

冲击地压主控因素及孕灾机制

谭云亮¹, 张修峰², 肖自义³, 范德源¹, 尹延春¹, 陈 洋², 刘学生¹

(1. 山东科技大学 能源与矿业工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 山东能源集团有限公司, 山东 济南 250101; 3. 国家矿山安全监察局山东局, 山东 济南 250031)

摘要:随着我国煤矿逐步向深部开采转移, 冲击地压灾害日趋严重。在冲击地压从机理认知走向防冲工程进程中, 首要的任务是厘清冲击地压孕灾主控因素, 并进行风险程度判识。在上百个冲击地压矿井致灾评价分析基础上, 提出了导致冲击地压发生的4类客观主控因素: 煤岩冲击倾向性、开采深度、坚硬顶板、地质构造, 以及3类人为主控因素: 煤柱、采空区及采掘卸荷, 并对各主控因素对冲击地压孕灾的力学机制进行了分析讨论。在客观主控因素方面, 煤岩冲击倾向性是煤岩积聚变形能进而诱发冲击破坏的自身属性; 开采深度与巷道围岩内积聚的变形能呈正相关关系, 是冲击地压发生的必要条件; 坚硬顶板大尺度周期断裂形成的冲击动载及动能是诱发冲击地压的“导火索”; 地质构造对冲击地压的影响显著, 对于断层构造而言, 断层两盘将在开采扰动造成的突发卸荷影响下产生相对“回弹”; 煤层变薄区等效弹性模量变大, 超前支承压力呈“双峰值”分布, 使得冲击影响范围扩大。在人为主控因素方面, 煤柱作为高应力集中区, 其尺寸、倾角及相对位置等将直接影响冲击地压发生的概率和强度; 采空区会诱发超前支承压力集中区内围岩积聚弹性能的突然释放, 尤其是在采高较大、顶板垮落不充分的情况下; 采掘卸荷会导致应力集中区快速“迁移”, 引发煤体内弹性应变能的大量释放, 是造成冲击地压的重要外因条件。在此基础上, 对山东新汶、山东鲁西、内蒙古鄂尔多斯、陕西彬长、新疆和甘肃等矿区冲击地压孕灾主控因素差异性, 进行了对比分析, 强调按层次对矿井、采区和工作面进行冲击地压主控因素及其影响程度判识重要性, 构建了从降能、释能、阻能到抗能的冲击地压治理工程路径。

关键词: 冲击地压; 主控因素; 孕灾; 风险判识; 递进式防治

中图分类号: TD324 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2024)01-0367-13

Main control factors of rock burst and its disaster evolution mechanism

TAN Yunliang¹, ZHANG Xiufeng², XIAO Ziyi³, FAN Deyuan¹, YIN Yanchun¹, CHEN Yang², LIU Xuesheng¹

(1. College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. Shandong Energy Group Co., Ltd., Jinan 250101, China; 3. Shandong Bureau of the National Mine Safety Administration, Jinan 250031, China)

Abstract: With the gradual transfer of shallow coal mining to deep coal mining in China, the rock burst disasters are becoming an increasingly serious problem. In the process of rock burst mechanism cognition to rock burst prevention engineering, the primary task is to clarify the main factors of rock burst and to identify its risk level. In this paper, four kinds of objective factors i.e., coal rock impact tendency, mining depth, hard roof and geological structure, and three kinds of human factors i.e., coal pillar, goaf and mining unloading effect, were proposed. And the disaster evolution mechanism of

收稿日期: 2023-07-07 修回日期: 2023-09-13 责任编辑: 郭晓炜 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.0829

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52374094); 山东能源集团揭榜挂帅资助项目(SNKJ2022BJ01-R27); 山东省泰山学者攀登计划资助项目(tspd20210313)

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

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

引用格式: 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.



移动阅读

each factor was discussed in detail. In terms of objective controlling factors, the impact tendency is the inherent attribute of coal/rock to accumulate deformation energy and induce impact failure. The mining depth is positively correlated with the deformation energy accumulated in the surrounding rock of the roadway, which is an essential condition for the occurrence of rock burst. The impact dynamic load and kinetic energy formed by large-scale hard roof periodic fracture are the 'fuse' to rock burst. The influence of geological structure on rock burst is significant. For fault structure, the two walls will relatively 'rebound' under the sudden unloading caused by mining disturbance. And the equivalent elastic modulus of the thinning area of the coal seam becomes larger, and the advanced abutment pressure is distributed in a 'double peak' pattern, which expands the impact influence range. In terms of subjective controlling factors, coal pillar is a high stress concentration area, and its size, dip angle and relative position will directly affect the probability and strength of rock burst. The goaf will induce a sudden release of energy accumulated in the stress concentration area, especially under large mining height and insufficient roof collapse conditions. Mining unloading will lead to the rapid "migration" of the stress concentration area and release a large amount of energy stored in the coal/rock, which is an important external inducement of rock burst. On this basis, the differences of main control factors of rock burst disaster in the main rock burst mining area, such as Xinwen, Luxi, Erdos, Binchang, Xinjiang and Gansu were compared and analyzed. The study emphasized the importance of identifying the main control factors and their influence degree of rock burst from an entire mine, a panel to a working face. Also, it constructed the engineering management path of rock burst from energy-reducing, energy-releasing, energy-damping to energy-resisting.

Key words: rock burst; main factors; disaster evolution; risk identification; progressive control

冲击地压是聚积在巷道围岩或回采工作面周围煤岩体中的能量突然释放而造成动力灾害。近些年来冲击地压灾害屡屡发生,如2018年山东能源集团龙郓煤业发生的21人死亡冲击地压事故,2019年吉林煤业集团公司龙家堡煤矿发生的9人死亡冲击地压事故,2019年开滦集团有限责任公司唐山矿业分公司井下发生7人死亡冲击地压事故^[1],冲击地压灾害防治形势十分严峻。

事实上,冲击地压孕灾机理研究一直是学术界关注重点之一。近些年来,我国冲击地压防治机理探讨也百花齐放、百家争鸣,提出了“三准则”理论^[2]、系统失稳理论^[3]、“三因素”理论^[4]、“弱化减冲”理论^[5]、“冲击启动”理论^[6]、冲击地压扰动响应失稳理论^[7]、动能诱冲理论^[8]等。另一方面,考虑地质条件、顶板特性及采掘工程部署,解剖不同类型冲击地压^[9-14],并进一步针对不同类型前兆信息^[15],采取针对性的监测与卸压措施^[16-18],已经成为防冲工作的重要组成部分。

然而,由于冲击地压孕灾影响因素多且复杂,如地质环境、开采条件日趋复杂性,导致采动应力与覆岩自重应力、构造应力相互叠加,在动静载合作用下,易诱发大采深重力型冲击型、坚硬顶板型冲击型、构造型冲击型、采动与构造耦合型冲击型、煤柱应力集中型等不同类型的冲击地压灾害;并且多种类型并存或相互叠加,使得工程判识不易量化。在冲击地压从机理认知走向防冲工程进程中,首要的任务是厘清冲击地压孕灾主控因素。

影响冲击地压的影响因素分析,是有效进行防冲

的前提。吕大钊^[19]把矿井掘进期间冲击地压发生主要影响因素归结为煤层冲击倾向性、开采深度、褶曲和断层构造、巷道布置以及底煤厚度;王业常等^[20]认为应当考虑冲击地压开采深度、煤岩冲击倾向性、顶板岩层结构特征、煤层厚度及变化特征、构造特征、开采技术因素以及组织管理等因素;而魏来等^[21]则认为矿井冲击地压主要影响因素为煤层倾角、开采工艺、开采深度、顶板岩层的结构特点、地质构造等。笔者经过2021—2022年期间参加山东省组织的全省近百次冲击地压矿井“双专双查”工作发现,众多的冲击地压影响因素中,煤岩冲击倾向性、开采深度、坚硬顶板、地质构造4类客观主控因素和煤柱、采空区及采掘卸荷3类人为主控因素。

1 冲击地压孕灾基本力学机制

冲击地压成灾时所表现出的突发性、瞬时性以及巨大破坏性是其孕育和发展过程中能量逐渐积聚及快速释放过程的集中体现。齐庆新^[4]早期提出的冲击地压演化及其发生的3个关键要素,即“力源因素”、“物性因素”和“结构因素”,为冲击地压成灾理论走向冲击地压防治理论,做出了重要的贡献。李海涛、齐庆新^[22],进一步从能量角度提升了“三要素”内涵;对于持续能量源,其产生作用的主要机制类似于加载,可将其概括为“力源因素”;弹性能存储对介质属性的要求可概括为“物性因素”;制约机制主要依附于结构发挥作用,故将其概括为“结构因素”。

由于冲击地压受煤岩体赋存物理属性、应力环境、

结构特征、开采扰动等多种因素的综合影响,导致冲击地压发生的源头属性难以摸清^[23]。尤其是受地缘区域性因素的影响巨大,如山东巨野、兗州、新汶等东部矿区,具有开采深度大、采动影响因素复杂等特征;而内蒙古鄂尔多斯、陕西彬长、新疆等西部矿区,则具有强度开采高、坚硬岩层、矿区差异性大等特征。破解“源头治理”的难题,需要从众多差异性特征中,把握共性要素。

在自然界中,物质的变形与破坏特征取决于2个方面:一是材料属性,如玻璃表现出强脆性,而铝质材料则表现出显著韧性;二是受力条件,同一种材料在不等压高应力作用下,往往表现出快速变形与破坏形态,而在低应力作用下则表现出缓慢变形与蠕变破坏形态,如图1所示。从自然界物质受力变形与破坏的基本原理出发,窥视冲击地压孕灾基本力学原理及影响因素,成为“从源头”上求真的基本遵循。因此,从最基本科学原理出发,可以把冲击地压孕灾主控因素分为两类:煤岩地质赋存属性,称之为客观因素;由人类开采导致煤岩受力条件改变,称之为人为因素。

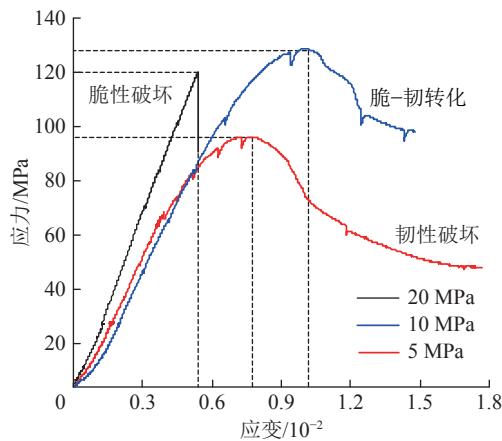


图1 不同围压条件下砂岩应力-应变曲线

Fig.1 Transient unloading state of roadway excavation

表1 煤岩冲击倾向性指数及冲击倾向性分类^[27]

Table 1 Bursting liability index and classification of coal and rock^[27]

指数	力学含义	冲击倾向性分类		
		无	弱	强
顶板弯曲能量指数 U_{WQS} /kJ	在均布载荷作用下,单位宽度岩梁达到极限跨度时积蓄的变形能	$U_{WQS} \leq 15$	$15 < U_{WQS} \leq 120$	$U_{WQS} > 120$
煤体单轴抗压强度 R_c /MPa	煤试件在单轴压缩状态下,承受的破坏载荷与其承压面面积的比值	$R_c < 7$	$7 \leq R_c < 14$	$R_c \geq 14$
煤体弹性能量指数 W_{ET}	煤试件在单轴压缩状态下,加载到(70%~90%) R_c 应力时试件弹性变形能与塑性变形能之比	$W_{ET} < 2$	$2 \leq W_{ET} < 5$	$W_{ET} \geq 5$
煤体动态破坏时间 D_T /ms	煤试件在单轴压缩状态下,从极限强度到完全破坏所经历的时间	$D_T > 500$	$50 < D_T \leq 500$	$D_T \leq 50$
煤体冲击能量指数 K_E	煤试件在单轴压缩状态下,在应力应变全过程曲线中,峰值前积蓄的变形能与峰值后耗损的变形能之比	$K_E < 1.5$	$1.5 \leq K_E < 5$	$K_E \geq 5$
煤岩组合试件剩余能量指数 W_{RE}	煤岩组合试件在单轴压缩状态下,峰值弹性能密度与峰后破坏能密度的比值	$0 < W_{RE} < 1$	$1 \leq W_{RE} < 2$	$W_{RE} \geq 2$

2 客观主控因素

2.1 煤岩冲击倾向性

煤岩冲击倾向性是指煤岩具有的积聚变形能并产生冲击破坏的性质,煤岩冲击倾向性是冲击地压发生的必要条件和内在因素。国内141对冲击地压矿井的统计数据表明^[24],煤层具有冲击倾向性的煤矿占比98.8%。国家标准(GB/T 25217.1—2010、GB/T 25217.2—2010)^[25-26]规定了对顶板采用弯曲能指数、煤层采用单轴抗压强度、弹性能指数、冲击能指数、动态破坏时间4个指标测定煤层冲击倾向性,见表1。此外,其他学者提出了修正冲击能指数、弹性变形能指数、峰值能量冲击指数、刚度冲击性指数、模量指数、冲击能量速度指数、剩余能量释放速度指数、剩余弹性能指数等十余种冲击倾向性指数,从强度、刚度、能量、时间等角度为煤岩冲击倾向性评价提供了参考指标。

冲击地压由顶板-煤体-底板所构成的组合结构体能量积聚与释放、失去动态平衡而诱发的突变破坏。因此,在冲击倾向性研究中,也应重视煤岩组合体的冲击倾向性表征。国家标准(GB/T 25217.3—2019)^[27]考虑了顶板岩石和巷帮煤体组合结构,提出了适于煤岩组合试件的剩余能量指数 W_{RE} ,采用峰值弹性能密度 U_e 与峰后破坏能密度 U_a 的比值计算,提高了冲击倾向性评价的全面性。

$$W_{RE} = \frac{U_e}{U_a} \quad (1)$$

笔者通过进行不同煤岩组合试件的力学行为测试,提出了煤岩组合冲击能速度指数 W_{ZT} ^[28]:

$$W_{ZT} = \frac{h_1 Q_{R1} + h_2 Q_{R2} + h_3 Q_{R3}}{h_1 F_X D_T} \quad (2)$$

式中, Q_{R1} 、 Q_{R2} 和 Q_{R3} 分别为煤岩组合体试件破坏时单位体积煤、顶板岩石与底板岩石内积聚的弹性应变

能; h_1 、 h_2 和 h_3 分别为煤岩组合体试件中煤、顶板岩石与底板岩石高度; D_T 为煤的动态破坏时间; F_X 为破坏单位体积处于峰值应力的煤所需消耗的能量。

2.2 开采深度

我国煤矿平均开采深度已达 700 m, 并且以每年 10~25 m 的速度延伸, 现有超千米深井约 60 个。与浅部不同, 深部煤岩体通常为含有节理裂隙的层状结构, 在多次开采扰动和长期的流变过程中, 这种断续结构煤岩体会出现新的破裂和强度不断衰减的循环过程, 从而导致大变形、强流变和超低摩擦效应, 在一定条件下将会引起冲击地压动力灾害^[10]。

统计分析表明^[19], 在同一矿区或同一煤矿, 开采深度越大, 冲击地压发生的可能性也越大。当开采深度 $H \leq 350$ m 时, 冲击地压一般不会发生; 深度在 $350 < H \leq 500$ m 时, 危险会逐步增加; 从 500 m 开始, 随开采深度的增加, 冲击地压的危险性急剧增长; 当采深为 800 m 时, 冲击指数 ($W_t=0.57$) 比采深 500 m ($W_t=0.04$) 增加了 14 倍。

开采实践表明, 在我国中东部地区山东、河南等采深超过 800 m、西部地区如内蒙古鄂尔多斯、山西彬长、新疆、甘肃等采深超过 550 m 的大部分矿井具有冲击动力灾害风险, 且随着深度增加风险程度越来越高, 开采深度与冲击地压发生的概率成正相关关系。课题组对 2006—2022 年发生人员伤亡的冲击地压事故矿井的采深统计如图 2 所示, 采深超 800 m 的事故占比 55%。

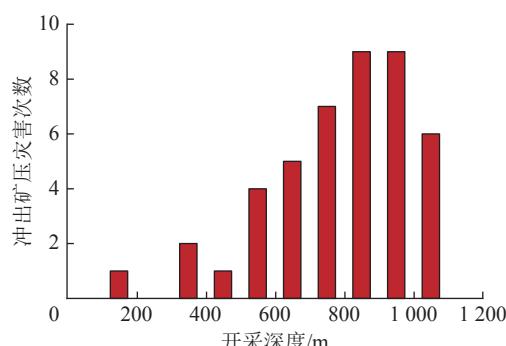


图 2 2006—2022 年冲击地压事故采深统计

Fig.2 Mining depth statistics of rock burst accidents from 2006 to 2022

事实上, 一旦巷道围岩开挖卸荷, 巷道周边将产生不平衡力, 导致围岩变形与破坏(图 3), 而随着深度的增加, 围岩原岩自重应力近似呈线性增加, 因此促使围岩不平衡力也将线性增加。

例如, 对于高度 3 m 一个矩形巷道而言, 泊松比取 $\mu=0.25$, 则侧压系数 $\lambda=\mu/(1-\mu)=1/3$, 则埋深 800 m 与 300 m 相比较, 瞬间开挖卸荷后, 沿着巷道走向单位厚度巷道表面产生不平衡力, 分别为 20 和 7.5 MN,

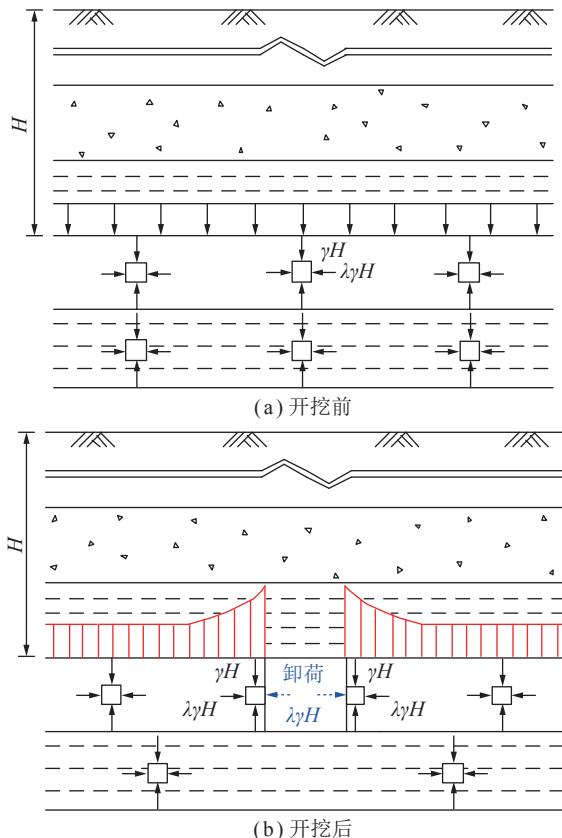


图 3 巷道开挖卸荷瞬态

Fig.3 Transient unloading state of roadway excavation

相比为 2.67 倍。根据最小能量理论, 巷道围岩内部积聚能量 U_J 可表示为

$$U_J = \frac{\gamma^2 H^2 \left[(1+\lambda) \left(1 + \frac{R_0^2}{r^2} \right) + (1-\lambda) \left(1 + \frac{3R_0^4}{r^4} \right) \right]}{16E} \quad (3)$$

式中, γ 为上覆岩层容重, kN/m^3 ; H 为埋深, m ; R_0 为巷道当量半径, m ; r 为岩体内任一点与巷道间距离, m ; E 为岩体弹性模量, GPa 。

因此, 深部巷道开挖瞬间在不平衡力作用下导致破坏和动力失稳。显然, 埋深越大, 巷道开挖后围岩内积聚的形变能呈二次函数型增大, 围岩破坏后剩余形变能转化成动能值也就越大, 发生冲击地压的可能性增大且冲击强度增强。由此可知, 开采深度与冲击地压发生的强度和烈度呈正相关关系。针对不同矿井地质及开采条件, 获得冲击地压极限埋深具有重要意义。

2.3 坚硬顶板

坚硬顶板可保持大面积的悬而不冒, 悬空面积大, 工作面超前应力集中程度高。坚硬顶板悬顶达到限时, 大面积断裂引起煤岩体强烈震动, 从而诱发采煤设备移动、瞬间底臌及大范围煤帮破坏等冲击灾害, 如图 4 所示。原北京矿务局门头沟、华丰煤矿、东滩煤矿、内蒙古鄂尔多斯地区等, 不仅厚层坚硬顶板, 来

压强烈诱发冲击地压,而且因高位厚层坚硬顶板还诱发矿震事件^[29-31]。

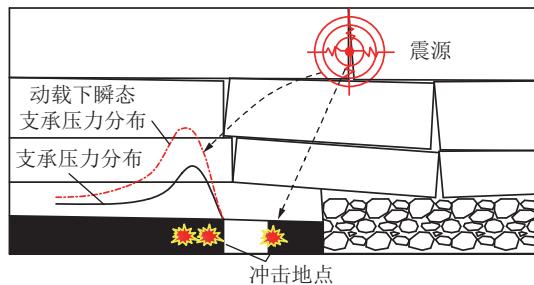


图4 顶板破断诱发矿震与冲击地压冲击示意

Fig.4 Schematic diagram of mining earthquake and rock burst induced by roof fracture

坚硬顶板作为客观类地质因素,其积聚的弯曲弹性能量主要与悬顶面积、顶板厚度、岩体强度等相关,顶板越坚硬且厚度越大,其周期断裂运动释放能量形成的冲击动载或诱冲动能就越大。将顶板视为弹性梁,其弯曲变形能 U 可表示为

$$U = \frac{1}{2EI} \int M^2(x)dx = \frac{m_E^2 \gamma_E^2 L_E^2 Y^2}{2EI} \quad (4)$$

式中, EI 为顶板平面应变模量, E 为弹性模量, I 为抗弯模量; $M(x)$ 为顶板弯矩; m_E 为顶板岩梁厚度; γ_E 为顶板岩石容重; L_E 为顶板岩梁长度; Y 为悬顶长度。

由表2可知,对上述参数进行取值,并代入式(4)进行分析,可以获得坚硬顶板应变能积聚特征,如图5所示,可以发现随着顶板厚度和悬露长度的增大,坚硬顶板内部应变能近似呈二次函数型增长。

表2 顶板参数取值^[32]

Table 2 Mechanical parameters selection of roof^[32]

$EI/(GN \cdot m^2)$	$\gamma_E/(kN \cdot m^{-3})$	L_E/m	m_E/m	Y/m
1 067.5	25.0	9.0	2.0~10.0	1.0~9.0

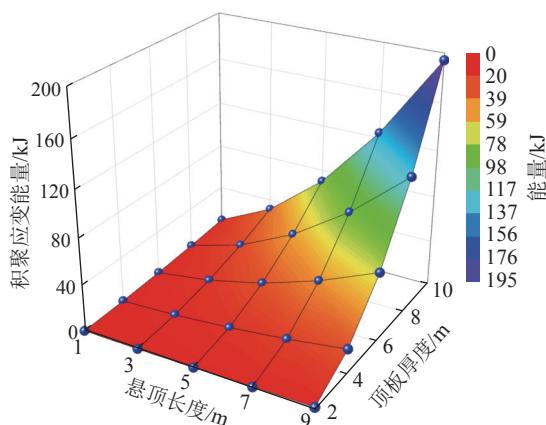


图5 坚硬顶板应变能积聚特征

Fig.5 Accumulation characteristics of strain energy in hard roof

坚硬顶板断裂能量释放模型如图6所示,根据坚硬顶板岩梁断裂释放弯曲应变能计算式,可得坚硬顶板断裂后的冲击能量 ΔU ^[17]为

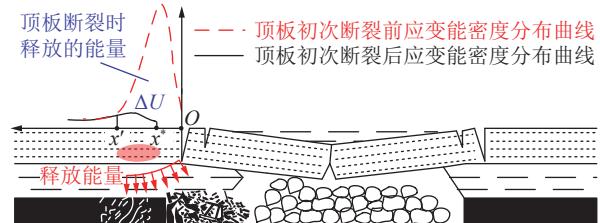


图6 坚硬顶板断裂后能量释放机制示意^[17]

Fig.6 Energy-releasing mechanism after initial fracture^[17]

$$\Delta U = \int_0^{x^*} \frac{dU_1(x)}{dx} dx - \int_{x^*}^{x^*} \frac{dU_2(x)}{dx} dx \quad (5)$$

式中, x^* 为坚硬顶板在煤壁前方断裂位置坐标; x^* 为顶板初次断裂前、后的弯曲应变能密度分布曲线交点处的坐标; $dU_1(x)/dx$ 为煤壁前方岩梁的弯曲应变能能量密度的分布函数; $dU_2(x)/dx$ 为岩梁初次断裂后 x^* 位置左侧能量密度的分布函数。

因此,在坚硬顶板断裂前,采用爆破或水压致裂等方式进行劣化,尤其是对震源区域内岩层进行劣化,使部分弹性应变能得以缓慢逐步安全释放,以避免因顶板突然大尺度断裂集中释放高能量而诱发冲击。

2.4 地质构造

地质构造对冲击地压的影响起到至关重要的作用。在地震领域,地质构造起到主控作用,即地震容易发生在活断层的一些特定部位,如端点、拐点、交汇点等,且多在现代构造运动强烈的部位。与之相似,构造对冲击地压影响极大,不同类型断层对冲击地压影响也不一样。对于张性正断层,一旦发生冲击地压,往往在上盘区域产生严重动力冲击破坏。如 2020-02-22 山东新巨龙能源有限责任公司 2305S 工作面上平巷发生冲击地压事故(简称“2·22”事故),ARAMIS M/E 监测震级为 2.49 级,能量 4.2×10^7 J,工作面上平巷前 10 m 至三联巷以南 80 m(共 420 m)以及三联巷 66 m 巷道出现变形,如图7 所示。

若认为严重破坏段 128 m 范围内断层上盘顶板岩层产生滑移,并根据微地震监测结果知顶板活动高度达 160 m,假设忽略断层面摩擦影响,则取沿着断层面滑移导致大能量事件进行反推,则顶板上盘滑移垂直高度为 0.66 mm。可见,正断层厚度较大岩层沿着正断层面微小滑移也可诱发较高冲击能量。同时,

“2·22”冲击地压事故破坏区域,就主要集中在 FD8 断层上盘区域,而下盘几乎未出现动力破坏^[33],断层两盘区域动力灾害表现出很大差异性(图8)。

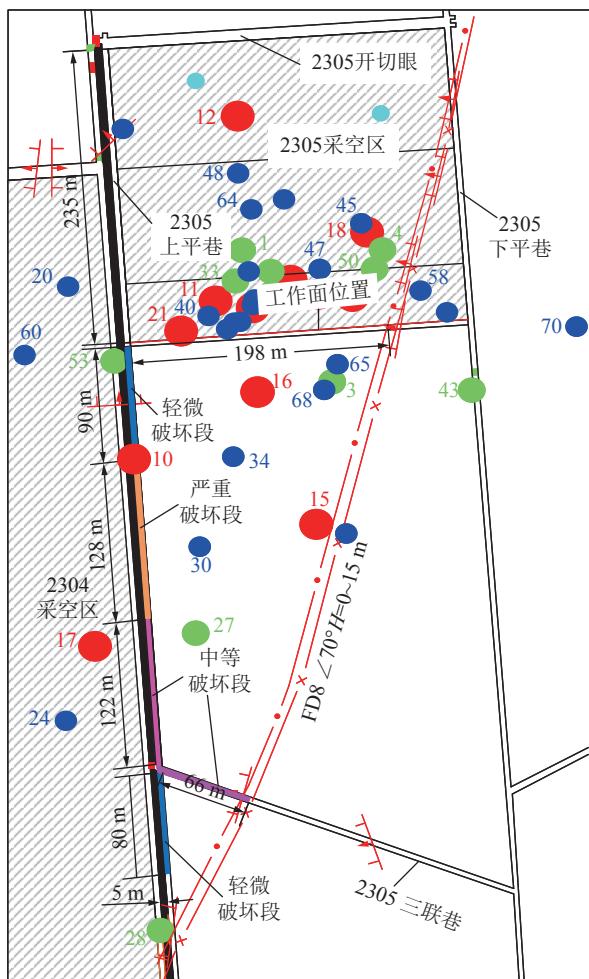


图 7 新巨龙煤矿“2·22”冲击地压事故区域

Fig.7 “2·22” rock burst accident area in Xinjulong Coal Mine

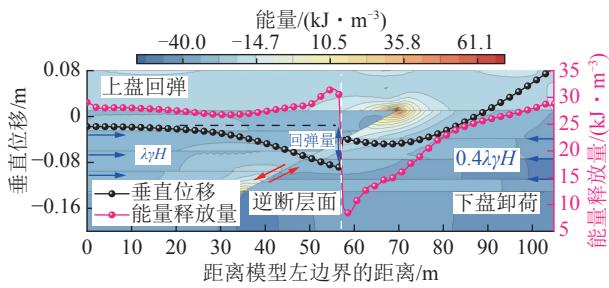


图 8 逆断层卸荷回弹能量变化

Fig.8 Energy evolution of unloading rebound in reverse fault

而对于压扭性断层, 断层两盘处于挤压高应力状态。一旦某一盘因顶板垮落等影响突发卸荷, 导致断层两盘产生相对“回弹”, 形成强应力波, 易对处于应力集中程度高的巷道造成冲击破坏。以逆断层为例, 当下盘受开采扰动影响发生卸荷后, 下盘在断层面处对上盘的法向作用力减小, 上盘在运移过程蕴藏于上覆坚硬岩层中的能量得到释放, 使得上盘向下回落, 即为逆断层的回弹。如图 8 所示, 当下盘卸荷系数为 0.4 时, 上盘回弹量约为 80 mm, 能量释放量最大约为

32.5 kJ/m^3 。另外, 逆断层回弹与断层倾角、落差、摩擦因数、卸荷系数等密切相关。断层倾角越大, 相同落差下逆断层运移的距离减小, 从而造成上覆岩层积聚能量减小, 即可释放的用于断层回弹的能量减小, 回弹量呈二次函数型减小。摩擦因数的增大不仅造成积聚能量的减小, 还导致回弹过程所需消耗的能量增大, 回弹量呈指数型减小。卸荷系数反映的是下盘采动作用下的卸压程度, 卸压系数越大, 说明卸荷程度越小。因此, 当卸压系数减小时, 下盘对上盘的法向约束力减小, 上盘在上覆岩层积聚能量的作用下的回弹量呈二次函数型增大。另外, 在相同断层倾角条件下, 断层落差的越大意味着上覆岩层所能积聚的能量越大, 上盘回弹时所能提供的能量越多, 回弹量呈线性增长。2004 年 6 月木城涧煤矿回采巷道的冲击地压事故(造成 1 人死亡、3 人重伤、5 人轻伤)便是典型一例, 如图 9 所示。现场监测表明, 断层倾角 30° 、断层面回弹滑移达 5 cm , 卸荷垮落岩层厚度 6 m 、面积 $2 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。同样假设忽略断层面摩擦影响, 初步估算其释放弹性形变能为 $7.5 \times 10^7 \text{ J}$ 。

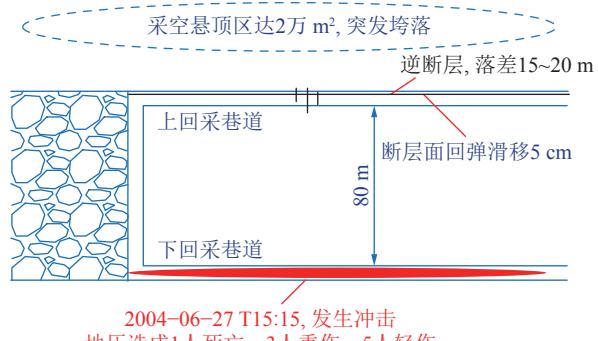


图 9 2004 年木城涧煤矿逆断层活动诱发冲击地压事故

Fig.9 Rock burst accident induced by reverse fault activity in Muchengjian coal mine in 2004

研究表明, 除褶曲和断层构造外, 煤厚变异区的地应力赋存异常, 也成为冲击地压致灾的重要影响要素^[34]。为了讨论煤层厚度变薄区域应力变化情况, 构建煤岩组合力学模型, 如图 10 所示。

假设 OA 段为全煤区, OB 段为煤岩组合区, 且煤层厚度变化符合线性函数关系, 煤层倾角为 α 。此时, 煤岩组合区中任一点 x 位置处煤层与岩层串联部分的等效弹性模量 $E(x)$ 可表示为

$$\frac{1}{E(x)} = \left(\frac{H_R}{H} - 1 \right) \left(\frac{1}{E_C} - \frac{1}{E_R} \right) \frac{x}{m} + \frac{1}{E_C} \quad (6)$$

式中, E_R 、 E_C 分别为岩石、煤的弹性模量; $H = H_R + H_C$,

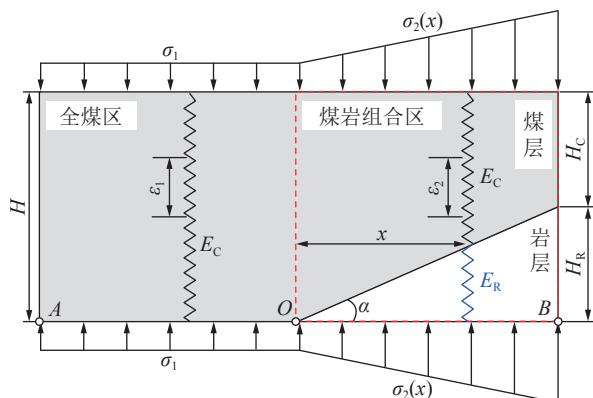


图 10 煤岩组合力学模型示意

Fig.10 Mechanical model of coal-rock combination

H_R 、 H_C 分别为岩石、煤的厚度; m 为煤岩组合区 OB 段长度。

根据弹性力学理论可知, 全煤区和煤岩组合区内应力与应变存在关系:

$$\begin{cases} \sigma_1 = E_C \varepsilon_1 \\ \sigma_2(x) = E(x) \varepsilon_2 \end{cases} \quad (7)$$

式中, σ_1 、 $\sigma_2(x)$ 分别为全煤区、煤岩组合区的应力; ε_1 、 ε_2 分别为全煤区、煤岩组合区应变。

假设在外界载荷作用下全煤区和煤岩组合区始终保持弹性状态, 则可认为其各部位的变形是一致的。由此可知, 全煤区应变 ε_1 与煤炭组合区应变 ε_2 相同, 即存在 $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_0$ 。根据上述条件将式(6) 和式(7) 联立, 可得全煤区与煤岩组合区的应力比 T 为

$$T = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{1}{\left(\frac{H_R}{H}-1\right)\left(1-\frac{E_C}{E_R}\right)\frac{x}{m}+1} \quad (8)$$

由于一般情况下 $E_C < E_R$, 即 $0 < E_C/E_R < 1$, 因此 $(1-E_C/E_R) \in (0, 1)$; 由于 $0 < H_R/H < 1$, 即 $-1 < H_R/H < 0$; 且 $x \in (0, m)$, 存在 $0 < x/m < 1$ 。因此:

$$\left[\left(\frac{H_R}{H}-1\right)\left(1-\frac{E_C}{E_R}\right)\frac{x}{m}+1\right] \in (0, 1)$$

由此可知 $T > 1$, 即 $\sigma_2 > \sigma_1$ 。这说明煤岩组合区所受应力始终高于全煤区, 究其原因是由于煤岩组合区中岩层的存在使得等效弹性模量大于全煤区弹性模量, 在相同应变状态下所能承受的应力更高。

为了定量表征煤层变薄对所受应力的高低的影响, 煤岩组合区中的煤层厚度比 s 可表示为

$$s = \frac{H-h}{H} \quad (9)$$

式中, h 为煤岩组合区中任一点 x 位置处岩层的厚度, 且存在 $h=xtan\alpha$ 。

将式(8) 与式(9) 联立, 可得

$$T = \frac{1}{\left(\frac{H_R}{H}-1\right)\left(1-\frac{E_C}{E_R}\right)\frac{H(1-s)}{mtan\alpha}+1} \quad (10)$$

为了进一步讨论煤层变薄区域应力变化规律, 对式(10) 中各力学参数进行取值, 见表 3。

表 3 煤层参数取值

Table 3 Mechanical parameters selection of coal seam

E_C/GPa	E_R/GPa	H_C/m	H_R/m	m/m	$\alpha/(^\circ)$	s
10.0	40.0	5.0	5.0	9.0	25~45	0~1

利用 MATLAB 工具对煤岩组合区内不同煤层厚度下的应力比进行分析, 发现随着煤层厚度比增大, 全煤区与煤岩组合区的应力比整体近似呈指数函数型减小, 且减小幅度随煤层变薄梯度角的增大而减小(图 11)。这说明煤岩组合区内煤层厚度与倾角是其所受应力大小的主控因素。在等厚煤岩组合区内, 煤层越厚, 等效弹性模量越小, 所受应力越小并趋近于全煤区应力 σ_1 ; 而煤层越薄, 等效弹性模量越大, 所受应力越大并趋近于全岩区应力, 即趋于组合体内“能干层”应力。

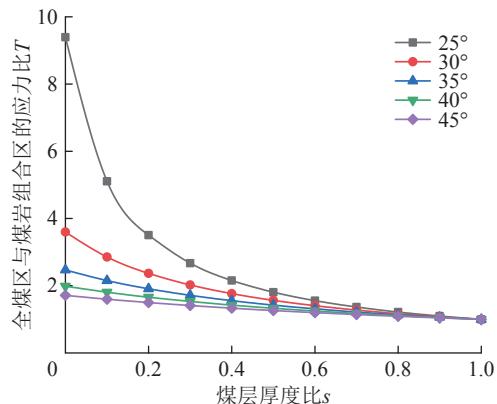
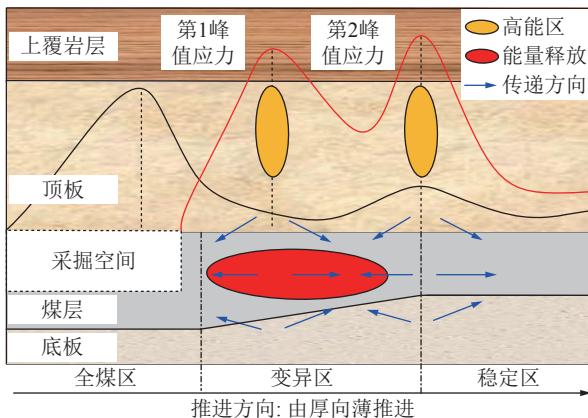


图 11 不同煤层厚度下应力比变化曲线

Fig.11 Stress ratio variations under different coal thicknesses

工作面由厚向薄回采, 超前支承压力呈“双峰值”分布, 而工作面由薄向厚回采, 超前支承压力呈“单峰值”分布; 冲击地压发生时, 工作面由厚向薄回采, 第 2 峰值应力区内形成高能区会阻碍能量向煤壁深部传递, 冲击能量将主要向巷道或工作面临空面释放, 冲击影响范围大, 如图 12 所示。

在木城涧煤矿+250 m 水平三槽采区, 西一壁工作面回采至煤厚由 3.5 m 变为 2.2 m 的煤厚变化区时、西三壁工作面回风巷掘进至煤厚由 3.5 m 变为 2.4 m 时, 各发生了一次冲击地压。因此, 在煤厚变异区布置工作面时, 应根据煤厚变化位置合理确定工作面回采方向, 避免冲击地压的发生。

图 12 煤厚变异区开采能量传递示意^[31]Fig.12 Energy transmission characters under variable mining region of coal thickness^[31]

3 人为主控因素

人为主控因素,主要是由于地下开采布置不合理造成应力集中区,或采空区岩层处理不当,或采掘进度不合理等导致发生冲击地压的情形,主要包括煤柱、采空区和采掘卸荷等。

3.1 煤柱

留煤柱护巷是我国煤矿常采用的一种护巷方法,但留设煤柱容易导致产生应力集中区域,煤柱上的集

中应力不仅对本煤层开采具有影响,还会向相邻煤层传递,对相邻煤层的应力条件构成影响,甚至导致冲击地压的发生。煤柱对冲击地压的影响是多方面的,诸如煤柱尺寸大小、煤柱与邻层之间岩层性质、倾角、煤柱边缘影响角、采煤区段与煤柱的相对位置等。

煤柱上方支承压力峰值及影响区域,随煤柱宽度增加而逐渐增加,并最终趋于稳定,支承压力分布曲线由“拱形”向“马鞍形”过渡。相比于宽煤柱,窄煤柱的煤体几乎全部进入塑性状态,内部不存在弹性核,所积聚的弹性能较少,冲击地压危险性较小。但煤柱太小后,承载强度低,受采动影响易发生破碎坍塌,无法保护巷道。因此,煤柱合理尺寸的确定是冲击地压防治中的重要工作。

由于开采布局不合理,形成的孤岛形或半岛形采区和遗留煤柱,在采煤过程中不但冲击地压发生次数多而且强度大。对于两侧采空孤岛“煤柱”而言,传统意义上的煤柱概念已经遭到颠覆,“煤柱”影响可达200 m以上,如2009年在古城煤矿2103运输巷的冲击地压事故(造成1死5伤)便是典型一例^[35],如图13所示。发生冲击地压地点在开采工作面2103前方244 m的巷道内,事实上,支承压力影响区域已经波及244 m以远,如图14所示,其中, K_{\max} 为最大应力集中系数。所以对煤柱尺寸影响要有“广义性”认识。

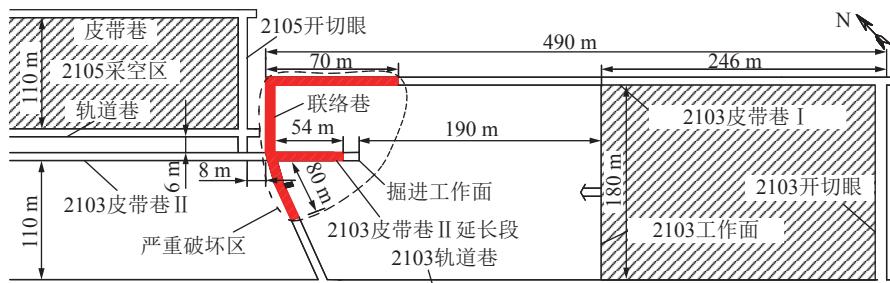


图 13 2009 年古城冲击地压事故

Fig.13 Rock burst accident in Gucheng coal mine in 2009

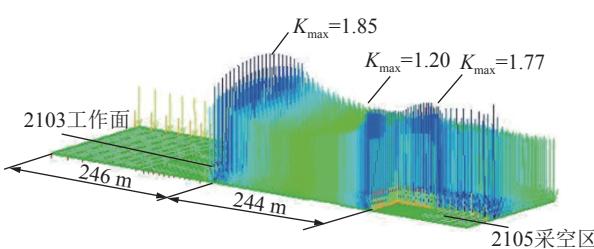


图 14 支承压力分布模拟结果

Fig.14 Simulation result of abutment pressure distribution

无独有偶,因缺乏科学的开采设计,我国许多矿井在开采初期遗留了大量的煤柱。当前,随着煤炭开采由“粗放式”向“精深式”方向发展,空间煤柱-岩层联动破坏导致下煤层开采时支架、巷道围岩发生剧烈

变形破坏现象时有发生,在近距离、多煤层开采过程中体现尤为明显。以晋华宫煤矿307盘区多煤层开采(7号、8号和11号煤)为例,如图15所示。

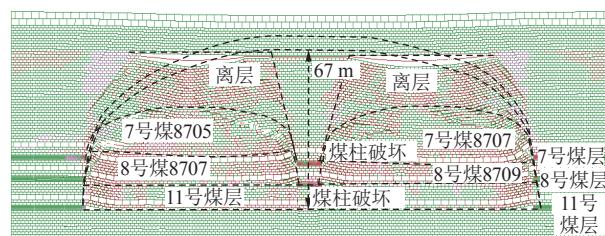


图 15 空间煤柱-岩层联动破坏失稳

Fig.15 Linkage failure and instability caused by spatial coal pillar and rock strata

下部11号煤层开采引起上覆岩层破断垮落的同时,还会与上覆7号和8号煤层采空区贯通,引起上覆煤层顶板进一步破断垮落。此时,空间煤柱由边缘内部的渐进式破坏引起上覆已经稳定的破断岩层进一步发生联动失稳,进而再在下部11号煤层开采过程中易诱发冲击地压灾害。合理的煤柱尺寸和开采煤层间距是破解这一难题的关键。

3.2 采空区

采空区的影响主要是在采高比较大、采空区直接顶冒落不充分,当上部坚硬基本顶强烈来压时,会诱发回采工作面或回采巷道超前支承压力集中区内围岩积聚的弹性能突然释放,导致冲击地压发生。如我国大同、北京等典型坚硬顶板矿区发生冲击地压(或

强矿压),主要源于坚硬顶板运动,尤其在不同尺度“见方”且满足“见方来压”几何条件^[36]时,将会诱发强烈动力显现。

数值模拟表明,在受二次采动影响时期,随着工作面的推进,沿空巷道顶板逐渐悬露并在上覆岩层载荷作用下发生弯曲沉降,实体煤与巷旁支护体所承受的支承压力逐渐增加,巷道围岩弹性应变能进一步积聚,能量增长幅度及梯度明显增大,巷旁支护体最大积聚能量约为400 kJ/m³,实体煤帮侧深部最大积聚能量为550 kJ/m³。在下区段工作面后方采空区内,侧向基本顶断裂之前,巷道围岩内部能量持续增加,最大积聚能量约为625 kJ/m³,如图16所示。

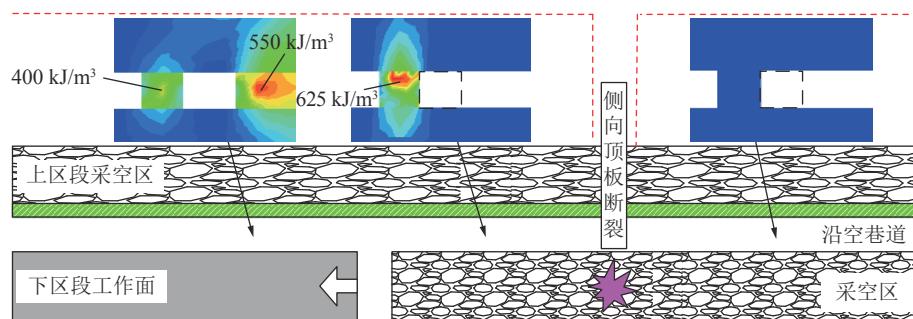


图16 采空区顶板能量积聚特征

Fig.16 Characteristics of energy accumulation in goaf roof

山东古城煤矿统计的35次冲击地压总结分析中,受采空区顶板周期来压与工作面前方构造应力综合影响的30次,占86%。因此,对于采空区坚硬顶板岩层处理,要么进行有效充填阻止坚硬顶板破断运动;要么进行弱化,降低一次性破断运动范围,减小冲击动能。

3.3 采掘卸荷

巷道掘进及工作面回采形成的采掘卸荷,是造成冲击地压的重要外因条件。采掘卸荷的效应在于,在已采掘空间围岩内出现不平衡力,导致围岩内应力重新分布与调整,并出现应力集中区;同时采掘过程中,会因应力集中区快速“迁移”,引起煤体应变能的大量释放,当煤体释放的应变能超过其破裂耗散能时,剩余能量转化为煤体动能,煤体冲击破坏。假设不考虑流变及开采时效影响,即认为进尺 Δl 的开采为瞬时完成,且支承压力影响范围不变。开采进尺 Δl 后,支承压力转移导致在其影响范围 L 内煤体作用力为 $F_1=F_0+\Delta F$,增量为 ΔF (图17(a))。此时,在支承压力影响区内积聚总能量 E_1 ^[8]为

$$E_1 = \frac{F_1^2}{2K} = \frac{(F_0 + \Delta F)^2}{2K} = E_0 \left[1 + \frac{2\Delta F}{F_0} + \left(\frac{\Delta F}{F_0} \right)^2 \right] \quad (11)$$

式中, F_0 为开采前支承压力影响范围内煤体作用力,N;

E_0 为开采前支承压力影响区内积聚总能量,J; K 为煤体刚度,GPa。

此时,由载荷 F_1 在新的平衡位置 x_0 处具有最大的动能 E_{\max} 为

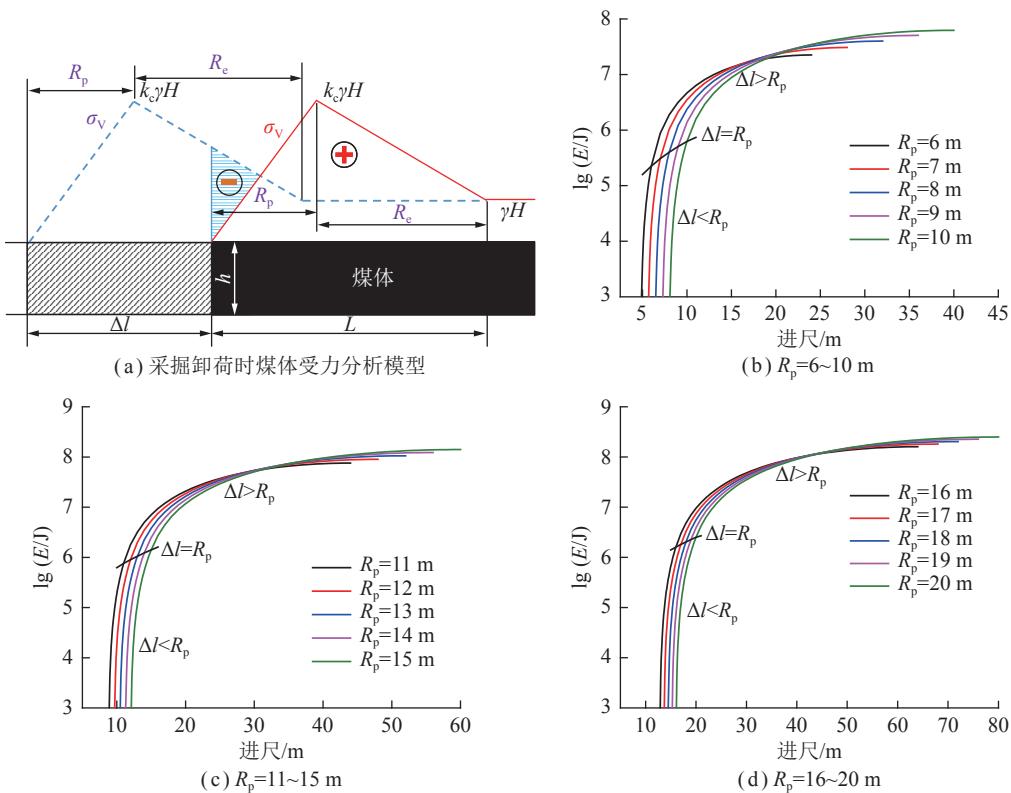
$$E_{\max} = \frac{F_1}{2g} \left(\frac{dx}{dt} \right)_{\max}^2 = \frac{F_0^2}{2K} \left(\frac{\Delta F}{F_0} \right)^2 = \frac{\Delta F^2}{2K} \quad (12)$$

式中, g 为重力加速度,m/s²; t 为时间,s。

从图17(b)~(d)可以看出,采掘卸荷引起的煤体应变能释放量及动能大小受塑性区宽度和开采进尺影响。当开采进尺一定时,煤体塑性区宽度越大,煤体破坏时产生的动能越小;同时,开采进尺越大,产生的煤体动能越大,如图17所示,其中, R_e 为最大支承压力至原岩应力区的距离,m; k_c 为应力集中系数; σ_v 为支承压力。因此,可采用大直径钻孔卸压等手段增大塑性区的宽度,降低推采速度减少进尺,从而降低采掘卸荷时煤体冲击动能。

采掘卸荷引起的冲击危险性 P ,可用采掘过程中每个煤体单元所积聚弹性应变能 W_{ek} 与冲击地压启动能量阈值 U^e 之比进行评价:

$$P = \frac{W_{ek}}{U^e} \quad (13)$$

图 17 不同塑性区宽度 R_p 、进尺 Δl 动能变化^[8]Fig.17 Kinetic energy variation of different plastic zone width R_p and footage Δl ^[8]

研究表明,当 $P < 0.3$ 时,则该煤体区域无冲击危险性; $0.3 \leq P < 0.5$ 时,此区域具有轻微冲击危险性; 当 $0.5 \leq P < 0.7$ 时,具有中等冲击危险性; $P \geq 0.7$ 时,具有强冲击危险性。

4 不同矿区主控因素差异性

应当指出,不同矿区冲击地压孕灾主控因素差别较大(表 4)。如在山东新汶最凸显特点是千米埋深和多煤层开采导致遗留煤柱应力集中;而鲁西埋深大、

则是薄基岩厚冲积载荷层和构造影响。在内蒙古鄂尔多斯等地覆岩存在厚层坚硬砂岩组、埋深相对较大(超过 550 m)且区段煤柱尺寸大;在陕西彬长矿区,则是坚硬砂岩、冲击地压与瓦斯、水害复合致灾、区段煤柱尺寸大、孤岛工作面开采;在新疆、甘肃等地,覆岩存在厚层坚硬砂岩组、煤层厚且倾角大、煤与瓦斯复合致灾等。即使同一矿区,不同矿井冲击地压孕灾主控因素也不一样。因此,分层次、分尺度进行主控因素判识,是精准排查冲击地压风险的重要举措(图 18)。

表 4 全国典型冲击地压矿区主控因素特征

Table 4 Characteristics of main controlling factors of typical rock burst mining areas in China

矿区	山东鲁西	山东新汶	陕西彬长	内蒙古鄂尔多斯	新疆、甘肃
客观因素	煤岩层具有冲击倾向性, 埋深大, 断层与褶曲等构造复杂, 薄基岩厚冲积层顶板随动岩层范围大	煤岩层具有冲击倾向性, 埋深大且构造赋存复杂, 上覆岩层中存在坚硬顶板	煤层及顶板具有冲击倾向性, 煤层上方 100 m 存在厚度超过 10 m 的坚硬砂岩, 冲击地压与瓦斯、水害复合致灾	煤层及顶板具有冲击倾向性, 覆岩存在厚层坚硬砂岩组, 埋深相对较大(超过 550 m)	煤层及顶板具有冲击倾向性, 覆岩存在厚层坚硬砂岩组, 煤层厚、倾角大; 煤与瓦斯复合致灾
主观因素	两翼后退式开采造成准备巷道处于煤柱应力集中区, 未按顺序开采形成孤岛煤柱, 条带开采导致窄小工作面	多煤层开采形成不规则重叠煤柱, 未按顺序开采形成孤岛煤柱工作面区, 受断层等影响布置不规则工作面, 两翼开采上山(下山)处于孤岛煤柱内应力集中区	大巷煤柱孤岛工作面, 采空区面积大且地表下沉不充分, 区段煤柱宽且不规则, 应力集中程度高, 复合动力灾害防治存在冲突	区段煤柱尺寸较大(15~20 m)、多煤层开采上覆残留煤柱对下部煤层开采影响大, 上覆坚硬岩层卸压不到位	留底煤开采或巷道布置不合理, 区段煤柱尺寸较大, 上覆坚硬岩层卸压不到位

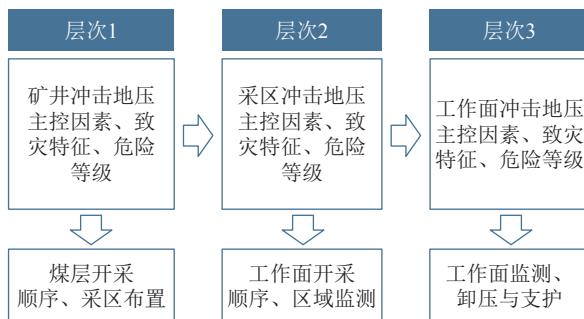


图 18 冲击地压防治层次

Fig.18 Control hierarchy of rock burst

事实上,从冲击地压机理及主控因素的认知,明确治理机理,采取有效方法与手段,递进式防治走向冲击地压治理工程必由之路(图 19)。

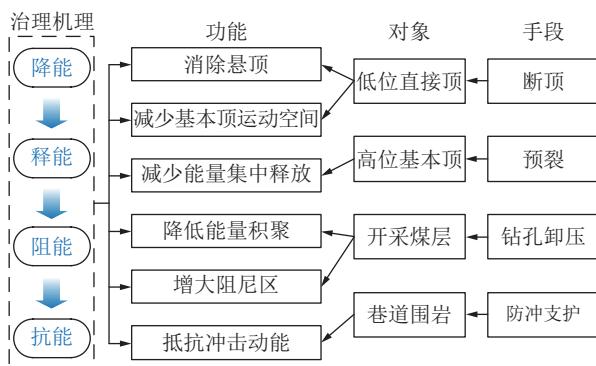


图 19 冲击地压防治工程技术路线

Fig.19 Technical road of rock burst prevention and control

降能: 在沿空回采巷道侧,强化对悬跨直接顶顶进行切断,一方面降低悬顶对沿空巷道区域围岩应力集中程度,达到降低能量的目的;同时还能够有效增加采空区冒落矸石高度,有效降低上覆坚硬岩层下沉运动带来冲击动能的影响。

释能: 对中高位坚硬岩层进行爆破或水压致裂等,增加岩层内的裂隙降低其完整性,让积聚的高形变能得以缓慢释放。

阻能: 在煤层内实施大直径钻孔卸压或水力割缝卸压等,一方面促使集中应力区向煤层内更深部转移;另一方面增加煤层低应力破碎区宽度,有效阻止深部高形变能释放造成动力效应。

抗能: 设计防冲支护体系,有效抵抗动载冲击。

很显然,有效降能和有效释能是冲击地压治理工程的前段;阻能和抗能是防冲工程的后段。从有效降能和释能到有效阻能和抗能,成为冲击地压防治工程的重要环节。

5 结 论

(1) 冲击地压影响因素多、孕灾机理与过程复杂,

冲击地压防治属于世界性“疑难杂症”,冲击地压机理走向防治工程,首先要理清冲击地压主控因素。

(2) 在上百个冲击地压矿井致灾评价分析基础上,提出了导致冲击地压发生的 4 类客观主控因素:煤岩冲击倾向性、开采深度、坚硬顶板、地质构造,3 类人为主控因素:煤柱、采空区及采掘卸荷。

(3) 在客观主控因素方面,煤岩冲击倾向性是煤岩积聚变形能进而诱发冲击破坏的自身属性;开采深度与巷道围岩内积聚的变形能呈二次正相关关系;坚硬顶板大尺度周期断裂形成的冲击动载及动能是诱发冲击地压的“导火索”;地质构造对冲击地压的影响显著,断层两盘将在开采扰动造成的突发卸荷影响下产生相对“回弹”;煤层变薄区超前支承压力呈“双峰值”分布,高能区能量快速释放造成冲击影响范围扩大。

(4) 在人为主控因素方面,煤柱作为高应力集中区,其尺寸、倾角及相对位置等将直接影响冲击地压发生概率和强度;采空区会诱发超前支承压力集中区内围岩积聚弹性性能的突然释放,尤其在采高较大、顶板冒落不充分的情况下;采掘卸荷会导致应力集中区快速“迁移”,引发煤体内弹性应变能的大量释放,是造成冲击地压的重要外因条件。

(5) 对新汶、鲁西、鄂尔多斯、陕西彬长、新疆和甘肃等冲击地压孕灾主控因素差异性,进行了对比分析表明,不同矿区冲击地压孕灾主控因素影响程度具有差异性,要对矿井、采区及工作面冲击地压主控因素及影响程度进行分别判识,实施从降能、释能、阻能与抗能递进式的治理工程,是冲击地压治理工程必由之路。

(6) 基于主控因素分析的冲击地压危险程度定量分级,需要进一步深化研究工作。冲击地压治理工程构建,还任重而道远。

参考文献(References):

- [1] 齐庆新,李一哲,赵善坤,等.我国煤矿冲击地压发展 70 年:理论与技术体系的建立与思考[J].煤炭科学技术,2019,47(9): 1-40.
QI Qingxin, LI Yizhe, ZHAO Shunkun, et al. Seventy years development of coal mine rockburst in China: Establishment and consideration of theory and technology system[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(9): 1-40.
- [2] 李玉生.冲击地压机理探讨[J].煤炭学报,1984,8(3): 1-10.
LI Yusheng. Discussion on mechanism of rock burst[J]. Journal of China Coal Society, 1984, 8(3): 1-10.
- [3] 章梦涛.冲击地压失稳理论与数值模拟计算[J].岩石力学与工程学报,1987,6(3): 197-204.
ZHANG Mengtao. Theory and numerical simulation of rockburst instability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1987, 6(3): 197-204.

- [4] 齐庆新, 李晓璐, 赵善坤. 煤矿冲击地压应力控制理论与实践[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(6): 1–5.
QI Qingxin, LI Xiaolu, ZHAO Shankun. Theory and practices on stress control of mine pressure bumping[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(6): 1–5.
- [5] 窦林名, 陆菜平, 牟宗龙, 等. 冲击矿压的强度弱化减冲理论及其应用[J]. 煤炭学报, 2005, 30(6): 690–694.
DOU Linming, LU Caiping, MOU Zonglong, et al. Intensity weakening theory for rockburst and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(6): 690–694.
- [6] 潘俊锋, 宁宇, 毛德兵, 等. 煤矿开采冲击地压启动理论[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(3): 586–596.
PAN Junfeng, NING Yu, MAO Debing, et al. Theory of rockburst start-up during coal mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(3): 586–596.
- [7] 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.
- [8] 谭云亮, 王子辉, 刘学生, 等. 采动诱发能估算及冲击危险性评价[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 123–131.
TAN Yunliang, WANG Zihui, LIU Xuesheng, et al. Estimation of dynamic energy induced by coal mining and evaluation of burst risk[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 123–131.
- [9] 钱七虎. 岩爆、冲击地压的定义、机制、分类及其定量预测模型[J]. 岩土力学, 2014, 35(1): 1–6.
QIAN Qihu. Definition, mechanism, classification and quantitative forecast model for rockburst and pressure bump[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(1): 1–6.
- [10] 姜耀东, 潘一山, 姜福兴, 等. 我国煤炭开采中的冲击地压机理和防治[J]. 煤炭学报, 2014, 39(2): 205–213.
JIANG Yaodong, PAN Yishan, JIANG Fuxing, et al. State of the art review on mechanism and prevention of coal bumps in China[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 205–213.
- [11] 齐庆新, 欧阳振华, 赵善坤, 等. 我国冲击地压矿井类型及防治方法研究[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(10): 1–5.
QI Qingxin, OUYANG Zhenhua, ZHAO Shankun, et al. Study on types of rock burst mine and prevention methods in China[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(10): 1–5.
- [12] 潘一山, 李忠华, 章梦涛. 我国冲击地压分布、类型、机理及防治研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1844–1851.
PAN Yishan, LI Zhonghua, ZHANG Mengtao. Distribution, type, mechanism and prevention of rock-burst in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1844–1851.
- [13] 姜福兴, 魏全德, 王存文, 等. 巨厚砾岩与逆冲断层控制型特厚煤层冲击地压机理分析[J]. 煤炭学报, 2014, 39(7): 1191–1196.
JIANG Fuxing, WEI Quande, WANG Cunwen, et al. Analysis of rock burst mechanism in extra-thick coal seam controlled by huge thick conglomerate and thrust fault[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(7): 1191–1196.
- [14] 窦林名, 何学秋. 煤矿冲击矿压防治理论与技术[M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 2001.
- [15] 谭云亮, 李芳成, 周辉. 冲击地压声发射前兆模式初步研究[J]. 石力学与工程学报, 2000, 19(4): 425–428.
TAN Yunliang, LI Fangcheng, ZHOU Hui. Preliminary study on acoustic emission precursor model of rock burst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(4): 425–428.
- [16] 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.
- [17] 吕大钊. 大埋深特厚煤层矿井冲击地压灾害影响因素分析[J]. 煤, 2015(6): 73–74.
LÜ Dazhao. Analysis on influencing factors of rock burst disaster in deep and thick coal seam[J]. Coal, 2015(6): 73–74.
- [18] 王业常, 欧钦, 陶领, 等. 深部矿井冲击地压影响因素分析[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(1): 26–29.
WANG Yechang, OU Qin, TAO Ling, et al. Analysis of influencing factors of rock burst in deep mine[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(1): 26–29.
- [19] 魏来, 马赛. 深部软岩矿井冲击地压影响因素分析[J]. 采矿技术, 2020, 20(5): 107–109.
WEI Lai, MA Sai. Analysis of influencing factors of rock burst in deep soft rock mine[J]. Mining Technology, 2020, 20(5): 107–109.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 李海涛, 齐庆新, 赵善坤, 等. 煤矿动力灾害广义“三因素”机理探讨[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(6): 42–52.
LI Haitao, QI Qingxin, ZHAO Shankun, et al. Discussion on generalized “Three Factors” mechanism of coal mine dynamic disaster[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(6): 42–52.
- [23] 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): 1865–1874.
QI Qingxin, MA Shijie, SUN Xikui, et al. Theory and technical framework of coal mine rock burst origin prevention[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 1865–1874.
- [24] 鞠文君, 卢志国, 高富强, 等. 煤岩冲击倾向性研究进展及综合定量评价指标探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(9): 1839–1856.
JU Wenjun, LU Zhiguo, GAO Fuqiang, et al. Research progress and comprehensive quantitative evaluation index of coal rock bursting liability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(9): 1839–1856.
- [25] GB/T 25217.1—2010. 冲击地压测定、监测与防治方法 第1部分: 顶板岩层冲击倾向性分类及指数的测定方法[S]. 北京: 中国煤炭工业协会, 2011.

- [26] GB/T 25217.2—2010. 冲击地压测定、监测与防治方法 第2部分: 煤的冲击倾向性分类及指数的测定方法[S]. 北京: 中国煤炭工业协会, 2011.
- [27] GB/T 25217.3—2019. 冲击地压测定、监测与防治方法 第3部分: 煤岩组合试件冲击倾向性分类及指数的测定方法[S]. 北京: 中国煤炭工业协会, 2020.
- [28] TAN Yunliang, LIU Xuesheng, SHEN Baotang, et al. New approaches to testing and evaluating the impact capability of coal seam with hard roof and/or floor in coal mines[J]. Geomechanics and Engineering, 2018, 14(4): 367–376.
- [29] 张全, 邹俊鹏, 吴坤波, 等. 深部采煤上覆关键层破断诱发矿震特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(5): 1150–1161.
ZHANG Quan, ZOU Junpeng, WU Kunbo, et al. On the characteristics of mine earthquakes induced by key strata breaking during deep mining [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(5): 1150–1161.
- [30] 白贤栖, 曹安业, 刘耀琪, 等. 基于震源机制解析的巨厚覆岩矿震破裂机制研究[J]. 煤炭学报, 2023, 48(11): 4024–4035.
BAI Xianxi, CAO Anye, LIU Yaoqi, et al. Study on mine earthquake mechanism of extremely thick strata based on focal mechanism analysis [J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(11): 4024–4035.
- [31] 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.
- [32] 李新元, 马念杰, 钟亚平, 等. 坚硬顶板断裂过程中弹性能量积聚与释放的分布规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26 (S1): 2786–2793.
LI Xinyuan, MA Nianjie, ZHONG Yaping, et al. Storage and release regularity of elastic energy distribution in tight roof fracturing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S1): 2786–2793.
- [33] 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[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 214–223.
- [34] 赵同彬, 郭伟耀, 谭云亮, 等. 煤厚变异区开采冲击地压发生的力学机制[J]. 煤炭学报, 2016, 41(7): 1659–1666.
ZHAO Tongbin, GUO Weiyao, TAN Yunliang, et al. Mechanics mechanism of rock burst caused by mining in the variable region of coal thickness[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(7): 1659–1666.
- [35] TAN Yunliang, ZHANG Ze. Rock burst disaster induced by mining abutment pressure[J]. Disaster Advances, 2012, 5(4): 378–382.
- [36] 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.
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.