

沿空侧向覆岩结构改性防冲机理与实践

谭云亮^{1,2}, 张修峰³, 范德源^{1,2}, 刘学生^{1,2}, 朱斯陶⁴, 牟宗龙⁵, 陈洋³

(1. 山东科技大学 能源与矿业工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 山东省深部矿井动力灾害智能防控重点实验室, 山东 青岛 266590; 3. 山东能源集团有限公司, 山东 济南 250101; 4. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083; 5. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要:无煤柱(或小煤柱)开采已得到广泛应用,随着开采深度增加,当侧空覆岩存在坚硬岩层时,大能量动力事件频发,冲击地压显现日趋严重,已成为制约深部煤炭资源开采的主要瓶颈之一。围绕沿空侧向覆岩结构改性防冲机理与实践开展研究,主要包括:构建了沿空工作面覆岩结构力学模型,提出了上位覆岩等效载荷估算方法,揭示了下位覆岩结构特征及演化规律;获得了沿空工作面下位覆岩运动对煤体内应力的定量表征方法,提出了以煤体的静载支承应力及关键层断裂产生的扰动应力之和与煤体强度比值大小为致灾指数的覆岩致灾关键层判别方法;定义了覆岩关键结构失稳致灾力学判据,综合分析应力状态和冲击倾向性指数对“发生冲击地压”的隶属度实现了侧空覆岩致灾风险评级;给出了侧空覆岩结构改性方法及防冲流程,并在新巨龙6305工作面开展了工程实践。结果表明,6305工作面实施侧空覆岩结构主动改性后,微震事件频次增幅33.3%,平均每个事件能量降幅23.5%;煤体应力集中程度显著降低,最大降幅约27.2%;沿空巷道围岩变形量明显减小,最大减小约104.7%;侧空覆岩致灾关键层得到消除,冲击地压的可能性等级为由“很可能”降为“不可能”。

关键词:深部;冲击地压;沿空巷道;覆岩结构;致灾;主动改性

中图分类号:TD324 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2025)01-0209-15

Mechanism and practice of structural modification to lateral overlying strata in gob-side entry for rockburst prevention

TAN Yunliang^{1,2}, ZHANG Xiufeng³, FAN Deyuan^{1,2}, LIU Xuesheng^{1,2}, ZHU Sitao⁴, MU Zonglong⁵, CHEN Yang³

(1. College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. Shandong Key Laboratory of Intelligent Prevention and Control of Dynamic Disaster in Deep Mines, Qingdao 266590, China; 3. Shandong Energy Group Co., Ltd., Jinan 250101, China; 4. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 5. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Pillarless (or small-pillar) mining method has been widely used. With increasing mining depth, the hard rock in the overlying strata leads to high stress concentration, extensive damage, and frequent high-energy dynamic events, which has become a major bottleneck in deep mining. In this study, the mechanism of rockburst prevention through the modification of lateral overlying strata was investigated. A mechanical model for lateral overlying strata was established, and an estimation method for the equivalent load of the upper overlying strata was proposed. The spatial structure characteristics and evolution of the lower overlying strata were revealed. A quantitative method for characterizing the stress in the coal

收稿日期: 2024-12-18 策划编辑: 郭晓炜 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.1565

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52374094); 山东省泰山学者攀登计划资助项目(tspd20210313); 山东省泰山产业领军人才工程资助项目(tscx202408130)

作者简介: 谭云亮(1964—),男,山东临朐人,教授,博士生导师。E-mail: yunliangtan@163.com

通讯作者: 范德源(1994—),男,山东泰安人,学术教授。E-mail: deyuan926@126.com

引用格式: 谭云亮,张修峰,范德源,等.沿空侧向覆岩结构改性防冲机理与实践[J].煤炭学报,2025,50(1):209-223.

TAN Yunliang, ZHANG Xiufeng, FAN Deyuan, et al. Mechanism and practice of structural modification to lateral overlying strata in gob-side entry for rockburst prevention[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(1): 209-223.



移动阅读

seam induced by lower overlying strata movement was developed. A disaster-causing index was introduced, defined as the ratio of the combined static stress and disturbance stress from key layer fractures to coal seam strength, and a method for identifying key disaster-causing layers was proposed. The mechanical criterion for the instability of the key layer is defined, and the impact risk assessment is realized by comprehensively analyzing the membership degree of stress state and impact tendency index to “rockburst occurrence”. A method of lateral overlying strata modification and a rockburst prevention process were proposed and engineering practice was applied in the 6305 working face of the Xinjulong coal mine. The results showed that after active modification, the frequency of micro-seismic events increased by 33.3%, while the average energy of each event decreased by 23.5%. The stress concentration was significantly reduced, with the maximum reduction of about 27.2%. The deformation of the surrounding rock was significantly decreased, with a maximum reduction of about 104.7%. Moreover, the key disaster-causing layers has been eliminated, and the possibility of rockbursts was reduced from “high-likely” to “non-likely”.

Key words: deep; rockburst; gob-side entry; overlying strata structure; disaster-causing; active modification

0 引 言

冲击地压作为煤矿开采过程中一种严重威胁矿山安全的动力灾害,具有显著的突发性和破坏性^[1-5]。尤其是深部开采在高地应力、高地温、高瓦斯压力等地质条件和强扰动、强时效等开采属性下,冲击地压等动力灾害发生的强度更为剧烈、频次更为密集、破坏更为严重^[6-7]。开采扰动使得采场周围岩体的原始平衡状态被打破,应力场、能量场和裂隙场将重新分布直至达到新的平衡。在此过程中,覆岩内将产生断裂、运移与变形等空间结构变化,并伴随着能量的积聚、耗散与释放^[8]。众多工程案例表明,煤矿冲击地压等动力灾害主要是覆岩空间结构运动演化及由此形成的高采动应力作用于煤岩体并使其应力及能量状态突变导致的^[9-11]。尤其是对于坚硬顶板,具有力学强度高、抗变形能力强、不易破断等特点。随着煤层开采空间增大,上覆坚硬岩层大面积悬而不垮,导致岩层内部应力集中程度加剧。当坚硬顶板达到极限跨距时发生覆岩运移破断,积聚的大量应变能突然释放与转移诱发工作面形成强烈的动力显现,严重威胁人员生命安全。因此,覆岩结构作为采场应力分布和能量积累的核心控制因素,直接决定了冲击地压的发生条件和动态演化过程。因此,研究覆岩结构对冲击地压的影响机制及其相关特性,具有重要的理论意义和实际工程价值。

国内外学者以不同视角对覆岩空间结构进行了深入探索。近代矿压理论中形成了以梁、板、拱壳为代表的覆岩结构假说^[12-17],其中梁模型由于边界条件简单、易于求解,被广泛应用。其中,具有代表性的是宋振骥院士^[13]提出的以岩层运动为核心的“传递岩梁”矿山压力理论体系,把我国矿山压力研究由统计数据

的阶段。钱鸣高院士^[18]在国际上首次提出的“砌体梁”和“关键层”覆岩结构理论体系,为我国矿山压力与岩层控制的研究奠定了基础。“传递岩梁”和“砌体梁”理论都是从采场煤岩层出发建立了采动岩层移动引起矿山压力变化理论,为矿山动力灾害防治理论体系的深入发展和不断完善奠定了基础。近年来,随着煤炭开采深度和强度不断增大,高地应力和大采动空间导致覆岩破断结构更为复杂,冲击地压等重大动力灾害逐渐增多^[19-20]。大量事故案例表明,重新认识矿山压力和岩层运动机理,进一步推动了采动影响覆岩结构理论发展十分必要。以“O-X”破断结构、类双曲线模型、连续曲梁模型为代表的从动态视角描述覆岩破断过程理论模型取得了重要进展^[21-23]。与此同时,冲击地压的研究不断尝试从覆岩破断承载结构、岩层运动演化、顶板完整性及强度等角度探索其致灾机理,为覆岩结构运移诱冲机理的研究提供了参考^[24-27]。

国内外学者对覆岩结构诱冲机理开展了大量研究。在理论模型方面,一些学者提出了顶板型冲击地压地质模型、岩层错动剪切梁模型、坚硬岩层断裂突变模型等,得到了对覆岩结构诱冲机理的初步认识^[28-33]。在室内试验研究方面,学者从覆岩岩层性质、坚硬岩层厚度及其组合方式等角度系统研究了煤岩组合体力学特性,获得了煤岩体破坏失稳声电热等前兆信息^[34-38]。在现场实测方面,有学者分析了坚硬岩层厚度对巷道围岩及工作面矿压显现乃至冲击地压发生的影响,验证了坚硬岩层破断是诱发冲击地压的重要因素^[39-41]。目前关于覆岩结构诱冲机理研究大致可分为3类:一是基于采矿学理论,从上覆岩层结构和空间应力分布分析岩层破断对冲击地压的影响^[42-44];二是借助动态加载试验技术手段,研究动载或冲击应力波作用下煤岩体变形破坏特征,从岩石动力学角度分析岩层破断诱冲机理^[45-47];三是将静力学

理论的冲击强度或能量理论直接扩展到冲击地压动力学理论,从宏观角度解释覆岩结构诱冲机理^[48-50]。

目前,已有关于覆岩承载结构和运移规律的研究在距采场较近的顶板研究较多,而距煤层较远但对冲击地压又有较多影响的覆岩,其破断前后的运动规律、形成的覆岩结构及致冲机理等方面还不清楚。虽然国内外学者针对坚硬覆岩层运移及其动力响应进行了研究^[8-17],从整体来看对致灾关键层机制及判识等方面仍不充分,尤其是覆岩不同结构对煤体附加静应力和动载冲击应力作用机制^[9, 26, 30],是揭示沿空巷道冲击地压发生机制的关键因素。因此,亟需开展沿空工作面覆岩结构运移致冲机理方面的研究。笔者针对山东能源集团所辖矿井典型地质条件,构建沿空工作面覆岩结构力学模型,探究采动影响下覆岩结构演化运移规律及对煤体内动静载荷定量表征方法,深入研究了覆岩结构失稳力学条件与致冲机理,为沿空工作面冲击地压防治提供理论与技术保障。

1 沿空侧向覆岩结构力学模型

根据对煤体的作用方式和影响程度的不同,可将工作面上覆岩层进一步划分为下位覆岩和上位覆岩,如图1所示。下位覆岩是靠近煤层上方一定范围内对冲击地压起着主导作用的岩层结构,其垮落、断裂结构及不同运动状态产生的应力变化,将对侧空巷道冲击地压的发生有着直接影响;上位覆岩则位于下位覆岩上部,距离煤层较远,对沿空巷道冲击地压的发生有着一定的影响,主要以载荷的方式或能量方式作用在下位岩层,为此可将其简化为作用于下位覆岩的“载荷带”。

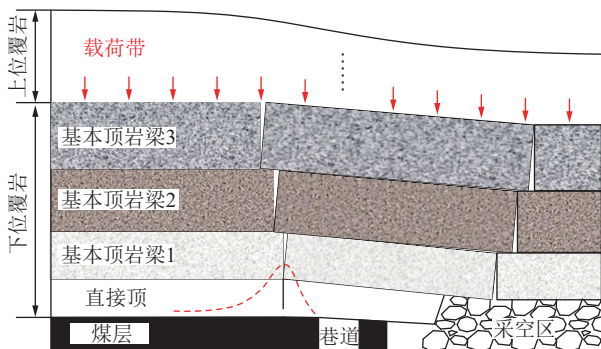


图1 沿空巷道侧向覆岩结构划分

Fig.1 Structure division of lateral overlying strata in gob-side entry

1.1 上位覆岩等效载荷估算

1.1.1 上位覆岩释放能量

上位覆岩缓慢沉降属于静载作用,而突发破断将

产生动载释放能量并以震动波的形式向震源点周围传播^[26]。处于上位不同高度和运动形式的覆岩运动所释放的能量具有强弱差异。设顶板上方第 n 层覆岩运动释放震动能量为 U_n 。将上位覆岩运移与破断状态简化为 4 种类型,即初次破断、周期破断、回转沉降及滑移失稳。其中,上位覆岩初次破断及周期破断所需能量主要源自岩梁的弯曲弹性能,破断后的覆岩发生回转沉降及滑移失稳运动产生能量则主要源于岩层自重。因此,基于上位覆岩运动不同状态的震动能量估算,初次破断、周期破断、回转沉降及滑移失稳释放的震动波能量分别计算^[26-27]:

$$\begin{cases} U_{cn} = \eta_n \frac{q_n^2 L_{cn}^5 b_n}{48 E_n h_n^3} \\ U_{zn} = \eta_n \frac{3 q_n^2 L_{zn}^5 b_n}{2 E_n h_n^3} \\ U_{hn} = \gamma_n \eta_n H_{hn} L_{zn} m_n d_n \\ U_{yn} = \gamma_n \eta_n H_{yn} L_{zn} m_n d_n \end{cases} \quad (1)$$

式中, U_{cn} 、 U_{zn} 、 U_{hn} 、 U_{yn} 分别为第 n 层覆岩初次破断、周期破断、回转沉降及滑移失稳释放的震动波能量; h_n 为第 n 层的厚度; q_n 为第 n 层覆岩自重及其上覆岩层附加单位长度折算载荷; E_n 为第 n 层覆岩弹性模量; m_n 为第 n 层覆岩厚度; b_n 为第 n 层覆岩悬空跨度; η_n 为第 n 层覆岩运动过程中震动波释放效率; L_{cn} 、 L_{zn} 分别为第 n 层覆岩初次、周期破断步距; γ_n 为第 n 层覆岩的平均容重; H_{hn} 为第 n 层覆岩回转垂高; H_{yn} 为第 n 层覆岩滑移垂高; d_n 为第 n 层覆岩发生回转或滑移运动块体倾向长度。

上位覆岩运动过程中,由于滑移(回转)块体尺寸较小且释放能量大小主要由块体重力势能控制。因此同层覆岩四类运动释放能量大小顺序可按覆初次破断、周期破断、滑移失稳或回转沉降进行排序,其中覆岩初次破断释放震动能量最大,对于下位覆岩影响最为强烈。

1.1.2 等效附加应力

上位覆岩运动释放的震动波在岩层传播过程中,受传播介质中的摩擦阻力和能量耗散等因素影响,震动波能量会随着传播距离的增加呈指数型衰减^[51]。根据弹性波理论,获得了工作面上覆第 n 层覆岩运动震动波产生的等效扰动附加应力估算公式^[26-27]:

$$\Delta \sigma_{kd} = v_m \sqrt{2 \rho_j P_n U_n e^{-\lambda_n S_n}} \quad (2)$$

式中, ρ_j 为震动波传播途经煤岩体的平均介质密度; v_m 为震动波传播速度; U_n 为第 n 层覆岩破断时释放的震动波能量; P_n 为第 n 层覆岩运动引发震动的能量

作用系数; λ_n 为第 n 层覆岩运动震动波衰减系数; S_n 为第 n 层覆岩运动震源点至目标层位距离。

将式 (1) 代入式 (2), 可知第 n 层覆岩初次破断运动、周期破断运动、回转沉降运动及滑移失稳运动分别诱发采场等效附加扰动应力表达式为

$$\begin{cases} \Delta\sigma_{cn} = v_m \sqrt{\frac{P_n \eta_n q_n^2 L_{cn}^5 b_n \rho_j e^{-\lambda_n S_n}}{24 E_n h_n^3}} \\ \Delta\sigma_{zn} = v_m \sqrt{\frac{3 P_n \eta_n q_n^2 L_{zn}^5 b_n \rho_j e^{-\lambda_n S_n}}{E_n h_n^3}} \\ \Delta\sigma_{hn} = v_m \sqrt{\frac{2 \rho_j P_n \gamma_n \eta_n H_{hn} L_{zn} m_n d_n e^{-\lambda_n S_n}}{E_n h_n^3}} \\ \Delta\sigma_{yn} = v_m \sqrt{\frac{2 \rho_j P_n \gamma_n \eta_n H_{yn} L_{zn} m_n d_n e^{-\lambda_n S_n}}{E_n h_n^3}} \end{cases} \quad (3)$$

由于式 (3) 能量的衰减传递主要考虑传播距离及衰减系数的影响, 所以可能会出现上位覆岩对采场的等效附加扰动应力估算结果过大情况, 因此需结合现场微震监测等结果进行综合研判, 从而达到对上位覆岩计算结果的修正。

1.2 侧空下位覆岩结构特征

1.2.1 模型结构边界确定

侧空下位覆岩结构力学模型描述, 首先要确定其边界条件, 其包括沿厚度方向纵向边界和沿水平方向横向边界。

1) 纵向边界

工作面下位覆岩结构运动产生的应力是诱发冲击地压的关键因素。2018 年, 国家煤矿安监局发布关于印发《防治煤矿冲击地压细则》的通知要求“埋深超过 400 m 的煤层, 且煤层上方 100 m 范围内存在单层厚度超过 10 m、单轴抗压强度大于 60 MPa 的坚硬岩层”需要进行煤岩冲击倾向性鉴定。因此, 模型纵向边界应选在煤层上覆 10 倍采高或 100 m 位置的二者最大处。

2) 横向边界

按照宋振骥院士以上覆岩层运动为中心的矿压理论, 沿着工作面推进方向, 在支承压力处于“高峰”部位上覆岩层产生断裂, 将支承压力“高峰”区一分为二, 形成“内、外”2 个应力场。而且, 走向支承压力分布与侧向支承压力分布式相同的。因此, 可以选择在上覆岩层破断之前支承压力“高峰”部位, 作为模型构建的横向边界。

1.2.2 下位覆岩结构组成分析

当采高较小时, 下位覆岩选取范围为 100 m; 当采高较大时, 下位覆岩范围可能超过 100 m, 其明显的结构特征可以按照矿压理论中直接顶和基本顶来描述。

1) 直接顶

直接顶是在采空区垮落的岩层组成部分。根据顶板的性质, 其垮落形态差异较大。对于坚硬顶板, 将出现悬顶现象; 对于相对比较软的岩层, 则垮落充分, 无悬顶现象。直接顶厚度 m_Z 可根据式 (4) 进行计算:

$$m_Z = \frac{h}{K_A - 1} \quad (4)$$

式中, h 为采高, m ; K_A 为岩层碎胀系数。

2) 基本顶

基本顶是指的上覆岩层中, 呈现出周期性破断但处于“咬合”大状态的岩层结构。大量工程实践结果表明, 基本顶厚度 m_E 为 5~6 倍的采高, 即

$$m_E = (5 \sim 6)h \quad (5)$$

沿着推进方向, 顶板初次断裂步距可根据式 (6)、式 (7) 进行计算:

$$c_{Z0} = \sqrt{\frac{2m_Z [\sigma_{ZL}]}{\gamma_Z}} \quad (6)$$

$$c_{E0} = \sqrt{\frac{2m_i^2 [\sigma_{iL}]}{\sum m_i \gamma_E}} \quad (7)$$

式中, c_{Z0} 为直接顶岩梁破断步距; c_{E0} 为基本顶岩梁破断步距; m_i 为各基本顶岩梁厚度; $[\sigma_{ZL}]$ 为直接顶综合抗拉强度; $[\sigma_{iL}]$ 为各基本顶岩梁综合抗拉强度, $[\sigma_{iL}] = \Sigma(m_i \cdot \sigma_{iL}) / \Sigma m_i$; 其中 Σm_i 为基本顶岩梁厚度之和; γ_Z 、 γ_E 分别为直接顶和基本顶的平均容重。

工程实践表明, 岩层周期来压步距 c 为初次来压步距 c_0 的 1/3~1/2, 即

$$c = \left(\frac{1}{3} \sim \frac{1}{2}\right)c_0 \quad (8)$$

根据塑性动力学理论可知, 当顶板破断按照横 X 型破断时, 最易形成的顶板结构即耗能最小形成的顶板结构, 为顶板侧向断裂步距与走向周期断裂步距相同, 如图 2 所示。即基本顶侧向顶板步距等于周期来压步距, 即

$$L_M = c \quad (9)$$

2 下位侧空覆岩结构量化表征

2.1 基于破断线位置下位侧空覆岩结构破断类型

根据关键层理论^[20], 随着工作面开采, 顶板将出现“O-X”型断裂。在长壁面的末端顶板断裂后形成一个“弧形三角块”。“弧形三角块”与两侧岩层相连, 形成“楔形板”结构。沿着侧空方向, 根据基本顶破断

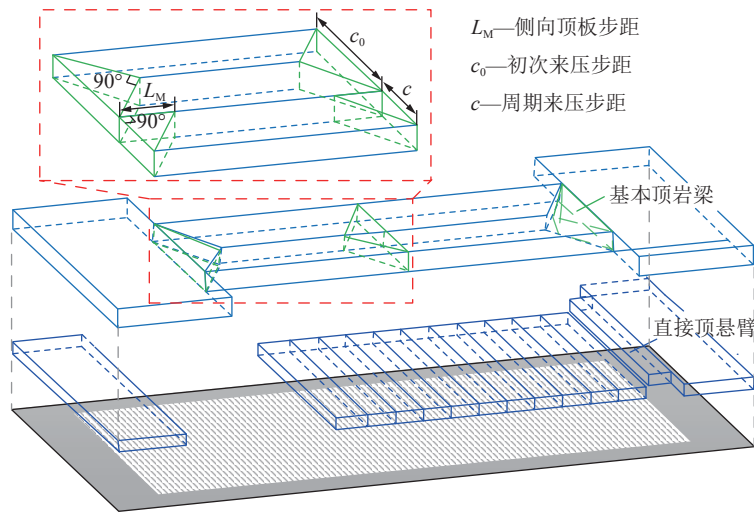


图 2 “O-X” 顶板破断结构

Fig.2 “O-X” roof fracture structure

线位置不同, 可将侧向覆岩结构划分为 3 类, 即: 破断线位于实体煤侧 (I 类)、破断线位于巷道上方 (II 类)、破断线位于采空区侧 (III 类), 如图 3 所示。图中: q 为基本顶上方岩层产生的均布载荷; θ_1 、 θ_2 、 θ_3 分别为 I、II、III 类断裂线位置情况下基本顶回转角; Δh_1 、 Δh_2 、 Δh_3 分别为 I、II、III 类断裂线位置情况下基本顶下沉高度; L_{E1} 、 L_{E2} 、 L_{E3} 分别为 I、II、III 类断裂线位置情况下岩块 B 在 A—A 截面上的长度; F_{11} 、 F_{12} 、 F_{13} 分别为 I、II、III 类断裂线位置情况下实体煤帮对直接顶的支承反力; L_0 为在巷道或煤柱上方断裂时断裂线距离巷道煤柱侧煤壁的水平距离; F_{31} 、 F_{32} 、 F_{33} 分别为 I、II、III 类断裂线位置情况下煤柱对直接顶的支承反力; F_{41} 、 F_{42} 、 F_{43} 分别为 I、II、III 类断裂线位置情况下采空区矸石对基本顶的支承反力; F_Z 为断裂线影响范围内的直接顶重力; F_{E1} 、 F_{E2} 、 F_{E3} 分别为 I、II、III 类断裂线位置情况下弧形三角板重力。

2.2 侧空覆岩结构力学分析

在基本顶岩块 B 不断下沉过程中, 最终下沉量 Δh 为

$$\Delta h = h - m_Z(K_A - 1) \quad (10)$$

式中, K_A 为顶板岩石的碎胀系数, 与垮落矸石性质有关, 一般取 1.15~1.35。

根据工作面回采过程中上覆岩层顶板运动规律, 最终确定岩块 B 沿着侧向的回转角度 θ 为

$$\theta = \arcsin \frac{\Delta h}{L_E} \quad (11)$$

岩块 B 重力 F_E , 直接顶重力 F_Z 分别为

$$F_E = m_E \gamma_E L_E \quad (12)$$

$$F_Z = m_Z \gamma_Z (L_1 + L_2 + L_3) \quad (13)$$

式中, m_E 为基本顶的厚度, m ; L_E 为岩块 B 在 A—A 截面上的长度; L_1 为破断线到实体煤壁的水平距离, m ; L_2 为巷道宽度, m ; L_3 为煤柱宽度, m 。

按照力和力矩平衡关系, 可以获得不同侧向覆岩结构类型下作用在沿空巷道煤柱和实体煤处的静载作用力:

$$\text{煤柱} \begin{cases} \text{I: } F_{31} = \frac{F_{31}(L_2 + L_3) + (F_{E1} - 2F_{41} + qL_{E1})L_{E1} \cos \theta_1 - (F_{E1} + qL_{E1} - F_{41})L_1}{L_1 + 2L_2 + L_3} \\ \text{II: } F_{32} = \frac{F_{32}(L_0 + L_3) + (F_{E2} + qL_{E2} - 2F_{42})L_{E2} \cos \theta_2}{2L_0 + L_3} \\ \text{III: } F_{33} = \frac{(m_Z \gamma_Z + m_E \gamma_E + q)(L_1 + L_2 + L_3)(L_2 + L_3)}{L_1 + 2L_2 + L_3} \end{cases} \quad (14)$$

$$\text{实体煤} \begin{cases} \text{I: } F_{11} = F_{E1} + qL_{E1} - F_{41} + \frac{F_{31}(L_1 + L_2) - (F_{E1} - 2F_{41} + qL_{E1})L_{E1} \cos \theta_1 + (F_{E1} + qL_{E1} - F_{41})L_1}{L_1 + 2L_2 + L_3} \\ \text{II: } F_{12} = L_1(m_Z \gamma_Z + m_E \gamma_E + q) \\ \text{III: } F_{13} = (m_Z \gamma_Z + m_E \gamma_E + q)(L_1 + L_2 + L_3) \left(1 - \frac{L_2 + L_3}{L_1 + 2L_2 + L_3} \right) \end{cases} \quad (15)$$

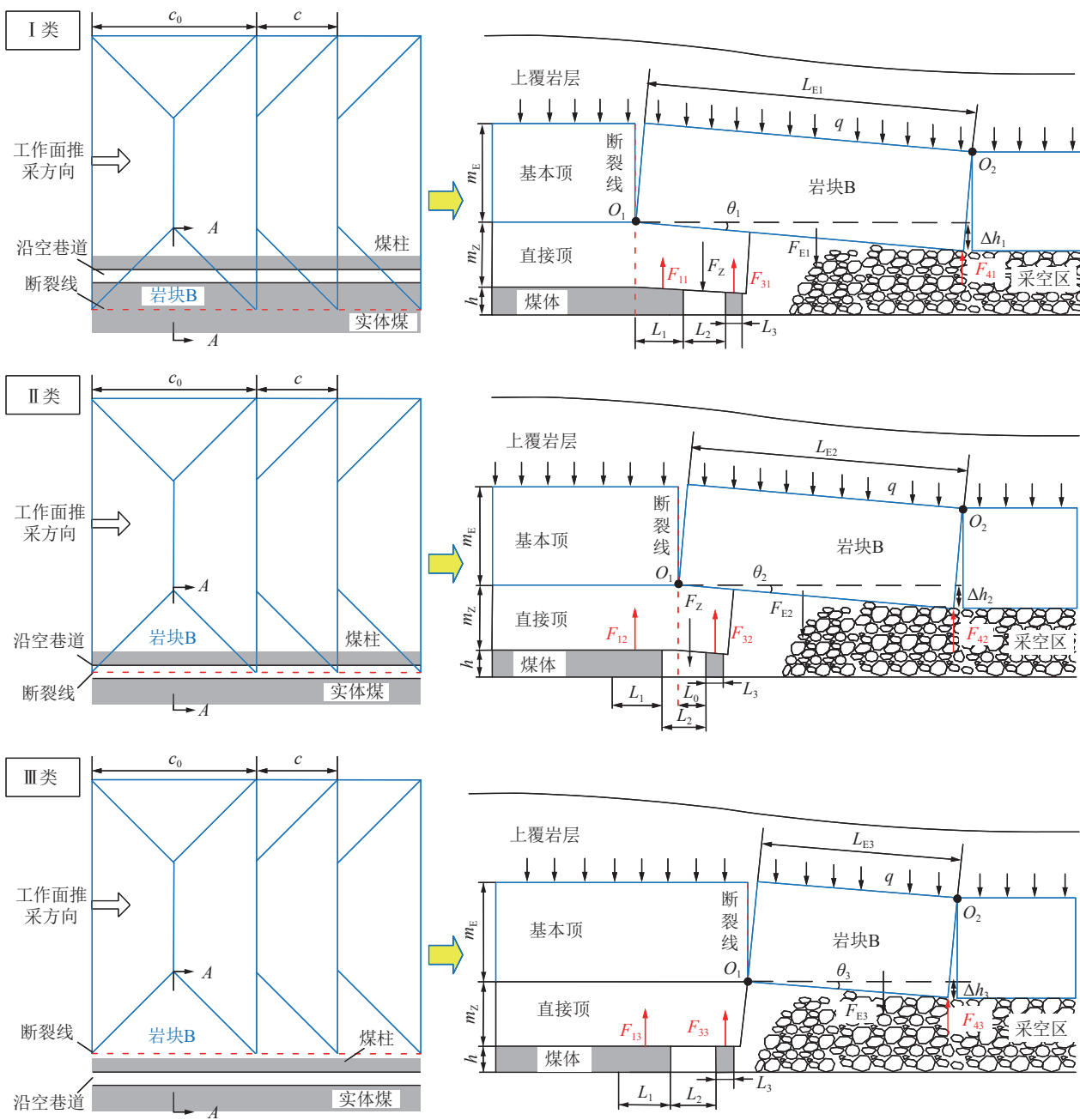


图 3 覆岩结构破断类型划分

Fig.3 Division of fracture types of lateral overlying strata

3 覆岩致灾关键层判识及风险评级

3.1 致灾关键层判识方法

采场上覆岩层局部或直至地表的全部岩层活动起控制作用的岩层称为关键层,关键层破断将导致全部或局部上覆岩层的破断,从而引起较大范围的岩层移动。关键层破断传递至工作面的动载与煤体原有静载之和超过煤体支承应力时会对煤柱或实体煤致灾。将造成煤体致灾的关键层称为致灾关键层,定义煤体支承应力及关键层断裂产生的扰动应力之和与煤体强度的比值为致灾指数 K :

$$K = \frac{\sigma_1 + \sum \sigma_{rj}}{\lambda \sigma_c} \tag{16}$$

式中, σ_1 为煤体支承应力, MPa; λ 为煤体强度系数 (取值 0~1); σ_c 为煤样单轴抗压强度, MPa; σ_{rj} 各关键层断裂产生的扰动应力, MPa。

考虑岩层本身剪切模量对弹性应变能积聚的影响和能量在岩体传播过程中的衰减规律,关键层断裂产生的扰动应力可按式计算^[26-27]:

$$\sigma_{rj} = V_k \sqrt{\frac{P_j \rho_k m_j^2 \gamma_j^2 (1 - 2\mu_j)^2 e^{-d_j w_j}}{3G_j (1 - \mu_j)^2}} \tag{17}$$

式中: V_k 为震动波的传播速度, m/s; m_j 为第 j 个关键层的厚度, m; P_j 第 j 个关键层震动作用系数, 取 1%~2%; μ_j 为第 j 个关键层的泊松比; ρ_k 为震动波传播途径煤岩体的平均介质密度, kg/m³; d_j 为第 j 个关键层震源点距工作面的距离, m; G_j 为第 j 个关键层的剪切模量, GPa; γ_j 为第 j 个关键层的容重, kN/m³; w_j 为第 j 个关键层的震动波衰减系数, 取 5%~6%。

当致灾关键层致灾指数 K 大于 1 时, 即可判定工作面上方存在致灾关键层, 当只有 1 个关键层时, 该关键层为致灾关键层。根据关键层理论和现场经验, 工作面上方往往存在多个关键层。关键层厚度与其内部蕴存的变性能成正比关系, 即厚度越大, 岩层内部所积聚的变性能越大, 岩层断裂时可释放的动载能量越高。因此, 将关键层厚度大小作为致灾关键层的判定指标, 即层厚最大的关键层即为致灾关键层。最大关键层层厚 m_i 可按下式比较得出:

$$m_i = \max \{m_1, m_2, m_3, \dots, m_j, \dots\} \quad (18)$$

式中, m_j 为关键层厚度, m。

从而, 致灾关键层可按下述判据进行判识:

$$K \begin{cases} \leq 1, & \text{无致灾关键层} \\ > 1 \begin{cases} j = 1, & \text{有且仅有一个致灾关键层} \\ j > 1, & \text{厚度为 } m_i \text{ 的关键层为致灾关键层} \end{cases} \end{cases} \quad (19)$$

3.2 侧空覆岩结构致灾风险评级

对于沿空巷道而言, 一方面需要考虑覆岩结构致冲应力条件; 另一方面还要考虑巷道围岩内禀的物性, 即冲击倾向性。二者综合考虑, 以可能性指数来表征。可能性指数法是一种基于采动应力和冲击倾向性的冲击危险度评价方法^[39]。应用模糊数学理论, 计算某一应力状态和冲击倾向性指数对“发生冲击地压”的隶属度, 进而判断发生冲击地压的可能性。应力条件发生可能性指数即状态对“发生冲击地压”事件的隶属度 U_K :

$$U_K = \begin{cases} 0.5K, & K \leq 1.0 \\ K - 0.5, & 1.0 < K < 1.5 \\ 1.0, & K \geq 1.5 \end{cases} \quad (20)$$

煤体内禀致冲物性条件可用冲击倾向性指数即对“发生冲击地压”事件的隶属度 $U_{W_{et}}$:

$$U_{W_{et}} = \begin{cases} 0.3W_{et}, & W_{et} \leq 2.0 \\ 0.13W_{et} + 0.33, & 2.0 < W_{et} < 5.0 \\ 1.0, & W_{et} \geq 5.0 \end{cases} \quad (21)$$

式中, W_{et} 为冲击倾向性指数。

发生冲击地压的综合可能性指数 U :

$$U = \frac{(U_K + U_{W_{et}})}{2} \quad (22)$$

根据可能性指数 U 评价冲击地压发生的可能性, 评价标准见表 1。

表 1 冲击地压发生可能性评价

U	0~0.6	0.6~0.8	0.8~0.9	0.9~1.0
可能性	不可能	可能	很可能	能够

4 侧空覆岩结构改性防冲工程实践

4.1 改性方法及流程

沿空工作面覆岩改性方法及防冲流程, 主要包括: 现场资料调研分析、侧空覆岩结构模型构建及数值模拟分析、侧空覆岩运动诱冲危险性评价、侧空覆岩结构改性设计、煤柱稳定性分析及巷道支护设计、侧空覆岩改性效果检验, 如图 4 所示。

4.2 侧空覆岩改性工程实践

4.2.1 工程地质条件

山东新巨龙能源有限责任公司位于山东省菏泽市巨野县龙固镇境内, 东北距巨野县城约 20 km, 西距菏泽市约 40 km。6305 工作面为六采区北翼第 5 个工作面, 位于北区进风巷以北, 东为尚未开采的 6306 工作面, 西为 6304 采空区, 南为六采下山保护煤柱, 北为陈庙北断层保护煤柱。工作面开采 3 煤层, 煤层厚度 7.9~10.0 m, 煤层倾角 0°~12°。6305 上平巷设计与 6304 下平巷保留 4.5 m 煤柱掘进, 最后与 6304 下平巷贯通。

4.2.2 侧空覆岩致灾判识

1) 力学模型构建

新巨龙煤矿 6305 工作面开采高度为 9.08 m, 由此可以确定 6305 工作面下位覆岩结构模型的纵向边界为 100 m。同时, 通过现场监测发现在实体煤内 35 m 处出现卡钻现象即应力高峰处, 因此确定模型横向边界为 35 m。根据 6305 工作面内 L-6 号取心钻孔资料和上述计算结果, 对煤层上方 100 m 范围内直接顶和基本顶进行划分, 见表 2。

依据岩层的强度、厚度及岩心完整性, 进行综合划分: A 为直接顶, 总厚度约 28.57 m; B1~B3 为基本顶, 其中 B1 为第 1 岩梁, 总厚度约 17.92 m; B2 为第 2 岩梁, 总厚度约 19.55 m; B3 为第 3 岩梁, 总厚度约 23.12 m。将上述参数代入式 (6)、式 (7), 可得 6305 工作面不同岩层组来压步距, 见表 3。

根据上述监测结果、直接顶、基本顶划分情况及来压步距计算结果, 构建 6305 工作面侧向覆岩结构模型, 如图 5 所示。

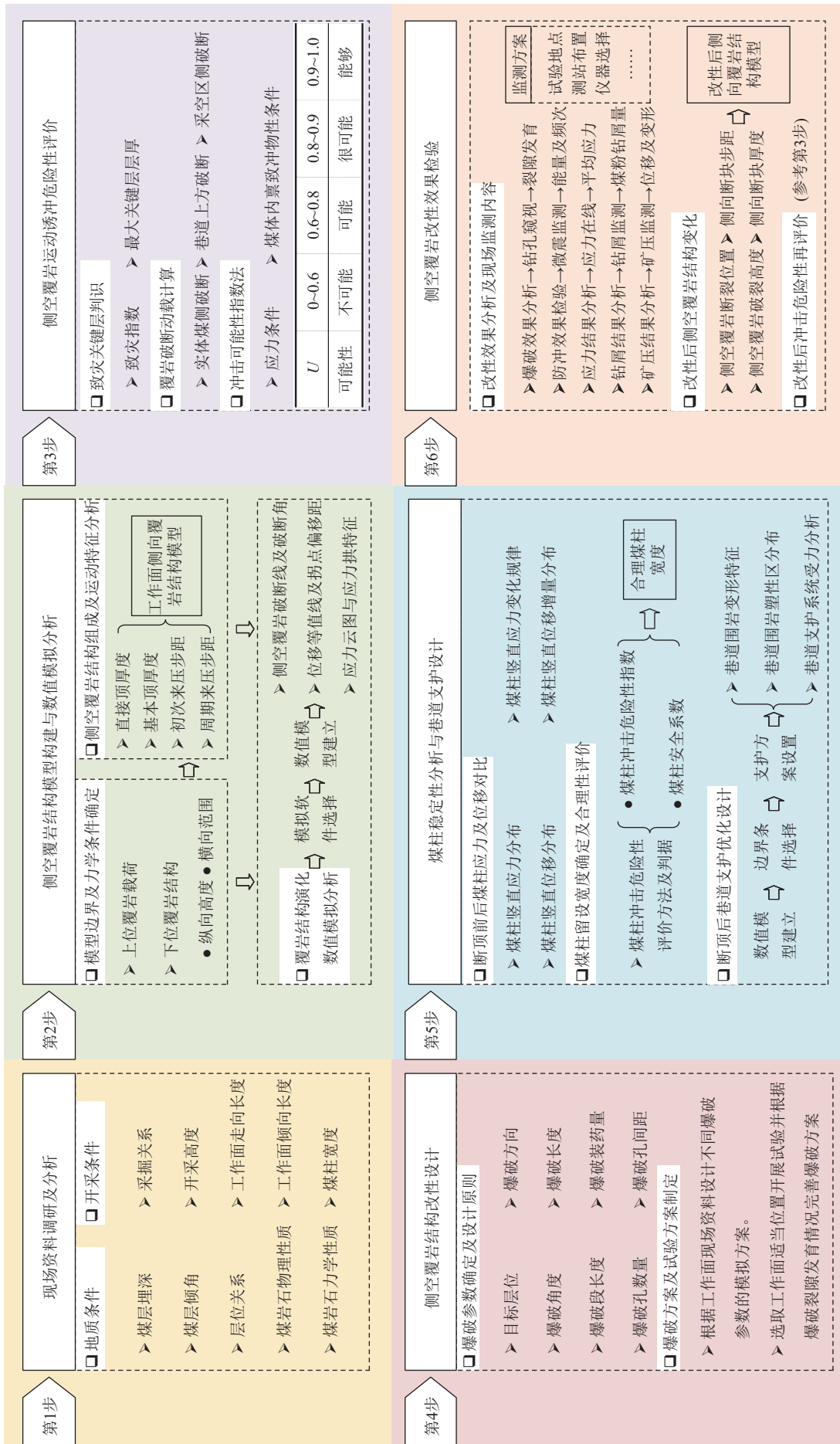


图 4 沿空工作面覆岩改性方法及防冲流程
Fig.4 Method for modifying lateral overlying strata and rockburst prevention process

表 2 煤层覆岩特征参数

Table 2 Characteristic parameters of overlying rock

序号	岩性	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	分层厚度/m	累计厚度/m	备注
11	中粒砂岩	77.65	3.74	0.20	89.16	
10	泥岩	45.00	1.74	6.03	88.96	B3
9	无心	—	—	16.89	82.93	
8	砂质泥岩	68.64	1.84	3.24	66.04	B2
7	无心	—	—	16.31	62.80	
6	细粒砂岩	65.74	1.56	1.55	46.49	B1
5	砂质泥岩	69.68	2.09	16.37	44.94	
4	粉砂岩	50.50	2.42	18.09	28.57	A
3	细粒砂岩	79.30	5.56	8.16	10.48	
2	砂质泥岩	53.12	1.74	1.82	2.32	
1	泥岩	43.00	1.25	0.50	0.50	

2) 致灾关键层判识

通过关键层判识,发现 6305 工作面上覆岩层 100 m 内共有 3 层关键层,分别为距煤层 10.48 m 的细粒砂岩关键层 R3,厚度为 8.16 m;距煤层 28.57 m 的粉砂岩关键层 R4,厚度为 18.09 m;距煤层 44.94 m 的砂质泥岩关键层 R5,厚度为 16.37 m,各关键层具体参数见表 4。

根据所述计算结果和现场数据, $L_{E1}=39.06$ m, $L_1=35$ m, $L_2=5$ m, $L_3=4.5$ m, $K_A=1.25$, $\gamma_E=25$ kN/m³, $m_E=17.92$ m, $m_Z=28.57$ m, $\gamma_Z=27$ kN/m³。将数据代入式 (11)~式 (13) 中得关键层回转角度 $\theta \approx 3^\circ$,关键层作

表 3 不同岩层组计算参数及来压步距

Table 3 Calculation parameters and weighting interval of different strata groups

编号	综合抗拉强度/MPa	岩层组厚度/m	初次来压步距/m	周期来压步距/m
A	4.0	28.57	38.70	12.90~19.35
B1	3.6	17.92	39.06	13.02~19.53
B2	3.8	19.55	43.79	14.59~21.89
B3	4.2	23.12	54.44	18.14~27.22

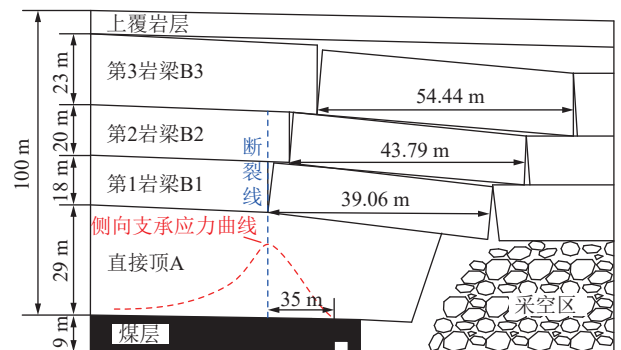


图 5 6305 工作面侧向覆岩结构模型

Fig.5 Lateral overlying rock structure model of 6305 working face

用力 $F_{E1}=17.50$ MPa, 直接顶作用力 $F_{Z1}=34.33$ MPa。对于 6305 工作面,第一岩梁 B1 所受均布载荷 $q=2$ 200 kN/m,将相应数据代入式 (14)、式 (15) 得煤柱的静载支承应力 $\sigma_{z1}=13.53$ MPa, 实体煤的静载支承应力 $\sigma_{s1}=36.36$ MPa。

表 4 关键层具体参数

Table 4 Specific parameters of key layers

关键层	厚度/m	泊松比	震源点距工作面的距离/m	剪切模量/GPa	容重/(kN · m ⁻³)	震动作用系数/%	震动波衰减系数/%
细粒砂岩R3	8.16	0.25	8.56	13.52	25.3	1.2	5.3
粉砂岩R4	18.09	0.23	22.37	8.13	28.4	1.5	5.2
砂质泥岩R5	16.37	0.14	40.51	4.73	25.9	1.5	5.5

根据工程实践,震动波的传播速度 $v_m=3$ 040 m/s,传播过程中穿过的煤岩体的平均介质密度为 1.87×10^3 kg/m³,将表 4 中数据代入式 (17) 得到各关键层断裂时产生的扰动应力:关键层细粒砂岩 R3 断裂产生的扰动应力为 0.94 MPa,粉砂岩 R4 断裂产生的扰动应力为 3.04 MPa,砂质泥岩 R5 断裂产生的扰动应力为 5.7 MPa。

根据上述计算结果,分别计算煤柱和实体煤的致灾指数,其中 $\lambda_1=0.9$, $\sigma_c=17.4$ MPa 计算,代入式 (16) 得煤柱的致灾指数为 1.48,实体煤的致灾指数为 2.91。因此,6305 上覆岩层中的关键层断裂时释放的能量会

对煤柱和实体煤造成破坏。将各关键层厚度进行比较,得到厚度最大的关键层为粉砂岩 R4,厚度为 18.09 m。由上述计算可知,实体煤和煤柱的致灾指数均大于 1,关键层厚度最大为 18.09 m 厚的粉砂岩 R4,即粉砂岩 R4 为致灾关键层。

3) 致灾风险评价

6305 工作面致灾指数最大为 2.91,结合式 (20) 可得应力状态对“发生冲击地压”事件的隶属度 $U_K=1$;煤层冲击倾向性指数 $W_{ct}=2.16$,结合式 (21) 得冲击倾向性指数对“发生冲击地压”事件的隶属度 $U_{Wct}=0.62$ 。将上述参数代入式 (22),可得发生冲击地压的可能性

指数 $U=0.81$, 即 6305 回采工作面发生冲击地压的可能性等级为“很可能”。

4.2.3 改性方法及实践

1) 主动爆破改性方法

选择 6305 进风巷距离新终采线之前 20 m 前的 100 m 范围作为试验地点。其中, 50 m 为现行卸压方式监测区 (I 区)、另 50 m 为卸压试验区 (II 区), 如图 6 所示。

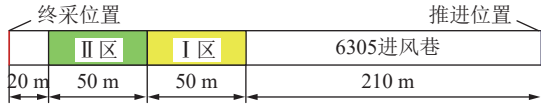


图 6 6305 回风巷试验地点

Fig.6 Test site of 6305 return airway

采用钻孔爆破的方法对致灾关键层进行主动改性, I 区试验爆破方案为: 倾向爆破孔每组 3 个孔, 间距 15 m、孔径 89 mm、钻孔垂直下帮, 仰角 80°、70°、50°, 孔深分别为 51、53、66 m, 装药量分别为 75、78、99 kg, 封孔长度 ≥ 15 m。走向爆破孔沿巷道走向布置, 2 组倾向爆破孔之间布置 2 个走向爆破孔, 孔间距 5 m, 仰角 70°, 孔深 50 m, 装药量 75 kg。II 区试验爆破方案为: 倾向爆破孔将现行的爆破组间距由 15 m 变为 7.5 m, 即在原倾向爆破组中间增补 1 组爆破孔, 且新增爆破孔施工参数与现行方案一致。走向爆破孔根据钻孔间裂隙窥视情况进行调整, 当爆破裂隙不发育时, 在 2 个原走向爆破孔之间补打爆破孔, 朝向 6304 采空区, 仰角 70°, 孔深 50 m, 装药量 75 kg; 当爆破裂隙发育较好时, 不再补充爆破。

2) 爆破效果分析

根据钻孔窥视的观测结果 (图 7) 可知, 钻孔深度在 0~16 m 区域内, 仅在局部区域发现有节理和裂隙存在, 且这些裂隙大多数呈现纵向分布, 横向裂隙较少。此外, 岩层交界面未观察到明显的离层现象, 表明岩层完整性较高, 结构稳定性较好。然而, 当钻孔深度超过 16 m 后, 岩层受到爆破影响的显著作用, 表现出节理和裂隙逐渐增多、发育程度增强的特征。与浅层不同, 这一深度范围内的裂隙呈现出横向与纵向裂隙交错分布的特点, 裂隙的延展性和渗透性也有所增强。这表明, 在爆破影响下, 致灾关键层的整体刚度和完整性显著降低, 内部岩石结构发生了重组与调整, 形成了较为明显的裂隙网络, 达到了预期的爆破效果。

4.2.4 改性效果验证

1) 微震事件及能量

改性前后的微震事件分布如图 8 所示。改性前

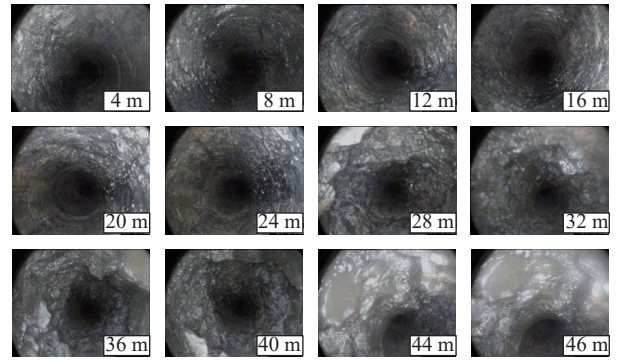
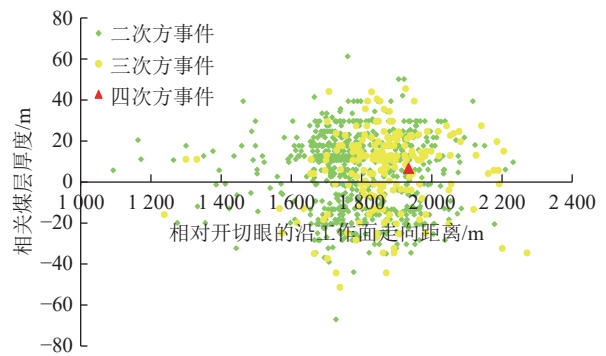


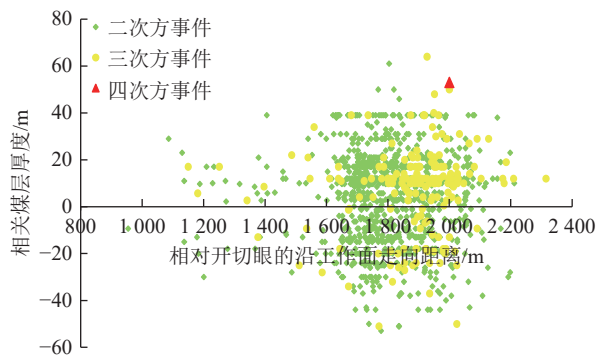
图 7 主动爆破改性效果分析

Fig.7 Analysis of active blasting modification effect

累计微震事件 887 个, 其中二次方事件、三方事件和四次方事件个数分别为 685、201 和 1, 所有事件总能量为 693 955 J, 平均每个事件能量 782.4 J; 改性后累计微震事件 1 182 个, 其中二次方事件、三方事件和四次方事件个数分别为 998、183 和 11, 所有事件总能量为 707 412 J, 平均每个事件能量 598.5 J。回采期间释放总能量接近, 但改性后总频次增幅为 33.3%, 平均每个事件能量降幅为 23.5%, 说明加密爆破后微震向“高频低能”趋势进展, 冲击风险性明显降低。



(a) 改性前微震事件分布



(b) 改性后微震事件分布

图 8 改性前后不同能级微震事件分布

Fig.8 Distribution of micro-seismic events at different energy levels before and after modification

2) 围岩应力监测

通过对改性前后两区域平均应力计读数进行对

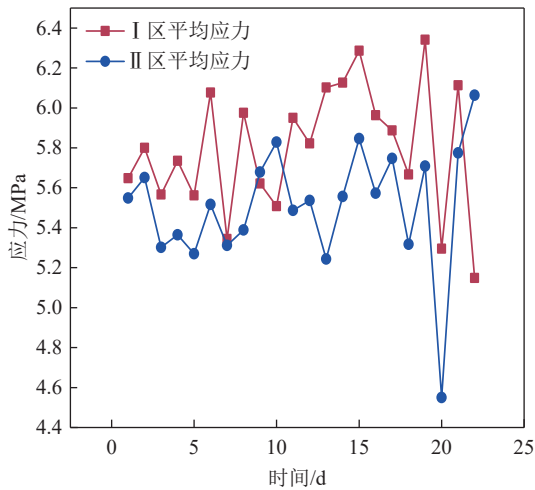


图 9 改性前后围岩平均应力对比

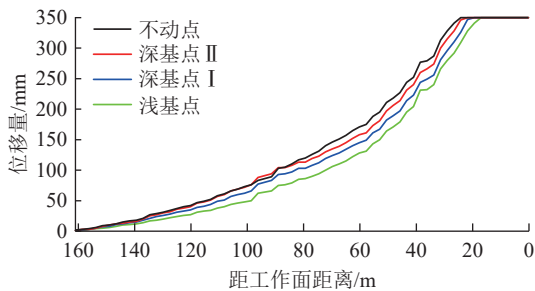
Fig.9 Comparison of average stress of surrounding rock before and after modification

比分析,如图 9 所示。

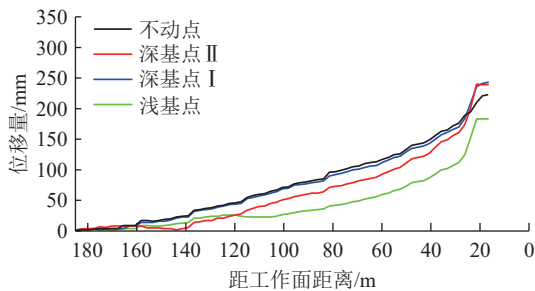
发现改性前应力整体趋势高于改性后区域,改性前围岩应力最大为 7.54 MPa,平均值为 6.08 MPa;改性后围岩应力最大值为 5.93 MPa,平均值为 5.23 MPa,分别降低约 27.2% 和 16.3%。由此可知,实施爆破能降低煤体应力集中程度,验证了爆破改性措施的有效性。

3) 围岩深部变形

随着 6305 回采工作面不断靠近试验区,多点位移计的基点位移量不断增加,如图 10 所示。



(a) 改性前多点位移计变化规律

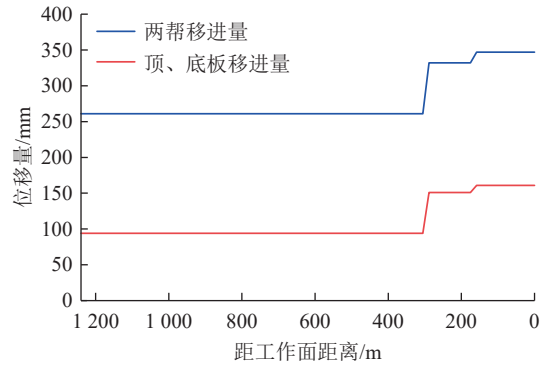


(b) 改性后多点位移计变化规律

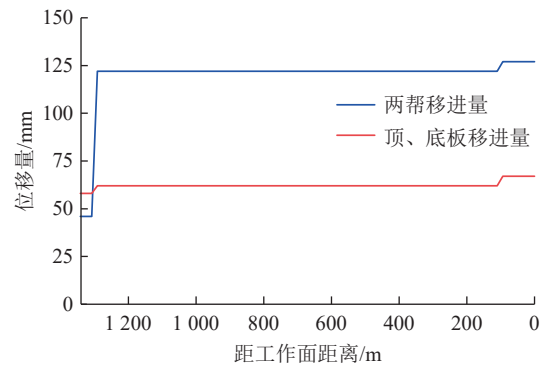
图 10 改性前后巷道围岩深部变形对比

Fig.10 Comparison of deep deformation of roadway surrounding rock before and after modification

改性前多点位移计的 4 个基点之间的位移差值基本在 10~15 mm; 改性后多点位移计基点位移呈近似线性增长趋势,其中不动点和深基点 I 的位移量基本一致,不动点、深基点 I 与深基点 II 的位移差值在 15~20 mm,深基点 II 与浅基点的位移差值在 30~60 mm。如图 11 所示,改性后多点位移计的位移量整体教小,说明爆破改性降低了上覆岩层的压力,减小了煤体内部裂隙的产生,取得了较好的卸压效果。



(a) 改性前巷道表面变形规律



(b) 改性后巷道表面变形规律

图 11 改性前后巷道围岩表面变形对比

Fig.11 Comparison of surface deformation of roadway surrounding rock before and after modification

4) 围岩表面变形

6305 工作面回风巷变形变化曲线,如图 11 所示。

6305 工作面爆破改性前,巷道两帮移近量为 260 mm,顶、底板移进量为 95 mm;爆破改性后,巷道两帮移进量为 127 mm,顶、底板移近量为 67 mm,分别减小约 104.7% 和 41.8%,说明对 6305 工作面侧向覆岩改性后巷道变形明显减小。

5) 改性后侧空覆岩致灾再评价

根据改性设计和具体参数对改性之后的致灾指数进行计算。覆岩结构改性后,岩块长度变为 30 m,关键层作用力为 13.44 MPa,直接顶作用力不变,为 34.33 MPa。将数据代入 (14)、式 (15) 得到改性后的煤柱静载支承压应力为 4.67 MPa,实体煤静载支承压应力

为 13.49 MPa。改性后致灾关键层所储存的弯曲应变能得到释放,岩石密度变大,对应的扰动应力也将减少,将未改性时关键层断裂产生的扰动应力按 20% 进行折算,得到改性后关键层断裂后产生的扰动应力为 1.94 MPa,将参数代入式 (16) 得关键层对煤柱和实体煤致灾指数 K 分别为 0.42、0.98。其致灾指数均小于 1,即无致灾关键层。

根据改性设计和具体参数对改性之后的致灾指数进行计算。对覆岩结构改性后,破断位置位于采空区侧,能量集聚程度降低。将 $K=0.98$ 代入式 (20) 得 $U_K=0.49$,由于冲击倾向性属于内禀物性条件,则 $U_{\text{wet}}=0.62$ 。将上述参数代入式 (22) 得发生冲击地压的可能性指数 $U=0.56$ 。由此可知,改性后 6305 回采工作面发生冲击地压可能性等级由“很可能”降为“不可能”。

5 结 论

1) 通过分析矿井覆岩地质条件,将侧空工作面覆岩划分为下位覆岩和上位覆岩,构建了沿空工作面覆岩结构力学模型,实现了上位覆岩等效载荷的估算,揭示了下位覆岩结构特征及演化规律。

2) 通过分析侧向顶板结构及应力演化过程,根据破断线位置的不同构建了多种覆岩结构类型下沿空巷道结构力学模型,获得了沿空工作面下位覆岩运动对煤体内应力的定量表征。

3) 提出了以煤体的静载支承应力及关键层断裂产生的扰动应力之和与煤体强度比值大小为致灾指数的覆岩致灾关键层判识方法,获得了应力状态和冲击倾向性指数对“发生冲击地压”的隶属度,实现了覆岩致灾风险评级。

4) 提出了侧空覆岩结构改性方法及防冲流程,并在新巨龙 6305 工作面开展了工程实践。现场监测结果表明,6305 工作面覆岩结构主动爆破改性后,微震能量降幅 23.5%,煤体应力集中程度最大降幅 27.2%,巷道围岩变形量最大减小约 104.7%,关键层对煤柱和实体煤致灾指数均小于 1,即无致灾关键层,冲击地压的可能性等级为由“很可能”降为“不可能”。

参考文献(References):

- [1] 谢和平,王金华,王国法,等. 煤炭革命新理念与煤炭科技发展构想[J]. 煤炭学报, 2018, 43(5): 1187–1197.
XIE Heping, WANG Jinhua, WANG Guofa, et al. New ideas of coal revolution and layout of coal science and technology development[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(5): 1187–1197.
- [2] 谭云亮,谭涛,张修峰,等. 正断层两盘动力灾害显现差异性及机制[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 214–223.
TAN Yunliang, TAN Tao, ZHANG Xiufeng, et al. Difference and mechanism of dynamic behaviors between two walls of normal fault[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 214–223.
- [3] 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.
- [4] 谭云亮,张修峰,肖自义,等. 冲击地压主控因素及孕灾机制[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 367–379.
TAN Yunliang, ZHANG Xiufeng, XIAO Ziyi, et al. Main control factors of rock burst and its disaster evolution mechanism[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 367–379.
- [5] 袁亮,马衍坤,黄勤豪,等. 煤岩动力灾害模型试验灾变地层模拟材料研制现状与展望[J]. 中国矿业大学学报, 2024, 53(5): 827–856.
YUAN Liang, MA Yankun, HUANG Qin hao, et al. Development status and prospects of simulation materials for catastrophic prone strata in the physical model experiments on coal and rock dynamic disasters[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(5): 827–856.
- [6] 郑凯歌,袁亮,张平松,等. 复合关键层厚硬顶板诱冲机制与防治技术模式[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(10): 14–24.
ZHENG Kaige, YUAN Liang, ZHANG Pingsong, et al. Rock bursts induced by thick-hard roof with compound key strata: Mechanisms and technical modes for prevention[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(10): 14–24.
- [7] 刘学生,武允昊,谭云亮,等. 深部高水平应力巷道倾斜锚杆破断机制及加强支护时机[J]. 煤炭学报, 2023, 48(2): 609–622.
LIU Xuesheng, WU Yunhao, TAN Yunliang, et al. Breaking mechanism of inclined bolts in deep mine roadway with high horizontal stress and the timing of strengthening support[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 609–622.
- [8] 朱建波,马斌文,谢和平,等. 煤矿矿震与冲击地压的区别与联系及矿震扰动诱冲初探[J]. 煤炭学报, 2022, 47(9): 3396–3409.
ZHU Jianbo, MA Binwen, XIE Heping, et al. Differences and connections between mining seismicity and coal bursts in coal mines and preliminary study on coal bursts induced by mining seismicity[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(9): 3396–3409.
- [9] 张翔,朱斯陶,姜福兴,等. 深厚表土综放采场应力加载型冲击地压机理[J]. 煤炭学报, 2023, 48(5): 2092–2105.
ZHANG Xiang, ZHU Sitao, JIANG Fuxing, et al. Mechanism of stress-loaded rockburst in fully mechanized top-coal caving stope with deep overburden[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 2092–2105.
- [10] 王高昂,朱斯陶,姜福兴,等. 倾斜厚煤层综放工作面煤柱-关键层结构失稳型矿震机理[J]. 煤炭学报, 2022, 47(6): 2289–2299.
WANG Gaoang, ZHU Sitao, JIANG Fuxing, et al. Seismic mechanism of coal pillar-key layer structure in fully mechanized caving face of inclined thick coal seam[J]. Journal of China Coal Society,

- 2022, 47(6): 2289–2299.
- [11] 谭云亮, 郭伟耀, 赵同彬, 等. 深部煤巷帮部失稳诱冲机理及“卸-固”协同控制研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 66–81.
TAN Yunliang, GUO Weiyao, ZHAO Tongbin, et al. Coal rib burst mechanism in deep roadway and “stress relief-support reinforcement” synergetic control and prevention[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 66–81.
- [12] 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 Voussoir Beam Theory proposed by Academician Minggao Qian[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 80–94.
- [13] 宋振骥, 郝建, 石永奎, 等. “实用矿山压力控制理论”的内涵及发展综述[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2019, 38(1): 1–15.
SONG Zhenqi, HAO Jian, SHI Yongkui, et al. An overview of connotation and development of practical ground pressure control theory[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2019, 38(1): 1–15.
- [14] 李云鹏, 赵善坤, 李杨, 等. 复杂坚硬岩层条件下特厚煤层综放开采矿压分级预测[J]. 煤炭学报, 2021, 46(S1): 38–48.
LI Yunpeng, ZHAO Shankun, LI Yang, et al. Prediction on weighting classification of fully-mechanized caving mining under extremely thick coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(S1): 38–48.
- [15] 牟宗龙, 窦林名, 张广文, 等. 坚硬顶板型冲击矿压灾害防治研究[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(6): 737–741.
MU Zonglong, DOU Linming, ZHANG Guangwen, et al. Study of prevention methods of rock burst disaster caused by hard rock roof[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006, 35(6): 737–741.
- [16] 杨玉亮. 采动覆岩分层拱壳结构时空演化特征及损伤控制研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2023.
YANG Yuliang. Research on spatio-temporal evolution of layered arch shell structure and damage control of mining overburden[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, 2023
- [17] 霍丙杰, 于斌, 张宏伟, 等. 多层坚硬顶板采场覆岩“拱壳”大结构形成机理研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(11): 18–23.
HUO Bingjie, YU Bin, ZHANG Hongwei, et al. Study on formation mechanism of arch shell large structure of overburden in coal mining face with multi layer hard roof[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(11): 18–23.
- [18] 钱鸣高, 朱德仁, 王作荣. 老顶岩层断裂型式及对工作面来压的影响[J]. 中国矿业学院学报, 1986, 15(2): 12–21.
QIAN Minggao, ZHU Deren, WANG Zuotang. The Fracture Types of Main Roof and Their Effects on Roof Pressure in Coal Face[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1986, 15(2): 12–21.
- [19] 钱鸣高, 缪协兴, 黎良杰. 采场底板岩层破断规律的理论研究[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(6): 55–62.
QIAN Minggao, MIAO Xiexing, LI Liangjie. Mechanism for the fracure behaviours Of main floor in longwall mining[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(6): 55–62.
- [20] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林. 岩层控制中的关键层理论研究[J]. 煤炭学报, 1996, 18(3): 2–7.
QIAN Minggao, MIAO Xiexing, XU Jianlin. Theoretical study of key stratum in ground control[J]. Journal of China Coal Society, 1996, 18(3): 2–7.
- [21] 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.
- [22] 左建平, 徐丞谊, 孙运江, 等. 采动岩层整体移动“类双曲线”理论模型及验证: 从二维“类双曲线”到三维“类双曲面”模型[J]. 煤炭学报, 2024, 49(4): 1731–1751.
ZUO Jianping, XU Chengyi, SUN Yunjiang, et al. Theoretical model and verification of “analogous hyperbola(hyperboloid)” for the overall movement of mining rock strata: From two-dimensional “analogous hyperbola” to three-dimensional “analogous hyperboloid” models[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(4): 1731–1751.
- [23] 孙运江, 左建平, 米长宁, 等. 基于岩层移动类双曲线模型的水资源“浅保-深储”方法[J]. 煤炭学报, 2023, 48(S2): 501–513.
SUN Yunjiang, ZUO Jianping, MI Changning, et al. “Shallow preservation-deep storage” method of water resources based on analogous hyperbola model of overburden movement caused by coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(S2): 501–513.
- [24] 牟宗龙, 窦林名, 倪兴华, 等. 顶板岩层对冲击矿压的影响规律研究[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(1): 40–44.
MU Zonglong, DOU Linming, NI Xinghua, et al. Research on the influence of roof strata on rock burst risk[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, 39(1): 40–44.
- [25] 谭云亮, 孙中辉. 矿区岩层运动非线性动力学特征及预测研究的基本框架[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2000, 11(2): 51–54.
TAN Yunliang, SUN Zhonghui. Research skeleton of non-linear dynamical features and prediction for strata motion in mine[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2000, 11(2): 51–54.
- [26] 马玉镇, 朱斯陶, 潘俊锋, 等. 煤矿覆岩主控致灾层位危险识别及现场应用[J]. 煤炭学报, 2024, 49(6): 2589–2603.
MA Yuzhen, ZHU Sitao, PAN Junfeng, et al. Identification and on-site application of the main hazard-causing stratum of overlying strata in coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(6): 2589–2603.
- [27] 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 earth-

- quakes and induced disasters in China's coal mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(2): 807–816.
- [28] 谭云亮, 张明, 徐强, 等. 坚硬顶板型冲击地压发生机理及监测预警研究[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(1): 166–172.
TAN Yunliang, ZHANG Ming, XU Qiang, et al. Study on occurrence mechanism and monitoring and early warning of rock burst caused by hard roof[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(1): 166–172.
- [29] 谭云亮, 郭伟耀, 辛恒奇, 等. 煤矿深部开采冲击地压监测解危关键技术研究[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(1): 160–172.
TAN Yunliang, GUO Weiyao, XIN Hengqi, et al. Key technology of rock burst monitoring and control in deep coal mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(1): 160–172.
- [30] 窦林名, 曹安业, 杨耀, 等. 巨厚覆岩矿震孕育破裂特征与应力触发机制[J]. *煤田地质与勘探*, 2024, 52(10): 1–13.
DOU Linming, CAO Anye, YANG Yao, et al. Fracturing characteristics of significantly thick overburden inducing mine earthquakes and the stress-triggering mechanisms of the mine earthquakes[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024, 52(10): 1–13.
- [31] 朱斯陶, 姜福兴, K. J. A. Kouame, 等. 深井特厚煤层综放工作面断层活化规律研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(1): 50–58.
ZHU Sitao, JIANG Fuxing, K. J. A. Kouame, et al. Fault activation of fully mechanized caving face in extra-thick coal seam of deep shaft[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(1): 50–58.
- [32] 刘学生. 动载荷作用下巷道围岩冲击地压机理及防控研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2017.
LIU Xuesheng. Study on the mechanism and control of rockburst in roadways under dynamic loads[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2017.
- [33] 李利萍, 胡学锦, 潘一山, 等. 煤岩组合体冲击倾向性对超低摩擦型冲击地压的影响机制[J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2024, 6(4): 23–33.
LI Liping, HU Xuejin, PAN Yishan, et al. The influence mechanism of bursting tendency of coal-rock combination on ultra-low friction-typed rockburst[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2024, 6(4): 23–33.
- [34] LIU Xuesheng, NING Jianguo, TAN Yunliang, et al. Damage constitutive model based on energy dissipation for intact rock subjected to cyclic loading[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2016, 85: 27–32.
- [35] 杜锋, 王凯, 孙加智, 等. 单轴压缩下不同倾角煤岩组合体力学特性及破坏特征[J]. *中国安全科学学报*, 2024, 34(6): 136–145.
DU Feng, WANG Kai, SUN Jiazhi, et al. Mechanical properties and failure characteristics of coal rock combinations with different inclination angles under uniaxial compression[J]. *China Safety Science Journal*, 2024, 34(6): 136–145.
- [36] MA Qing, TAN Yunliang, LIU Xuesheng, et al. Experimental and numerical simulation of loading rate effects on failure and strain energy characteristics of coal-rock composite samples[J]. *Journal of Central South University*, 2021, 28(10): 3207–3222.
- [37] 陈光波, 唐薇, 李谭, 等. 裂隙煤岩组合体单轴压缩力学响应及失稳机制[J]. *岩土力学*, 2024, 45(9): 2633–2652.
CHEN Guangbo, TANG Wei, LI Tan, et al. Mechanical response and instability model of fractured coal-rock combined body[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2024, 45(9): 2633–2652.
- [38] 朱斯陶, 姜福兴, 刘金海, 等. 复合厚煤层巷道掘进冲击地压机制及监测预警技术[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(5): 1659–1670.
ZHU Sitao, JIANG Fuxing, LIU Jinhai, et al. Mechanism and monitoring and early warning technology of rock burst in the heading face of compound thick coal seam[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(5): 1659–1670.
- [39] 王岗, 于晓杰, 王爰文, 等. 覆岩承压含水层疏水应力场演化规律电荷监测研究[J]. *煤田地质与勘探*, 2024, 52(10): 106–118.
WANG Gang, YU Xiaojie, WANG Aiwen, et al. Exploring the evolutionary patterns of stress field in coal seams during water drainage in overburden confined aquifers based on charge monitoring[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024, 52(10): 106–118.
- [40] 钟涛平, 李振雷, 杨伟, 等. 厚硬顶板刀把形采空区下综放工作面冲击地压机制研究[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(6): 29–39.
ZHONG Taoping, LI Zhenlei, YANG Wei, et al. Mechanism of rock burst induced within the fully mechanized top coal caving face with overlying knife-shape-like gob and hard thick roof[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(6): 29–39.
- [41] 韩刚, 李旭东, 曲晓成, 等. 采场覆岩空间破裂与采动应力场分布关联性研究[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(2): 53–58.
HAN Gang, LI Xudong, QU Xiaocheng, et al. Study on correlation between spatial fracturing of overlying strata and distribution of mining stress field in stope[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(2): 53–58.
- [42] 薛成春, 曹安业, 牛风卫, 等. 深部不规则孤岛煤柱区冲击地压机理及防治[J]. *采矿与安全工程学报*, 2021, 38(3): 479–486.
XUE Chengchun, CAO Anye, NIU Fengwei, et al. Mechanism and prevention of rock burst in deep irregular isolated coal pillar[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2021, 38(3): 479–486.
- [43] FAN Deyuan, LIU Xuesheng, TAN Yunliang, et al. Energy mechanism of bolt supporting effect to fissured rock under static and dynamic loads in deep coal mines[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2024, 34(3): 371–384.
- [44] 谭云亮, 郭伟耀, 赵同彬, 等. 深部巷道动静载试验系统研制及初步应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(8): 1513–1524.
TAN Yunliang, GUO Weiyao, ZHAO Tongbin, et al. Development and application of a novel deep roadway test system with dynamic-static loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(8): 1513–1524.
- [45] 牟宗龙, 王浩, 彭蓬, 等. 岩-煤-岩组合体破坏特征及冲击倾向性试验研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2013, 30(6): 841–847.
MU Zonglong, WANG Hao, PENG Peng, et al. Experimental research on failure characteristics and bursting liability of rock-coal-rock sample[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2013, 30(6): 841–847.
- [46] 刘学生, 范德源, 谭云亮, 等. 深部动载作用下超大断面硐室群锚

- 固围岩破坏失稳机制研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(12): 3407–3418.
- LIU Xuesheng, FAN Deyuan, TAN Yunliang, et al. Failure and instability mechanism of anchored surrounding rock for deep chamber group with super-large section under dynamic disturbances[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(12): 3407–3418.
- [47] FAN Deyuan, LIU Xuesheng, TAN Yunliang, et al. Numerical simulation research on response characteristics of surrounding rock for deep super-large section chamber under dynamic and static combined loading condition[J]. *Journal of Central South University*, 2020, 27(12): 3544–3566.
- [48] 沈凯, 肖晓春, 徐军. 静、动载荷下含弱层煤岩间超低摩擦效应[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2022, 4(4): 78–86.
- SHEN Kai, XIAO Xiaochun, XU Jun. Ultra-low friction effect of weakly layered composite rock coal under static and dynamic loads[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2022, 4(4): 78–86.
- [49] 王爱文, 孙郑齐, 潘一山, 等. 梯度围岩结构应力波透射模型与传播衰减规律[J]. 煤炭学报, 2023, 48(5): 1969–1984.
- WANG Aiwen, SUN Zhengqi, PAN Yishan, et al. Transmission model and propagation attenuation law of stress wave in gradient surrounding rock structure[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(5): 1969–1984.
- [50] 宋振骥, 文志杰, 蒋宇静, 等. 采动力学与岩层控制关键理论及工程应用[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 16–35.
- SONG Zhenqi, WEN Zhijie, JIANG Yujing, et al. Theory and application of mining mechanics and strata control[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(1): 16–35.
- [51] 谭云亮, 胡善超. 顶板见方来压发生条件分析研究[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(6): 19–22, 130.
- TAN Yunliang, HU Shanchao. Analysis and study on condition to cause roof weighing in square meter[J]. *Coal Science and Technology*, 2015, 43(6): 19–22, 130.