

DOI: 10.11779/CJGE20230892

# 深部大采高综采面厚硬岩层-煤柱结构失稳诱冲机理研究

张翔<sup>1</sup>, 朱斯陶<sup>\*1,2</sup>, 姜福兴<sup>1</sup>, 刘金海<sup>1</sup>, 朱权洁<sup>3</sup>, 史先锋<sup>3</sup>, 韩刚<sup>4</sup>, 魏晓虎<sup>5</sup>, 曹京龙<sup>4</sup>, 曲效成<sup>6</sup>

(1. 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083; 2. 山东能源集团有限公司, 山东 济南 250014; 3. 华北科技学院河北省矿井灾害防治重点实验室, 河北 廊坊 101601; 4. 中煤能源研究院有限责任公司, 陕西 西安 710054; 5. 鄂尔多斯市伊化矿业资源有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017399; 6. 北京安科兴业科技股份有限公司, 北京 102200)

**摘要:** 厚硬岩层-煤柱结构失稳诱发型冲击地压是鄂尔多斯深部矿区典型的冲击地压模式, 其发生机理尚不清晰, 以鄂尔多斯深部矿区某矿 30202 工作面为工程背景, 采用理论分析、数值模拟、现场实测等方法, 研究了深部大采高综采面厚硬岩层-煤柱结构失稳诱冲机理, 得出结论: 探讨了深部大采高综采面厚硬岩层-煤柱结构的运动特征, 建立了厚硬岩层-煤柱结构的力学模型并推导了其失稳诱冲的工程判据。揭示了厚硬岩层-煤柱结构失稳诱冲机理: 区段煤柱承载基础应力来源于面内厚硬岩层组和临侧采空区铰接加载岩层自重, 当面内厚硬岩层达到强度极限时发生“W”型破断并传递附加应力, 区段煤柱承载的叠加应力超过其破坏阈值后发生局部甚至整体失稳冲击。数值模拟发现区段煤柱承载应力随厚硬岩层组的破断运动发生阶段性突增现象, 厚硬岩层组“W”型两次破断运动传递的载荷是工作面附近区段煤柱失稳冲击的主要应力来源, 其中二次破断释放的能量远高于初次破断。设计并实施了深部大采高综采面厚硬岩层-煤柱结构失稳诱冲的控制体系, 包括承载煤柱强卸载、扰动区域强支护和推进速度强管控, 效果评价验证了防冲体系能够保障工作安全回采。

**关键词:** 冲击地压; 厚硬岩层; 区段煤柱; 微震监测

中图分类号: TD324

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)12-2570-10

作者简介: 张翔(1993—), 男, 博士研究生, 从事煤矿冲击地压机理与防治研究。E-mail: ckzhangxiang@163.com。

## Mechanism of instability induced scour of thick hard rock-coal pillar structure in deep fully mechanized working face with large mining height

ZHANG Xiang<sup>1</sup>, ZHU Sitao<sup>1,2</sup>, JIANG Fuxing<sup>1</sup>, LIU Jinhai<sup>1</sup>, ZHU Quanjie<sup>3</sup>, SHI Xianfeng<sup>3</sup>, HAN Gang<sup>4</sup>, WEI Xiaohu<sup>5</sup>, CAO Jinglong<sup>4</sup>, QU Xiaocheng<sup>6</sup>

(1. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Shandong Energy Group Company Limited, Jinan 250014, China; 3. North China Institute of Science and Technology, Hebei Province Mine Disaster Prevention Primary Laboratory, Langfang 101601, China; 4. China Coal Energy Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China; 5. Ordos Yihua Mining Resources Co., Ltd., Ordos 017399, China; 6. Beijing Anke Xingye Technology Co., Ltd., Beijing 102200, China)

**Abstract:** The instability-induced rockburst of thick hard rock stratum-coal pillar structure is a typical rockburst mode in Ordos deep mining area, and its mechanism is still unclear. Taking the 30202 working face of a mine in Ordos deep mining area as the engineering background, the instability-induced rockburst mechanism of thick hard rock stratum-coal pillar structure in deep fully mechanized mining face with large mining height is studied by means of the theoretical analysis, numerical simulation and field measurement, and the following conclusions are drawn: The spatial movement characteristics of thick hard rock stratum-coal pillar structure in deep fully mechanized mining face with large mining height are discussed. The mechanism of instability-induced impact of the thick and hard rock stratum-coal pillar structure is revealed, i.e., the foundation stress of the section coal pillar comes from the self-weight of the in-plane thick and hard rock stratum group and the adjacent mined-out area, when it reaches the strength limit, the in-plane thick and hard rock stratum breaks in a "W" shape and transmits additional stress, and when the superimposed

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3004604); 国家自然科学基金面上项目(52374076); 中国科协青年人才托举工程项目(2021QNRC001)

收稿日期: 2023-09-13

\*通信作者 (E-mail: zhusitao@ustb.edu.cn)

stress of the section coal pillar exceeds its failure threshold, local or even whole instability impact occurs. It is found through the numerical simulation that the load transmitted by the "W"-shaped twice breaking motion of the thick and hard strata group is the main stress source of the instability impact of the coal pillar near the working face. The control system of instability-induced impact of the thick hard rock stratum-coal pillar structure in deep fully mechanized mining face with large mining height is designed and implemented, including strong unloading of bearing coal pillar, strong support in disturbed areas and strong control of advancing speed. The effectiveness evaluation verifies that the anti-impact system can ensure the safe mining of the working face.

**Key words:** rockburst; thick hard rock stratum; section coal pillar; microseismic monitoring

## 0 引 言

随着中国煤矿开采深度和生产强度的不断增大, 冲击地压成为中国煤矿深部开采面临的主要动力灾害之<sup>[1-3]</sup>。鄂尔多斯深部矿区面临的冲击地压威胁尤为严峻, 截止到 2020 年, 该矿区若干矿井(门克庆、母杜柴登、营盘壕、石拉乌素等)已经进行了初期生产, 这些新建的矿井均具备典型的“厚硬岩层-煤柱”结构, 具备大采深(多为 600~800 m)、大采高(主采煤层 3-1 煤厚 5~8 m)、宽煤柱(区段煤柱宽 20~40 m)和厚硬岩层(主关键层厚度均大于 30 m)等特点, 该矿区所有矿井的第二临空回采工作面均发生过冲击显现, 且工作面临空巷为冲击显现的集中发生地点。

厚硬岩层、宽煤柱是鄂尔多斯深部矿区冲击地压的主要诱发因素, 中国学者针对厚硬岩层、宽煤柱的诱冲机理进行了大量研究, 朱斯陶等<sup>[4]</sup>研究了基于冲击地压-矿震协同控制的合理隔离煤柱宽度设计方法; 张俊文等<sup>[5]</sup>认为覆岩转移高应力影响下的沿空巷道, 受到低位厚硬顶板运移扰动容易诱发冲击地压; 郭文豪等<sup>[6]</sup>提出多关键层宽煤柱采场的覆岩空间结构具有低位竖“O-X”、高位横“OX”的 2 种破断形式; 王博等<sup>[7]</sup>研究了双巷掘进条件下的宽区段煤柱应力演化规律; 赵毅鑫等<sup>[8]</sup>认为厚硬顶板条件下的采空区侧向静载、超前静载及扰动动载是沿空巷道的冲击地压源; 翁明月等<sup>[9]</sup>研究了多关键层运动对于窄煤柱综采面沿空巷的诱冲机制; 解嘉豪等<sup>[10]</sup>提出了沿空巷坚硬顶板爆破前后的覆岩空间结构特征; 白贤栖等<sup>[11]</sup>以震源群为单位、微震台站为对象构建了反演矩阵进行煤矿矿震震源的机制反演; 韩刚等<sup>[12]</sup>认为近距离坚硬顶板破断产生的强扰动是鄂尔多斯深部矿区沿空巷频发动力显现的主要原因; 张俊文等<sup>[13]</sup>研究了圆形断层煤柱对于四周采场覆岩空间结构的影响; 丛利等<sup>[14]</sup>认为多次采掘扰动将导致宽煤柱承载应力高度集中。

厚硬岩层-煤柱结构失稳诱发型冲击地压是目前鄂尔多斯深部矿区大采高综采面典型的冲击地压模式, 目前鄂尔多斯深部矿区的冲击地压研究尚处于起步阶段, 导致鄂尔多斯深部矿区面临此类冲击地压时

处于束手无策的状态, 本文以鄂尔多斯深部矿区某矿 30202 工作面为工程背景, 采用现场实测、理论分析、数值模拟等方法, 揭示了深部大采高综采面厚硬岩层-煤柱结构失稳诱冲的发生机制, 以期为此类型冲击地压的现场防治提供理论依据。

## 1 工程案例

鄂尔多斯深部矿区某矿 30202 工作面, 如图 1, 该工作面东部为 30201 采空区, 南部为井田边界, 西部为设计 30203 实体煤工作面, 北部为工业广场保护煤柱, 区段煤柱宽度为 19.5 m。30201 工作面生产时间为 2016 年 12 月—2018 年 3 月, 地表最大沉降量小于 1.5 m; 30202 工作面设计生产时间为 2018 年 4 月—2021 年 1 月, 临空开采后地表最大沉降量小于 2 m。判断工作面均处于非充分采动状态。

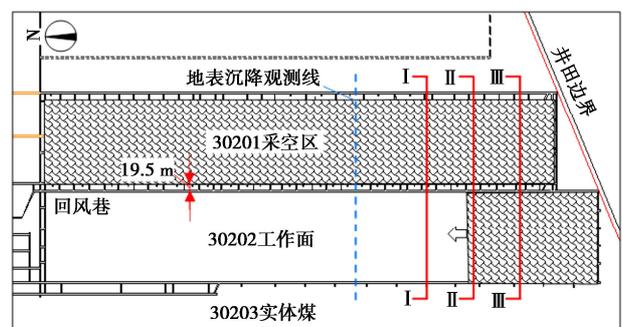


图 1 30202 工作面平面位置

Fig. 1 Plane position of No. 30202 working face

30202 工作面平均采深 640 m, 回采 3-1 煤层平均厚度 5.7 m, 平均倾角约 2°, 经鉴定 3-1 煤层具有强冲击倾向性, 顶底板均具有弱冲击倾向性。30201 与 30202 工作面宽度分别为 241, 268 m, 均采用一次采全高综采工艺。根据面内 B22 钻孔揭露情况(表 1), 3-1 煤层上覆约 40 m 范围存在一层厚度大于 60 m 的厚硬砂岩, 具备典型的厚硬岩层-煤柱结构。

30201 工作面回采期间面后留巷(现 30202 回风巷)共发生 9 次强矿压显现, 造成巷帮位移片帮, 部分锚杆锚索脱锚崩断、单体支柱压弯折断, 说明仅一

侧采空条件下的厚硬岩层-煤柱结构失稳时即可发生冲击显现, 30202 工作面临空后其回风巷冲击风险水平将进一步增加。为了避免 30202 工作面临空开采阶段发生厚硬岩层-煤柱结构失稳诱发冲击地压事故, 需要提前开展深部大采高综采面厚硬岩层-煤柱结构失稳诱冲机理研究, 为此类冲击地压防治设计提供依据, 保障厚硬岩层-宽煤柱结构工作面的安全开采。

表 1 B22 钻孔地层参数

Table 1 Formation parameters of B22 borehole 单位: m

编号	岩性	厚度	编号	岩性	厚度
R <sub>15</sub>	风积砂	255.1	R <sub>7</sub>	泥岩	41.1
R <sub>14</sub>	复合砂岩组	120.5	R <sub>6</sub>	粗粒砂岩	61.6
R <sub>13</sub>	泥岩	14.1	R <sub>5</sub>	泥岩	2.1
R <sub>12</sub>	复合砂岩组	100.4	R <sub>4</sub>	2-2 <sub>#</sub> 煤	1.3
R <sub>11</sub>	泥岩	40.1	R <sub>3</sub>	细粒砂岩	11.8
R <sub>10</sub>	中粒砂岩	7.2	R <sub>2</sub>	泥岩	10.3
R <sub>9</sub>	泥岩	57.9	R <sub>1</sub>	细粒砂岩	11.9
R <sub>8</sub>	中粒砂岩	20.2	Coal	3-1 煤	5.3

## 2 厚硬岩层-煤柱空间结构演化规律

### 2.1 采场厚硬岩层-煤柱结构分区特征

厚硬岩层的运动状态控制了采场覆岩空间结构, 并对区段煤柱应力分布及变形产生重要影响, 本节以 30202 工作面为例针对厚硬岩层-区段煤柱空间结构特征展开分区分析。

临空工作面前方区段煤柱为单侧采空状态, 如图 2 (a), 煤柱承载覆岩主要由临侧采空区垮落带 (F) 悬臂岩层结构、裂隙带 (S) 铰接岩层结构组成, 处于悬顶状态的弯曲下沉带 (B) 岩层传递应力峰值位于本工作面实体煤深处, 对区段煤柱影响较小。

临空工作面后方区段煤柱为两侧采空状态, 由于宽煤柱的阻隔作用, 面内垮落带发育受临侧采空区的影响较小, 区段煤柱承载采场垮落带覆岩为两侧对称的悬臂结构。垮落带覆岩运动将产生高位顶板的离层空间, 非充分采动条件下, 采场覆岩裂隙高度发育上限为采空区短边宽度的 1/2<sup>[15-16]</sup>, 对应单、双采空区覆岩裂隙发育高度分别为 (R<sub>6</sub>, R<sub>7</sub>) 面内厚硬岩层组、(R<sub>8</sub>, R<sub>9</sub>) 采场厚硬岩层组, 考虑高位厚硬岩层的运动时间效应及区段煤柱的压缩变形程度, 工作面后方覆岩结构演化可分为面内裂隙带发育阶段和采场裂隙带扩展阶段。面内裂隙带发育阶段如图 2 (b), 由于面内厚硬岩层组煤柱端的垂直约束远低于实体煤端, 煤柱端为简支受力状态<sup>[17]</sup>, 当其破断后裂隙带岩层将形成“W”型破断结构; 采场裂隙带扩展阶段如图 2 (c), 随着面内覆岩裂隙高度持续上移, 区段煤柱压缩量不断增加甚至失稳破坏, 采场厚硬岩层组离层量

持续增加直至破断, 形成“V”型破断结构, 采场裂隙带的“V”型破断结构将控制采场弯曲下沉带岩层的“V”型运动趋势。

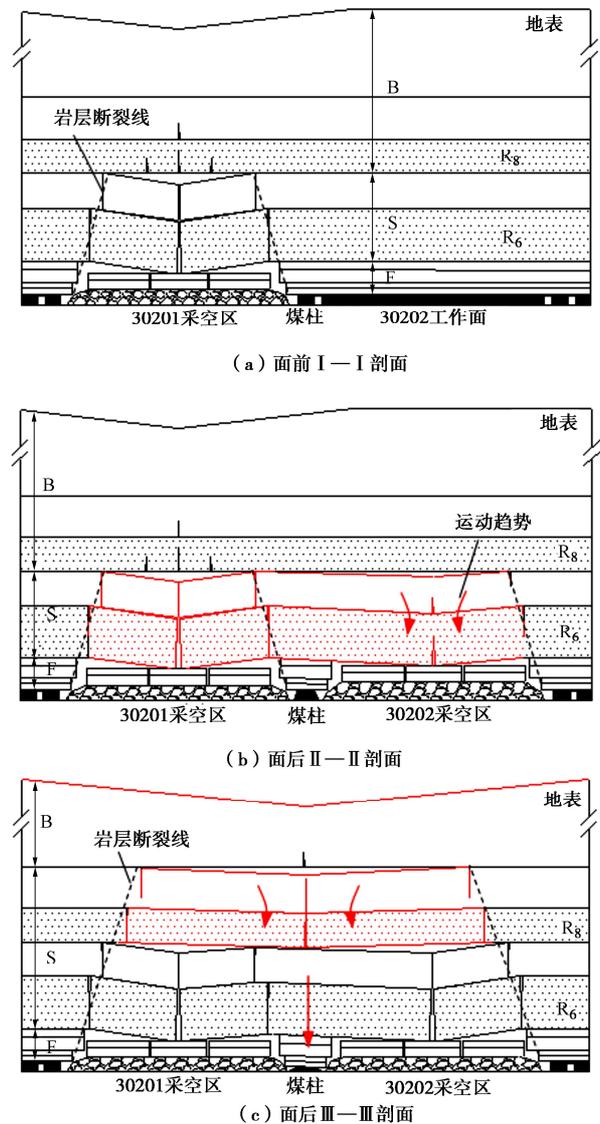


图 2 厚硬岩层-煤柱结构特征

Fig. 2 Structural characteristics of thick and hard strata-coal pillar

由于宽煤柱的隔离和支撑作用, 工作面垮落带覆岩运动无法与临侧采空区联动, 裂隙带范围内的厚硬岩层组传递基础应力和破断附加应力是区段煤柱失稳冲击的主要应力来源, 考虑高位厚硬岩层组“V”型破断具备滞后性, 其破断加载对工作面附近区段煤柱的影响较小, 所以本文的研究重点为厚硬岩层组“W”型破断运动对区段煤柱的诱冲效应。

### 2.2 面内厚硬岩层“W”型破断阶段划分

“W”型结构的形成需要面内厚硬岩层组两次破断运动。如图 3, 临空工作面采空初期, 面内厚硬岩层发生挠曲下沉, 其最大拉应力出现在实体煤侧支撑点且靠近岩层上表面, 当该处拉应力超过其强度极限时, 厚硬岩层发生初次破断, 考虑大采高、垮落带砂

岩组碎胀系数小等因素, 此阶段面内裂隙带岩层组受采空区矸石的承载力较小, 进行理论分析时可忽略不计; 初次破断后, 厚硬岩层承载的最大弯矩向采空区中部转移且靠近其下表面, 达到强度极限后发生二次破断, 破碎岩块回转并触矸, 最终形成“W”型破断结构。

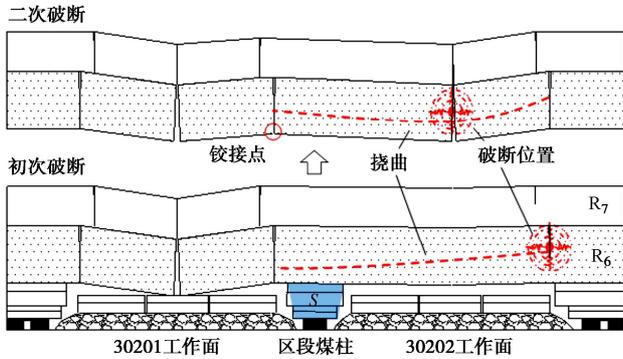


图 3 “W”型破断阶段划分

Fig. 3 Division of "W"-shaped fracture stages

两次破断前后厚硬岩层空间形态与区段煤柱承载基础应力各不相同, 且厚硬岩层破断释放的附加应力增加了区段煤柱的应力集中水平, 因此应分别研究面内厚硬岩层组两次破断运动条件下的区段煤柱承载叠加应力及对应的失稳冲击工程判据。

### 3 厚硬岩层-煤柱结构失稳诱冲机理

#### 3.1 厚硬岩层-煤柱结构力学模型

##### (1) 初次破断阶段煤柱受力分析

由于工作面实体煤侧范围远大于区段煤柱宽度, 对比二者垂直方向的变形和受力, 区段煤柱可视为“单轴压缩”而实体煤侧煤体相对稳定, 可将区段煤柱简化为等效的弹簧, 面内厚硬岩层视为弹性岩梁, 得到一端固支、一端受弹簧和临侧采空区铰接岩层加载的厚硬岩层-煤柱结构简化力学模型, 如图 4, 将区段煤柱对厚硬岩层的承载应力简化为集中载荷, 即用集中力  $F$  表示, 由于面内裂隙带厚硬岩层的破断长度远大于垮落带悬臂长度, 所以可视集中力  $F$  和相邻采空区铰接岩层加载力  $F_{2x}$  均作用于裂隙带铰接点。

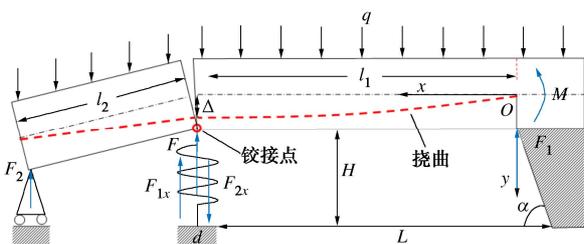


图 4 初次破断阶段力学模型

Fig. 4 Mechanical model at initial fracture stage

##### a) 基础应力分析

初次破断时区段煤柱承载基础应力  $P_j$  由垮落带岩层自重  $R$  和厚硬岩层挠曲加载应力- $F$ (集中力  $F$  的反作用力)叠加组成,

$$P_j = R - F \quad (1)$$

区段煤柱承载垮落带岩层范围  $S$  如图 3 所示, 其自重  $R$  为

$$\left. \begin{aligned} R &= \gamma S, \\ S &= H(d + H \cot \alpha). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中:  $\gamma$  为岩层重度;  $d$  为区段煤柱宽度;  $H$  为垮落带岩层总厚度;  $\alpha$  为岩层破裂角。

集中力  $F$  计算可从区段煤柱垂直压缩变形角度分析, 区段煤柱的垂直压缩变形量  $\Delta$  满足:

$$\Delta = u + w \quad (3)$$

式中:  $u$  为垮落带岩层自重垂直压缩煤柱变形量;  $w$  为厚硬岩层挠曲加载垂直压缩煤柱变形量,

$$\left. \begin{aligned} u &= mR / Ed, \\ w &= mF / Ed. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中:  $m$  为煤层厚度;  $E$  为煤层弹性模量。

区段煤柱的垂直压缩变形量  $\Delta$  同样等于厚硬岩层的最大挠曲下沉量, 所以  $\Delta$  等于厚硬岩层承载载荷  $q$  (包括厚硬岩层自重)、临侧采空区铰接岩层加载力  $F_{2x}$  和煤柱集中力  $F$  单独加载条件下的厚硬岩层挠曲下沉量之和,

$$\Delta = w_q + w_{F_{2x}} + w_F \quad (5)$$

式中:  $w_q$ ,  $w_{F_{2x}}$ ,  $w_F$  分别为厚硬岩层在  $q$ ,  $F_{2x}$ ,  $F$  单独加载条件下的挠曲下沉量:

$$\left. \begin{aligned} w_q &= q(L+d)^4 / 8E_1I, \\ w_{F_{2x}} &= F_{2x}(L+d)^3 / 3E_1I, \\ w_F &= -F(L+d)^3 / 3E_1I. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中:  $L$  为采空区宽度;  $E_1$ ,  $I$  为分别为厚硬岩层弹性模量、断面距,  $I = m_1^3 / 12$ ,  $m_1$  为厚硬岩层厚度。由于厚硬岩层破断后形成的铰接块长度远大于其回转下沉量, 分析时可认为采空区矸石和铰接点各承载一半载荷, 所以铰接岩层加载力  $F_{2x}$  可表示为

$$F_{2x} = ql_2 / 2 = q(L - 2H \cot \alpha) / 2 \quad (7)$$

式中:  $l_2$  为临侧采空区厚硬岩层铰接块长度。

联立式 (2) ~ (7) 可得

$$F = -\frac{3E_1Eld[w_q + w_{F_{2x}} - u]}{Ed(L+d)^3 + 3mE_1I} \quad (8)$$

设  $A = \omega_q + \omega_{F_{2x}} - u$ ,  $B = Ed(L+d)^3 + 3mE_1I$ , 联立式 (1)、(2)、(8), 得初次破断时煤柱承载基础应力  $P_j$  的表达式可表示为

$$P_j = \frac{3E_1EldA + \gamma H(d + H \cot \alpha)B}{B} \quad (9)$$

## b) 附加应力分析

厚硬岩层初次破断时在均布载荷  $q$  (包括厚硬岩层自重)、铰接岩层加载力  $F_{2x}$  和煤柱集中力  $F$  单独加载条件下的弯曲变形为

$$\left. \begin{aligned} y_q &= qx^2[x^2 - 4(L+d) + 6(L+d)^2]/24E_1I, \\ y_{F_{2x}} &= F_{2x}x^2[3(L+d) - x]/6E_1I, \\ y_F &= -Fx^2[3(L+d) - x]/6E_1I. \end{aligned} \right\} (10)$$

根据功的互等定理, 可得单位宽度厚硬岩层积聚能量  $U$  为

$$U = \int_0^{L+d} (y_q + y_{F_{2x}} - y_F)qdx + F_{2x}w_{F_{2x}} - Fw_F. (11)$$

当厚硬岩层破断时仅有约 0.1%~1% 的积聚能量转变为震动波能量<sup>[18]</sup>, 现场分析厚硬岩层破断释能时  $U$  应乘以其破断距  $a$ 。根据弹性波相关理论<sup>[19]</sup>, 厚硬岩层初次破断释能产生的区段煤柱附加应力  $P_d$  为

$$P_d = \gamma\zeta(2K\eta aUs^{-\lambda}/\gamma)^{1/2}. (12)$$

式中:  $\zeta$  为附加应力传播速度;  $K$  为附加应力能量作用指数;  $\eta$  为地震效率;  $s$  为附加应力源距离;  $\lambda$  为附加应力波衰减系数。

## (2) 二次破断阶段煤柱受力分析

厚硬岩层初次破断后演变为一端铰接、一端受煤柱承载和临侧采空区铰接岩层加载的简支梁状态, 其结构简化力学模型见图 5。

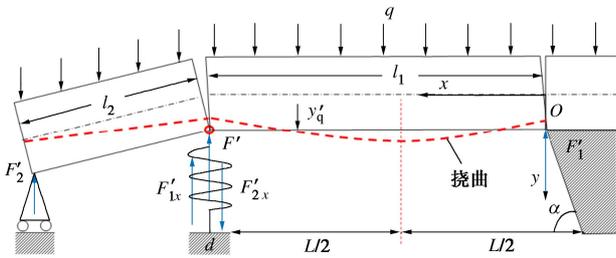


图 5 二次破断阶段力学模型

Fig. 5 Mechanical model at secondary fracture stage

## a) 基础应力分析

二次破断时区段煤柱承载基础应力  $P'_j$  由垮落带岩层自重  $R$  和厚硬岩层直接加载应力  $-F'$  组成,

$$P'_j = R - F'. (13)$$

二次破断时, 区段煤柱承载的厚硬岩层范围包括临侧采空区铰接岩层、煤柱承载区厚硬岩层和面内悬顶厚硬岩层宽度的 1/2, 所以  $F'$  为

$$F' = q(3L + 2d - 4H \cot \alpha)/2. (14)$$

联立式 (2)、(13)、(14) 可得二次破断时煤柱承载基础应力  $P'_j$  的表达函数可为

$$P'_j = \gamma H(d + H \cot \alpha) + q(3L + 2d - 4H \cot \alpha)/2. (15)$$

## b) 附加应力分析

二次破断时厚硬岩层受均布载荷  $q$  (包括厚硬岩层自重) 加载时的弯曲变形可表示为

$$y'_q = qx[x^3 - 2(L+d)x^2 + (L+d)^3]/24E_1I. (16)$$

二次破断时单位宽度厚硬岩层积聚能量为

$$U' = \int_0^{L+d} y'_q q dx. (17)$$

最终厚硬岩层二次破断释能产生的区段煤柱附加应力  $P'_d$  可用式 (12) 进行计算。

## 3.2 厚硬岩层-煤柱结构失稳诱冲工程判据

## (1) 工程判据推导

厚硬岩层-煤柱结构的冲击方式与类型由厚硬岩层运动阶段和区段煤柱受力状态共同决定。厚硬岩层为应力加载源, 区段煤柱为灾害冲击体, 所以应系统性分析厚硬岩层破断与区段煤柱失稳的应力条件。

## a) 厚硬岩层破断应力条件

厚硬岩层初次破断时最大弯矩  $M$  位于实体煤侧固支端, 二次破断时最大弯矩  $M'$  位于岩层中部, 可表示为

$$\left. \begin{aligned} M &= q(L+d)^2/2 + (F_{2x} - F)(L+d), \\ M' &= q(L+d)^2/2. \end{aligned} \right\} (18)$$

厚硬岩层初次破断、二次破断时最大弯矩位置的拉应力  $\sigma_i$ ,  $\sigma'_i$  为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_i &= Mm/2I, \\ \sigma'_i &= M'm/2I. \end{aligned} \right\} (19)$$

由于铰接岩层加载力  $F_{2x}$  小于集中力  $F$ , 所以厚硬岩层初次破断  $M$ ,  $\sigma_i$  小于二次破断  $M'$ ,  $\sigma'_i$ , 初次破断后必然发生二次破断, 设厚硬岩层抗拉极限强度为  $[\sigma_i]$ , 则厚硬岩层破断的应力条件为

$$[\sigma_i] \leq \sigma_i < \sigma'_i. (20)$$

## b) 区段煤柱失稳应力条件

从煤柱内部是否存在弹性承载区角度划分: 屈服煤柱 (无弹性核区) 和承载煤柱 (有弹性核区)。本文研究的鄂尔多斯深部矿区留设区段煤柱均为承载煤柱, 由于孤立煤体的应力均化效应, 承载煤柱两侧采空后其承载基础应力逐渐向中部集中, 工作面附近的煤柱基础应力分布曲线由马鞍形逐渐演化至平台型, 而区段煤柱失稳冲击属于应力问题, 工程上通常以煤柱弹性承载区的峰值应力  $P_a$  与煤体单轴抗压强度  $[\sigma_c]$  的比值  $I_c$  来判断失稳冲击危险程度, 可表示为

$$I_c = P_a/[\sigma_c]. (21)$$

考虑承载煤柱的弹塑性分布规律, 应力平台型分布的峰值应力  $P_a$  为

$$P_a = \max(\bar{P}_j + P_d, \bar{P}'_j + P'_d). (22)$$

式中:  $\bar{P}_j$ ,  $\bar{P}'_j$  分别为区段煤柱弹性核区的平均基础应力,  $\bar{P}_j = P_j(d-\rho)$ ,  $\bar{P}'_j = P'_j(d-\rho)$ ,  $\rho$  为煤柱两侧塑性区宽度, 近似取巷道半径的 (3~5) 倍。

煤柱失稳冲击阈值与煤体围压近似呈线性关系, 结合承载煤柱内部煤体的围压分布规律, 一般情况下煤柱弹性核区边缘的煤体可近似为单向受力状态, 承载应力达到  $[\sigma_c]$  即具备局部失稳冲击风险 ( $I_c \geq 1$ ) [7]; 弹性核区中部的煤体处于三向受力状态, 承载应力达到  $3[\sigma_c]$  即具备整体失稳冲击风险 ( $I_c \geq 3$ ) [15]。

(2) 工程案例验算

根据 30202 工作面及周边地质开采技术条件, 取煤柱宽度  $d=19.5$  m, 采空区宽度  $L=268$  m; 岩层重度  $\gamma=25$  k N/m<sup>3</sup>; 垮落带厚度  $H=37$  m; 岩层断裂角  $\alpha=71.5^\circ$ ; 煤层厚度  $m=5.3$  m; 煤层弹性模量  $E=0.57$  GPa; 厚硬岩层弹性模量  $E_1=27$  GPa; 厚硬岩层厚度  $m_1=61.6$  m; 抗拉强度  $[\sigma_t]=6.2$  MPa; 均布载荷  $q=2.6$  MPa; 破断距  $a=50$  m; 附加应力传播速度  $\zeta=3500$  m/s; 附加应力能量作用指数  $K=1\%$ ; 地震效率  $\eta=1\%$ ; 附加应力源距离  $s=265$  m (初次) 和  $144$  m (二次); 附加应力波衰减系数  $\lambda=1.5$ ; 单轴抗压强度  $[\sigma_c]=35.37$  MPa; 煤柱塑性区宽度  $\rho=7.5$  m。将以上参量代入式

(1) ~ (22), 计算结果如下:

a) 厚硬岩层 R<sub>6</sub> 稳定性分析

厚硬岩层 R<sub>6</sub> 承载的最大拉应力: 初次破断阶段  $\sigma_t=9.7$  Pa >  $[\sigma_t]$ 、二次破断阶段  $\sigma'_t=14.6$  MPa >  $[\sigma_t]$ , 满足厚硬岩层 R<sub>6</sub> 破断的应力条件。

b) 区段煤柱稳定性分析

不同宽度区段煤柱承载峰值应力计算结果见图 6, 可知二次破断条件下的煤柱承载叠加应力均大于初次破断, 所以计算强度比  $I_c$  时应使用二次破断阶段煤柱承载应力。

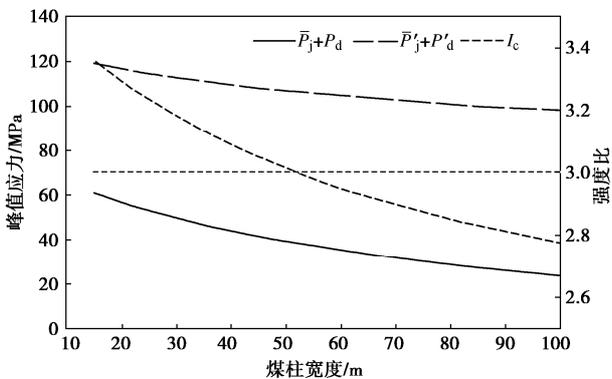


图 6 煤柱承载叠加应力曲线

Fig. 6 Curves of superimposed stress of bearing capacity of coal pillar

常规宽度 ( $\leq 60$  m) 的区段煤柱均达到局部失稳冲击的应力条件, 同时预防整体失稳型冲击地压的安

全煤柱宽度为 52 m。案例工作面区段煤柱宽度为 19.5 m, 承载叠加应力峰值  $P_a=116.7$  MPa, 强度比  $I_c=3.3$ , 满足煤柱整体失稳冲击的应力条件。

综上分析, 30202 工作面回采时厚硬岩层 R<sub>6</sub> 将发生 “W” 型破断运动, 区段煤柱承载叠加应力超过整体冲击危险阈值, 具备发生整体失稳冲击的风险。

3.3 厚硬岩层-煤柱结构失稳诱冲发生机制

冲击地压本质是处于高应力状态的冲击倾向性煤岩体达到破坏极限时发生的瞬间失稳并冲击[20], 对于厚硬岩层-煤柱结构的冲击地压问题, 高应力来源于厚硬岩层传递的基础应力、附加应力, 冲击倾向性煤岩体位于区段煤柱的弹性承载区, 而破坏极限取决于区段煤柱弹性核的失稳阈值。

深部大采高综采面厚硬岩层-煤柱结构失稳诱冲机理为: 区段煤柱承载基础应力来源于面内厚硬岩层组和临侧采空区铰接加载岩层, 当面内厚硬岩层达到强度极限时发生 “W” 型破断并传递附加应力, 如图 7, 区段煤柱承载的叠加应力超过其破坏阈值后将发生局部甚至整体失稳冲击。

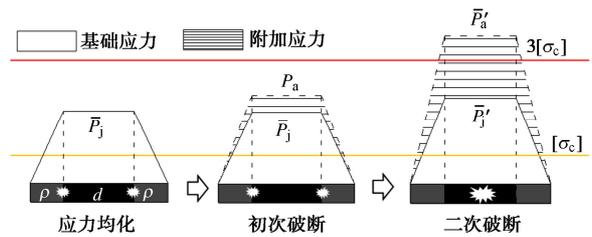


图 7 厚硬岩层-煤柱结构失稳诱冲机理

Fig. 7 Mechanism of instability-induced scour of thick hard rock-coal pillar structure

4 数值模拟及现场实测验证

4.1 空间结构演化数值模拟

根据 30202 工作面的地质、开采技术条件, 采用 UDEC 数值模拟软件沿采场倾向方向建立模型, 数值模型尺寸长×高=1260 m×284 m, 对模型的侧向和底部边界加以约束, 顶部为自由边界, 在模型顶部施加 10 MPa 均布载荷代替所建模型顶部至地表之间 400 m 范围的岩层重量。模型岩层的屈服准则采用莫尔-库仑准则, 根据矿井地质资料及钻孔实测数据确定岩体、节理的物理及力学参数。采场工作面开采顺序为: 30201 工作面→30202 工作面。

统计分析 30202 工作面开采后不同计算步数条件下的区段煤柱承载应力变化规律。区段煤柱承载应力峰值随覆岩运动加载整体呈递增状态。如图 8, 区段煤柱承载应力相邻两次统计结果 (500 步) 的最大增量值呈现 4 次突增现象, 4 次突增峰值的计算步数分

别为 500, 3500, 5500, 13500 步, 对应的覆岩裂隙发育如图 9 所示, 可知 4 次突增对应的采场覆岩运动阶段分别为 I—垮落带岩层组破断运动、II—裂隙带  $R_6$  岩层组初次破断、III—裂隙带  $R_6$  岩层组二次破断和 IV—裂隙带  $R_8$  岩层组破断运动。

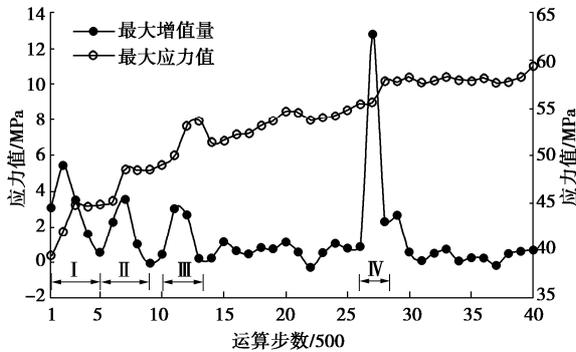


图 8 区段煤柱应力演化规律

Fig. 8 Stress evolution law of coal pillar in section

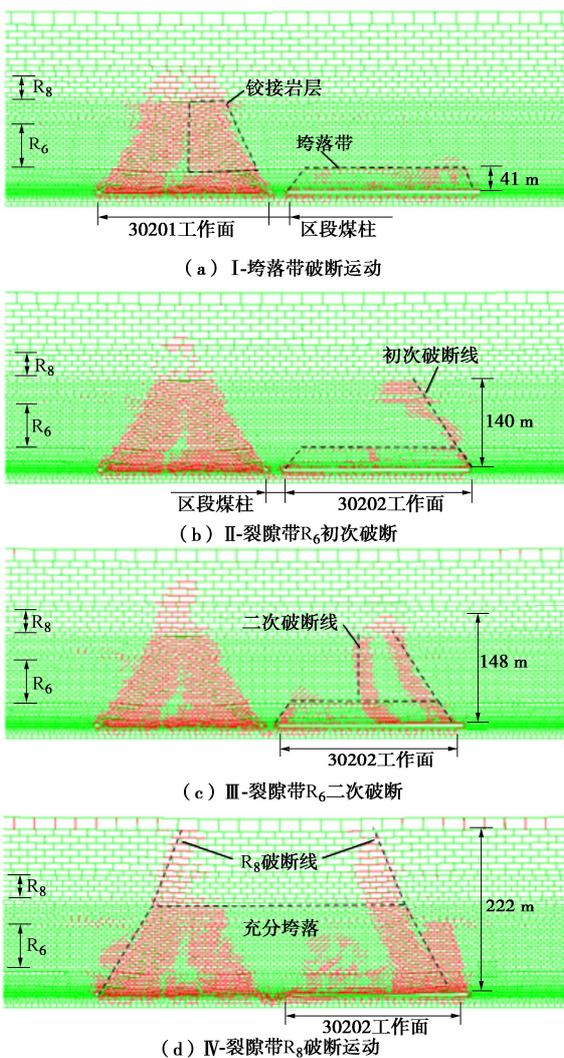


图 9 覆岩结构演化特征

Fig. 9 Evolution characteristics of overlying stratum structure

计算步数增加对应着覆岩运动滞后工作面的距离

增大、对回采工作面冲击危险性的影响程度减小, 由于 I 阶段区段煤柱的基础应力较小, IV 阶段滞后回采工作面较远, 因此 II、III 阶段是厚硬岩层-煤柱结构失稳诱冲的关键阶段, 区段煤柱承载基础应力达到了局部冲击的应力阈值, 同厚硬岩层  $R_6$  破断释放的附加应力叠加后将增加区段煤柱的冲击危险等级。数值模拟结果验证了深部大采高综采面厚硬岩层-煤柱空间结构演化规律的合理性。

#### 4.2 采场能量释放微震监测

微震监测结果揭示了深部大采高综采面厚硬岩层-煤柱结构的覆岩破坏特征和能量释放规律, 图 10 为案例矿井不同边界条件的回采工作面微震监测剖面投影, 可知实体煤工作面开采时微震事件能级较低且整体分布为一个“等腰梯形”的断裂结构, 如图 10(a), 工作面上方 0~40 m 事件密集分布, 判断表 1 中岩层  $R_1 \sim R_5$  位于覆岩垮落带, 由于采高较大, 垮落带范围内的岩层破断后不能形成稳定的铰接结构, 将以悬臂状态加载至采空区两侧围岩; 工作面上方 40~140 m 微震事件呈现明显的线性分区分布, 判断  $R_6$ 、 $R_7$  厚硬岩层组位于覆岩裂隙带并且破碎岩体处于铰接状态, 加载至采空区矸石和两侧围岩; 工作面上方 140 m 以上区间无微震事件分布, 判断  $R_8$  及以上岩层组位于弯曲下沉带并处于悬顶状态。综上可知, 非充分采动条件下, 深部大采高综采面覆岩加载模式具有分区性, 垮落带基岩为悬臂结构加载, 裂隙带基岩为铰接结构加载, 弯曲下沉带基岩为悬顶结构加载。

沿空工作面开采时监测微震事件高度发育区间同样为 0~140 m, 对应岩层高度上限为  $R_6$  厚硬岩层组, 说明  $R_6$  厚硬岩层组即时加载至沿空工作面, 为沿空工作面的诱冲关键层, 而  $R_8$  厚硬岩层组为延时加载, 其破坏运动滞后于工作面, 对回采作业的冲击危险性影响较小。沿空工作面开采时微震事件能级整体高于实体煤工作面, 如图 10(b), 高能级微震事件主要集中在工作面中部和区段煤柱附近。由于工作面宽度远大于区段煤柱, 所以厚硬岩层  $R_6$  二次破断的最大弯矩位置可视为采空区中部, 即中部区域为厚硬岩层  $R_6$  的二次破断位置, 监测结果表明厚硬岩层  $R_6$  二次破断释放的能量远高于初次破断; 区段煤柱附近的高能级事件集中区说明了该区域具备较高的应力水平, 此区域煤岩体运动破坏时将释放积聚的弹性势能, 产生高能级微震事件。微震监测结果验证了深部大采高综采面厚硬岩层-煤柱结构力学模型、工程判据的正确性。

### 5 厚硬岩层-煤柱结构失稳诱冲防治

#### 5.1 防冲技术体系思路

结合厚硬岩层-煤柱结构失稳诱冲机理可知, 该类

型冲击地压的防控对象为厚硬岩层破断运动传递的叠加应力(应力源)、区段煤柱内部的弹性核区(冲击体),

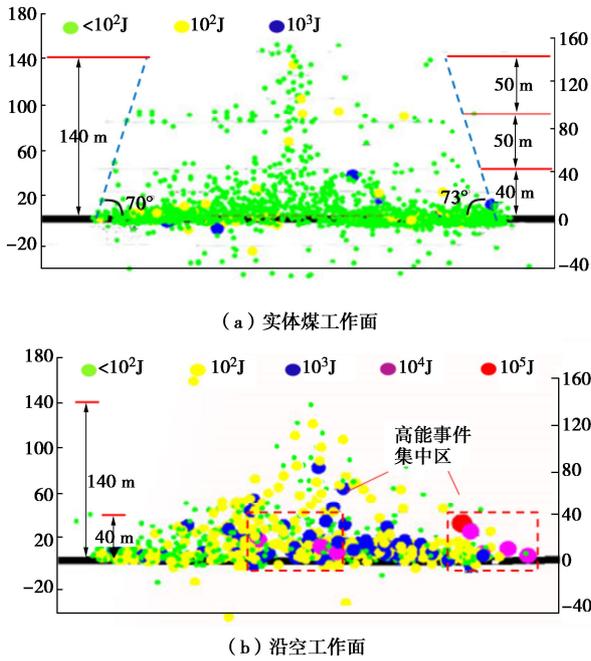


图 10 工作面微震监测投影

Fig. 10 Microseismic monitoring projection of working face

针对防控对象提出适用于深部大采高综采面厚硬岩层-煤柱结构的冲击地压防控体系,在保证监测预警强度和质量的的前提下,防控体系包括承载煤柱强卸载、扰动区域强支护和推进速度强管控。

(1) 承载煤柱强卸载

根据前章分析可知,煤柱强卸载即降低厚硬岩层组传递应力( $P_a$ )和弱化区段煤柱弹性核区( $d$ )。降低应力源采用顶板深孔爆破处理临侧采空区较接岩层组( $F_{2x}$ ),弱化冲击体采用煤层大直径钻孔破坏煤柱承载能力( $[\sigma_c]$ )。

(2) 扰动区域强支护

被动支护系统与区段煤柱共同承载厚硬岩层组传递的叠加应力,由式(22)可知,加强工作面超前影响区域的被动支护系统,相当于增加厚硬岩层运动时的承载宽度( $d$ ),从而减小传递基础应力( $\bar{P}_j$ 和 $\bar{P}'_j$ )达到降低冲击危险的目的,同时被动支护可以提高巷道支护体系的完整性和稳定性,减小区段煤柱强卸载导致的围岩大变形问题。

(3) 推进速度强管控

控制推进速度保持低速、匀速状态可以减少厚硬岩层组积聚能量的集中释放水平,从而降低厚硬岩层破断释能产生的区段煤柱附加应力( $P_d$ 和 $P'_d$ ),所以可以根据现场监测结果动态调整工作面临界推进速度。

5.2 现场防治设计与评价

(1) 防治措施设计

由于 30202 工作面现场试验顶板深孔爆破时多次出现 5 次方高能级微震事件,判断仅单侧采空时 19.5 m 区段煤柱承载应力处于危险水平,所以仅采用煤层大直径钻孔进行全巷道承载煤柱强卸载方案。针对区段煤柱弹性核区宽度大、煤体硬度高的特点,沿空巷道实施四轮煤层大直径钻孔预卸压措施,见表 2,一至三轮均为全巷道煤层预卸压,四轮针对单、双工作面“见方”来压区域集中预卸压。后续工作面区段煤柱设计时选择屈服宽度方案( $\leq 6\text{ m}$ ),从根本上消除煤柱弹性核冲击体。

表 2 煤层卸压钻孔施工方案

Table 2 Construction plans for pressure relief drilling of coal seam

参数	孔深/间距( $\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$ )							
	一轮	二轮	三轮	四轮				
煤柱帮	10	$\leq 2$	13	$\leq 2$	13	$\leq 2$	13	$\leq 1$
生产帮	20	$\leq 2$	20	$\leq 2$	22	$\leq 2$	35	$\leq 1$

针对 30202 回风巷回采扰动区域采取的强支护方案为工作面超前 200 m 以内采用 6 架垛式液压支架+160 架液压单元支架+锚索梁加强支护,工作面超前 200 m 以外采用单体液压支柱+锚索梁联合支护。

依据现场反馈确定“支护-卸压”条件下的安全极限推速:地表沉降进入稳沉阶段(第三次双工作面“见方”来压后)之前“见方”来压区间 4~6 刀/d、非“见方”来压区间 6~8 刀/d,稳沉阶段之后保持 8~10 刀/d。

(2) 防冲效果评价

将工作面倾向微震事件进行能量-频次统计分析,如图 11,监测统计的能量-频次集中区域均位于实体煤内部,其中频次峰值(214 个)位于面内距回风巷 100~125 m,能量峰值( $1.02 \times 10^6\text{ J}$ )位于面内距回风巷 0~25 m,而煤柱区域的微震能量-频次处于高频低能状态(频次 107 个、 $8.45 \text{ E} \times 10^5\text{ J}$ 能量),说明区段煤柱附近的应力集中程度低,能量释放均匀,高应力集中区转移至实体煤内部,实现回风巷处于“低应力”、“低扰动”、“低倾向”、“强支护”状态。

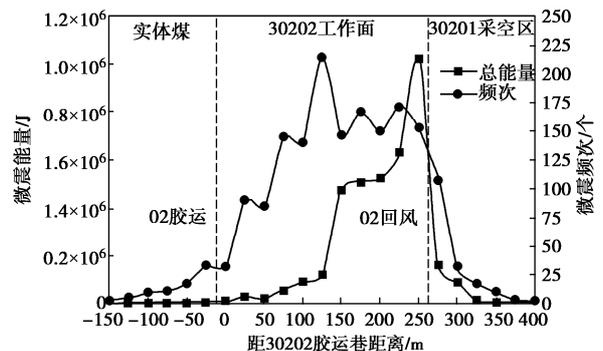


图 11 微震能量-频次倾向统计

Fig. 11 Statistics of microseismic energy-frequency tendency

## 6 结 论

(1) 探讨了深部大采高综采面厚硬岩层-煤柱结构的运动特征,建立了厚硬岩层-煤柱结构力学模型并量化了厚硬岩层“W”型破断条件下的煤柱承载应力演化规律,推导了厚硬岩层-煤柱结构失稳诱冲的工程判据。

(2) 揭示了深部大采高综采面厚硬岩层-煤柱结构失稳诱冲机理:区段煤柱承载基础应力来源于面内厚硬岩层组和临侧采空区铰接加载岩层,当面内厚硬岩层达到强度极限时发生“W”型破断并传递附加应力,区段煤柱承载的叠加应力超过其破坏阈值后发生局部甚至整体失稳冲击。

(3) 数值模拟、微震监测结果验证了空间结构、力学模型与工程判据的合理性。区段煤柱承载应力随厚硬岩层组的破断运动发生阶段性突增现象,厚硬岩层组“W”型两次破断运动传递的载荷是工作面附近区段煤柱失稳冲击的主要应力来源,二次破断释放的能量远高于初次破断。

(4) 设计并实施了深部大采高综采面厚硬岩层-煤柱结构失稳型冲击地压的控制体系,包括承载煤柱强卸载、扰动区域强支护和推进速度强管控,现场评价防冲体系安全有效。

### 参考文献:

- [1] 潘一山,代连朋. 煤矿冲击地压发生理论公式[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 789-799. (PAN Yishan, DAI Lianpeng. Theoretical formula of rock burst in coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 789-799. (in Chinese))
- [2] 齐庆新,王守光,李海涛,等. 冲击地压应力流理论及其数值实现[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 172-179. (QI Qingxin, WANG Shouguang, LI Haitao, et al. Stress flow theory for coal bump and its numerical implementation[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 172-179. (in Chinese))
- [3] 姜福兴,张翔,朱斯陶. 煤矿冲击地压防治体系中的关键问题探讨[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 203-213. (JIANG Fuxing, ZHANG Xiang, ZHU Sitao. Discussion on key problems in prevention and control system of coal mine rock burst[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 203-213. (in Chinese))
- [4] 朱斯陶,王博,姜福兴,等. 基于冲击地压-矿震协同控制的隔离煤柱合理宽度研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(6): 102-110. (ZHU Sitao, WANG Bo, JIANG Fuxing, et al. Study on reasonable width of isolated coal pillar based on rock burst-mine earthquake coordinated control[J]. Coal

- Science and Technology, 2021, 49(6): 102-110. (in Chinese))
- [5] 张俊文,董续凯,柴海涛,等. 厚煤层一次采全高低位厚硬岩层垮落致冲机理与防治[J]. 煤炭学报, 2022, 47(2): 734-744. (ZHANG Junwen, DONG Xukai, CHAI Haitao, et al. Mechanism and prevention of rock burst caused by the collapse of low-level thick hard rock strata at full-height mining face in thick coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(2): 734-744. (in Chinese))
- [6] 郭文豪,曹安业,温颖远,等. 鄂尔多斯矿区典型厚顶宽煤柱采场冲击地压机理[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(4): 720-729. (GUO Wenhao, CAO Anye, WEN Yingyuan, et al. Mechanism of rockburst in stopes with typical thick roof and wide coal Pillars in Ordos mining area[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(4): 720-729. (in Chinese))
- [7] 王博,姜福兴,朱斯陶,等. 陕蒙接壤深部矿区区段煤柱诱冲机理及其防治[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(3): 505-513. (WANG Bo, JIANG Fuxing, ZHU Sitao, et al. Mechanism and prevention of rock burst induced by segment Pillars in the deep mining areas of Shaanxi-Inner Mongolia adjacent regions[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(3): 505-513. (in Chinese))
- [8] 赵毅鑫,周金龙,刘文岗. 新街矿区深部开采邻空巷道受载特征及冲击失稳规律分析[J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1595-1606. (ZHAO Yixin, ZHOU Jinlong, LIU Wengang. Characteristics of ground pressure and mechanism of coal burst in the gob side roadway at Xinjie deep mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5): 1595-1606. (in Chinese))
- [9] 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. Mechanism and three-level collaborative prevention and control technology of narrow coal pillar rockburst in multiple key layers[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(S1): 45-56. (in Chinese))
- [10] 解嘉豪,韩刚,孙凯,等. 邻空巷坚硬顶板预裂爆破防冲机理及效果检验[J]. 煤炭学报, 2023, 48(5): 2078-2091. (XIE Jiahao, HAN Gang, SUN Kai, et al. Rockburst prevention mechanism and effect test of blast presplitting of hard roof in gob-side roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 2078-2091. (in Chinese))
- [11] 白贤栖,曹安业,刘耀琪,等. 基于震源机制解析的巨厚覆岩矿震破裂机制[J]. 煤炭学报, 2023, 48(11): 4024-4035.

- (BAI Xianxi, CAO Anye, LIU Yaoqi, et al. Mine earthquake mechanism of extremely thick strata based on focal mechanism analysis[J]. Journal of China Coal Society, 2023, **48**(11): 4024-4035. (in Chinese))
- [12] 韩刚, 窦林名, 张寅, 等. 沿空巷道动力显现影响机制与防治技术研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, **38**(4): 730-738, 748. (HAN Gang, DOU Linming, ZHANG Yin, et al. Influence mechanism and prevention technology of dynamic manifestation of roadway along goaf[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, **38**(4): 730-738, 748. (in Chinese))
- [13] 张俊文, 董续凯, 柴海涛, 等. 地质异常区域多工作面开采结构演化及冲击地压防治[J]. 煤炭科学技术, 2023, **51**(2): 95-105. (ZHANG Junwen, DONG Xukai, CHAI Haitao, et al. Structure evolution and rockbursts prevention in multi-face mining in geological anomaly area[J]. Coal Science and Technology, 2023, **51**(2): 95-105. (in Chinese))
- [14] 丛利, 翁明月, 秦子晗, 等. 坚硬顶板三次强扰动临空宽煤柱诱冲机制及防治[J]. 煤炭学报, 2022, **47**(增刊 1): 125-134. (CONG Li, WENG Mingyue, QIN Zihan, et al. Mechanism and prevention of coal pillar induced by three times strong disturbance of hard roof[J]. Journal of China Coal Society, 2022, **47**(S1): 125-134. (in Chinese))
- [15] 朱斯陶, 姜福兴, 朱海洲, 等. 高应力区掘进工作面冲击地压事故发生机制研究[J]. 岩土力学, 2018, **39**(增刊 2): 337-343. (ZHU Sitao, JIANG Fuxing, ZHU Haizhou, et al. Study on the mechanism of rock burst accident in driving face in high stress area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(S2): 337-343. (in Chinese))
- [16] 尚晓光, 朱斯陶, 姜福兴, 等. 地面直井水压致裂防控巨厚硬岩运动型矿震试验研究[J]. 煤炭学报, 2021, **46**(增刊 2): 639-650. (SHANG Xiaoguang, ZHU Sitao, JIANG Fuxing, et al. Experimental study on prevention and control of sports mine earthquake in super-thick hard rock by ground vertical well water pressure fracturing[J]. Journal of China Coal Society, 2021, **46**(S2): 639-650. (in Chinese))
- [17] 于斌, 朱卫兵, 高瑞, 等. 特厚煤层综放开采大空间采场覆岩结构及作用机制[J]. 煤炭学报, 2016, **41**(3): 571-580. (YU Bin, ZHU Weibing, GAO Rui, et al. Strata structure and its effect mechanism of large space stope for fullymechanized sublevel caving mining of extremely thick coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2016, **41**(3): 571-580. (in Chinese))
- [18] 李振雷, 何学秋, 窦林名. 综放覆岩破断诱发冲击地压的防治方法与实践[J]. 中国矿业大学学报, 2018, **47**(1): 162-171. (LI Zhenlei, HE Xueqiu, DOU Linming. Control measures and practice for rock burst induced by overburden fracture in top-coal caving mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, **47**(1): 162-171. (in Chinese))
- [19] 朱斯陶, 刘金海, 姜福兴, 等. 我国煤矿顶板运动型矿震及诱发灾害分类、预测与防控[J]. 煤炭学报, 2022, **47**(2): 807-816. (ZHU Sitao, LIU Jinhai, JIANG Fuxing, et al. Classification, prediction, prevention and control of roof movement-type mine earthquakes and induced disasters in China's coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2022, **47**(2): 807-816. (in Chinese))
- [20] 朱斯陶, 姜福兴, 王绪友, 等. 特厚煤层掘进面围岩能量积聚特征及诱冲机制研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(11): 2071-2078. (ZHU Sitao, JIANG Fuxing, WANG Xu-you, et al. Study on energy accumulation characteristics and induced scouring mechanism of surrounding rock in tunneling face of extra thick coal seam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(11): 2071-2078. (in Chinese))