

年宾,张宇,张明,等.覆岩离层注浆弱化顶板型防冲机理研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(5):528-537.DOI: 10.11956/j.issn.1008-0562.20250022
NIAN Bin,ZHANG Yu,ZHANG Ming,et al.Research on the mechanism of impact prevention through roof weakening by overburden separation layer grouting[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2025, 44(5): 528-537. DOI: 10.11956/j.issn.1008-0562.20250022

覆岩离层注浆弱化顶板型防冲机理研究

年 宾¹, 张 宇¹, 张 明^{2*}, 王 卫¹, 魏凯祥², 朱海虎², 袁 飞¹, 李达明¹

(1. 中勘资源勘探科技股份有限公司 地灾治理研究院, 安徽 淮北 235000;

2. 安徽理工大学 煤炭无人化开采数智技术全国重点实验室, 安徽 淮南 232001)

摘 要: 为探究覆岩离层注浆对防冲的影响, 采用理论结合实践方法, 分析覆岩离层注浆条件下工作面岩层运动及覆岩空间结构分布特征, 阐释覆岩离层注浆对冲击地压的控制效果。研究结果表明: 覆岩离层注浆充填能增加局部离层空间围岩相互作用, 形成“下压+上托”效果, 一方面改变局部关键层运移及其能量积聚, 另一方面控制整体覆岩空间结构分布及其载荷传递, 二者共同构成覆岩离层注浆弱化顶板型防冲的主要原理及形式。通过对比未采用和采用覆岩离层注浆充填工作面回采实践, 分析回采过程中相同阶段的应力、微震、钻屑量冲击地压监测指标发现, 采用离层注浆工作面的微震事件破裂高度与能级、应力范围及峰值以及钻屑量均有显著下降趋势, 防冲效果良好。研究结论为充填开采防冲研究与实践提供参考。

关键词: 覆岩离层注浆; 冲击地压; 顶板; 覆岩空间结构; 微震监测; 应力监测; 监测对比

中图分类号: TD325

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2025)05-0528-10

Research on the mechanism of impact prevention through roof weakening by overburden separation layer grouting

NIAN Bin¹, ZHANG Yu¹, ZHANG Ming^{2*}, WANG Wei¹, WEI Kaixiang², Zhu Haihu²,
YUAN Fei¹, LI Daming¹

(1. Geological Disaster Prevention and Control Research Institute, Chexplore Resource Exploration Technology Company Limited by Shares, Huaibei 235000, China;

2. State Key Laboratory of Digital and Intelligent Technology for Unmanned Coal Mining, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: In order to explore the influence of overburden bed separation grouting on rock burst prevention, the theoretical and practical methods are used to analyze the characteristics of strata movement and spatial structure distribution of overlying strata under the condition of overburden bed separation grouting, and to explain the control effect of overburden bed separation grouting on rock burst. The research results indicate that the filling of overburden strata separation grouting can increase the interaction among the surrounding rocks in the local separation space, forming an effect of “downward pressure+upward support”. On one hand, it alters the movement of local key strata and their energy accumulation. On the other hand, it controls the distribution of the overall overburden spatial structure and its load transfer. These jointly constitute the main principles and forms of the rockburst prevention mechanism of roof weakening by overburden strata separation grouting. Through the mining practices of working faces without and with overburden strata separation grouting filling, by comparing the monitoring indicators of rockburst such as stress, micro seismic activity, and drill cuttings volume at the same stage during the mining process, it was found that in the working face with separation grouting, the fracture height and energy level of micro-seismic events, the stress range and peak value, as well as the drill-cuttings volume all showed a significant downward trend, demonstrating a good rockburst prevention effect. The research

收稿日期: 2025-01-15 修回日期: 2025-03-11 接受日期: 2025-03-18 责任编辑: 焦丽

基金项目: 国家自然科学基金项目(52104114); 中勘资源勘探科技股份有限公司-安徽理工大学联合博士后科研项目(HX20240014)

作者简介: 年 宾(1982-), 男, 安徽怀远人, 高级工程师, 主要从事矿山灾害预测与防治方面的研究。E-mail: 117352733@qq.com

通信作者: 张 明(1987-), 男, 安徽六安人, 博士, 副教授, 主要从事矿震与冲击地压防控方面的研究。E-mail: ok_ming_ming@126.com

conclusions provide reference for the research and practice of anti-impact in filling mining.

Keywords: overburden strata separation grouting; rockburst; roof; spatial structure of overburden; rock microseismic monitoring; stress monitoring; monitoring comparison

0 引言

未来较长的一段时间内,煤炭资源仍为中国的主体能源,煤矿开采特别是地下煤矿开采仍将长期存在^[1-2]。受限于目前开采条件和技术水平,冲击地压问题可能会日益严重^[3]。一是浅埋易采煤炭资源逐渐枯竭,二是残采煤炭资源的开采强度逐渐增加。近年来诱冲因素呈现多元化和矿山压力复杂化等特点,冲击地压发生频次及其危险程度呈现复苏苗头,这一问题越来越受到政府、生产和研发等部门的关注,探索有效的防冲技术手段是解决此类问题的关键^[4]。

学者提出多种冲击地压发生机制,按研究方法或对象不同概括为:运用弹性理论、弹塑性理论、塑性局部化理论等,将冲击地压视为静态稳定性问题,揭示煤岩破坏的力学机制^[5-6];利用数值模拟和力学实验等,将冲击地压视为动态失稳问题,分析煤岩变形、破坏动载响应特征,揭示冲击地压启动、发生机制^[7-8];采用能量守恒与转化原理,将冲击地压看成应力跃迁过程中蓄能及释能问题,根据应力演化和能量聚散确定冲击地压机理^[9-10];分析现场灾害范围、煤岩失稳形态、巷道支护破坏特征、开采地质条件等,宏观反演冲击地压机理^[11-12]。

在冲击地压防治方面,通常采取顶板和煤体协同治理。顶板为冲击灾害源(体)的情况下,通常采用顶板爆破、水力预裂等技术^[13-14]。煤体为冲击灾害源(体)的情况下,通常采用钻孔卸压、煤层压裂等方法^[15-16]。近年来山东、内蒙古等多个矿井逐步采用覆岩离层注浆开采技术,一方面针对性解决了产能接续和地表减沉、建下开采、固废减排等问题,另一方面对缓解冲击地压发挥了积极作用。窦林名等^[17]认为覆岩离层注浆技术可以提高覆岩主关键层的长期稳定,降低主关键层运动诱发冲击地压可能性。王志强等^[18]、史俊伟等^[19]针对巨厚砾岩赋存条件,通过理论分析和相似模拟等手段,论证了巨厚砾岩条件下离层注浆防冲的有效性。周楠等^[20]研究了诱冲关键层变形阶段的能量聚散、传递过程及其对诱发冲击地压影响,揭示了离层注浆在控制诱冲关键层变形、降低能量聚散速度和缓释能量传递效率等方面的作用。

诸多学者的研究成果为冲击地压理论预测和

防治实践提供基础,但针对覆岩离层注浆防冲研究仍相对较少,目前关于覆岩离层注浆对岩层控制研究,主要侧重于降低地面沉陷和保护地表建(构)筑物。与不采用覆岩离层注浆相比,覆岩离层注浆能在一定程度上改变工作面附近的岩层运动和覆岩空间结构,表现为覆岩离层注浆弱化“工作面-采空区-顶板”结构影响诱冲因素。此方面的研究尚未完全揭示清楚,也未形成普遍性认识。本文基于实际工程背景,探讨覆岩离层注浆弱化顶板型防冲机理,重点阐释覆岩离层注浆对控制井下冲击地压的主要作用和影响方式,为进一步完善煤矿充填开采防冲理论和技术实施提供参考。

1 研究背景

1.1 工作面基本情况

某矿834工作面位于八采区下部,西侧与833工作面采空区相邻(833工作面采空区宽约为85 m,中间留设近似三角的不规则条带煤柱),东侧为采区边界,北侧未开拓,南侧为八采区皮带下山,位于工业广场正东2.3 km处的职业高中及其他需要保护的地面区域。工作面采深为534~610 m(平均为570 m),宽度约为81 m,开采3煤稳定,煤层厚度范围为5~6 m,硬度系数为2~3,煤层倾角小于7°(近水平煤层),采用走向长壁后退式开采,一次采全高综采放顶煤,全部垮落法管理顶板。833工作面、834工作面布置情况见图1。

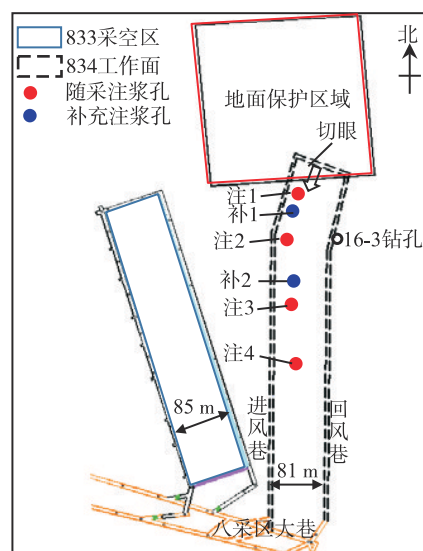


图1 工作面布置

Fig.1 working face layout

16-3 钻孔柱状图见图 2。由图 2 可见, 3 煤直接顶为厚约 8.6 m 的砂质泥岩; 煤层上方约 24.5 m 处赋存厚约 13.2 m 的细砂岩基本顶(亚关键层); 细砂岩(主关键层) 厚约为 20.8 m, 距离煤层高度约为 83.2 m; 底板砂质泥岩厚约为 5.6 m。3 煤及其顶底板冲击倾向鉴定结果: 煤层动态破坏时间 D_T 为 2 732 ms, 弹性能量指数 W_{ET} 为 2.35、冲击能量指数 K_E 为 2.87、单轴抗压强度 σ_c 为 7.7 MPa; 顶、底板弯曲能量指数分别为 72.1 kJ、65.0 kJ, 均具有弱冲击倾向性。

岩层名称	岩性	柱状	厚度/m	距煤层高度/m
主关键层	细砂岩		20.8	83.2
基岩	含泥质夹层砂岩组, 单层厚度小于 8 m		45.5	37.7
亚关键层	细砂岩		13.2	24.5
基岩	泥岩互层		4.6	19.9
	细砂岩		5.5	14.4
	粉砂岩		5.8	8.6
直接顶	砂质泥岩		8.6	0
3 煤	煤层		5.6	
直接底	砂质泥岩		5.6	
基本底	粉砂岩		4.8	

图 2 16-3 钻孔柱状图
Fig.2 16-3 drill hole histogram

1.2 工作面覆岩离层注浆充填情况

833 首采工作面, 距离地面保护区域相对较远, 未采取覆岩离层注浆充填保护开采手段, 工作面开采后地面沉降变形未影响地面保护区域。接续的 834 工作面是压覆工作面, 为降低 834 工作面开采过程中对地面保护区域的沉降变形, 采用覆岩离层注浆

技术, 注浆孔底距离煤层顶板高度为 60~85 m (根据实际推采顶板变化情况调整), 主要采用基岩注浆方式。为控制关键层及其覆岩层下沉, 注浆压力大于覆岩自重, 实际注浆充填压力为 6~8 MPa。834 工作面内设计注浆钻孔 6 个(随采注浆孔 4 个、补充注浆孔 2 个), 注浆充填材料细度 (0.045 mm 方孔筛余量) 不大于 12% (I 级粉煤灰), 注浆浓度不低于 70%, 注浆量约 5.2 万 t。

1.3 覆岩离层注浆充填对覆岩三带影响

833 工作面、834 工作面分别采用“采空区垮落式+不采取离层注浆”和“采空区垮落式+采取离层注浆”方式作为顶板控制方法, 见图 3。

由图 3 可见, 不同工况开采完成后, 采空区覆岩经过充分运动沉降, 采空区后方的顶板岩层呈现差异性, 主要表现如下。

(1) 833 工作面采空区不采取离层注浆, 覆岩三带(垮落带、离层带、弯曲下沉带) 分区相对明显, 与关键层的下位岩层相比, 关键层的抗弯刚度较大。随着采空范围增加, 低位岩层逐层垮落、运动, 并逐步与关键层分离, 出现离层, 形成离层空间^[21], 弯曲下沉带范围岩层在自重作用下发生缓慢变形, 使地面沉降。

(2) 834 工作面采空区采取离层注浆, 可视为在 833 工作面采空区覆岩三带基础上, 通过在离层空间内及时实施注浆充填挤压围岩。主动施压实现对离层带下压和弯曲下沉带上托等效果, 将原先在高度方向上暂时处于分离状态的覆岩三带在外界作用重新形成挤压状态。因此可以对注浆充填区域的下部和上部岩层同时起到控制作用, 控制弯曲下沉带范围岩层的变形和地面沉降, 提高覆岩三带岩层整体稳定性。

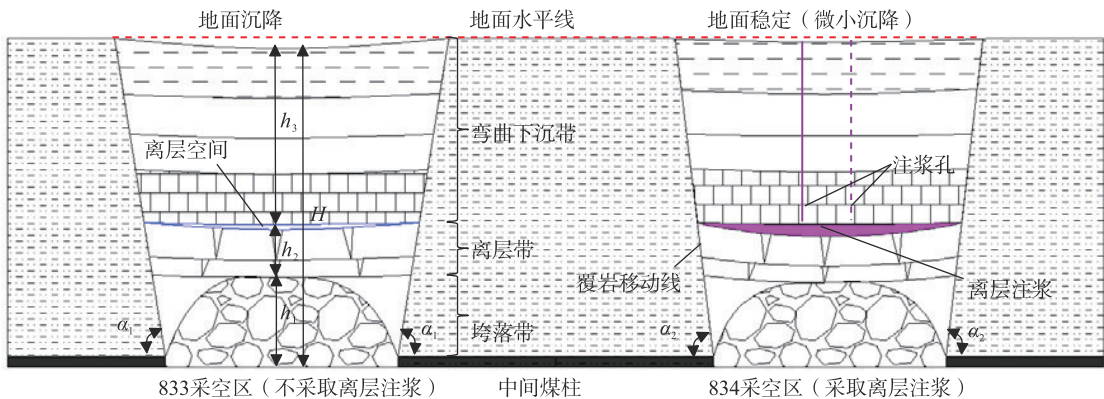


图 3 833、834 采空区覆岩充分运动沉降后剖面
Fig.3 833,834 goaf overlying strata after full movement and settlement profile

图3中,假设采深为 H ,垮落带、离层带、弯曲下沉带的高度分别为 h_1 、 h_2 、 h_3 , $H=h_1+h_2+h_3$,不采取和采取离层注浆覆岩移动角分别为 α_1 、 α_2 ,考虑离层注浆对覆岩运移和沉降控制作用,一般情况下, $\alpha_1 < \alpha_2$ 。

833工作面、834工作面的宽度、煤层及顶底板赋存等条件基本一致,影响井下冲击地压的主要因素是覆岩离层注浆充填。因此,可以通过分析覆岩离层注浆控制顶板运移特征,对比覆岩离层注浆对关键层及其覆岩空间结构影响,定性(量)揭示覆岩离层注浆弱化顶板型防冲机理及有效性。

2 岩层运动和覆岩空间结构分析

矿山压力理论和开采实践证明“覆岩空间结构分布-矿山压力演化-冲击地压显现”之间存在紧密联系,诱发冲击地压的载荷(应力)来源于覆岩空间结构变形或运动。钱鸣高院士等提出的关键层理论^[22]明确指出,采场赋存的各级关键层作为地层系统骨架,控制着覆岩空间结构变形(运动)范围与程度。基于此,本文结合覆岩离层注浆充填作用和关键层运动状态等,进一步对比覆岩离层注浆影响工作面岩层运动和覆岩空间结构。“工作面-采空区-顶板”特征平面示意图见图4,图中I-I为倾向剖面位置、II-II为走向剖面位置。

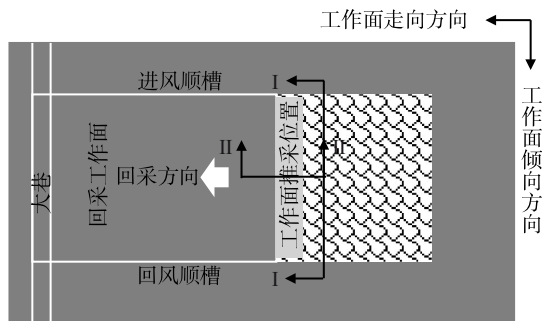


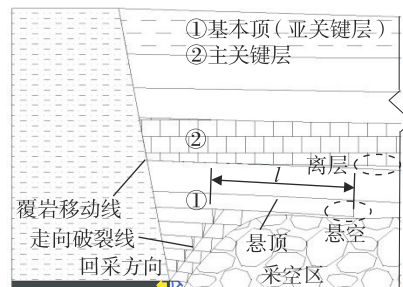
图4 “工作面-采空区-顶板”特征平面

Fig.4 “working face-goaf-roof” feature plane

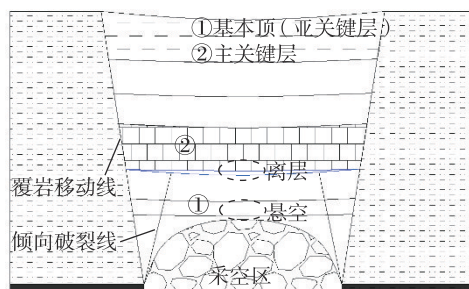
2.1 覆岩离层注浆对局部关键层运移影响

两侧实体煤条件下,通常工作面开采过程中顶板自下而上逐层发生“破断→冒落→充填→压实”等运动过程,各级岩层抗弯刚度存在差异,导致关键层下方岩层出现一定的离层(空间)现象。如果不采取措施,采空区上覆岩层经过充分运动沉降后离层空间可能逐渐消失。离层空间为形成顶板悬顶结构和积聚能量提供了“孕育”条件,积聚能量的顶板悬顶结构是影响冲击地压的重要“灾害源(体)”。离层空间越大对冲击地压影响越显著,离层注浆作为一种充填离层空间常用技术方法,能够在理论和工程上降低或杜绝灾

害源(体)孕育。工作面开采后,短期内不采取(或者不及时采取)离层注浆和及时采取离层注浆,形成2种不同的“工作面-采空区-顶板”结构剖面类型,见图5和图6。

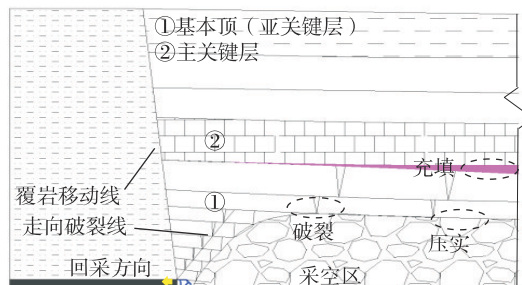


(a) 走向

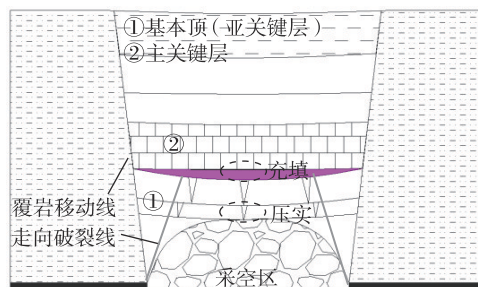


(b) 倾向

图5 不采取离层注浆“工作面-采空区-顶板”结构剖面
Fig.5 “working face-goaf-roof” structural section without separation grouting



(a) 走向



(b) 倾向

图6 采取离层注浆“工作面-采空区-顶板”结构剖面
Fig.6 separation grouting “working face-goaf-roof” structural section is adopted

对比局部关键层运移特征,具体分析如下。

由图5可知:在倾向方向,基本顶(亚关键层)与高位主关键层形成暂时性离层状态(两者处于分离状态),基本顶与采空区垮落岩层之间不能形成有效的触研压实状态;在走向方向,基本顶在自身强度等作用下形成了具有一定范围的悬顶结构,基本顶悬顶结构易发生挠曲变形积聚能量以及向工作面传递载荷。

由图6可知:在倾向方向,基本顶(亚关键层)与高位主关键层之间的离层空间重新被充填体完全充填,达到饱和充填状态,并在局部离层空间内形成围(挤)压效果,基本顶在离层注浆充填压力和覆岩重力作用下,重新获得外界压力并发生挠曲变形甚至破断,促使基本顶与采空区垮落岩层之间能够形成触研压实状态;在走向方向,基本顶在离层注浆充填传递压力和覆岩重力作用下,受压向下发生挠曲变形(或破断),与采空区垮落岩层形成紧密压实状态,因此离层注浆能够削弱或消除基本顶悬顶结构,源头破坏积聚能量和向工作面传递载荷的条件和途径。

定量分析离层注浆对影响冲击的基本顶弱化效果,以基本顶周期来压悬顶为例,建立不采取离层注浆条件下的局部能量积聚和载荷传递的简化模型,见图7。

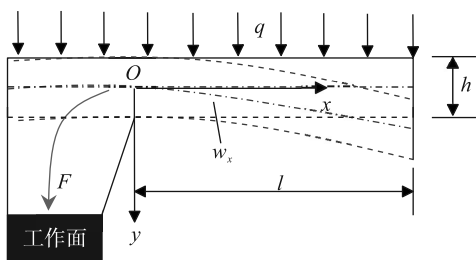


图7 局部基本顶悬顶结构及受力

Fig.7 local main roof suspended roof structure and force

(1) 基本顶积聚能量分析

基本顶的挠曲变形过程中外力做功近似为

$$U = \int_0^l q w_x dx, \quad (1)$$

式中: q 为基本顶及其控制覆岩载荷的单位长度折算; l 为基本顶悬顶长度; w_x 为基本顶变形挠度。

基本顶在周期来压前挠曲线方程为

$$w_x = \frac{qx}{24EI} (4lx - 6l^2 - x^2), \quad (2)$$

式中: E 为基本顶弹性模量; I 为基本顶截面惯性矩, $I = bh^3/12$; h 为基本顶厚度。

联立式(1)与式(2),积分得基本顶局部积聚弹性能为

$$U = \frac{3q^2 l^5}{2Eh^3}. \quad (3)$$

(2) 基本顶传递载荷分析

在竖直方向上,基本顶悬顶结构保持相对稳定的力系平衡条件,是工作面前方煤岩体能够承载覆岩自重及其附加的基本顶悬顶结构重力(载荷),附加载荷在工作面煤体上形成传递载荷,根据力系平衡条件得到最大传递载荷为

$$F = ql, \quad (4)$$

式中, F 为最大传递载荷,是基本顶破断前悬顶结构形成的静态集中载荷(力)。

结合分析结果可知,工作面开采后短期内不采取(或者不及时采取)离层注浆, U (忽略重力势能)与 l 呈指数关系, F 与 l 呈线性关系。 l 是决定工作面煤体冲击影响因素(能量、载荷)重要条件和途径。离层注浆作为一种充填离层空间常用技术方法,能够削弱或消除基本顶悬顶结构,进一步弱化“工作面-采空区-顶板”局部关键层运移影响。

2.2 离层注浆对整体覆岩空间结构影响

沿工作面走向进行剖面分析,见图8,图中区域A为受采动影响区域;区域B为随采动亚稳定区域;区域C为采空区压实区域。

随着工作面不断向前推采,工作面邻近位置上覆空间结构整体近似呈倒梯形形态(区域B),这部分覆岩随工作面采动而发生运动,是影响工作面冲击的主要覆岩区域。倒梯形形态覆岩空间结构大致处于覆岩层移动线与覆岩触研线之间,在“倒梯形”左侧岩体(区域A)未受到明显的采动影响,这部分岩层位于“面前”稳定状态,在“倒梯形”右侧岩体(区域C)自下而上发生破裂运动并逐渐形成触研效果,这部分岩层处于“面后”稳定状态,区域A、B、C岩层之间大致以覆岩层移动线和覆岩触研线为分界线,“倒梯形”覆岩空间结构与周边围岩处于铰接接触,整体范围内覆岩空间结构的载荷能够形成传递应力。图8为不采取离层注浆、采取不及时充分离层注浆、采

取及时充分离层注浆条件下对应的典型“工作面-采空区-顶板”结构剖面,设这3种工况对应的不同工况条件覆岩移动角分别为 α_1 、 α_2 、 α_3 ,覆岩触矸角分别为 β_1 、 β_2 、 β_3 , $L_{i1}(h_{i1})$ 、 $L_{i2}(h_{i2})$ 、 $L_{i3}(h_{i3})$ 分别为“倒梯形”内组成岩层悬伸长(高)度,回采工作面低位岩层破裂角 $^{[23]}$ 为 θ (主要与开采地质

有关,与是否采取离层注浆技术无关),参照工程背景的中硬地层条件分析,低位岩层垮落带高度 $^{[24]}$ 为

$$h_1 = \frac{100 \times \sum M}{1.6 \times \sum M + 3.6} + 5.6,$$

式中, M 为采出煤层厚度。

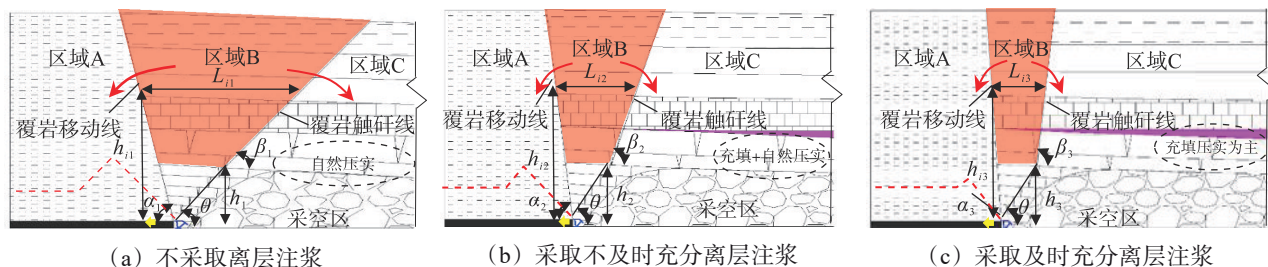


图8 不同工况“工作面-采空区-顶板”整体覆岩空间结构剖面

Fig.8 different working conditions “working face-goaf-roof” overall overlying strata spatial structure profile

对比离层注浆对整体覆岩空间结构的影响,分析如下。

(1) 根据离层注浆对岩层运动变形的控制作用效果,一般离层注浆越及时、充填注浆比越高(这里将离层注浆充填材料的体积与采出煤炭体积之比,定义为“注浆比”),注浆充填效果越明显。不采取离层注浆、采取不及时充分离层注浆、采取及时充分离层注浆,对应的覆岩控制可分别描述为单纯自然压实、“充填+自然压实”、充填压实为主。理论上,采取及时充分离层注浆能够达到充填后岩层不移动和地面不沉降的效果。实施有效的离层注浆对改变整体覆岩空间结构分布特征效果明显。

(2) 相比较不采取离层注浆,离层注浆能够减小“倒梯形”(区域B)岩层的范围,降低覆岩载荷对工作面支承应力影响。一般情况下回采工作面的垮落带高度 h_1 、低位岩层破裂角为 θ 基本相同,“倒梯形”底部宽度相差不大,受到离层注浆对高位覆岩控制,覆岩载荷直接通过充填体将底部采空区传递,从而达到覆岩重力平衡,减小了覆岩重力向周围岩体转移,表现为对“倒梯形”内岩层悬伸长度产生较大差异(覆岩层移动线与覆岩触矸线之间当量水平宽度)。

定量分析离层注浆对整体覆岩空间结构弱化效果,建立整体覆岩空间结构载荷传递与应力分布简化分析模型,见图9。

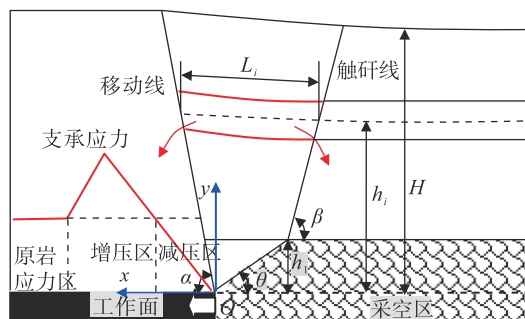


图9 整体覆岩空间结构及支承应力

Fig.9 overall overlying rock space structure and supporting stress

覆岩空间结构形成的支承应力计算。对“倒梯形”悬伸岩层产生应力增量叠加分析,得到“倒梯形”重心距离煤层高度 $h_i = (H + h_1)/2$,“倒梯形”传递至一侧煤体载荷(近似为“倒梯形”覆岩载荷的一半 $^{[25]}$)所形成的最大支承应力理论计算结果为

$$\Delta\sigma_i = \frac{(H - h_1)L_i}{2h_i \cot\alpha} = \frac{H \cot\beta + H \cot\alpha + 2h_1 \cot\theta - 2h_i \cot\beta}{4h_i \cot\alpha} (H - h_1),$$

进一步得到应力增量为

$$\Delta\sigma = \begin{cases} \Delta\sigma_i x \tan\alpha / h_i & x \in [0, h_i / \tan\alpha) \\ \Delta\sigma_i (2 - x \tan\alpha / h_i) & x \in [h_i / \tan\alpha, 2h_i / \tan\alpha] \\ 0 & x \in (2h_i / \tan\alpha, +\infty) \end{cases}, \quad (5)$$

覆岩自重重力为

$$\sigma_q = \begin{cases} \gamma h_1 & x \in [0, h_1/\tan\alpha) \\ \gamma x \tan\alpha & x \in [h_1/\tan\alpha, H/\tan\alpha] \\ \gamma H & x \in (H/\tan\alpha, +\infty) \end{cases} \quad (6)$$

式(5)、式(6)中, x 为距离推采工作面的前方距离; γ 为覆岩平均容重。

将式(5)、式(6)联立得覆岩空间结构形成的支承应力为

$$\sigma = \sigma_q + \Delta\sigma \quad (7)$$

依据式(7)分析覆岩空间结构形成的支承应力特征。以采场边界为起始, 支承应力大致按照“增加-峰值-下降-原岩应力-稳定”的规律, 进一步划分为水平3区(减压区、增压区、原岩应力区)。不采取离层注浆、采取不及时充分离层注浆、采取及时充分离层注浆3种工况下, 同一层位岩层的 $h_i = h_{i1} = h_{i2} = h_{i3}$ 且 $L_{i1} > L_{i2} > L_{i3}$, 能够定性得3种工况下, 整体覆岩空间结构传递的载荷及其形成的支承应力和超前影响范围均呈减小趋势, 离层注浆能够削弱整体覆岩空间结构对工作面支承应力影响, 起到主动防冲效果。

2.3 覆岩离层注浆对工作面岩层运动和覆岩空间结构影响

通过对比不采取覆岩离层注浆、采取覆岩离层注浆两种工况, 分析“工作面-采空区-顶板”局部关键层运移、整体覆岩空间结构分布等特征。在覆岩离层空间内实施合理有效的离层注浆, 发挥3方面的(力学)效果: 通过在局部离层空间内注浆充填, “离层空间-充填体”形成作用力和反作用力; 承压浆液对离层下部岩层施加压力; 高压浆体对离层上部岩层起到顶力。覆岩离层注浆能够在工作面回采期间下压基本顶(亚关键层)悬顶结构、上托覆岩空间结构, 源头上消控影响工作面冲击能量和载荷(应力)的形成和传递。不采用覆岩离层注浆充填开采技术主关键层下方可能出现离层空间, 与之相比, 覆岩离层注浆能够主动填充离层空间, 改变主关键层控制的覆岩空间结构分布和基本顶(亚关键层)运动状态, 强化二者协同作用关系。

覆岩离层注浆防冲效果见图10。图10中, 区域①(图中红色框线部分)为主关键层及上覆岩层, G_1 为自重载荷, L_1 为关键层底部长度, σ_{x1} 为关键层底部的应力均布载荷; 区域②(图中黄色框线部分)为边界未破断基本顶(亚关键层)及其控制的岩层, G_2 为自重载荷, L_2 为边界未破断基本顶底部长度, σ_{x2} 为边界未破断基本顶底部的应力均布载荷; 区域③(图中绿色框线部分)为破断基本顶(亚关键层)及其控制的岩层, G_3 为自重载荷, L_3 为破断基本顶底部长度, σ_{x3} 为破断基本顶底部的应

力均布载荷。 L'_1 为充填体下方长度, σ'_{x1} 为充填体下方应力均布载荷, L_1 和 L'_1 长度相近。 K_1 ($0 < K_1 < 1$) 为区域①内岩层向采空区侧转移的自重载荷系数, K_2 ($0 < K_2 < 1$) 为区域②向岩层向采空区侧转移的自重载荷系数, 充填体自重载荷忽略不计。

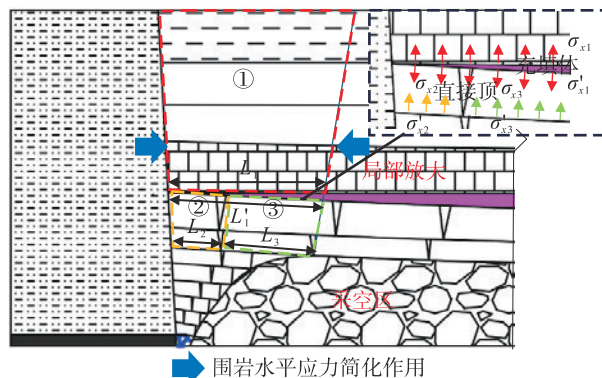


图10 覆岩离层注浆防冲效果

Fig.10 overburden strata separation grouting for rockburst prevention

离层注浆后, 充填体将区域①、②、③连接成整体, 在水平方向上覆岩空间结构保持平衡状态, 竖直方向上覆岩空间结构稳定性需进一步分析。

$$K_1 G_1 + K_2 G_2 + G_3 + \int_0^{L_1} \sigma_{x1} dx + \int_0^{L'_1} \sigma'_{x1} dx + \int_0^{L_2} \sigma_{x2} dx + \int_0^{L_3} \sigma_{x3} dx = 0 \quad (8)$$

采取离层注浆后(忽略充填空间高度), 离层注浆区域内部形成作用力和反作用力, 大小相同, 方向相反, 即

$$\sigma_{x1} = -\sigma'_{x1} \quad (9)$$

联立式(8)、式(9)可得

$$K_1 G_1 + K_2 G_2 + G_3 + \int_0^{L_2} \sigma_2 dx + \int_0^{L_3} \sigma_3 dx = 0 \quad (10)$$

离层注浆区域内部应力作用效果相互抵消, 满足 $\int_0^{L_1} \sigma_{x1} dx + \int_0^{L'_1} \sigma'_{x1} dx = 0$, 覆岩空间结构达到稳定状态。

归纳覆岩离层注浆弱化顶板型冲击地压机理如下: 离层注浆能减小(破坏)基本顶悬顶结构及其局部积聚能量、传递载荷, 起到弱化“工作面-采空区-顶板”局部关键层运移诱发冲击的作用; 离层注浆能控制(改变)覆岩空间结构传递的载荷, 降低工作超前支承应力大小和范围, 起到弱化“工作面-采空区-顶板”整体覆岩空间结构变形诱发冲击的作用。

上述2种方式既能单独防冲, 也能相互协调防控, 使覆岩空间结构达到稳定, 共同形成了覆岩

离层注浆弱化顶板型防冲的主要作用机制。由于开采条件差异性和诱冲因素复杂性,实际工程中离层注浆的防冲适应性及防冲可靠性存在一定差异,需要针对不同条件采取合理适用和评估,并与其他防冲技术协调配合。

3 覆岩离层注浆防冲效果对比

833工作面、834工作面为相邻工作面,宽度分别为85 m、81 m,两个工作面的采深、煤层、地层,以及采煤与防冲工艺等开采地质和技术条件等均基本一致,具有较好的工程对比性,因此选择这两个工作面作对比。受到地面保护设施位置关系及开采接续设计等影响,833工作面不采取离层注浆、834工作面采取离层注浆。

为强化对比效果,采用相同监测系统监测,重点分析两工作面在相同工程场景下的微震、

应力、钻屑量等指标。结果表明,采用覆岩离层注浆后,降低了影响冲击地压的能量、应力等,实现了对厚硬顶板及其覆岩空间结构的控制作用。

833工作面、834工作面的微震、应力、钻屑量等主要监测结果分析如下。

(1) 微震监测

微震监测水平方向的误差范围为 $[-10\text{ m}, 10\text{ m}]$, 垂直方向的误差范围为 $[-20\text{ m}, 20\text{ m}]$, 833工作面、834工作面推采至单见方期间,微震监测剖面定位见图11。两工作面在此回采期间未发生大能量微震事件(能量为 10^5 J 及以上),834工作面顶板最大破裂高度距煤层约50 m,833工作面最大破裂高度距煤层约62 m,采用离层注浆后的工作面最大破裂高度下降了12 m,降幅接近20%,同时微震事件释放的能量也明显降低。

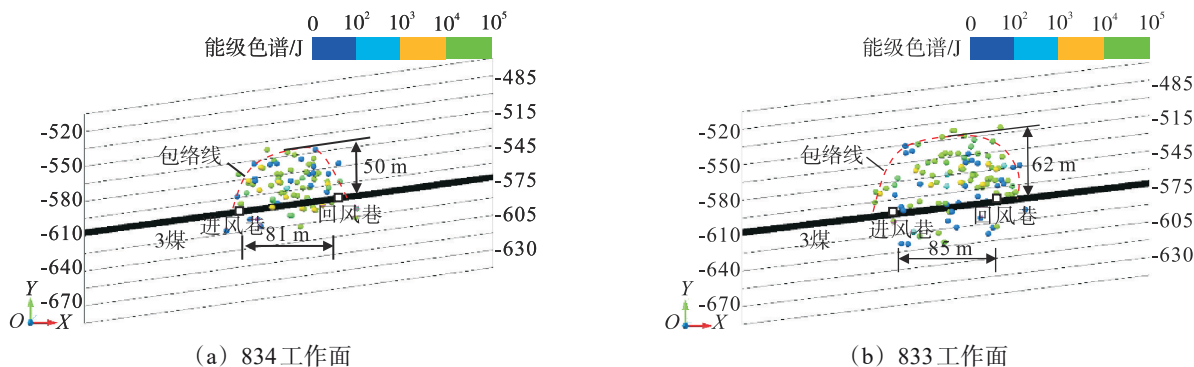


图11 工作面回采至单见方微震事件剖面

Fig.11 micro-seismic event profile when the working face in mined to the single square

(2) 应力监测

监测相对垂直应力,数据精确到小数点后一

位。834工作面、833工作面推采至单工作面单见方时应力云图见图12。

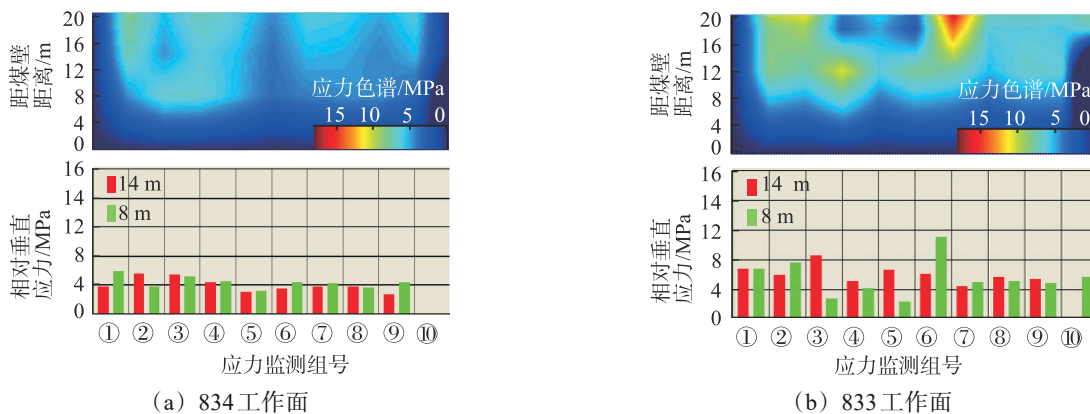


图12 工作面应力监测数据(单工作面见方时)

Fig.12 working face stress monitoring data (single working face square)

图12中,第①组布置在单工作面见方最近位置,每间隔25 m布置1个接续组,超前工作面布置距离约250 m,每组布置2个测点,深、浅孔分别为14 m、8 m,应力预警临界值为8 MPa。与不

采取离层注浆833工作面相比,采取覆岩离层注浆的834工作面的超前支承应力影响范围及大小明显下降。监测数据表明:834工作面应力为3~6 MPa、峰值应力超前工作面25~50 m,833工作面应力为4

~8 MPa、峰值应力超前工作面 50~75 m。相对来说, 834 工作面采动应力大小和影响范围均相对较小。

(3) 钻屑量检测

834 工作面、833 工作面分别推采至距本工作面单见方时, 进行工作面煤体钻屑量检测。检测孔位于工作面前方 10~30 m, 布置 3 个检测孔, 检测孔深 10 m, 分别统计 834 工作面、833 工作面钻屑量平均值, 见图 13。由图 13 可知, 834 工作面、833 工作面钻屑量范围分别为 1.5~3.8 kg/m、1.8~4.9 kg/m。与 833 工作面相比, 834 工作面钻屑量明显降低, 降幅接近 20%。

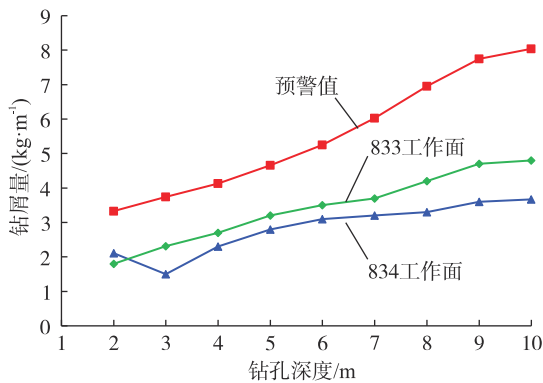


图 13 单工作面见方时工作面钻屑量

Fig.13 amount of drilling cuttings in a single working face squared

统计 834、833 工作面回采到相同阶段的应力、微震、钻屑量 3 项冲击地压监测指标, 见表 1。

表 1 主要对比指标结果

Tab.1 main comparative indicators results

工作面	微震		应力		钻屑量
	破裂高度/m	能量	范围/MPa	峰值影响范围/m	
834	0~50	小	3~6	25~50	小
833	0~62	大	4~8	50~75	大

4 结论

(1) 通过实施有效的覆岩离层注浆能够形成“离层空间-充填体”作用和“下压、上托”效果, 覆岩离层注浆除了能够控制“地面”沉降变形, 还能够对“井下”冲击地压起到积极防控作用, 主要体现在对局部关键层运移与整体覆岩空间结构分布影响方面。

(2) 覆岩离层注浆弱化顶板型冲击地压机理: 减小(破坏)基本顶悬顶结构及其局部积聚能量、传递载荷; 控制(改变)覆岩空间结构传递的载荷。

(3) 监测对比结果表明, 相同(似)工况条件下, 覆岩离层注浆能够明显控制覆岩破裂高度

和微震能量大小、减小支承应力和峰值影响范围、降低工作面钻屑值, 明显降低冲击地压显现程度。

本文研究背景为具有明显关键层赋存的冲击危险性工作面, 覆岩离层注浆防冲效果相对较好。对于无明显关键层赋存的钱家营煤矿, 已尝试“厚松散层”注浆减沉并成功应用, 有望形成更完备的、可靠的覆岩离层注浆防冲原理和技术。

参考文献(References):

- [1] 王双明, 申艳军, 宋世杰, 等. “双碳”目标下煤炭能源地位变化与绿色低碳开发[J]. 煤炭学报, 2023, 48(7): 2599-2612.
WANG Shuangming, SHEN Yanjun, SONG Shijie, et al. Change of coal energy status and green and low-carbon development under the “dual carbon” goal [J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(7): 2599-2612.
- [2] 袁亮. 我国煤炭主体能源安全高质量发展的理论技术思考[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(1): 11-22.
YUAN Liang. Theory and technology considerations on high-quality development of coal main energy security in China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(1): 11-22.
- [3] 冯攀飞, 朱红伟, 宗程, 等. 急倾斜巨厚煤层掘进巷道贯通期间冲击地压防治研究[J]. 西安科技大学学报, 2025, 45(3): 512-523.
FENG Panfei, ZHU Hongwei, ZONG Cheng, et al. Research on prevention and control of rock burst during the connection of drivage roadways in steeply inclined ultra-thick coal seam[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2025, 45(3): 512-523.
- [4] 潘一山. 煤矿冲击地压扰动响应失稳理论及应用[J]. 煤炭学报, 2018, 43(8): 2091-2098.
PAN Yishan. Disturbance response instability theory of rockburst in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(8): 2091-2098.
- [5] 张平松, 许时昂, 郭立全, 等. 采场围岩变形与破坏监测技术研究进展及展望[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(3): 14-48.
ZHANG Pingsong, XU Shiang, GUO Liquan, et al. Prospect and progress of deformation and failure monitoring technology of surrounding rock in stope[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(3): 14-48.
- [6] SWAN G, LI C C. Hardrock burst mechanisms and management strategies[J]. Geohazard Mechanics, 2023, 1(1): 18-31.
- [7] 袁亮, 王恩元, 马衍坤, 等. 我国煤矿动力灾害研究进展及面临的科技难题[J]. 煤炭学报, 2023, 48(5): 1825-1845.
YUAN Liang, WANG Enyuan, MA Yankun, et al. Research progress of coal and rock dynamic disasters and scientific and technological problems in China[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 1825-1845.
- [8] 韩军, 郭宝龙, 贾冬旭, 等. 冲击地压的两种破坏类型及其机制[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2024, 43(5): 524-533.
HAN Jun, GUO Baolong, JIA Dongxu, et al. Two failure types and its mechanism of coal bump[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2024, 43(5): 524-533.

- [9] 宫凤强,赵英杰,王云亮,等.煤的冲击倾向性研究进展及冲击地压“人-煤-环”三要素机理[J].煤炭学报,2022,47(5): 1974-2010.
GONG Fengqiang, ZHAO Yingjie, WANG Yunliang, et al. Research progress of coal bursting liability indices and coal burst “Human-Coal-Environment” three elements mechanism[J]. Journal of China Coal Society,2022,47(5):1974-2010.
- [10] 周坤友,窦林名,李家卓,等.巨厚关键层对冲击矿压动静载作用机制研究[J].采矿与安全工程学报,2024,41(5): 908-919.
ZHOU Kunyou, DOU Linming, LI Jiazhao, et al. Effect of extra-thick key strata on the static and dynamic stress of rockburst[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2024,41(5):908-919.
- [11] 潘一山,宋义敏,刘军.我国煤矿冲击地压防治的格局、变局和新局[J].岩石力学与工程学报,2023,42(9): 2081-2095.
PAN Yishan, SONG Yimin, LIU Jun. Pattern, change and new situation of coal mine rockburst prevention and control in China [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2023,42 (9):2081-2095.
- [12] 相里海龙,张宁,邓辉,等.深部留底煤巷道冲击地压破坏机理与卸压实践[J].煤炭技术,2024,43(5): 96-101.
XIANGLI Hailong, ZHANG Ning, DENG Hui, et al. Failure mechanism and pressure relief practice of rockburst in deep bottom coal roadway[J]. Coal Technology,2024,43(5):96-101.
- [13] 潘俊锋,陆闯,马小辉,等.井上下煤层顶板区域压裂防治冲击地压系统及应用[J].煤炭科学技术,2023,51(2): 106-115.
PAN Junfeng, LU Chuang, MA Xiaohui, et al. System and application of regional fracking of coal seam roof on and under the ground to prevent rockburst[J].Coal Science and Technology,2023, 51(2):106-115.
- [14] 潘俊锋,康红普,闫耀东,等.顶板“人造解放层”防治冲击地压方法、机理及应用[J].煤炭学报,2023,48(2): 636-648.
PAN Junfeng, KANG Hongpu, YAN Yaodong, et al. The method, mechanism and application of preventing rock burst by artificial liberation layer of roof[J].Journal of China Coal Society, 2023,48(2):636-648.
- [15] 郝宪杰,孙希奎,唐忠义,等.覆岩高位整层爆破卸压“人造预裂层”源头防治冲击地压技术体系及应用[J].煤炭学报,2024,49 (3): 1318-1331.
HAO Xianjie, SUN Xikui, TANG Zhongyi, et al. Technology system and application of “artificial pre-fracture layer” by high level whole layer blasting for pressure releasing to source prevention and control of rockburst[J]. Journal of China Coal Society,2024,49(3):1318-1331.
- [16] 杜学领.防治冲击地压的钻孔卸压技术研究进展与展望[J].煤矿安全,2024,55(11): 28-40.
DU Xuelling. Research progress and prospects of drillhole destressing in the prevention of rock burst[J]. Safety in Coal Mines,2024,55(11): 28-40.
- [17] 窦林名,许家林,陆菜平,等.离层注浆控制冲击矿压危险机理探讨[J].中国矿业大学学报,2004,33(2):145-149.
DOU Linming, XU Jialin, LU Caiping, et al. Study of controlling rock burst with grouting bed separation[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2004,33(2): 145-149.
- [18] 王志强,苏越,崔冬雪,等.华丰矿冲击地压危险性预测及区域防治技术研究[J].中国安全生产科学技术,2018,14(2):87-92.
WANG Zhiqiang, SU Yue, CUI Dongxue, et al. Study on risk prediction and regional prevention and control technologies of rock burst in Huafeng Mine[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018,14(2):87-92.
- [19] 史俊伟,朱学军,孙熙正.巨厚砾岩诱发冲击地压相似材料模拟试验研究[J].中国安全科学学报,2013,23(2):117-122.
SHI Junwei, ZHU Xuejun, SUN Xizheng. Similar material simulation test research on rock burst induced by overlying thick conglomerate strata movement[J]. China Safety Science Journal, 2013,23(2):117-122.
- [20] 周楠,许健飞,张吉雄,等.充填弱化坚硬覆岩冲击地压灾害机制研究[J].岩石力学与工程学报,2023,42(10): 2412-2426.
ZHOU Nan, XU Jianfei, ZHANG Jixiong, et al. Study on the weakening mechanism of hard overburden rock burst disaster by backfilling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2023,42(10):2412-2426.
- [21] 孟祥军,林海飞,王超,等.巨厚煤层综放工作面覆岩“三带”演化特征[J].煤矿安全,2021,52(6):85-90.
MENG Xiangjun, LIN Haifei, WANG Chao, et al. Evolution characteristics of overburden three zones in fully-mechanized caving face in huge thick coal seam[J].Safety in Coal Mines, 2021, 52 (6):85-90.
- [22] 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,1996,21(3):225-230.
QIAN Minggao, MIAO Xiexing, XU Jialin. Theoretical study of key stratum in ground control[J]. Journal of China Coal Society, 1996,(3):225-230.
- [23] 姜福兴,成功,冯宇,等.两侧不规则采空区孤岛工作面煤体整体冲击失稳研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(增刊2):4164-4170.
JIANG Fuxing, CHENG Gong, FENG Yu, et al. Research on coal overall instability of isolated working face with irregular gobs on both sides[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015,34(Suppl.2):4164-4170.
- [24] 徐良骥,张坤,刘潇鹏,等.离层注浆开采关键层变形特征及地表沉陷控制效应[J].煤炭学报,2023,48(2): 931-942.
XU Liangji, ZHANG Kun, LIU Xiaopeng, et al. Deformation characteristic of key strata and control effect of surface subsidence in mining with grouting into overburden bed-separation[J].Journal of China Coal Society,2023,48(2):931-942.
- [25] 张明,魏凯祥,年宾,等.深井冲击煤层充填工作面区段煤柱宽度研究[J].岩石力学与工程学报.2025, 44(2):316-330.
ZHANG Ming, WEI Kaixiang, NIAN Bin, et al. Study on the width of section coal pillar in filling face of coal seam with rockburst hazards in deep mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2025, 44(2):316-330.