



移动扫码阅读

曹安业, 吕国伟, 薛成春, 等. 关键层复合效应下动静载诱冲机制及影响因素[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(9): 141–152.

CAO Anye, LYU Guowei, XUE Chengchun, *et al.* Mechanism and influencing factors of dynamic-static load induced rock burst under the composite effect of key strata[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(9): 141–152.

## 关键层复合效应下动静载诱冲机制及影响因素

曹安业<sup>1,2,3</sup>, 吕国伟<sup>1</sup>, 薛成春<sup>1</sup>, 翁明月<sup>4</sup>, 张学启<sup>5</sup>, 马祥<sup>6</sup>, 彭雨杰<sup>1</sup>, 白贤栖<sup>1</sup>, 郝琪<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 深部煤炭资源开采教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116;

3. 中国矿业大学 江苏省矿山地震监测工程实验室, 江苏 徐州 221116; 4. 上海大屯能源股份有限公司江苏分公司, 江苏 徐州 221600;

5. 内蒙古伊泰煤炭股份有限公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017000; 6. 内蒙古伊泰广联煤化有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017000)

**摘要:**鄂尔多斯矿区直罗组内邻近砂岩层间的运动及破断会相互影响形成复合效应, 导致工作面超前支承应力峰值大、范围广, 大能量微震事件频发, 不同关键层影响下的动力显现特征也不尽相同。基于某矿3<sup>-1</sup>02工作面不同钻孔控制区域动力显现的差异性, 采用理论分析及数据分析方法构建了厚砂岩关键层复合效应结构力学模型, 提出了复合关键层形成的判定条件, 揭示了复合关键层采场冲击地压发生机理, 模拟研究了分层厚度比、中间层厚度对岩层复合效应的影响, 优化了复合效应作用下释能降载方案。研究结果表明: 近煤层关键层赋存状态的不同是引起动力显现差异性的根本原因, 2层厚度超过30 m砂岩层赋存区域冲击危险程度高于单层厚度为50~70 m的区域; 提出了复合关键层的形成条件: 2个关键层同步运动且在岩层接触面及模型最大剪应力处均不产生剪切滑移; 复合关键层作用下工作面超前支承应力峰值及影响范围增加, 破断释放动载强烈, 与现场数据吻合, 佐证了关键层复合效应下的冲击是由静载及多次强动载叠加作用诱发; 上下分层厚度越接近、中间层厚度越薄, 岩层间的复合效应越明显; 优化后的顶板深孔爆破及煤体大直径钻孔方案施工后, 工作面大能量微震事件活动强度、煤岩体应力集中水平明显降低, 有效弱化了关键层复合效应对冲击危险的影响程度。

**关键词:** 大能量微震事件; 复合关键层; 复合效应; 冲击地压; 动静载

**中图分类号:** TD324

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0253-2336(2025)09-0141-12

## Mechanism and influencing factors of dynamic-static load induced rock burst under the composite effect of key strata

CAO Anye<sup>1,2,3</sup>, LYU Guowei<sup>1</sup>, XUE Chengchun<sup>1</sup>, WENG Mingyue<sup>4</sup>, ZHANG Xueqi<sup>5</sup>,  
MA Xiang<sup>6</sup>, PENG Yujie<sup>1</sup>, BAI Xianxi<sup>1</sup>, HAO Qi<sup>1</sup>

(1. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. MOE Key Laboratory of Deep Coal Resource Mining, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. Laboratory of Mine Earthquake Monitoring and Prevention (Jiangsu), China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 4. Jiangsu Branch of Shanghai Datun Energy Co., Ltd., Xuzhou 221600, China; 5. Inner Mongolia Yitai Coal Co., Ltd., Ordos 017000, China; 6. Inner Mongolia Guanglian Yitai Coal & Chemical Industry Co., Ltd., Ordos 017000, China)

**Abstract:** In Ordos mining area, the movement and fracture of adjacent sandstone strata in Zhiluo Formation are prone to interacting with each other to form composite effects, resulting in high peak and wide range of advanced support stress on the working face, as well as frequent large energy micro-seismic events, and different dynamic characteristics under the influence of different composite key strata. Based on the discrepancies in dynamic behavior of different drilling control areas on the 3<sup>-1</sup>02 working face, a structural mechanics model of thick sandstone key strata composite effects were constructed using theoretical analysis and data analysis methods, the mechanism of rock

收稿日期: 2025-05-22

策划编辑: 朱恩光

责任编辑: 刘雅清

DOI: 10.12438/cst.2025-0707

**基金项目:** 国家重点研发计划资助项目(2022YFC3004603); 国家自然科学基金资助项目(52274098); 江苏省创新支撑计划国际科技合作/港澳台科技合作-重点国别产业技术研发合作资助项目(BZ2023050)

**作者简介:** 曹安业(1982—), 男, 江苏盐城人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: caoanye@163.com

**通讯作者:** 吕国伟(1994—), 男, 山西朔州人, 博士研究生。E-mail: lyuguowei@cumt.edu.cn

burst in the stope of composite thick and weak key strata was revealed. The influence of the overlying and underlying strata thickness ratio and the interlayer thickness on the composite effect of rock strata was simulated, and the energy release and load reduction scheme under the action of composite effect was optimized. The results show that the discrepancies in the occurrence state of key strata near the coal seam is the fundamental reason for the difference in dynamic behavior. The rock burst hazard in areas with two sandstone strata with a thickness of more than 30 m is higher than that in areas with a single layer of 50–70 m. The formation conditions of composite key strata are proposed: the two key strata move synchronously and have no shear slip at the strata interface and maximum shear stress in the model. Under the composite effect of key strata, the peak stress and range of advanced support increase, with the strong dynamic load released by rock fracture, which is basically consistent with the on-site data, confirming that the rock burst under the composite effect of key strata is induced by the superposition of static load and multiple strong dynamic loads. The closer the thickness of the overlying and underlying and the thinner the thickness of the interlayer, the stronger the composite effect between the rock strata. After the optimization of deep hole blasting in the roof and large-diameter drilling in the coal seam, the intensity of large energy micro-seismic events activity on the working face and the concentration of stress in the coal-rock mass are significantly reduced, effectively weakening the composite effect of key strata on the rock burst hazard.

**Key words:** high-energy microseismic event; composite key strata; composite effect; rock burst; dynamic and static load

## 0 引 言

随着鄂尔多斯矿区煤炭资源的开发利用,部分矿井已处于深部开采力学状态<sup>[1-2]</sup>,冲击地压矿井数量及冲击灾害发生频次逐年增加<sup>[3-4]</sup>。鄂尔多斯矿区红庆河煤矿、营盘壕煤矿、石拉乌素煤矿等冲击矿井的侏罗系直罗组受沉积作用等影响,砂岩层赋存特征较为特殊<sup>[5-7]</sup>;砂岩层强度多低于 40 MPa,总厚度为 90~187 m,距煤层距离为 14~110 m,且砂岩层空间赋存差异性大,多呈单层特厚(>50 m)或多层厚砂岩(20~40 m/层)交替赋存的特征,常构成邻近工作面的冲击危险主控关键层,对采动应力场、能量场的非稳态演化具有显著控制作用。

钱鸣高等<sup>[8]</sup>提出的覆岩关键层理论指出:采场上方厚硬岩层对覆岩的变形、破坏起主要控制作用,破断前以“板或梁”结构作为上部岩层的承载主体,破断后形成的砌体梁结构影响着采场矿压显现及岩层移动;且当 2 个关键层距离较近时,可能产生类似于复合板或复合梁的结构,从而增强关键层的整体承载能力。在此基础上,相关学者定义了复合关键层、关键层的复合效应等基本概念,基于有限元数值计算方法定量分析了软弱夹层厚度、复合层相对厚度、采高等对复合关键层破断的影响,同时得出了复合效应会影响采场矿压、覆岩裂隙发育、地表沉降等岩体活动<sup>[9]</sup>。孙振武等<sup>[10]</sup>构建了复合岩层力学模型,将横截面任一位置的剪应力与抗剪强度的关系作为组合层是否在破断前错动的判别准则,提出了采场复合关键层形成条件的理论公式。王海洋<sup>[11]</sup>引入中性轴概念进一步完善了复合关键层形成条件的判别公式。许家林等<sup>[12]</sup>采用物理试验及数值模拟的方法揭示了松散承压含水层载荷传递对关键层复合破断

的影响机制。潘红宇等<sup>[13]</sup>建立了 Winkler 地基上复合关键层模型,引入抗挠刚度分析了复合关键层下支承应力演化特征。付宝杰等<sup>[14]</sup>采用并行电法测试技术分析了复合关键层运动、破断规律。同时,部分学者指出复合岩层可等效为单一均质岩层重新判别关键层<sup>[12-13]</sup>,复合关键层破断距增大,超前支承应力峰值上升,强矿压显现的可能性增加,其对上覆岩层的运移及地表沉降影响更为突出<sup>[15-17]</sup>。

现有研究成果多以山西、山东等中东部矿区地层条件为研究对象,揭示了复合关键层对岩层运动、应力演化、地表沉降等规律。然而,不同于以往的研究对象,鄂尔多斯矿区直罗组砂岩层具有单层厚、强度低、距煤层近等特征。不同钻孔控制区域的冲击危险及动力显现程度存在差异性,主要表现为:工作面在多层厚砂岩交互区回采时,冲击危险程度高于单一厚砂岩关键层区域,超前支承应力峰值大、影响范围广,临空侧巷道变形严重,顶板破断距大,大能量微震事件频发。该条件下不同区域冲击危险、动力显现差异性的诱因尚不明晰,厚砂岩关键层间相互影响下的诱冲机理研究较少,缺乏针对性的防治理念。

笔者针对鄂尔多斯矿区某矿工作面典型的动力显现特征,对厚砂岩关键层能否形成复合效应进行探讨,分析覆岩运动及煤体支承应力分布规律,揭示关键层复合效应作用下冲击地压发生机理,优化防冲技术措施,旨在为类似采场冲击地压的防治工作提供依据。

## 1 工作面动力显现特征

### 1.1 工作面概况

3<sup>-1</sup>02 工作面为鄂尔多斯矿区采区第 2 个工作面,走向长度为 3 616 m,倾向长度为 246 m,东南侧

为 3<sup>-1</sup>01 采空区,工作面间留设 40 m 区段煤柱,如图 1 所示。工作面平均采深 710 m,煤层平均厚度为 6.25 m,平均倾角为 2°。

基于关键层判别理论、3<sup>-1</sup>02 工作面全钻孔信息等分析,发现在工作面上方 100 m 范围内直罗组岩层中普遍存在一组砂岩关键层,累计厚度不低于

50 m,控制着距 3-1 煤层较近的岩层运动及破断,见表 1。该直罗组岩层受成岩年代、沉积作用等影响,展现出与中东部矿区同类型岩石不同的力学属性:岩石宏观结构较为松散,多为抗压强度小于 40 MPa 的弱胶结岩石,各类岩石强度排序:砾岩>砂质泥岩/泥岩>粉砂岩>细/中/粗砂岩。

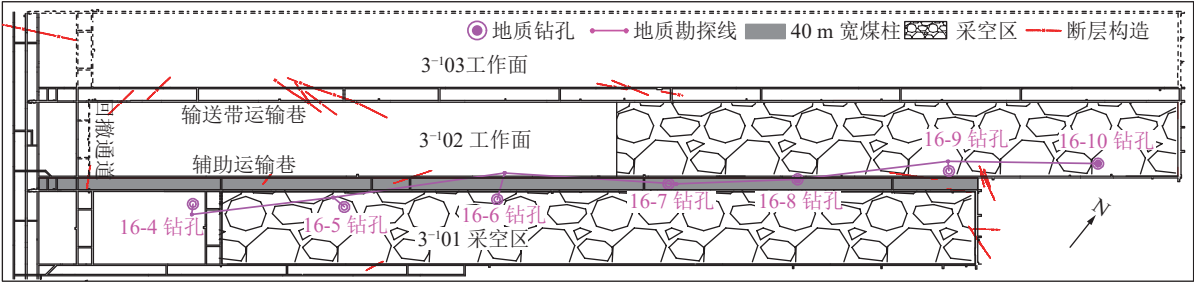


图 1 3<sup>-1</sup>02 工作面平面布置  
Fig.1 Plan layout of 3<sup>-1</sup>02 working face

表 1 3-1 煤层上方 100 m 范围关键层  
Table 1 Key stratum within 100 m above 3-1 coal seam

钻孔序号	岩性	层厚/m	距煤层距离/m	单轴抗压强度/MPa
16-4 钻孔	中粒砂岩	66.7	27.9	22.77
16-5 钻孔	粗粒砂岩、中粒砂岩	47.6、53.8	6.4	22.88、22.77
16-6 钻孔	中粒砂岩	60.0	25.2	22.77
16-7 钻孔	中粒砂岩、细粒砂岩	36.8、34.6	24.4	22.77、18.68
16-8 钻孔	中粒砂岩	70.0	19.5	22.77
16-9 钻孔	粉砂岩	48.8	31.5	29.24
16-10 钻孔	粗粒砂岩	66.9	31.8	22.88

1.2 不同区域大能量微震事件演化特征

沿工作面走向,某钻孔控制范围定义为:该钻孔分别与其前后相邻 2 个钻孔连线的垂直平分线所限定的区域。3<sup>-1</sup>02 工作面在 16-7 钻孔控制区域回采期间,大能量微震事件(能量超过 5×10<sup>4</sup> J)诱发动力显现现象:动力显现发生于辅运巷,覆盖范围约 60 m,顶板下沉、底鼓帮鼓、部分锚杆(索)崩断,同时伴随冲击气流、粉尘等。为分析不同区域冲击危险程度的差异性,统计了 3<sup>-1</sup>02 工作面推进 0~1 850 m 期间监测到的 118 次大能量事件,如图 2 所示,其分布特征如下:

1) 大能量事件主要分布于煤层上方 30~80 m 范围内的直罗组厚砂岩关键层中,表明强度低的关键层具备较强的承载能力,其运动、破断释放的能量极易诱发工作面动力显现,为诱冲关键岩层;同时,在 16-8—16-10 钻孔控制区域微震事件分布于关键层中下方,而在 16-7 钻孔控制区域微震事件覆盖整

个关键层区域。可见,16-7 钻孔关键层在回采期间协同运动,顶板活动性加剧。

2) 对比统计 16-7—16-10 钻孔控制范围内的大能量事件总频次分别为 40、20、28、30 次;总能量分别为 8.90×10<sup>6</sup>、3.41×10<sup>6</sup>、5.36×10<sup>6</sup>、4.17×10<sup>6</sup> J,16-7 钻孔控制范围内的分层厚砂岩关键层破断诱发大能量事件强度明显高于邻近钻孔同一层位单一厚砂岩层破断强度。

综上分析,3<sup>-1</sup>02 工作面上方 100 m 范围内的厚砂岩关键层破断失稳是诱发大能量事件的主要因素;不同钻孔控制的砂岩层厚度、岩性不同,导致大能量事件演化特征有所差异,主要体现在:16-7 钻孔控制区域上方为 2 层相邻的厚度超 30 m 砂岩层,工作面回采至该区域时大能量事件频次、能量较回采至其他钻孔单一厚关键层区域时有所增加。

1.3 不同区域超前应力分布规律

选取安装在 3<sup>-1</sup>02 辅运巷里程 2 340、1 875 m

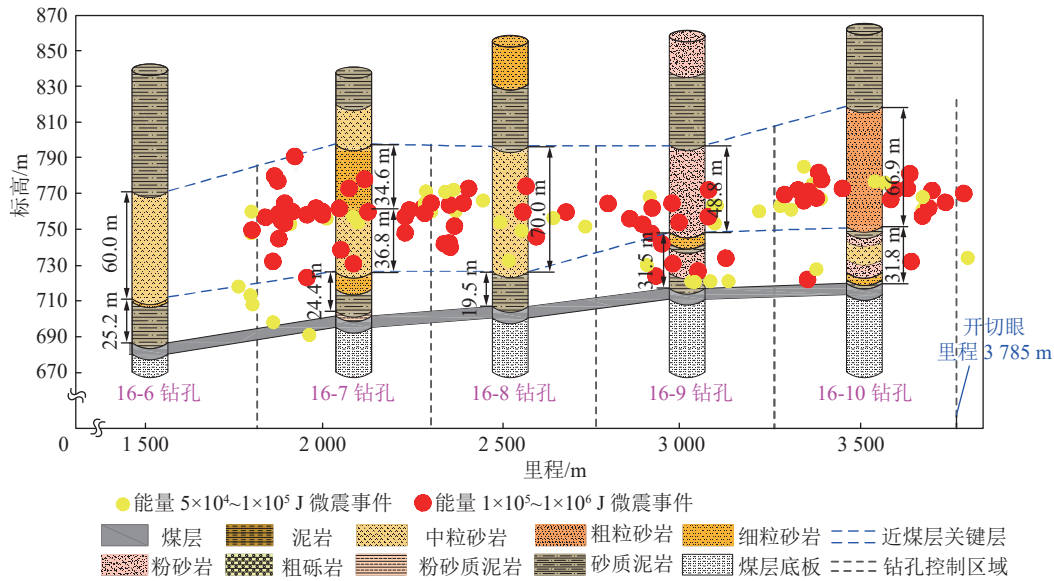


图 2 3<sup>-1</sup>02 工作面不同钻孔控制区域大能量微震事件剖面分布

Fig.2 Profile distribution of high-energy microseismic events in different borehole control zones of 3<sup>-1</sup>02 working face

的 41 号、71 号应力计, 分别位于 16-8 钻孔、16-7 钻孔控制范围内, 其中浅孔深度为 7 m、深孔深度为 13 m。通过分析工作面距应力监测点不同距离的应力值, 可以反推采场超前支承应力分布特征, 从而掌握顶板力源传递机制。

从图 3 可知, 各监测点的应力演化趋势较为一致, 深孔、浅孔应力计分别在距工作面约 330、285 m 时开始响应, 位于深部的应力计对采空区暴露岩层传递应力的响应程度较浅部的应力计更明显, 其应力波动范围更大, 工作面超前影响范围最远可达 330 m 且应力变化分区明显。位于 16-7 钻孔区域 71 号深孔应力计在超前工作面 101~240 m 区域呈上升趋势, 在 235~240 m 区域应力急剧抬升, 最大增长速率约为 0.63 MPa/m; 而位于 16-8 钻孔区域 41 号深孔应力计在超前工作面 102~222 m 区域呈上升趋势, 在 106~222 m 区域应力急剧抬升, 最大增长速率约为 0.19 MPa/m。可见, 16-7 钻孔控制区

域的应力影响范围及应力增长速率明显高于 16-8 钻孔区域, 其上方关键层载荷传递强度更高。

3<sup>-1</sup>02 工作面回采至 16-7 钻孔控制区域时, 大能量事件频次、能量明显增加, 超前应力影响范围大, 辅运巷局部区域发生以顶板下沉、底鼓帮鼓、部分锚杆(索)崩断等特征为主的动力显现, 即 16-7 钻孔控制区域与其他钻孔控制区域冲击危险程度存在差异性。经分析, 从开切眼至 16-7 钻孔范围内, 近煤层关键层赋存状态的不同是引起动力显现差异性的根本原因, 2 层厚度超过 30 m 砂岩层赋存区域冲击危险程度高于单层厚度为 50~70 m 的区域。

## 2 复合关键层采场动静载诱冲机理

### 2.1 复合关键层形成条件判定

当采场覆岩中存在 2 层及以上岩层时, 上下位岩层的运动变形和破断都会互相影响, 导致岩层强度及刚度明显增强, 这种影响称为邻近岩层间的复合效应; 若上下位岩层均为关键层, 它们间的影响称为关键层的复合效应, 同时将产生复合效应且同步破断的上、下位关键层统称为复合关键层<sup>[10,15]</sup>。

鄂尔多斯矿区覆岩多为岩石强度低、层厚大于 25 m 的砂岩层, 部分相邻的砂岩层为具有承载结构的关键层, 回采期间上下关键层是否具备协同运动、相互作用的条件需要进行研究。因此, 建立关键层复合效应结构力学模型<sup>[11]</sup>, 如图 4 所示。

模型主要研究区域为由上下 2 层关键层、中间层组成的矩形截面复合梁,  $h_1$ 、 $h_{12}$ 、 $h_2$  分别为从下往上的岩层厚度, m;  $E_1$ 、 $E_{12}$ 、 $E_2$  分别为从下往上的弹性

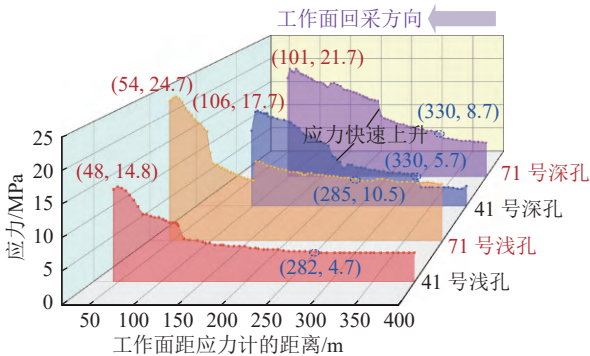


图 3 3<sup>-1</sup>02 工作面超前应力监测曲线变化

Fig.3 Advanced stress monitoring curves of 3<sup>-1</sup>02 working face



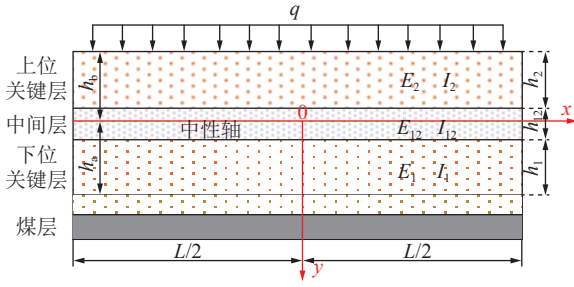


图4 关键层复合效应结构力学模型

Fig.4 Composite effect structure mechanical model of key strata

模量, GPa。假定复合梁中性轴在中间层内,  $h_a$ 、 $h_b$  分别为中性轴距下位、上位关键层距离, m;  $q$  为关键层承受的单位面积垂向载荷, MPa。基于复合梁横截面上的静力关系, 可得:

$$E_1 \int_{A_1} y_1 dA_1 + E_{12} \int_{A_{12}} y_{12} dA_{12} + E_2 \int_{A_2} y_2 dA_2 = 0 \quad (1)$$

式中:  $A_1$ 、 $A_{12}$ 、 $A_2$  分别为下位关键层、中间层及上位关键层的横截面积,  $m^2$ ;  $y_1$ 、 $y_{12}$ 、 $y_2$  分别为各岩层截面内任意一点到复合梁中性轴的垂直距离, m。

将模型条件代入式(1)可求得  $h_a$ :

$$h_a = \frac{E_1 h_1^2 + (E_{12} h_{12} + E_2 h_2)(2h_1 + h_{12}) + E_2 h_2^2}{2(E_1 h_1 + E_{12} h_{12} + E_2 h_2)} \quad (2)$$

复合梁中性轴上下应力场特征不同, 中性轴上方为受压区、下方为受拉区, 2 个部分剪应力表达式分别为

受拉区:  $-L/2 \leq x \leq L/2, 0 \leq y \leq h_a$ ,

$$\tau_{xya} = \frac{3qx}{2(h_1 + h_{12} + h_2)} \left( \frac{y^2}{h_a^2} - 1 \right) \quad (3)$$

受压区:  $-L/2 \leq x \leq L/2, 0 \leq y \leq -h_b$ ,

$$\tau_{xyb} = \frac{3qx}{2(h_1 + h_{12} + h_2)} \left( \frac{y^2}{h_b^2} - 1 \right) \quad (4)$$

式中:  $L$  为单一关键层的极限初次破断跨距, m。

复合关键层形成的条件为各岩层可以同步运动, 且在岩层接触面上及模型的最大剪应力处均不产生剪切滑移。从式(3)、式(4)可以发现, 模型的最大剪应力  $\tau_{12\max}$  分布于中性轴的两端, 岩层接触面上的最大剪应力  $\tau_{1\max}$ 、 $\tau_{2\max}$  分布于接触面的两端。因此, 形成复合关键层的条件可表征为式(5):

$$\begin{cases} \tau_{1\max} = \pm \frac{3qL(h_1^2 - 2h_a h_1)}{4(h_1 + h_{12} + h_2)h_a^2} \leq \tau_{g1} \\ \tau_{2\max} = \pm \frac{3qL(h_2^2 - 2h_b h_2)}{4(h_1 + h_{12} + h_2)h_b^2} \leq \tau_{g2} \\ \tau_{12\max} = \pm \frac{3qL}{4(h_1 + h_{12} + h_2)} \leq \tau_z \end{cases} \quad (5)$$

式中: 最大剪应力为负值时仅代表该位置的剪应力方向与坐标轴方向相反;  $\tau_z$  为中性轴所在岩层抗剪强度, MPa;  $\tau_{g1}$ 、 $\tau_{g2}$  分别为岩层层理面抗剪强度, MPa。岩层间水平层理面间抗剪强度<sup>[18]</sup> 计算式如下:

$$\tau_z = 0.4667\sigma + 0.1369 \quad (6)$$

式中:  $\sigma$  为岩层间层理面所受的垂向应力, MPa。

根据 16-7 钻孔信息得出 3-1 煤层上方 100 m 范围内存在 2 层厚砂岩关键层, 亚关键层 1 及亚关键层 2 的力学参数如下: 岩层厚度  $h_1=36.8$  m、 $h_2=34.6$  m, 弹性模量  $E_1=3.4$  GPa、 $E_2=3.8$  GPa, 容重  $\gamma_1=23$  kN/m<sup>3</sup>、 $\gamma_2=22.5$  kN/m<sup>3</sup>, 抗拉强度  $R_{T1}=1.6$  MPa、 $R_{T2}=2.2$  MPa。根据单一关键层理论计算, 亚关键层 1 为厚 36.8 m 的中粒砂岩, 控制岩层厚度为 36.8 m, 上覆载荷  $q_1=0.829$  MPa, 初次破断距  $L_1=72.28$  m; 亚关键层 2 为厚 34.6 m 的细粒砂岩, 控制岩层厚度 57.2 m, 上覆载荷  $q_2=1.00$  MPa, 初次破断距  $L_2=72.40$  m。考虑到 2 个关键层间无中间层赋存, 即  $h_{12}=0$  m, 代入式(2)中求得  $h_a=36.7$  m,  $h_b=34.7$  m, 即中性轴位于下方关键层中, 2 个关键层接触面位于中性轴上方受压区。因此, 2 个关键层若形成复合关键层需满足式(5)中后 2 项即可, 计算得到关键层接触面、中性轴处的最大剪应力均为 0.76 MPa。

研究的关键层所在区域垂直应力约为 16.8 MPa, 代入式(6)计算得到关键层接触面处的剪切强度为 7.98 MPa, 同时根据试验测定下方关键层中粒砂岩剪切强度为 5.24 MPa。16-7 钻孔区域上覆 100 m 范围内 2 层厚关键层的中性轴及接触面的剪切力均小于其剪切破坏强度, 满足复合关键层的形成条件。

## 2.2 复合关键层结构下动静载特征

当采场上方岩层满足复合关键层形成条件后, 可将复合关键层用等效的单一均质岩层替代<sup>[19]</sup>, 得到式(7)的复合关键层等效厚度  $h_e$ 、等效惯性矩  $I_e$ 、等效弹性模量  $E_e$ 、等效容重  $\gamma_e$ 。

$$\begin{cases} h_e = h_1 + h_{12} + h_2 \\ I_e = \frac{(h_1 + h_{12} + h_2)^3}{12} \\ E_e = \frac{E_1 I_1 + E_2 I_2 + E_{12} I_{12}}{I_e} \\ \gamma_e = \frac{\gamma_1 h_1 + \gamma_{12} h_{12} + \gamma_2 h_2}{h_e} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $I_1$ 、 $I_{12}$ 、 $I_2$  分别为下位关键层、中间层及上位关键层的惯性矩,  $m^4$ ;  $\gamma_{12}$  为中间层的容重, kN/m<sup>3</sup>。

本文仅针对复合关键层初次破断前悬顶结构引起的静载增量及初次破断诱发的动载进行分析。将复合层等效参数代入关键层理论中, 计算得到复合关键层及其所控制的岩层高度  $h$ 、复合关键层上覆

载荷  $q_c$  及其初次破断距  $L_c$ 。

$$\begin{cases} q_c = \frac{E_c h_c^3 (\gamma_c h_c + \gamma_2 h_2 + \cdots + \gamma_n h_n)}{E_c h_c^3 + E_2 h_2^3 + \cdots + E_n h_n^3} \\ h = h_c + h_2 + \cdots + h_n \\ L_c = h_c \sqrt{\frac{2R_T}{q_c}} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $n'$  为复合关键层所控制的岩层数;  $R_T$  为抗拉强度, MPa。

将前述 16-7 钻孔的复合关键层参数代入式(7)中, 求得复合关键层等效为单一均质岩层的力学参数如下:  $h_c=71.4$  m,  $I_c=30\ 332.86$  m<sup>3</sup>,  $E_c=0.90$  GPa,  $\gamma_c=22.75$  kN/m<sup>3</sup>; 代入式(8)中求得复合关键层上覆载荷  $q_c=2.08$  MPa, 控制的岩层厚度  $h=127.4$  m。考虑到下位关键层破断是复合关键层破断的前提, 将下位关键层抗拉强度代入计算得到复合关键层初次破断距  $L_c=88.6$  m。可见, 在上、下位关键层在复合效果影响下承载能力明显增强, 其控制的岩层高度及破断距较单一岩层明显增加。

1) 复合关键层结构下支承应力分布规律。工作面煤壁前方的支承压力分布形式由多种条件共同决定, 假设复合关键层处于初次破断前的完全悬顶状态, 其应力传递结构模型如图 5 所示。

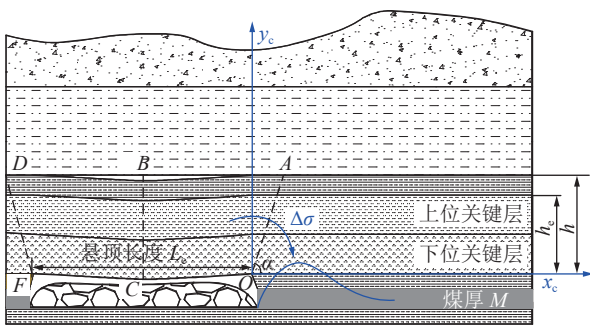


图 5 复合关键层初次破断前完全悬顶状态应力传递模型  
Fig.5 Stress transfer model of composite key strata in fully suspended state before initial fracture

悬顶的复合关键层结构( $OADF$  范围岩体)的自重应力由前后两侧实体煤共同承担, 即该结构向远方传递的应力增量  $\Delta\sigma$  可视右侧  $OABC$  结构传递的总应力。悬顶岩层传递至工作面超前区域支承应力增量分布可近似拟合为三角形分布<sup>[20]</sup> 表达式:

$$\Delta\sigma = \begin{cases} \frac{\sigma_{\max} \tan \alpha}{h} x_c & \left[0, \frac{h}{\tan \alpha}\right) \\ \sigma_{\max} \left(2 - \frac{\tan \alpha}{h} x_c\right) & \left[\frac{h}{\tan \alpha}, \frac{2h}{\tan \alpha}\right] \\ 0 & \left[\frac{2h}{\tan \alpha}, +\infty\right) \end{cases} \quad (9)$$

其中,  $OABC$  悬顶岩体传递应力峰值  $\sigma_{\max}$  表达式如下:

$$\sigma_{\max} = \frac{Q_{OABC} \tan \alpha}{h} = \frac{\gamma_c \tan \alpha}{2} \left(L_c + \frac{h}{\tan \alpha}\right) \quad (10)$$

式中:  $Q_{OABC}$  为  $OABC$  范围内覆岩结构的质量, kg;  $\alpha$  为复合关键层移动角, ( $^\circ$ )。

根据 3<sup>-1</sup>02 工作面覆岩运移监测得到岩层移动角  $\alpha=64^\circ$ , 将复合关键层悬顶结构参数代入式(9)一式(10), 求得该结构应力传递引起的工作面超前支承应力增量峰值为 3.52 MPa, 峰值位于煤壁前方约 62.1 m 区域; 同时基于 2.1 节中 2 个关键层参数, 计算不考虑复合效应下的 2 个关键层悬顶结构传递的支承应力增量的峰值叠加后为 2.76 MPa, 峰值位于工作面超前煤壁约 45.8 m, 超前应力分布曲线如图 6 所示。

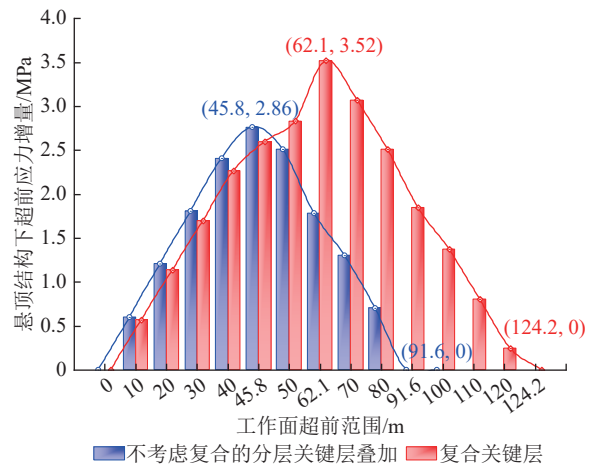


图 6 复合/非复合悬顶结构下超前应力增量曲线  
Fig.6 Advance stress increment curves of composite or single key strata suspended roof structure

根据超前支承应力分布特征可知, 暴露岩层向工作面前方传递的应力与悬顶岩层厚度、长度呈明显的正相关性。因此, 相比于各分层关键层而言, 复合关键层作用下的岩层极限破断长度及承载岩层厚度增加, 导致复合关键层悬顶结构对工作面传递的应力增量进一步上升, 应力影响范围扩大。

2) 复合关键层结构下破断能量释放特征。复合关键层结构破断释放的弹性能主要来源为顶板弯曲弹性能, 结合岩层悬顶系统贮能模型<sup>[21-22]</sup>, 得到复合关键层结构初次破断释放的能量为

$$U_{fw} = \eta \frac{q_c^2 L_c^5 b}{48 E_c h_c^3} \quad (11)$$

式中:  $U_{fw}$  为复合关键层结构初次破断释放的弹性能, J;  $\eta$  为地震效率, 表示以震动波形势释放的能量占破

断岩层释放弹性性能的比例,取 0.26%~3.60%; $b$  为关键层倾向破断跨距, m。

$\eta$  取 0.26%,  $b$  取工作面宽度的 1/3, 为 82 m, 计算得到复合关键层初次破断释放的能量为  $3.20 \times 10^5$  J; 同理, 计算不考虑复合效应下的分层关键层悬顶结构初次破断释放的能量叠加后为  $9.17 \times 10^4$  J。复合关键层结构控制的岩层厚度大、承载载荷强、初次破断距长, 导致该结构破断时释放的能量大。

### 2.3 复合关键层下冲击地压致灾机理

如图 7 所示, 复合关键层承载能力的增强并

不等于各分层关键层简单地线性叠加, 复合关键层上方承载岩层厚度增加, 覆岩承载载荷升高, 极限破断距增大。复合关键层破断前, 在暴露岩层的载荷传递作用下工作面超前区域静载水平升高, 主要体现为: 超前支承应力峰值高、应力影响范围大; 复合关键层达到极限强度破断时, 释放的强动载以震动波的形式向超前煤岩体区域传播。在复合关键层结构下的静载与多次强动载叠加作用下, 工作面易发生冲击、强矿压等动力显现。

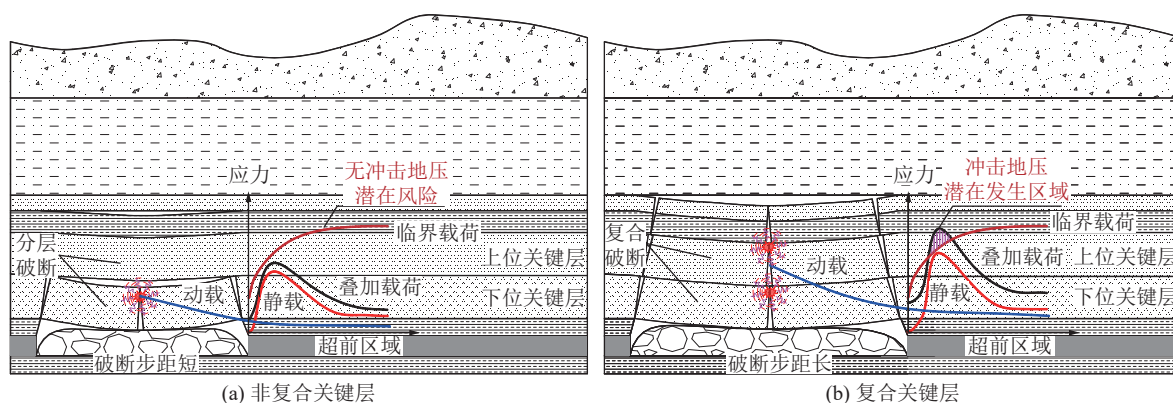


图 7 复合/非复合关键层下动静载冲击机理

Fig.7 Rock burst mechanism of dynamic and static combined load under composite or non-composite key strata

## 3 不同因素影响下复合效应响应特征分析

岩层形成复合效应的主要特征<sup>[15]</sup>: 上下位岩层同步破断且破断距增加, 超前支承应力峰值上升, 不同组合岩层状态下的复合效应强弱存在差异性, 而复合效应的强弱进一步影响着工作面的冲击危险。本文采用 UDEC 离散元数值模拟软件, 选取分层厚度比、中间层厚度 2 种因素, 分析岩层破断距及超前支承应力峰值演化规律, 研究不同岩层组合条件下复合效应的强弱。

### 3.1 复合效应模拟方案

基于 16-7 钻孔构建不同岩层组合下的复合效应强弱的数值模型, 如图 8 所示。模型尺寸为 500 m×250 m, 煤层厚度为 6 m, 模型顶部施加等效均布载荷为 12.25 MPa。模型底部采用固定边界, 其余面为滚支边界, 侧应力系数取 1.4, 重力加速度为 9.8 m/s<sup>2</sup>, 数值模型力学参数见表 2。

本文针对上下位关键层的分层厚度比、中间层厚度因素对复合效应强弱的影响展开研究, 模拟方案如下。工作面开挖 10 m 进行一次模拟计算, 用来研究工作面覆岩破断及煤层超前应力分布规律。

分层厚度比: 构建下分层距煤层距离为 0 m, 中

间层厚度为 0 m, 复合层总厚度为 70 m, 且上下分层厚度比分别为 5:2、4:3、1:1、3:4、2:5 的数值模型。

中间层厚度: 构建下分层距煤层距离为 0 m, 上下分层厚度均为 35 m, 中间层岩性为砂质泥岩, 且厚度分别为 0、10、20、30、40 m 的数值模型。

### 3.2 分层厚度比下复合效应响应特征

#### 3.2.1 工作面覆岩破断规律

上下分层能否同步下沉、破断是判别复合效应强弱的依据。选择各方案下工作面回采至 70、90 m

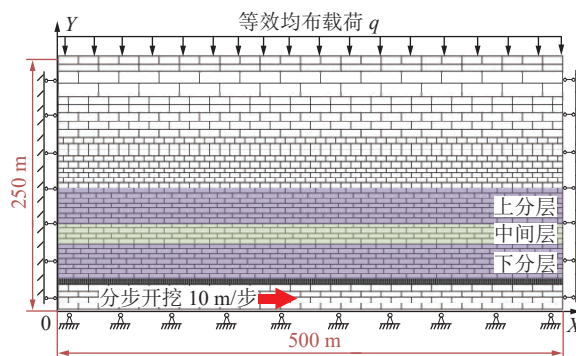


图 8 不同岩层组合的复合效应强弱数值模型

Fig.8 Numerical model of composite effect of different rock strata combination



表 2 UDEC 数值模型的力学参数  
Table 2 Mechanical parameters of UDEC numerical model

岩层	块体性质			节理参数				
	块体弹性模量/ GPa	泊松比	岩石质量指标 RQD/%	法向刚度/ GPa	切向刚度/ GPa	黏聚力/ MPa	内摩擦角/ (°)	抗拉强度/ MPa
砂质泥岩	5.9	0.32	93	28.3	9.9	4.1	33	3.8
细粒砂岩	2.2	0.28	90	9.7	3.4	2.4	27	1.7
中粒砂岩	2.0	0.28	90	8.7	3.1	2.6	27	1.7
煤	0.7	0.21	76	2.1	0.71	1.2	24	1.6

时的 Y 方向位移及顶板岩层破断特征进行分析,如图 9 所示。

由图 9 可以发现,上下分层厚度比为 5 : 2 时,下分层破断距为 70 m,此时上分层最大位移约为 2.10 m,上下分层间最大离层量可达 0.65 m,当工作面回采至 90 m 时,上分层开始破断,分层间最大离层量进一步增加至 0.95 m,可见,该分层厚度比的上下分层运动、破断有明显的独立性;当上下分层厚度比为 4 : 3、1 : 1、3 : 4 时,工作面回采后的覆岩运动、破断规律较为类似,即工作面回采至 70 m 时上下分

层均未破断,顶板最大位移约为 2.0 m,随着工作面进一步回采至 90 m 时,上下分层整体破断并垮落在采空区,2 个岩层间离层不明显;当上下分层厚度比为 2 : 5 时,下分层在工作面回采 70 m 时破断,此次下分层的下部区域呈“倒拱形”垮落至采空区,位移量及离层量较大,但下分层的上部区域与上分层整体性较强,仍保持较稳定的结构悬露在采空区上方,随着工作面回采至 90 m 时上下分层整体破断,此时上下分层的岩层破断形态与分层厚度比为 3 : 4 ~ 4 : 3 时的形态较为相似。

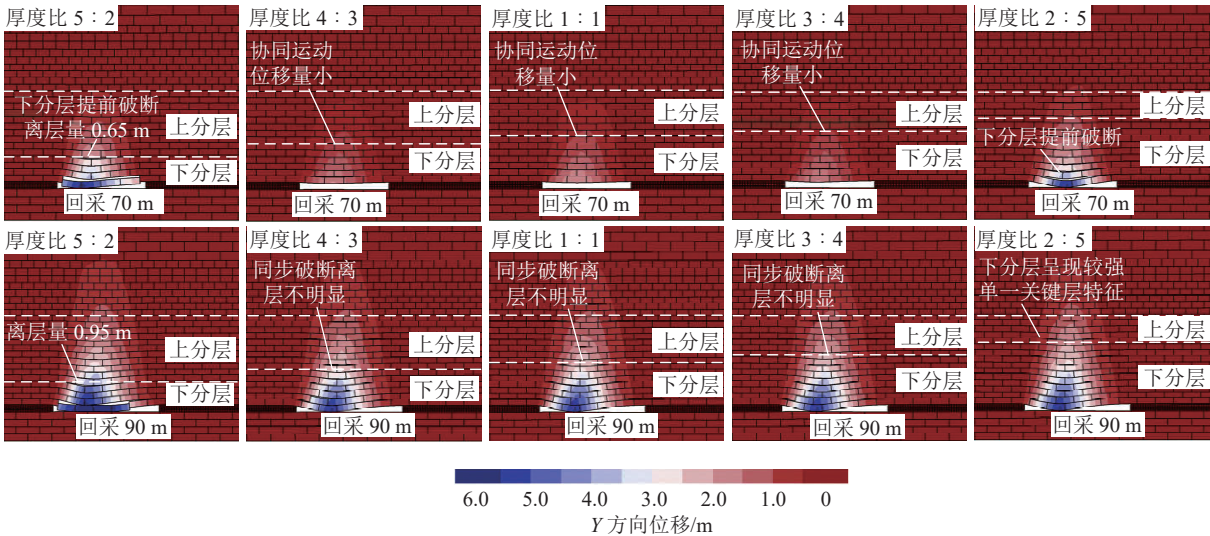


图 9 不同分层厚度比影响下覆岩破断规律  
Fig.9 Overburden fracture law under the influence of different strata thickness ratio

3.2.2 超前应力分布规律

上下分层形成复合效应后整体强度上升,该岩层结构悬顶时对煤体传递的应力也会增加。为保证各方案下工作面超前应力规律的对比性,选择工作面回采 60 m 时的煤体超前应力进行分析(测线取 Y=27 m),如图 10 所示。该回采尺度下 5 种分层厚度比方案的模型顶板均未破断。

由图 10 可以看出,随着上下分层厚度比的减小,工作面超前支承应力峰值呈先上升后下降的趋势。

当上下分层厚度比为 1 : 1 时,工作面超前应力峰值最大,应力峰值为 23.3 MPa,此时复合效应最强;当上下分层厚度比为 5 : 2 时,工作面超前应力峰值最小,应力峰值为 22.7 MPa。

通过分析可知,当下分层厚度较小时,层间的复合效应降低甚至消失,上下分层间呈现明显的分步运动及破断特征;当上下分层的厚度越接近时岩层间的复合效应越强,超前支承应力峰值及破断距也随之增加,工作面冲击危险性上升;当下分层厚度明



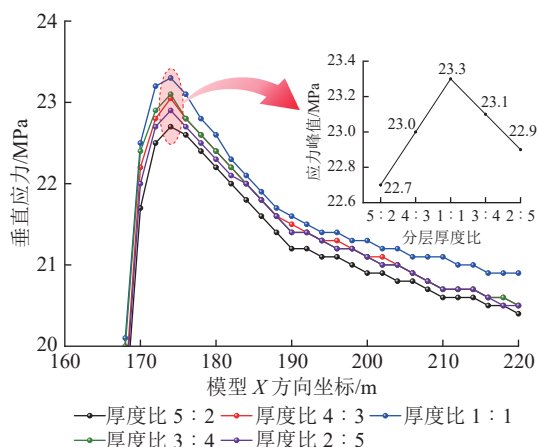


图 10 不同分层厚度比影响下工作面超前应力分布规律  
Fig.10 Advance stress distribution law under the influence of different strata thickness ratio

显大于上分层时,下分层显露出较强的单一关键层特征,但其超前支承应力及破断距有所降低,复合效

应明显弱化。

### 3.3 中间层厚度下复合效应响应特征

#### 3.3.1 工作面覆岩破断规律

选择各方案下工作面回采至 70、90 m 时 Y 方向位移及顶板岩层破断特征进行分析,如图 11 所示。

由图 11 可以发现,当中间层厚度为 0、10、20 m 的砂质泥岩时,岩层破断规律较为相似。当工作面回采至 90 m 时,上下分层整体破断并垮落至采空区,2 个岩层间离层不明显;当中间层厚度逐渐增加至 30、40 m 时,上下分层不再同步运动;当工作面回采至 70 m 时,下分层开始破断且部分垮落至采空区,此时下分层与中间层的离层量较小;随着工作面进一步回采至 90 m 时,下分层充分破断垮落,与中间层形成明显的离层空间,最大离层量分别为 1.5、2.2 m,上分层受到中间层的阻隔作用位移量较小,最大位移分别为 1.1、0.9 m。

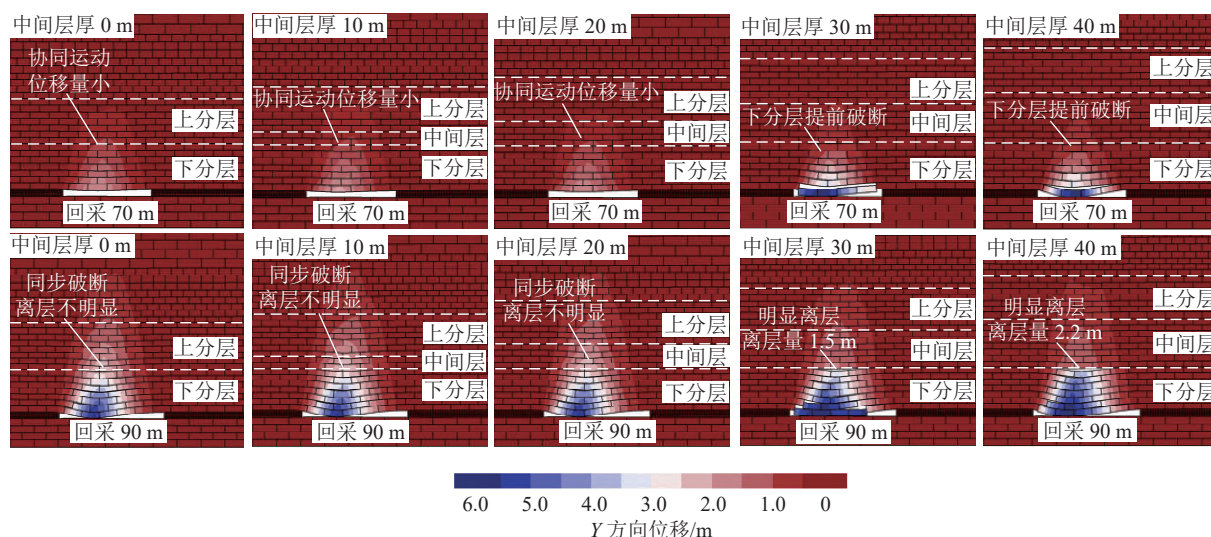


图 11 不同中间层厚度影响下覆岩破断规律

Fig.11 Overburden fracture law under the influence of different interlayer thickness

#### 3.3.2 超前应力分布规律

选择工作面回采 60 m 时顶板未破断时的煤体超前应力进行分析(测线取  $Y=27$  m),如图 12 所示。

由图 12 可以看出,当中间层厚度为 0、10、20 m 时,工作面超前应力峰值相同,峰值均为 23.3 MPa。随着中间层厚度逐渐增加至 30、40 m 时,工作面超前应力峰值随之下降,应力峰值分别为 22.9、22.4 MPa。

通过分析可知,随着中间层厚度接近或超过上下分层的厚度时,下分层会提前破断并垮落至采空区内,与中间层及上分层形成较明显的离层空间,超前应力集中程度有所下降,应力峰值降低,复合效应消失。可见,中间层的存在会隔断上下分层间的联

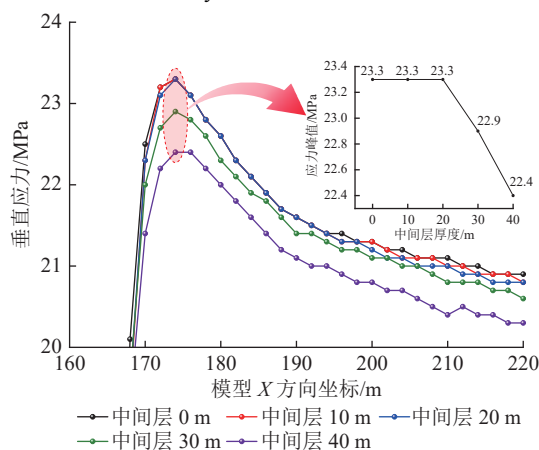


图 12 不同中间层厚度影响下超前应力分布规律

Fig.12 Advance stress distribution law under the influence of different interlayer thickness

系,弱化上下分层形成复合效应的可能性。

4 复合关键层采场防冲实践

图 13 为 3<sup>-1</sup>02 工作面内 16-5 钻孔柱状图,该钻孔中煤层上方约 6.40 m 处存在厚 47.60 m 粗粒砂岩、厚 53.80 m 的中粒砂岩。将岩层参数代入式(2)—式(6)中,计算得到关键层接触面、中性轴处的最大剪应力均为 0.96 MPa,小于其对应的剪切破坏强度,即上述岩层满足复合关键层的形成条件,需要采取针对性地防治措施:按照“破坏上下层位关键层间相互影响”的防治宗旨,根据现场顶板赋存、开采条件对爆破孔长度、装药量等关键参数进行动态调整与优化。

4.1 防治方案

针对 16-5 钻孔中岩层赋存特点,为避免上下位岩层形成较强的复合效应,针对性地提出顶板整体弱化及煤体应力释放相结合防治优化方案:

1)增加顶板深孔预裂爆破强度,对厚 47.60 m 的粗粒砂岩关键层中上部及厚 53.80 m 的中粒砂岩关键层下部进行致裂,一方面弱化 2 个关键层完整性,另一方面减小下位关键层的破断距,迫使关键层分

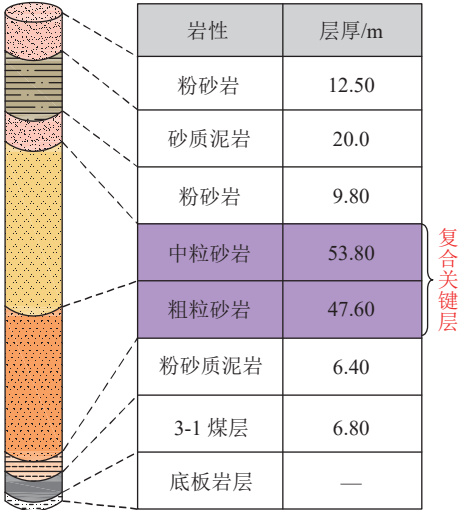


图 13 3<sup>-1</sup>02 工作面内 16-5 钻孔柱状图

Fig.13 Columnar section of 16-5 borehole within 3<sup>-1</sup>02 working face

层破断。辅运巷(邻空)、运输巷每 10 m 布置 1 组扇形爆破孔,对应巷道每组施工孔数分别为 5、3 个,爆破孔直径为 90 mm,正向装药,同时为确保爆破致裂效果,装药量由原先的 2~3 kg/m 增加至 4 kg/m,爆破参数见表 3。

表 3 顶板预裂爆破参数

Table 3 Roof presplitting blasting parameters

施工位置	孔号	孔深/m	仰角/(°)	装药量/kg	装药长度/m
2个巷道回采帮	F1或J1	83	43	200	50
	F2或J2	79	58	200	50
	F3或J3	69	75	180	45
辅运巷煤柱帮	F4	69	75	180	45
	F5	70	54	180	45

2)采用大直径卸压钻孔对工作面超前区域煤体进行弱化改性,降低超前煤体应力集中程度。钻孔孔径为 153 mm,钻孔间距由原先的 1.0~2.0 m 缩短至 0.8~1.6 m,钻孔深度由 20 m 增加至 25 m,钻孔距巷道底板 1.2~1.5 m,卸压方案如图 14 所示。

考虑到 2 个巷道冲击危险差异性,设计辅运巷、运输巷超前预卸压范围分别不低于 350、200 m。

4.2 防治效果检验

4.2.1 微震监测数据对比

如图 15 所示,16-5 钻孔控制区域内采取优化防治方案后,能量 $\geq 5.0 \times 10^4$  J 的事件总频次、总能量分别降低至 10 次、 $1.0 \times 10^6$  J,相较于未采用优化方案的 16-7 钻孔区域的大能量事件总频次、总能量(40 次、 $8.90 \times 10^6$  J)分别降低了约 75%、88.2%,反之,16-5 钻孔区域内小能量微震事件活动程度有所上升。可见,

优化的防治方案可有效切断上、下位关键层间的联系,关键层间复合效应显著弱化,微震事件由“低频次-高能量”的强风险特征转化为“高频次-低能量”的中低风险特征,降低了复合关键层协同破断释放的强动载对工作面影响。

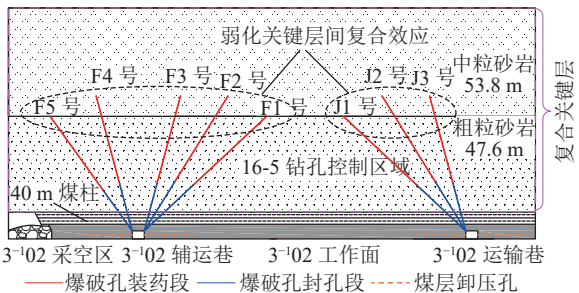


图 14 卸压方案示意

Fig.14 Schematic of stress relief scheme

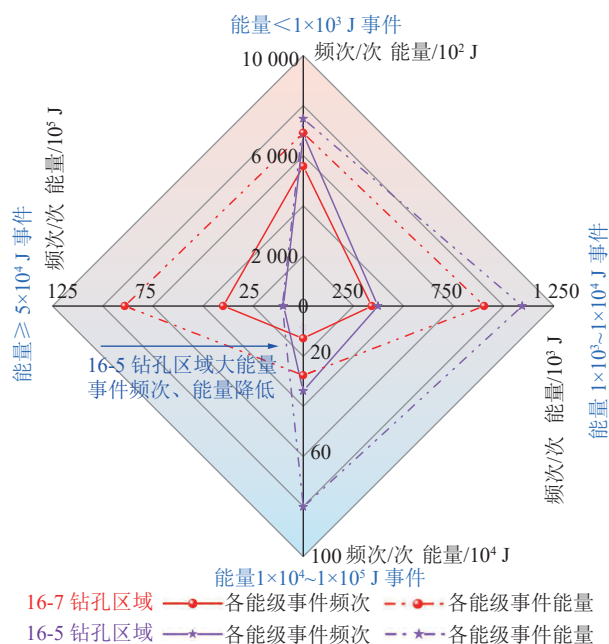


图 15 不同钻孔控制区域微震频次、能量

Fig.15 Microseism frequency and energy of different borehole control areas

#### 4.2.2 能量密度云演化特征

能量密度云可反映微裂隙的发育和能量释放, 高能量密度区域是微裂隙集中、煤岩体破坏验证的区域; 同时能量密度云成核可表征冲击地压发生前局部高应力集中区域的演化<sup>[23]</sup>。选取工作面在 2 个区域回采期间的微震数据绘制能量密度云, 如图 16 所示。

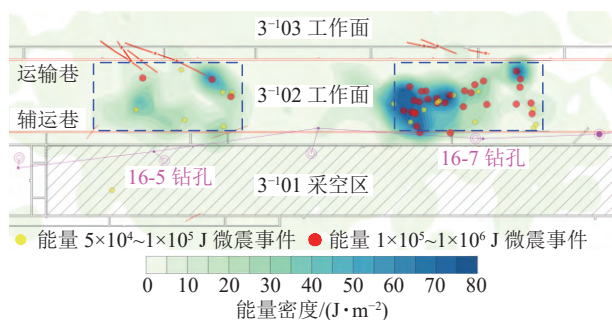


图 16 不同钻孔控制区域微震能量密度云

Fig.16 Microseism energy density cloud of different borehole control areas

结果显示, 16-7 钻孔控制区域回采期间的能量密度最大值为  $78.5 \text{ J/m}^2$ , 能量密度云成核区域范围大、分布集中, 且成核区域与大能量事件分布较为一致; 而 16-5 钻孔区域回采期间的能量密度最大值为  $58.4 \text{ J/m}^2$ , 能量密度最大值降低了约 25.6%, 且能量密度成核区域范围小、分布分散、远离邻空的 3-02 辅运巷侧。可见, 采取优化防治方案后, 弱化了煤岩

体积聚弹性能的能力, 降低了煤岩体内应力集中水平, 卸压效果明显。

## 5 结 论

1) 现场数据表明, 多分层厚砂岩关键层区域回采期间的大能量事件频次多、能量大、分布集中, 且超前应力测点对工作面回采扰动响应更为强烈, 其冲击危险程度较单一厚砂岩关键层区域回采时明显增强。关键层的赋存差异是造成不同区域冲击危险差异的本质原因。

2) 基于关键层复合效应结构力学模型, 提出了复合关键层形成条件判据。揭示了关键层复合效应下冲击地压机理: 工作面超前支承压应力峰值及影响范围增加, 且复合关键层破断释放动载强烈, 在高静载与多轮强动载叠加作用下易发生冲击。

3) 复合效应影响因素模拟表明: 假设上下分层岩性相近且层理面结合完整, 上下分层的厚度越接近时, 复合效应呈现增强趋势, 岩层厚度比为 1:1 时超前支承压应力峰值最大, 岩层协同破断; 中间层的存在会弱化上下分层间的协同性, 当中间层厚度接近或超过分层厚度时, 复合效应呈现降低趋势。

4) 基于复合关键层动静载诱冲机理, 优化了“顶板-煤体”协同释能降载的防治方案。该方案有效降低了工作面大能量微震事件活动强度及煤岩体应力集中水平, 弱化了复合关键层对工作面的冲击危险影响程度。

## 参考文献(References):

- [1] 谢和平, 高峰, 鞠杨. 深部岩体力学研究探索[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2161-2178.  
XIE Heping, GAO Feng, JU Yang. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2161-2178.
- [2] 张建民, 李全生, 张勇, 等. 煤炭深部开采界定及采动响应分析[J]. 煤炭学报, 2019, 44(5): 1314-1325.  
ZHANG Jianmin, LI Quansheng, ZHANG Yong, et al. Definition of deep coal mining and response analysis[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(5): 1314-1325.
- [3] 齐庆新, 马世志, 孙希奎, 等. 煤矿冲击地压源头防治理论与技术架构[J]. 煤炭学报, 2023, 48(5): 1861-1874.  
QI Qingxin, MA Shizhi, SUN Xikui, et al. Theory and technical framework of coal mine rock burst origin prevention[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 1861-1874.
- [4] 窦林名, 田鑫元, 曹安业, 等. 我国煤矿冲击地压防治现状与难题[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 152-171.  
DOU Linming, TIAN Xinyuan, CAO Anye, et al. Present situation and problems of coal mine rock burst prevention and control in China[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 152-171.



- [5] 孙利辉. 西部弱胶结地层大采高工作面覆岩结构演化与矿压活动规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(7): 1820.  
SUN Lihui. Structural evolution and rock pressure activity regularity of weakly cemented strata of the large mining height work face in Western China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(7): 1820.
- [6] 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.
- [7] 张帝. 基于多钻孔联合建模的鄂尔多斯矿区巨厚覆岩型矿震发生机制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.  
ZHANG Di. Study on the mechanism of super-thick overburden type mine earthquake in Ordos mining area based on multi-borehole joint modeling[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.
- [8] 钱鸣高, 许家林, 王家臣, 等. 矿山压力与岩层控制[M]. 3 版. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2021.
- [9] 王家臣, 许家林, 杨胜利, 等. 煤矿采场岩层运动与控制研究进展: 纪念钱鸣高院士“砌体梁”理论 40 年[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 80–94.  
WANG Jiachen, XU Jialin, YANG Shengli, et al. Development of strata movement and its control in underground mining: In memory of 40 years of Vossioir Beam Theory proposed by Academician Ming-gao Qian[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 80–94.
- [10] 孙振武, 缪协兴, 茅献彪. 采场覆岩复合关键层的判别条件[J]. 矿山压力与顶板管理, 2005, 22(4): 76–77, 83.  
SUN Zhenwu, MIAO Xiexing, MAO Xianbiao. Criterion for composite key layer on overlying strata[J]. Ground Pressure and Strata Control, 2005, 22(4): 76–77, 83.
- [11] 王海洋. 复合坚硬顶板变形破坏特征及对矿压显现的影响规律[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.  
WANG Haiyang. Deformation and breaking characteristics of compound hard roof and its influence on pressure behavior[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.
- [12] 许家林, 陈稼轩, 蒋坤. 松散承压含水层的载荷传递作用对关键层复合破断的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(4): 699–704.  
XU Jialin, CHEN Jiaxuan, JIANG Kun. Effect of load transfer of unconsolidated confined aquifer on compound breakage of key strata[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(4): 699–704.
- [13] 潘红宇, 李树刚, 张涛伟, 等. Winkler 地基上复合关键层模型及其力学特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(10): 4050–4056.  
PAN Hongyu, LI Shugang, ZHANG Taowei, et al. Composite key stratum module of Winkler foundation and its mechanical properties[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43(10): 4050–4056.
- [14] 付宝杰, 高明中, 涂敏, 等. 关键层的复合效应及其对矿压显现的影响[J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(2): 220–225.  
FU Baojie, GAO Mingzhong, TU Min, et al. Composite effect of key stratum and its influence on strata behaviors[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2016, 33(2): 220–225.
- [15] 钱鸣高. 岩层控制的关键层理论[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2000.
- [16] 张广超, 张广有, 周广磊, 等. 多工作面连续开采地表沉陷与强矿震联动响应规律[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2024, 6(1): 117–130.  
ZHANG Guangchao, ZHANG Guangyou, ZHOU Guanglei, et al. The linking response law of surface subsidence and strong mine earthquake in continuous mining of multiple working faces[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2024, 6(1): 117–130.
- [17] 郑凯歌, 袁亮, 杨森, 等. 基于分区弱化的复合坚硬顶板冲击地压分段压裂区域防治研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(2): 322–333.  
ZHENG Kaige, YUAN Liang, YANG Sen, et al. Study on prevention and control of rock burst staged fracturing area of composite hard roof based on zoning weakening[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(2): 322–333.
- [18] 张有乾. 考虑层间剪切特性复合顶板失稳机理及控制[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.  
ZHANG Youqian. Instability and control mechanism of layered compound roof in consideration of shear behavior of bedding plane[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.
- [19] 侯忠杰. 组合关键层理论的应用研究及其参数确定[J]. 煤炭学报, 2001, 26(6): 611–615.  
HOU Zhongjie. Study on application of combinatorial key stratum theory and parameters determining[J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(6): 611–615.
- [20] 姜福兴, 刘懿, 张益超, 等. 采场覆岩的“载荷三带”结构模型及其在防冲领域的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(12): 2398–2408.  
JIANG Fuxing, LIU Yi, ZHANG Yichao, et al. A three-zone structure loading model of overlying strata and its application on rockburst prevention[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(12): 2398–2408.
- [21] 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.
- [22] 白贤栖, 曹安业, 杨耀, 等. 高位巨厚覆岩运移规律及矿震触发机制研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(3): 10–20.  
BAI Xianxi, CAO Anye, YANG Yao, et al. Study on movement law of extremely thick strata and triggering mechanism of mine earthquakes[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(3): 10–20.
- [23] WANG G F, YUAN X Y, GONG S Y, et al. Understanding rockburst-generating behaviors and associated seismicity by using a spatial calculation methodology with an energy density index[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2018, 2018(1): 6128368.