对下方岩层施加的作用力视为均布载荷. 基于Winkler弹性地基理论,将煤层视为由一系列相互独立的竖向弹簧构成的弹性地基,如图5所示,O为坐标系原点. 取悬臂梁结构中的微小单元体进行受力分析,可建立如下平衡方程:

$$\begin{cases} Q+[q-k\omega(x)]\mathrm{d}x-(Q+\mathrm{d}Q)=0, \\ M+Q\mathrm{d}x-(M+\mathrm{d}M)=0, \end{cases} \tag{1}$$

式中:Q为直接顶截面所受剪力,kN;M为直接顶截面所受弯矩,kN·m;q为上覆岩层传递至直接顶的向下均布载荷,kN/m;k为Winkler系数,kN/m^2;$\omega(x)$为直接顶受上覆岩层作用下在x处的竖向挠度,m.

化简式(1)得:

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}x}=q-k\omega(x), \\ \dfrac{\mathrm{d}M}{\mathrm{d}x}=Q. \end{cases} \tag{2}$$

根据材料力学基本定律:

$$M=E_{\mathrm{r}}I_{\mathrm{r}}\frac{\mathrm{d}^2\omega(x)}{\mathrm{d}x^2}, \tag{3}$$

式中:E_{r}为直接顶等效弹性模量,MPa;I_{r}为直接顶截面惯性矩,m^4.

将式(3)代入式(2),可得到顶板挠度四阶

方程：

$$E_rI_r\frac{d^4\omega(x)}{dx^4}+k\omega(x)=q, \tag{4}$$

令 $\omega(x)$ 等于常数 C 并代入式(4)中，可得方程特解 $\omega_p(x)$：

$$C=q/k. \tag{5}$$

$$\omega_p(x)=\frac{q}{k}. \tag{6}$$

将式(4)右边置零，可得：

$$\frac{d^4\omega(x)}{dx^4}+\frac{k}{E_rI_r}\omega(x)=0. \tag{7}$$

令 $r^2=k/E_rI_r$，$\omega(x)=e^{\lambda x}$ 代入式(4)中可得：

$$\lambda^4+r^2=0, \tag{8}$$

求特征根得：

$$\lambda=\pm\alpha\pm i\alpha,\ \alpha=\left(\frac{k}{4E_rI_r}\right)^{1/4}, \tag{9}$$

式中：λ 为该四阶常微分方程对应的复数特征根，m^{-1}；α 为弹性地基梁的柔度特征值，m^{-1}.

则式(4)的通解 $\omega_h(x)$ 为：

$$\omega_h(x)=e^{\alpha x}(A_1\cos\alpha x+A_2\sin\alpha x)+e^{-\alpha x}(A_3\cos\alpha x+A_4\sin\alpha x), \tag{10}$$

式中：A_1，A_2，A_3，A_4 为方程通解的待定系数.

对于式(4)所描述的非齐次线性微分方程，其通解由齐次方程的通解与非齐次方程的任意一个特解叠加构成：

$$\omega(x)=\omega_h(x)+\omega_p(x). \tag{11}$$

将式(6)与式(10)代入可得：

$$\omega(x)=\frac{q}{k}+e^{\alpha x}(A_1\cos\alpha x+A_2\sin\alpha x)+e^{-\alpha x}(A_3\cos\alpha x+A_4\sin\alpha x). \tag{12}$$

在远离工作面的非采动影响区，采动引起的顶板弯曲效应已消失，煤岩体回归原岩应力状态，产生近似均匀的竖向压缩变形. 因此，该处挠度最终收敛于上覆岩层压力所引起的均匀压缩量. 即当 x 趋于负无穷时，$\omega(x)$ 应等于常数 C. 由于 α 为正数，为满足这一边界条件，式(12)中待定系数 A_3 和 A_4 必须为零，则可得：

$$\omega(x)=\frac{q}{k}+e^{\alpha x}(A_1\cos\alpha x+A_2\sin\alpha x). \tag{13}$$

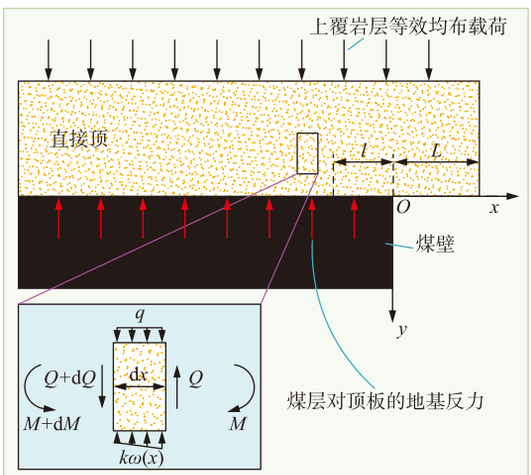
若煤壁前方悬露直接顶长度为 L，则根据悬臂梁理论可知此时悬臂段在煤壁截面($x=0$)处的截面内力：

$$M_0=\frac{qL^2}{2},\qquad Q_0=qL. \tag{14}$$

式中：M_0 为悬露直接顶在煤壁截面处产生的初始弯矩，kN·m；Q_0 为悬露直接顶在煤壁截面处施加的初始剪力，kN.

则可得挠度方程为：

$$\omega(x)=\frac{q}{k}+e^{\alpha x}\left[\left(\frac{qL^2}{4E_rI_r\alpha^2}-\frac{qL}{2E_rI_r\alpha^3}\right)\cos\alpha x+\frac{qL^2}{4E_rI_r\alpha^2}\sin\alpha x\right]. \tag{15}$$



注：l 为采动作用下煤壁前方实体煤的受载影响范围；L 为采空区直接顶的悬露长度.

图5 基于Winkler地基的顶板悬臂梁力学模型

Fig. 5 Cantilever-beam mechanical model of the roof based on a Winkler foundation

2.2 采场支承压力与顶煤缓冲吸能机理

基于Winkler地基假设，顶板的挠度与煤层的地基反力强度呈线性关系，根据直接顶挠度，可计算煤层对直接顶的地基反力强度，计算公式为：

$$p(x)=k\omega(x), \tag{16}$$

式中：$p(x)$ 为煤层在 x 处对直接顶的地基反力强度，kN/m.

对 $p(x)$ 沿 $-x$ 方向积分即可得到煤壁前方 l 范围内煤层对直接顶的反力合力为：

$$F_l=\int_{-l}^{0}p(x)dx, \tag{17}$$

式中：l 为煤壁前方被直接顶所影响范围，m；F_l 为煤壁前方被直接顶所影响区域所受的上覆岩层总压力，kN.

依据牛顿第三定律，直接顶作用于煤层的力与煤层对直接顶的地基反力合力大小相等、方向相反，故工作面前方影响区煤体所受界面合力为 $-F_l$. 为简化计算，将煤壁前方实体煤、支架上方顶煤及工作面液压支架等效为不同刚度的弹性弹簧，如图6所示.

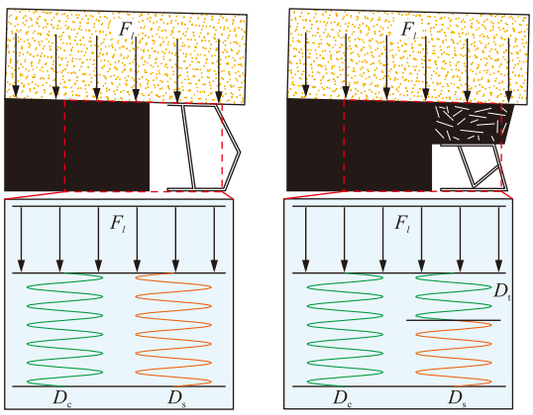


图 6　不同开采工艺下工作面支承单元等效弹簧模型

Fig. 6　Equivalent spring model for working face support units under different mining technologies

开采过程中，上覆岩层向下传递的荷载主要由煤壁前方受支承压力作用的煤体承担，此时煤壁前方 l 范围内完整煤体在直接顶作用下的压缩量为：

$$S_c=\frac{F_l}{D_c}, \tag{18}$$

式中：S_c 为煤层由于直接顶压力导致的平均变形量，m；D_c 为煤体的平均刚度，kN/m.

根据变形相容原理，在接触连续、无滑移的条件下，连接部位的位移与转角应保持一致，即可认为前方煤体的压缩量等于支架压缩量与顶煤压缩量之和[26]，其表达式为：

$$S_c=S_t+S_s, \tag{19}$$

式中：S_t 为顶煤压缩量，m；S_s 为支架压缩量，m.

综放开采时，破碎顶煤与支架在竖向受压中构成串联结构；按静力平衡，力在传递过程中大小不变，故两者承受的竖向力相同，则破碎煤层变形量与支架压缩量满足下列关系：

$$D_tS_t=D_sS_s, \tag{20}$$

式中：D_t 为顶煤刚度，kN/m；D_s 为支架刚度，kN/m.

将式(20)代入式(19)中，可得：

$$S_c=\frac{D_tS_t}{D_s}+S_t. \tag{21}$$

$$S_t=\frac{D_sS_c}{D_t+D_s}. \tag{22}$$

若将此时的煤体与液压支架均视为弹性体，根据功－能关系，弹性体在外力作用下所积聚的弹性应变能 W 的表达式为：

$$W=\frac{1}{2}DS^2, \tag{23}$$

式中：D 为弹性体等效刚度，kN/m；S 为弹性体在外力作用下的压缩变形量，m.

则可求出破碎顶煤所吸收的能量 W_t 为：

$$W_t=\frac{D_tD_s^2S_c^2}{2(D_t+D_s)^2}. \tag{24}$$

根据能量守恒理论，上覆岩层下沉释放的势能，一部分转化为煤体弹塑性变形的应变能，一部分用于煤体自身的破碎和产生新裂隙的表面能，还有一部分以热能等其他方式被耗散. 当工作面采用综放开采时能量平衡方程可表示为：

$$W_g=W_c+W_f+W_h, \tag{25}$$

式中：W_g 为上覆岩层下沉所释放的重力势能，kJ；W_c 为煤体受顶板作用所积聚的弹性应变能，kJ；W_f 为部分岩体自身破碎产生裂隙的表面能，kJ；W_h 为在采动过程中以热能、声能等形式释放的能量，kJ.

在弹性体中，单位体积储存的应变能，与该点应力的平方成正比，与材料弹性模量的两倍成反比，则可假设煤体中积聚的总弹性应变能可由工作面超前支承压力峰值点的应变能等效表征，即满足如下关系：

$$W_c\propto\zeta\frac{\sigma_c^2}{2E_c}, \tag{26}$$

式中：σ_c 为工作面超前支承压力峰值，MPa；ζ 为峰值点的应变能与煤体总积聚弹性能之间的系数，m^2；E_c 为煤层等效弹性模量，MPa.

工作面综放开采时，顶煤作为可压缩松散体，在压实过程中能够吸收部分上覆岩层传递给煤体中的弹性能，因而减少煤体中总积聚的能量，表达式为：

$$W_c'=W_c-W_t, \tag{27}$$

式中：W_c' 为综放开采时煤层的弹性能，kJ.

则综放开采时煤体内超前支承压力峰值为：

$$\sigma_c'=\sqrt{\sigma_c^2-\frac{2E_c\cdot\eta\cdot W_t}{\zeta}}, \tag{28}$$

式中：σ_c' 为综放开采超前支承压力峰值，MPa；η 为顶煤破碎吸能对前方煤体总积聚弹性能的有效折减系数，无量纲.

综采工作面推进过程中，回采扰动使煤层原位应力场重新分配，随着距工作面距离的增加，应力起初显著增大至峰值 $K_\sigma\gamma H$，然后减小，最后趋于原岩应力[27-28]，如图 7 所示.

则可知：

$$\sigma_c=K_\sigma\gamma H, \tag{29}$$

式中：K_σ 为应力集中系数，取决于地质与采场条

件，无量纲；γ 为上覆岩层平均容重，kN/m^3；H 为埋深，m.

$$\sigma_c'=\sqrt{(K_\sigma\gamma H)^2-\left[ql+\int_{-l}^{0}k\mathrm{e}^{\alpha x}\left[\left(\frac{qL^2}{4E_rI_r\alpha^2}-\frac{qL}{2E_rI_r\alpha^3}\right)\cos\alpha x+\frac{qL^2}{4E_rI_r\alpha^2}\sin\alpha x\right]\mathrm{d}x\right]^2\frac{E_c\eta D_tD_s^2}{\zeta D_c^2(D_t+D_s)^2}}. \quad (30)$$

对比式(30)与式(29)，可发现顶煤作为“垫层”的缓冲效应受到多种因素影响，若将顶煤在压缩破碎阶段因能量释放而诱发的工作面支承压力峰值演变效应整体表征为 Φ，则式(30)可变为：

$$\sigma_c'=\sqrt{\left(K_\sigma\gamma H\right)^2-\Phi}, \quad (31)$$

式中：Φ 为顶煤缓冲因子，$\left(\mathrm{kN/m^2}\right)^2$.

式(31)表明顶煤不仅能作为应力传递介质，也可视为具备耗能特性的力学结构体. 顶煤缓冲因子 Φ 量化了顶煤损伤破碎对工作面超前支承压力峰值的具体影响. 综放开采中近场坚硬岩层弯曲破断所释放的弹性能被顶煤以自身破碎的塑性功与表面能所部分耗散，从而限制了其向煤壁前方传递，在源头上降低了工作面超前支承压力峰值. 而当埋深较大时，顶煤所耗散缓冲的弹性能对于缓解工作面矿压显现变得尤为重要，从而解释了营盘壕煤矿 2215综采工作面与2102综放工作面在相近埋深条件下动力显现产生明显差异的现象.

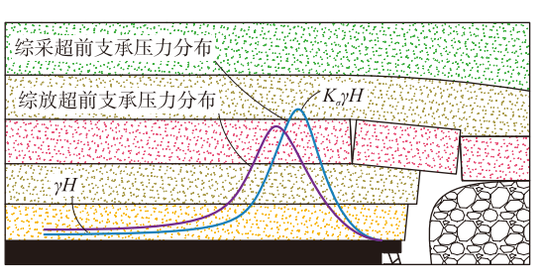


图 7 不同开采工艺下超前支承压力分布形态对比示意

Fig. 7 Schematic comparison of front abutment stress distribution patterns under different mining technologies

3 不同埋深下不同采煤工艺颗粒流数值分析

放顶煤开采坚硬煤层时，顶煤通常表现出较高的硬度、强度及强整体性，其破坏与垮落是在高应力作用下，由连续整体逐渐失稳，内部裂隙充分发育并最终演化为非连续破碎块体的复杂力学过程. 一般有限元软件在分析完整岩体的应力、位移演变规律时是有效的，但在处理大规模破裂以及破裂后块体间的复杂交互问题时则面临困难. 基于离散单元法(DEM)的颗粒流程序 PFC 能够从细观尺度上模拟材料的破裂演化，并自然地处理颗粒间的位移、旋转与分离. 通过在颗粒间建立可断裂的黏结模型，PFC 能够再现岩体从微观损伤到宏观破裂的渐进性破坏过程，并揭示其宏观力学响应背后的细观机制. 鉴于此，本文采用 PFC 软件构建数值模型，对不同埋深条件下不同工艺采场的应力场与能量场演化特征进行深入分析.

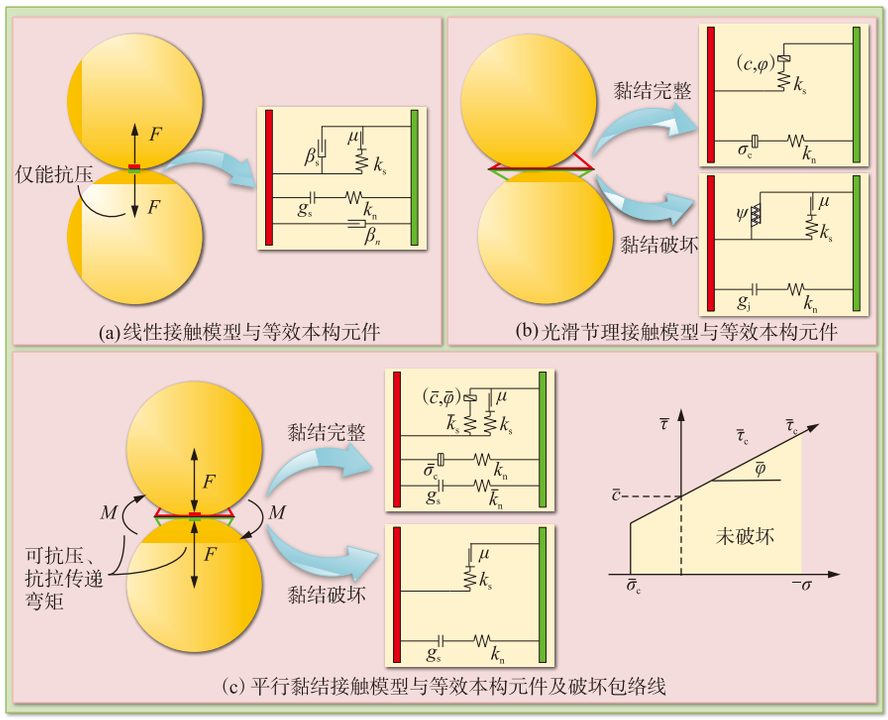
3.1 数值计算模型与本构关系

PFC 中，颗粒间的接触模型是实现对不同材料力学特性模拟的关键. 当颗粒间的接触为线性模型时，其力学性质主要由法向和切向刚度定义，如图 8a 所示. 法向接触力为法向重叠量与法向刚度的乘积，而切向接触力则根据相对剪切位移进行增量式累加，并受库仑摩擦定律制约. 该模型下颗粒间不具备抗拉能力，仅能通过摩擦传递压应力和剪应力.

平行黏结模型在线性接触的基础上，额外施加了一层类似“胶结物”的平行黏结(如图 8c 所示)，使得颗粒集合体表现为具有抗拉强度和内聚力的固结整体[29]. 该黏结具有法向和切向的刚度与强度等参数，能够传递力、弯矩和扭矩. 当作用于黏结上的最大拉应力或最大剪应力超过其抗拉强度或抗剪强度极限时，黏结便会发生断裂，其承载能力便完全丧失，颗粒间的相互作用退化为线性接触.

光滑节理模型则用于模拟岩体中已存在的节理、断层等软弱结构面. 如图 8b 所示，该模型在颗粒集合体中定义了一个虚拟的光滑平面，其力学行为由独立的黏聚力、摩擦角等参数控制. 当作用于该平面上的应力超过其强度时，节理便会发生张开或剪切滑移. 这使得模型能在保持岩石基质完整性的同时，有效模拟沿软弱面的优先破坏行为.

综上所述，本数值模型采用平行黏结与光滑节理模型共同构建. 平行黏结模型用于模拟煤岩体，通过设定不同参数及黏结强度区分各岩层，并再现其破裂及破碎后块体间的咬合行为. 光滑节理模型则设置于岩层接触面，用以模拟层间的相对滑移. 二者结合，即可模拟综放开采中岩层破断、垮落与层间滑移等关键力学行为.



注：F 与 M 分别为颗粒间传递的合力与弯矩；k_n 与 k_s 分别为接触法向刚度与切向刚度；β_n 与 β_s 分别为法向与切向临界阻尼比；g_s 为表面间隙；μ 为摩擦系数；σ_c 为节理抗拉强度；c 为黏聚力；φ 为内摩擦角；g_j 为节理间隙；ψ 为剪胀角；$\bar{k}_n$ 与 $\bar{k}_s$ 分别为平行黏结法向刚度与切向刚度；$\bar{\sigma}_c$ 为黏结抗拉强度；$\bar{c}$ 为黏结黏聚力；$\bar{\varphi}$ 为黏结内摩擦角；$\bar{\tau}$ 与 $-\sigma$ 分别为黏结面上的剪应力与法向应力.

图 8　PFC 颗粒接触模型及等效本构原理

Fig. 8　PFC contact model and equivalent constitutive law

3.2　模型构建与模拟方案设计

利用 PFC 颗粒流软件建立采场模型，模型尺寸为 800 m×120 m（长×高），颗粒最小粒径为 0.24 m，最大粒径为 0.4 m，孔隙率为 0.15，共生成 247 911 个颗粒. PFC 作为一种非连续介质方法，其本构关系建立在颗粒间的微观接触力学之上，因此无法直接应用宏观物理力学参数. 为建立宏观与微观尺度间的联系，本研究依据相关文献中的经验公式[30-32]，基于已知的岩层物理力学参数反演确定模型所需的微观参数组合，结果如图 9 所示.

序号	岩性	岩层	岩层厚度/m	接触模量/GPa	法向与切向刚度之比	平行黏结模量/MPa	平行黏结刚度之比	平行黏结法向强度/MPa	平行黏结切向强度/MPa
7	砂质泥岩与砂岩互层		24	2.81	1.79	2.81	1.79	2.44	3.97
6	砂岩组		38	5.78	1.95	5.78	1.95	6.53	10.61
5	砂质泥岩		8	2.79	1.72	2.79	1.72	2.35	3.81
4	中粒砂岩		20	6.59	1.72	6.59	1.72	5.44	8.84
3	粉砂岩		14	6.79	1.58	6.79	1.58	4.57	7.43
2	2-2煤层		6	1.98	1.65	1.98	1.65	2.13	3.47
1	粉砂岩		10	6.79	1.58	6.79	1.58	4.57	7.43

图 9　微观颗粒接触参数

Fig. 9　Micro-contact parameters of particles

图 10 展示了模型建立的具体流程与模拟方案. 在确定微观参数后，依据现场地层结构生成具备不同力学参数的岩层模型. 随后，按照岩层顺序将各岩层模型组合，不同岩层间颗粒接触模型设置为光滑节理模型，并在模型底部及左右两侧设置刚性墙体作为位移边界条件；在模型顶部设置具备向下伺服功能的墙体，通过控制伺服力的大小，实现对不同埋深条件下原岩应力的还原. 当模型内部不平衡力收敛至 1.0×10^{-5} 以下时，即获得不同埋深下地应力平衡的整体模型.

为分析不同开采工艺对采场围岩应力场与能量场演化特征的影响，分别设计了综采与综放2种开采工艺的模拟方案．综采模拟通过程序删除开挖区域的煤层颗粒实现，综放模拟过程中仅开采煤层下部区域，煤层开挖厚度为3.0 m，并在工作面煤壁位置加设具有一定刚度和承载能力的支架，支架高度与开挖厚度一致，为3.0 m，且该液压支架随着煤层开采可自动前移．在此基础上，分别在埋深为300，400，500，600，700以及800 m的模型中模拟采动岩层破断运动特征．2种开采工艺均采用分步开挖，循环开挖步距为20 m，待模型计算至再次平衡后，再进行下一步开挖，共计开挖10次，累计由模型的300 m处推进至500 m处，共200 m．

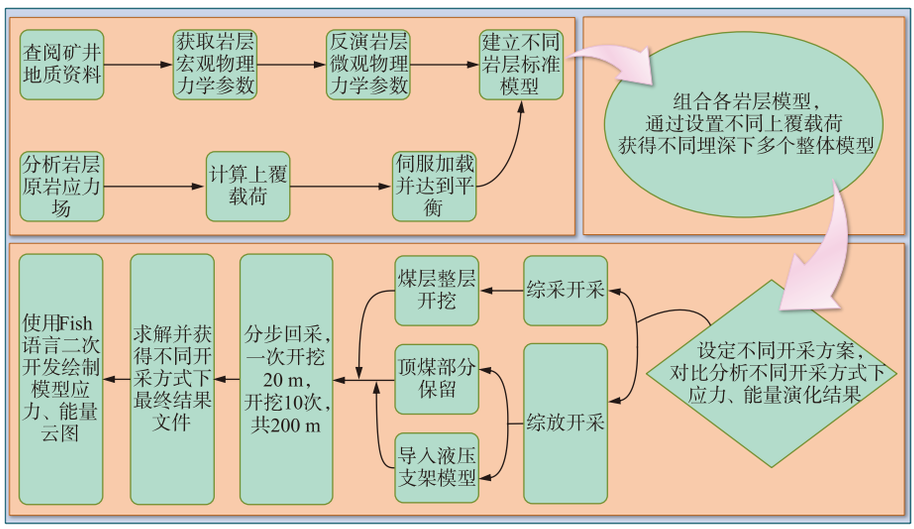


图10　数值模型建立与模拟方案设计流程

Fig. 10　Flow of numerical model construction and simulation scheme design

不同开采工艺下采场覆岩破坏特征如图11所示，煤层开挖后，采空区上方岩层应力状态发生改变，直接顶在拉、剪应力的作用下，先后萌生多条裂隙．随着工作面的持续推进，裂隙不断扩展并贯通，导致直接顶发生周期性垮落，垮落岩体堆积并填充采空区，形成冒落带．直接顶上方岩层同样表现出整体弯曲下沉的趋势，与高位坚硬岩层之间发生了显著的不协调变形，从而形成了大范围的离层．

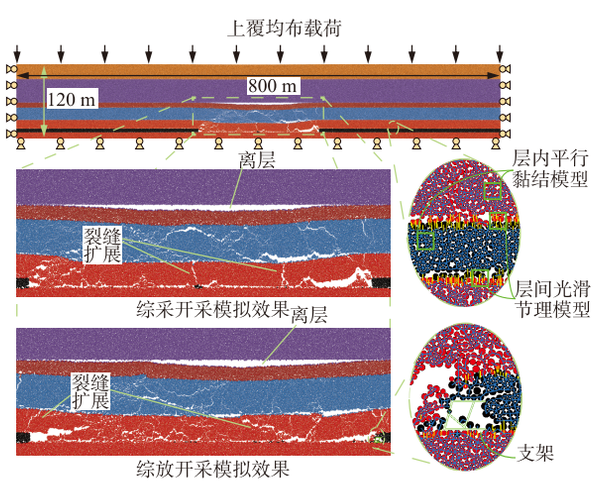


图11　不同开采工艺下采场覆岩破坏特征模拟结果对比

Fig. 11　Comparison of simulated overburden failure characteristics under different mining technologies

对比不同开采工艺下模拟的结果可发现，在综放开采过程中，顶煤作为直接顶与采空区之间的过渡区域，有效充当了能量缓冲层．当直接顶岩层发生周期性破断和下沉时，应力通过接触传递至顶煤，进而传递至采空区或底板岩层，期间释放的巨大动能在顶煤的变形、破裂及逐步垮落过程中所耗散，从而使矿压显现强度有所缓和．

3.3　不同埋深下不同工艺采场应力与能量演化特征

图12展示了埋深为300～800 m条件下，综采与综放2种工况在模型走向300～600 m范围内的垂直应力分布特征．随着埋深从300 m逐渐增加至800 m，模型整体应力呈现出递增趋势．工作面开挖后，模型走向300～500 m范围内的采空区形成了明显的卸压区，垂直应力显著降低；在不同埋深下，综放开采模型走向约500 m处均出现一定的应力集中，这是因为在综放开采模拟中引入了液压支架模型，上覆载荷除向工作面前方传递外，还有部分通过接触力链传递至顶煤与支架，产生了小范围的应力集中．

2种工艺工作面超前支承压力峰值均随埋深增加而不断增大，但综放工作面超前支承压力的增加趋势相对于综采工作面呈现出不断减缓趋势，如

图 13 所示．当埋深为 300，400 和 500 m 时，综采工作面峰值应力分别为 15.9，19.4，23.0 MPa，综放工况则分别为 14.5，18.2，21.3 MPa，此时综放工况工作面峰值压力约为综采的 91.2%～93.8%，工作面峰值压力最大降低量为 1.7 MPa．随着埋深进一步从 600 m 增加至 800 m，综采工作面峰值应力迅速分别升至 27.5，30.5 和 34.7 MPa，而综放工况对应值分别为 24.7，26.8 及 30.6 MPa，其与综采工况的对应值比例降至 87.9%～89.9%，最大降低 4.1 MPa．

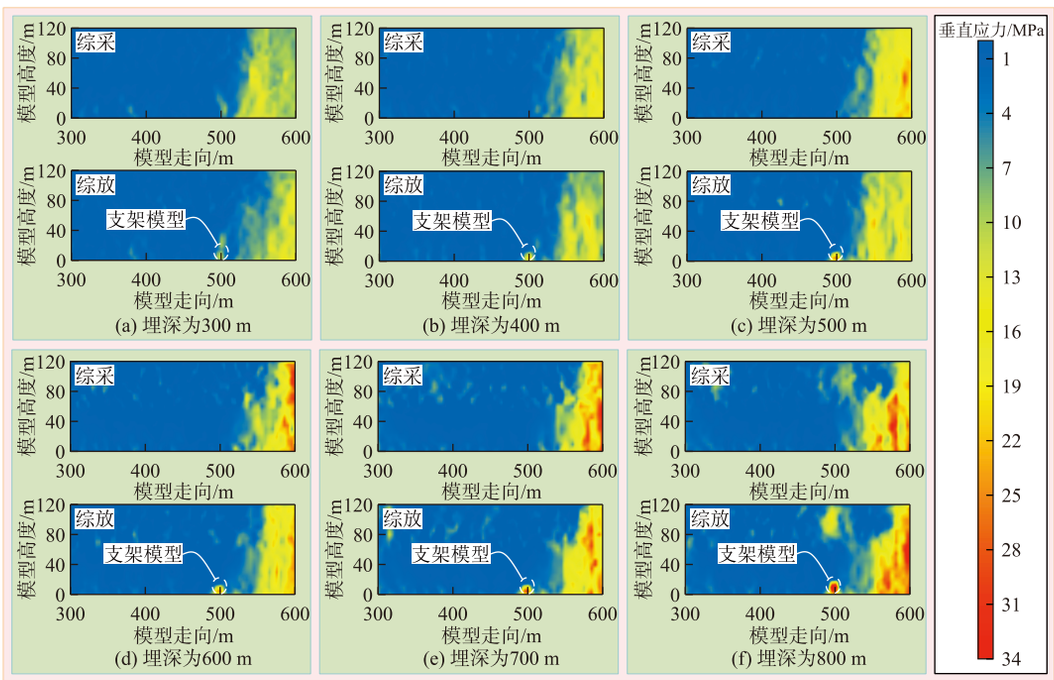


图 12　不同埋深与开采工艺下采场垂直应力分布云图

Fig. 12　Contours of vertical stress distribution at the working faces under different burial depths and mining technologies

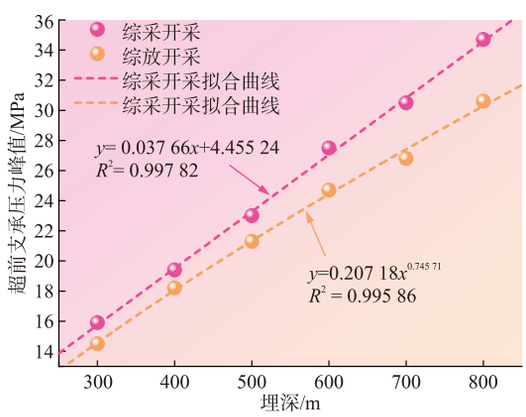


图 13　不同开采工艺下超前支承压力峰值随埋深变化规律

Fig. 13　Variation law of peak advanced abutment pressure with burial depth under different mining technologies

为深入探究不同工艺下采场围岩能量演化规律，通过 Fish 程序提取了模型中的弹性应变能数据．图 14 展示了不同埋深下不同开采工艺工作面能量场分布特征．从垂直分层上看，高位的坚硬岩层作为覆岩载荷的主要承载结构，其内部积聚了绝大部分的弹性应变能，且随着埋深的增加，岩层的能量水平不断升高；与之相对，直接顶岩层的能量水平显著降低，表明该层位下岩层在煤层开挖后已发生破断、垮落，大部分弹性能已经释放．

鉴于图 14 中不同岩层区域在能量演化模式上的显著差异，可将模型走向 500～600 m 范围与模型高度 10～30 m 范围超前工作面的煤层与直接顶视为近场区域，将模型走向 300～600 m 范围与模型高度 60～95 m 范围的高位坚硬岩层视为远场区域[9]．图 15 为不同埋深下模型走向 300～600 m 范围内，不同工作面远、近场区域内积聚的总弹性能变化曲线．针对远场区域，由于采场开采并未改变高位坚硬岩层的整体承载结构，其积聚的弹性能主要受埋深主导，呈现出稳定增长趋势，且不同开采工艺下的数值高度接近．当埋深由 300 m 增加至 800 m 时，综采远场总弹性能依次为 3.26，4.76，6.55，8.57，10.80 及 13.60 MJ；同等条件下，综放远场对应数值分别为 2.92，4.43，6.07，8.04，10.20 及 12.40 MJ，其与综采远场对应数值的比例稳定在 89.57%～94.44% 之间，表明远场能量积聚水平与开采工艺相关性较弱．

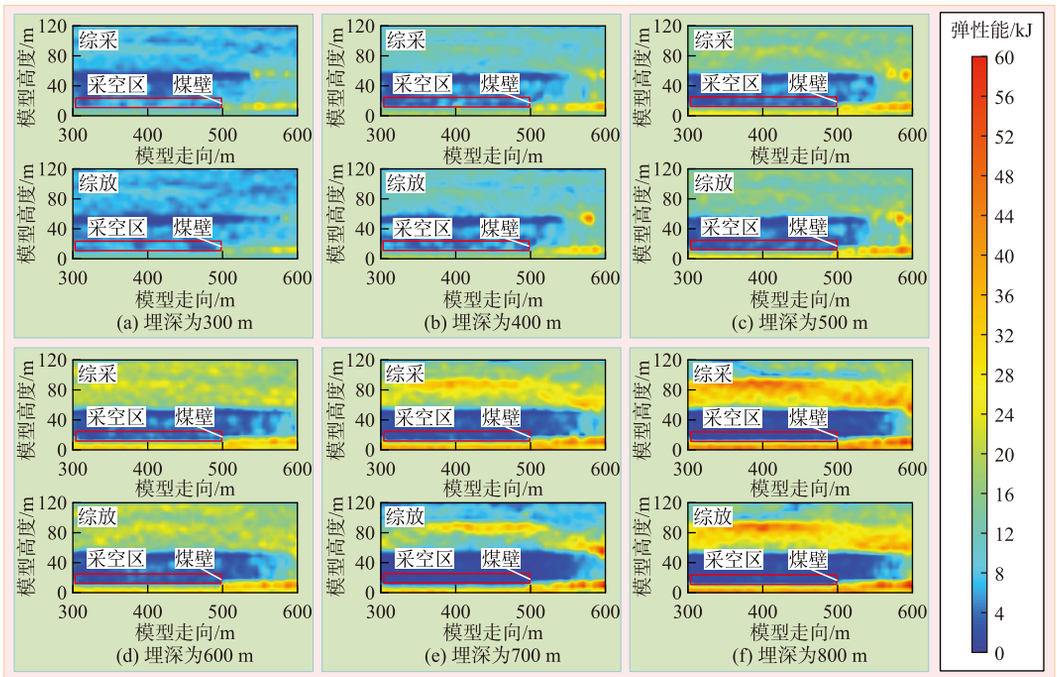


图 14 不同埋深与不同开采工艺下采场弹性能分布云图

Fig. 14 Contours of elastic energy distribution at the working faces under different burial depths and mining technologies

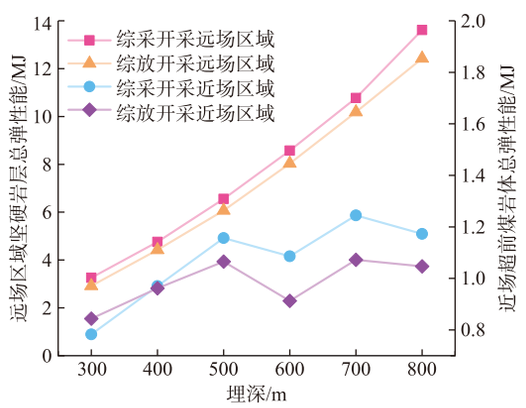


图 15 远-近场区域积聚总弹性能随埋深变化规律

Fig. 15 Variation of total accumulated elastic energy in the far- and near-field regions with cover depth

然而,近场区域在垂直应力增加以及顶煤损伤耗能共同影响下,表现出明显的非线性波动特征,具体数据如表 1 所示. 在 300 m 浅埋深阶段,2 种工艺工作面近场区域总积聚弹性能水平相近;随着埋深增加至 400 m 与 500 m,2 种工艺工作面近场区域总积聚弹性能同步增加,且综放工作面总弹性能均低于综采工作面;而在 600,700 及 800 m 的深部范围,2 种工艺工作面近场区域总积聚弹性能表现出较大的波动性,此时顶煤在上覆岩层作用下不断破碎滑落,耗散大量弹性应变能,导致综放工作面总弹性能均明显低于综采工作面.

表 1 不同埋深下综采、综放工作面近场区域总弹性能对比

Table 1 Comparison of total elastic energy in the near-field regions of FMM and FMTCC working faces under different burial depths

埋深/m	工作面近场区域总弹性能/MJ		综放与综采总能量之比/%
	综采	综放	
300	0.78	0.84	107.69
400	0.97	0.96	98.97
500	1.16	1.07	92.24
600	1.09	0.91	83.49
700	1.24	1.07	86.29
800	1.17	1.05	89.74

综上所述,综放开采会使工作面超前峰值压力与近场总积聚弹性能水平出现不同程度的降低:当埋深较浅时,开采工艺造成的差异不显著,影响效果较小;当埋深达到 600 m 及以上时,高地压环境显著放大了综放开采的顶煤缓冲与能量耗散效应,综放工作面超前峰值压力明显低于综采工作面. 同时,高地压下的煤岩体损伤破坏加剧,综放工作面近场积聚的弹性能较综采工作面也显著降低,进一步体现了综放开采在深部动力灾害防控中的独特优势.

3.4　基于弹性应变能释放量的动载危险性评价

近场厚硬顶板破断运动将先前储存的弹性应变能快速释放是冲击荷载传递的能量源头，查明弹性应变能释放量大小是科学评价采动岩层破断运动动载危险能大小的先决条件．为此，本文采用滑动窗口的方法对工作面近场坚硬岩层弹性应变能变化特征进行分块提取．即按照 20 m 一块，总模型长度 800 m，共 40 块能量计算窗口，提取了工作面不同采位时各个能量窗口的弹性应变能总量，同时提取上一个采位时相同计算窗口的弹性应变能，后者减去前者得出每一个能量计算窗口的差值．若该差值大于零，则表明上一采位到当前采位过程中，该区位岩层中能量处于积聚状态；若该差值小于零，则表明上一采位到当前采位过程中，该区位最初积聚的弹性应变能释放．据此可以得到近场岩层中不同位置弹性应变能的分区特性与动态演化规律．因此，该弹性应变能释放量可作为量化指标，对动载冲击危险性进行评价．

受篇幅所限，论文以 60，120，180 m 这 3 个采位为代表，对比分析综采与综放 2 种工艺下近场岩层内部不同能量计算窗口中弹性应变能释放量分布特征，如图 16 所示．

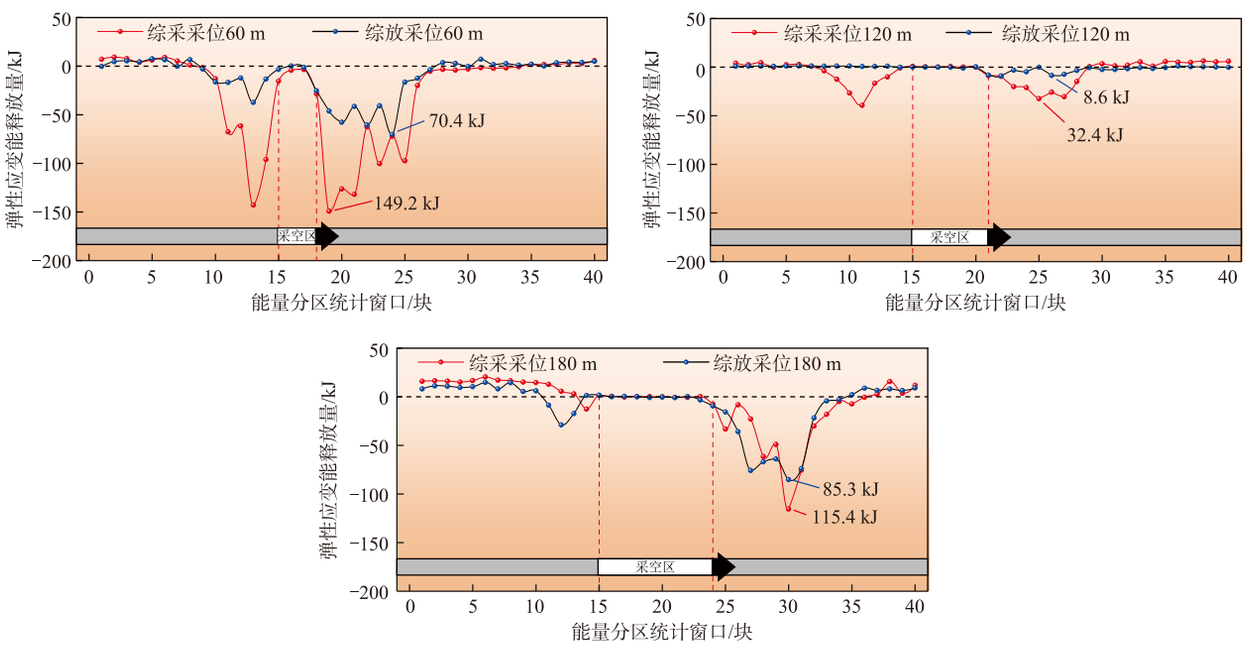


图 16　综采与综放工艺下近场岩层断裂释能差异

Fig. 16　Differences in fracture energy release of near-field strata under fully mechanized mining and fully mechanized top-coal caving

由图 16 可知，采位为 60，120，180 m 时，综放开采工艺下近场岩层断裂应变能释放量显著低于综采工艺，能量释放量峰值分别由 149.2，32.4，115.4 kJ 缩减至 70.4，8.6，85.3 kJ，降低幅度分别达到 52.8%，73.5%，26.1%．因此，从岩层断裂释能角度而言，综放工艺可从源头一定程度上削减近场岩层断裂释放能量，加之顶煤破碎流动对断裂释能的消耗与吸纳作用，会进一步弱化工作面动力显现．

4　矿井微震监测数据实测验证

工作面微震事件响应情况能直观反映采动围岩的能量释放强度与动力响应特征[33]，基于前文的研究可知，综放开采中顶煤的垫层缓冲作用是缓解深部高应力集中与降低弹性能积聚的关键因素．本节基于鄂尔多斯营盘壕煤矿 2215 综采工作面与 2102 综放工作面以及石拉乌素煤矿 12 北 1 综采工作面与 1219 综放工作面现场微震事件监测数据开展对比研究；石拉乌素煤矿 12 北 1 工作面与 1219 工作面具有相似地质条件且煤厚接近，但采取了不同开采工艺．围绕工作面推进过程中初次来压、单见方和双见方 3 个关键时期，对 2 种工艺工作面微震能量特征进行量化分析对比，结果如图 17 所示．

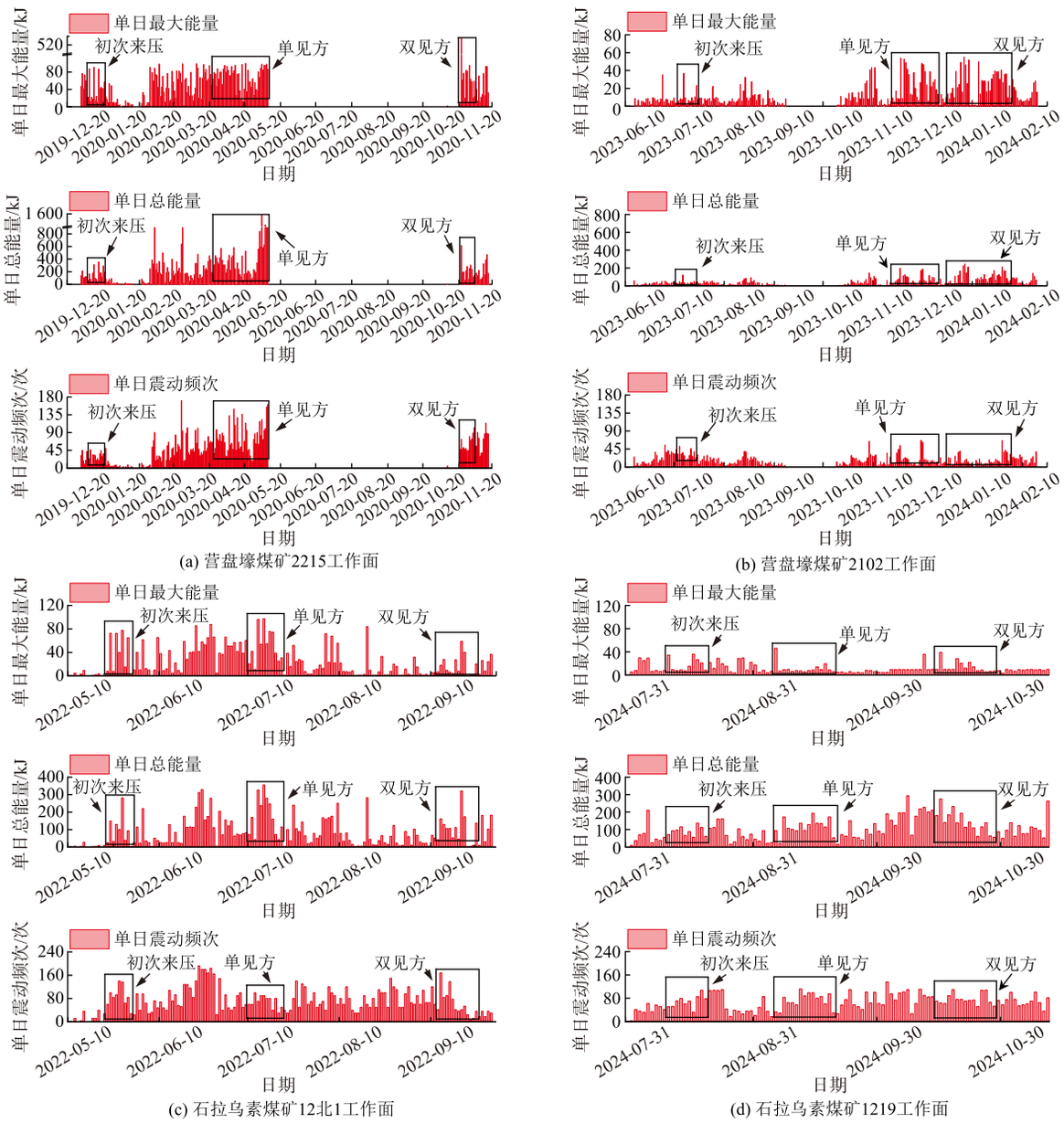


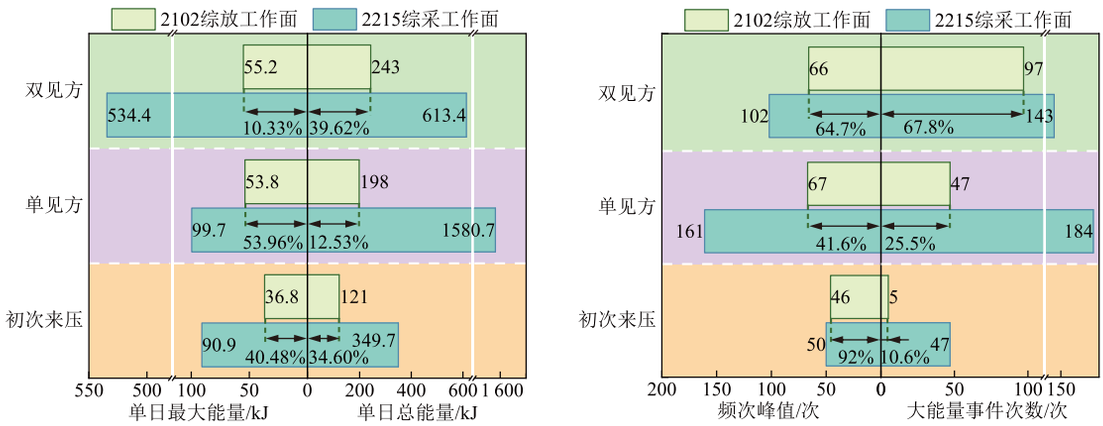
图 17 营盘壕、石拉乌素两矿井微震事件特征

Fig. 17 Characteristics of microseismic events at Yingpanhao and Shilawusu coal mines

4.1 营盘壕煤矿微震响应特征

针对营盘壕煤矿的监测数据显示，2215综采工作面在初次来压、单见方及双见方3个关键时期表现出极高的能量释放水平，其微震事件单日最大能量峰值分别达到90.9，99.7与534.4 kJ，对应的单日总能量峰值也高达349.7、1580.7与613.4 kJ. 相比之下，2102综放工作面在对应时期的能量释放强度显著降低，其单日最大能量峰值仅为36.8、53.8和55.2 kJ，单日总能量峰值仅为121、198和243 kJ. 如图18a对比所示，2102综放工作面3个时期的单日最大能量与总能量峰值分别仅为2215综采工作面的40.48%与34.60%(初次来压)、53.96%与12.53%(单见方)，以及10.33%与39.62%(双见方).

统计营盘壕及石拉乌素两矿井多个工作面在不同时期的大能量事件(能量>10 kJ)发生次数，结果如表2所示. 2215综采工作面在前述3个时期的单日震动频次峰值依次为50，161，102次，大能量事件分别发生了47，184，143次. 2102综放工作面的震动频次则明显减少，其单日震动频次峰值降至46，67，66次，对应的大能量事件发生次数大幅减少为5，47，97次. 如图18b对比所示，3个时期2102综放工作面的单日震动频次峰值仅为综采工作面的92.0%，41.6%，64.7%，而大能量事件发生次数对应比例更低，分别为10.6%，25.5%，67.8%.



(a) 微震能量峰值对比　　(b) 微震事件频次与大能量事件次数对比

图 18　营盘壕煤矿各时期微震活动特征对比

Fig. 18　Comparison of microseismic activity characteristics at different stages of Yingpanhao coal mine

表 2　营盘壕、石拉乌素两矿井大能量事件发生次数

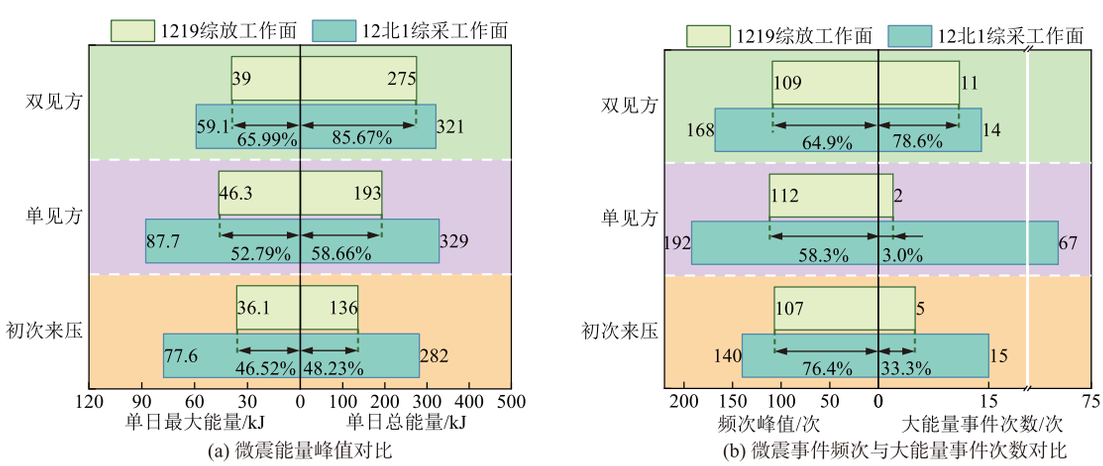
Table 2　Number of high-energy events at Yingpanhao and Shilawusu coal mines

矿井	工作面	不同时期大能量事件发生次数/次		
		初次来压	单见方	双见方
营盘壕	2215	47	184	143
	2102	5	47	97
石拉乌素	12北1	15	67	14
	1219	5	2	11

4.2　石拉乌素煤矿微震响应特征

石拉乌素煤矿的微震响应规律与营盘壕煤矿高度一致. 12北1综采工作面在初次来压、单见方及双见方期间积聚了大量弹性能，单日最大能量峰值依次达到 77.6，87.7 与 59.1 kJ，单日总能量峰值分别为 282，329 与 321 kJ. 而 1219 综放工作面的能量水平大幅下降，其单日最大能量峰值仅为 36.1，46.3 和 39.0 kJ，单日总能量峰值依次为 136，193 和 275 kJ. 如图 19a 对比所示，3 个时期 1219 综放工作面的单日最大能量与总能量峰值分别为 12北1综采工作面的 46.52% 与 48.23%（初次来压）、52.79% 与 58.66%（单见方），以及 65.99% 与 85.67%（双见方）.

进一步分析频次特征可知，12北1综采工作面在前述 3 个关键时期的单日震动频次峰值分别为 140，192，168 次，大能量事件次数为 15，67，14 次. 而 1219 综放工作面的单日震动频次峰值下降至 107，112，109 次，大能量事件仅分别发生 5，2，11 次. 如图 19b 对比所示，3 个时期（初次来压、单见方、双见方）1219 综放工作面的单日频次峰值分别为 12北1综采工作面的 76.4%，58.3% 与 64.9%，而大能量事件次数的占比分别为 33.3%，3.0% 与 78.6%.



(a) 微震能量峰值对比　　(b) 微震事件频次与大能量事件次数对比

图 19　石拉乌素煤矿各时期微震活动特征对比

Fig. 19　Comparison of microseismic activity characteristics at different stages of Shilawusu coal mine

综合营盘壕与石拉乌素两矿井的微震监测数据可知，综放开采在深部工作面开采过程中表现出一致且显著的动力灾害抑制能力. 综放工作面在初次来压以及单、双见方期间，均呈现出“低能级、低频次”特征，其单日能量峰值与大能量事件发生频次普遍大幅低于同等条件下的综采工作面.

5 结 论

1)基于顶煤缓冲效应下采场支承压力理论模型分析表明,顶煤作为具有耗能特性的力学结构体,在综放开采过程中可通过自身损伤破坏吸收并耗散近场岩层弯曲破断时的弹性能,从而限制了其向煤壁前方传递,在源头上降低了工作面超前支承压力峰值,平缓了工作面动力显现.

2)颗粒流模拟在300~800 m埋深范围获得的对比结果与现场认识基本一致.相同埋深条件下,综放工作面的超前支承压力峰值普遍降为综采面的87.9%~93.8%;多方案对比研究发现,远场高位坚硬岩层的能量积聚主要受埋深控制,与开采工艺相关性较弱,而近场区域则对开采工艺高度敏感.

3)深部厚煤层条件下,开采工艺对工作面前方能量演化影响显著.相较于综采,综放开采时近场厚硬岩层不同区位弹性应变能释放量显著降低,采位分别为60,120与180 m时能量释放量峰值由149.2,32.4,115.4 kJ缩减至70.4,8.6,85.3 kJ,降低幅度分别达到52.8%,73.5%,26.1%.营盘壕与石拉乌素两矿井的微震监测数据一致表明,综放工作面在初次来压、单见方与双见方阶段微震活动强度受到明显抑制,其单日最大能量与总能量峰值普遍降至同等条件下综采工作面的10.33%~65.99%与12.53%~85.67%,且大能量事件发生频次最高缩减了97%.

4)综合理论推导、数值分析与现场监测结果可知,当埋深达到或超过600 m时,综采工作面超前支承压力峰值与近场总弹性能将急剧增加,导致冲击地压危险性大幅升高;相较之下,综放开采时顶煤的缓冲与调节作用使近场应力与能量响应更为平稳,显著降低了工作面微震事件频率与能量峰值.在埋深超过600 m的深部厚煤层开采中,应优先选用综放工艺以实现对动力灾害的源头防控,从而保障工作面的安全高效生产.

参考文献:

[1] 潘一山,齐庆新,窦林名,等.冲击地压工程学[M].北京:高等教育出版社,2022.
PAN Yishan, QI Qingxin, DOU Linming, et al. Rock burst engineering[M]. Beijing: Higher Education Press, 2022.

[2] XIE H P, JU Y, REN S H, et al. Theoretical and technological exploration of deep in situ fluidized coal mining[J]. Frontiers in Energy, 2019, 13(4): 603-611.

[3] RANJITH P G, ZHAO J, JU M H, et al. Opportunities and challenges in deep mining: A brief review[J]. Engineering, 2017, 3(4): 250-261.

[4] 刘文超,赵毅鑫,郭继鸿.新街矿区厚硬顶板条件邻空巷道冲击地压机理与控制[J].煤田地质与勘探,2024,52(10):153-165.
LIU Wenchao, ZHAO Yixin, GUO Jihong. Mechanisms and control of rock bursts in goaf-side roadways under the condition of thick and hard roofs in the Xinjie mining area, Inner Mongolia[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(10): 153-165.

[5] 钱鸣高,许家林,王家臣,等.矿山压力与岩层控制[M].徐州:中国矿业大学出版社,2021.
QIAN Minggao, XU Jialin, WANG Jiachen, et al. Ground pressure and strata control[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2021.

[6] 窦林名,李振雷,何学秋.厚煤层综放开采的降载减冲原理及其应用研究[J].中国矿业大学学报,2018,47(2):221-230.
DOU Linming, LI Zhenlei, HE Xueqiu. Principle of rockburst control by weakening static and dynamic loading using top-coal caving in the mining of thick coal seams[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(2): 221-230.

[7] 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.

[8] JU J F, XU J L. Structural characteristics of key strata and strata behaviour of a fully mechanized long-wall face with 7.0 m height chocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, 58:46-54.

[9] 于 斌,杨敬轩,高 瑞.大同矿区双系煤层开采远近场协同控顶机理与技术[J].中国矿业大学学报,2018,47(3):486-493.
YU Bin, YANG Jingxuan, GAO Rui. Mechanism and technology of roof collaborative controlling in the process of Jurassic and Carboniferous coal mining in Datong mining area[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(3): 486-493.

[10] YU B, GAO R, KUANG T J, et al. Engineering

study on fracturing high-level hard rock strata by ground hydraulic action[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 86: 156-164.

[11] 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.

[12] 李化敏,蒋东杰,李东印.特厚煤层大采高综放工作面矿压及顶板破断特征[J].煤炭学报,2014,39(10):1956-1960.
LI Huamin, JIANG Dongjie, LI Dongyin. Analysis of ground pressure and roof movement in fully-mechanized top coal caving with large mining height in ultra-thick seam[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(10): 1956-1960.

[13] LU Y B, YAN S H, ZHOU K Y, et al. Structural quantification of multi-thick hard roof and strong ground pressure control in large mining height stope: A case study[J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2025, 11(1): 56.

[14] 路洋波,闫少宏,周坤友,等.大采高全宽工作面厚硬顶板迁移破断量化与控制[J].中国矿业大学学报,2025,54(4):754-769.
LU Yangbo, YAN Shaohong, ZHOU Kunyou, et al. Migration fracture quantitative and control of thick-hard roof in fullwidth working face with large mining height[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(4): 754-769.

[15] 于　雷,闫少宏.特厚煤层综放开采顶板运动形式及矿压规律研究[J].煤炭科学技术,2015,43(8):40-44.
YU Lei, YAN Shaohong. Study on roof movement form and mine strata pressure law of fully-mechanized top coal caving mining in ultra thick seam[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(8): 40-44.

[16] 翟新献,赵晓凡,翟俨伟,等.综放开采上覆巨厚砾岩层离层和断裂力学模型及其应用[J].中国矿业大学学报,2023,52(2):241-254.
ZHAI Xinxian, ZHAO Xiaofan, ZHAI Yanwei, et al. Separation and fracturing mechanical models of overlying hugely-thick conglomerate stratum in fully mechanized caving mining and their application[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52(2): 241-254.

[17] 谢广祥.综放工作面及其围岩宏观应力壳力学特征[J].煤炭学报,2005,30(3):309-313.
XIE Guangxiang. Mechanical characteristics of fully mechanized top-coal caving face and surrounding rock stress shell[J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(3): 309-313.

[18] XIE G X, CHANG J C, YANG K. Investigations into stress shell characteristics of surrounding rock in fully mechanized top-coal caving face[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(1): 172-181.

[19] LI Q H, WANG H N, ZHENG X J, et al. Adaptability analysis of full height mining at one time of deep soft thick coal seam[J]. Frontiers in Earth Science, 2022, 10: 862710.

[20] 王　博.陕蒙深部矿区典型动力灾害发生机理及防治研究[D].北京:北京科技大学,2021.
WANG Bo. Mechanism and control of typical dynamic disasters in deep mining areas of Shaanxi and Inner Mongolia[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2021.

[21] ZHANG H, ZHANG J, XU Z H, et al. Overburden breakage and surface damage evolution under high-intensity mining of shallow coal seams: evidence from Shendong mining area[J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 23152.

[22] CHEN X J, LI L Y, WANG L, et al. The current situation and prevention and control countermeasures for typical dynamic disasters in kilometer-deep mines in China[J]. Safety Science, 2019, 115: 229-236.

[23] 齐庆新,潘一山,舒龙勇,等.煤矿深部开采煤岩动力灾害多尺度分源防控理论与技术架构[J].煤炭学报,2018,43(7):1801-1810.
QI Qingxin, PAN Yishan, SHU Longyong, et al. Theory and technical framework of prevention and control with different sources in multi-scales for coal and rock dynamic disasters in deep mining of coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(7): 1801-1810.

[24] 王家臣,刘云熹,张　伟,等.两硬特厚煤层大采高综放煤壁稳定性与顶煤冒放性协同控制研究[J].采矿与岩层控制工程学报,2025,7(5):5-18.
WANG Jiachen, LIU Yunxi, ZHANG Wei, et al. Cooperative control of face wall stability and top-coal cavability of LTCC panel in hard seam with large cutting height and hard roof[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2025, 7(5): 5-18.

[25] 袁　亮,涂庆毅,赵祖恒,等.颗粒煤的破碎比功及其在压缩破碎过程中的能量转移特征研究[J].矿业

科学学报,2025,10(5):785-796.
YUAN Liang, TU Qingyi, ZHAO Zuheng, et al. Research on the crushing specific work of particle coal and its energy transfer law during compression crushing process[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2025, 10(5): 785-796.

[26] WANG J C, WANG Z H. Systematic principles of surrounding rock control in longwall mining within thick coal seams[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2019, 29(1): 65-71.

[27] WANG Z L, WANG H W, QU Q D, et al. Determination of mining-induced stress based on mining face hydraulic support stress and micro-seismicity[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2025, 17(9): 5493-5508.

[28] TAN X Y, CHEN W Z, WANG L L, et al. Spatial deduction of mining-induced stress redistribution using an optimized non-negative matrix factorization model[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2023, 15(11): 2868-2876.

[29] 许永祥,王国法,李明忠,等.基于黏结颗粒模型的特厚坚硬煤层综放开采数值模拟研究[J].煤炭学报,2019,44(11):3317-3328.
XU Yongxiang, WANG Guofa, LI Mingzhong, et al. Numerical simulation of longwall top-coal caving with extra-thick and hard coal seam based on bonded particle model[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(11): 3317-3328.

[30] 左建平,徐丞谊,展帅菲,等.煤岩组合体真三轴破坏行为及结构-材料协同破坏机制[J].中国矿业大学学报,2025,54(2):287-303.
ZUO Jianping, XU Chengyi, ZHAN Shuaifei, et al. True triaxial failure behavior and structure-material synergistic failure mechanism of coal-rock composites[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(2): 287-303.

[31] 赵国彦,戴 兵,马 驰.平行黏结模型中细观参数对宏观特性影响研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(7):1491-1498.
ZHAO Guoyan, DAI Bing, MA Chi. Study of effects of microparameters on macroproperties for parallel bonded model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(7): 1491-1498.

[32] 肖福坤,谢 锴,顾 缘,等.考虑相态的垮落体材料细观参数标定方法研究:以平行黏结模型为例[J].岩土力学,2024,45(增1):13-24.
XIAO Fukun, XIE Kai, GU Yuan, et al. Mesoscopic parameter calibration method for collapsed body considering phase states: Using parallel bonding model as an illustration[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(Sup 1): 13-24.

[33] CAO A Y, DOU L M, WANG C B, et al. Microseismic precursory characteristics of rock burst hazard in mining areas near a large residual coal pillar: A case study from Xuzhuang coal mine, Xuzhou, China[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(11): 4407-4422.

(责任编辑 沈春妮 宋 爽)