

煤岩结构瞬变诱冲机理

伍永平^{1,2}, 罗生虎^{2,3}, 闫壮壮^{1,2}, 解盘石^{1,2}, 田程阳^{1,2}, 王 同^{1,2}, 高喜才^{1,2}, 王红伟^{1,2}, 郎 丁^{1,2}

(1. 西安科技大学 能源学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安科技大学 西部矿井开采及灾害防治教育部实验室, 陕西 西安 710054;
3. 西安科技大学 理学院, 陕西 西安 710054)

摘 要: 冲击地压是深部煤矿开采面临的主要灾害之一, 揭示冲击地压的发生机理是其灾害评价、预测及防治的前提和基础。采用理论分析、数值计算、模拟实验和现场实测互馈综合研究方法, 在综合厘定覆岩空间结构与其力学响应内在联系的基础上, 系统研究了结构瞬变激励下采场煤岩的力学响应和冲击地压的发生机理。结果显示: 覆岩空间结构的力学性能和力学环境是其范围内的采场煤岩产生不同力学响应的内、外因, 坚硬岩层破断等子系统的瞬时失稳, 会导致覆岩空间结构大系统的瞬变, 进而造成采场煤岩动态力学响应(矿震)的发生和静态力学响应的阶变。结构瞬变后, 除了震源处的应变能会发生瞬变外, 更大范围的煤岩应力场、位移场、应变能场和重力势能场等力学响应也会发生瞬变。结构瞬变区域上方覆岩瞬时下沉、应力骤减、应变能和重力势能的释放特征明显, 结构瞬变区域外侧深部区域煤岩略有下沉、应力骤增、应变能聚集特征明显、重力势能略有释放; 采场煤岩的总势能瞬时减小, 这其中, 总应变能瞬时增大, 而总重力势能瞬时减小。同时, 受坚硬岩层破断形成的卸载、回弹和下沉影响, 矿震发生时, 并非所有区域的煤岩都会被瞬时加载, 临近结构瞬变区域的煤体会被瞬时卸载。工作面后方坚硬岩层的瞬时破断, 会使走向支承压力“瞬时前移”, 导致工作面前方煤体的高静载区域出现“高静载+负动载”的应力状态, 而回采巷道煤体的高静载区域出现“高静载+正动载”的应力状态, 造成回采巷道发生冲击地压的概率远大于工作面。在实际工程中, 应基于煤岩结构与其动、静力学响应的内在关联, 基于“调结构、控响应”的理念, 建立针对性的防控措施。

关键词: 煤岩结构; 瞬变; 力学响应; 矿震; 冲击地压

中图分类号: TD324 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2025)01-0193-16

The mechanism of rockburst induced by coal rock structure transient

WU Yongping^{1,2}, LUO Shenghu^{2,3}, YAN Zhuangzhuang^{1,2}, XIE Panshi^{1,2}, TIAN Chengyang^{1,2}, WANG Tong^{1,2},
GAO Xicai^{1,2}, WANG Hongwei^{1,2}, LANG Ding^{1,2}

(1. School of Energy Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Western Mine Exploitation and Hazard Prevention under Ministry of Education, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 3. College of Sciences, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: Rock burst is one of the main disasters in deep coal mining. Revealing the mechanism of rock burst is the premise and foundation of its disaster evaluation, prediction and prevention. In this paper, theoretical analysis, numerical calculation, simulation experiment and engineering field test mutual feedback research methods are comprehensively used.

收稿日期: 2024-10-18 策划编辑: 郭晓炜 责任编辑: 钱小静 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.1266

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目 (52274139, 51974227); 陕西省杰出青年科学基金资助项目 (2023-JC-JQ-42)

作者简介: 伍永平 (1962—), 男, 陕西汉中, 教授, 博士。E-mail: wuyyp@xust.edu.cn

通讯作者: 罗生虎 (1983—), 男, 新疆哈密, 教授, 博士。E-mail: luoshh06@qq.com

引用格式: 伍永平, 罗生虎, 闫壮壮, 等. 煤岩结构瞬变诱冲机理[J]. 煤炭学报, 2025, 50(1): 193-208.

WU Yongping, LUO Shenghu, YAN Zhuangzhuang, et al. The mechanism of rockburst induced by coal rock structure transient[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(1): 193-208.



移动阅读

Based on comprehensively determining the internal relationship between the spatial structure of overlying strata and its mechanical response, the mechanical response of coal and rock and the mechanism of rock burst under structural transient excitation are systematically studied. The results show that the mechanical properties and mechanical environment of the spatial structure of overlying strata are the internal and external causes of different mechanical responses of coal and rock in the mining area. The instantaneous instability of subsystems such as hard rock breaking, which will lead to the transient of the large system of the overlying rock space structure, and then cause the occurrence of the dynamic mechanical response (mine earthquake) and the step change of the static mechanical response of the coal rock mass in the stope. After the transient of the structure, in addition to the strain energy at the source, the mechanical response of the stress field, displacement field, strain energy field and gravitational potential energy field of the coal and rock in a larger range will also be transient. The instantaneous subsidence of overlying strata above the structural transient region, the sudden reduction of stress, and the release characteristics of strain energy and gravitational potential energy are obvious. The coal rock mass in the deep area outside the structural transient region sinks slightly, the stress increases suddenly, the strain energy aggregation characteristics are obvious, and the gravitational potential energy is slightly released. The total potential energy of coal rock mass in the stope decreases instantaneously, in which the strain energy of coal rock mass increases instantaneously, while the gravitational potential energy decreases instantaneously. At the same time, due to the influence of unloading, rebound and subsidence caused by the fracture of hard rock strata, When the mine earthquake occurs, not all the coal and rock mass in the area will be instantaneously loaded, and the coal mass near the structural transient area will be instantaneously unloaded. The instantaneous fracture of the hard rock stratum behind the working face will make the strike abutment pressure ‘Move forward instantaneously’, resulting in the stress state of ‘high static load + negative dynamic load’ in the high static load area of the coal body in front of the working face, while the stress state of ‘high static load + positive dynamic load’ appears in the high static load area of the coal body in the mining roadway, resulting in a phenomenon that the probability of rock burst in the mining roadway is much larger than that in the working face. In practical engineering, targeted prevention and control measures should be established based on the internal relevance between coal rock structure and its dynamic and static response, as well as the concept of “adjusting structure and controlling response”.

Key words: coal rock structure; transient; mechanical response; mine earthquake; rock burst

0 引 言

冲击地压是指井巷或工作面周围煤岩体,由于弹性变形能的瞬间释放而产生突然剧烈破坏的动力现象,常伴随有煤体抛出、巨响和气浪等^[1]。随着开采深度和强度的增大,冲击地压灾害日益加剧,是深部矿井开采面临的主要灾害之一^[2-4],严重威胁着矿井的安全生产。

经过长期的研究与探索,我国在冲击地压发生机理、监测技术与装备、防治方法与技术等方面均取得了长足进步,为冲击地压的防治提供了有力支持^[5]。这其中,对冲击地压发生机理的研究,是冲击地压研究中最根本的内容,是冲击地压灾害评价、预测及防治的前提和基础^[6]。冲击地压的发生机理,是指冲击地压发生的原因、条件、机制和物理过程。早期关于冲击地压的经典理论,如强度理论^[7]、刚度理论^[8]、能量理论^[9]和冲击倾向性理论^[10]等,是由德国、波兰和前苏联等国学者提出的。20 世纪 80 年代,李玉生^[11]提出了我国最早关于冲击地压的“三准则”理论,认为

发生冲击地压的充要条件是煤体同时满足强度准则、能量准则和冲击倾向性准则。近年来,国外因煤矿开采萎缩,对冲击地压的研究进展缓慢^[5]。我国学者通过对冲击地压经典理论的深度融合与发展,相继提出了“三因素”理论^[12]、冲击启动理论^[13]、扰动失稳理论^[14]、动静载叠加诱冲理论^[15]和蠕变失稳理论^[16]等,在一定程度上揭示了冲击地压的孕育致灾机理,为进一步的研究奠定了基础。但由于问题的复杂性,尚未形成统一、且普遍认可的理论与观点。

笔者在已有研究工作基础上,基于坚硬岩层瞬时破断的力学特性,从覆岩空间结构的视角和结构动力学与系统动力学的理念出发,采用理论分析、数值计算、模拟实验和现场实测互馈综合研究方法,在综合厘定覆岩空间结构与其力学响应内在联系的基础上,以来压时基本顶的瞬时破断为例,系统研究了结构瞬变激励下采场煤岩的力学响应,探讨了结构瞬变激励下冲击地压的发生机理,提出了煤岩结构瞬变诱冲的科学理念,以期能为冲击地压等煤岩动力灾害的防治提供一定的理论支撑。

1 煤岩结构与其力学响应的内在关联

力学响应是指物体(结构、系统)在内、外因综合作用下产生的力学反应或行为,涉及应力、速度、位移、应变能、重力势能等诸多方面。内因主要是指物体的力学性能,包括物体的结构特征和材料特性等;外因主要是指物体所处的力学环境,包括物体的受力特征和边界条件等^[17-18]。因此,当内、外因发生改变时,物体的力学响应必然会发生改变。尤其是当内、外因的改变瞬时发生时,会导致物体动态力学响应的发生。

例如,对于图1a和图1b所示的系统,外部动载 $F(t)$ 的作用和2号弹簧阻尼子系统的瞬时破坏,都会使系统经历由稳态→非稳态→稳态的演变历程。并且,如果图1a中的 $F(\infty) = 0$,如应力波作用时,系统在2个稳态时的静态力学响应一致。但对于图1b所示的情况,由于2个稳态时系统的结构存在差异,系统的静态力学响应会产生非连续、台阶式的变化(如1号、3号弹簧的受载将由物块自重的 $G/3$ 瞬变为 $G/2$)。在地震领域中,形象地将这种地震前、后围岩静态力学响应非连续、台阶式的变化特征,如图2所示,称为“阶变”^[19-20]。

在地下煤层开采中,工作面形成后,采空区上方一定范围内的覆岩发生破坏,其破裂面形态呈现为非规则的残恒状,如图1c所示。破裂面内的岩块堆砌—

铰接,形成覆岩块体结构,该结构在工作面煤壁片帮、支架下滑倾倒等围岩灾害的形成与控制中处于核心地位^[21-24]。同时,受自重应力场和采动卸荷效应影响,覆岩破裂面以外、采动影响范围以内的岩层相互作用、相互制约,自发形成一个具有特殊力学联系的复杂力学系统,即覆岩空间结构^[18],任意单一岩层仅是覆岩空间结构的一个子系统。该结构的力学功能是将采空区上方、破裂面外未破坏岩层的自重载荷转移至采空区四周的煤岩上^[18,25]。结合物体力学响应的内、外因可知,覆岩空间结构的力学性能和力学环境是其范围内的采场煤岩,如两巷围岩、区段煤柱等,产生不同力学响应的内、外因。

由于坚硬岩层属于典型的脆性材料,破坏过程短暂而剧烈,坚硬岩层的破断会导致采场煤岩动态力学响应(矿震)的发生。但其不同于图1a所示一般动力学问题中的外部加载问题,而是类似于图1b所示煤岩结构的瞬变问题。这是因为,采场煤岩承受的载荷均来自于上覆岩层的自重载荷,且坚硬岩层的破断,会造成覆岩空间结构内边界几何形态和约束的瞬变,但其力学功能未发生改变。因此,结合系统动力学和结构动力学理论,可将坚硬岩层破断等诱发的矿震理解为,坚硬岩层破断等子系统的瞬时失稳,导致覆岩空间结构大系统的瞬变,进而造成其影响范围内采场煤岩动态力学响应的发生和静态力学响应的阶变^[18],

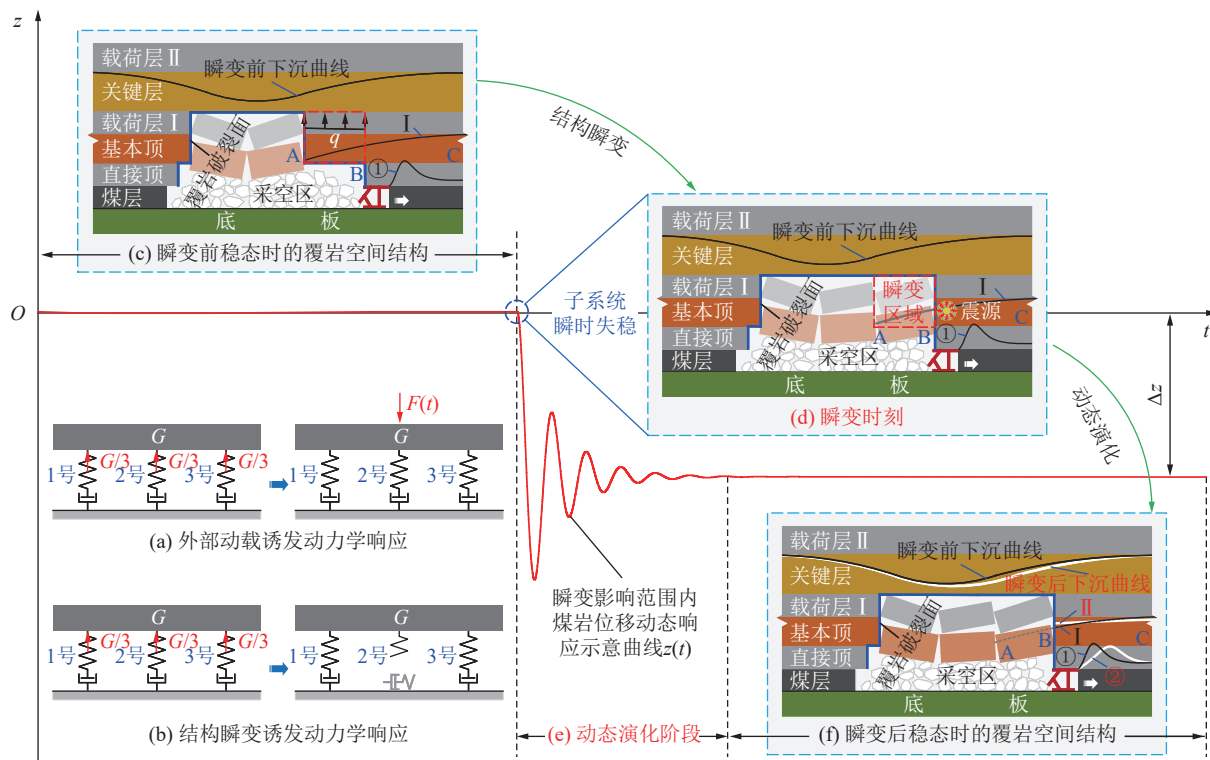


图1 结构瞬变激励下采场煤岩动、静力学响应示意

Fig.1 Schematic diagram of dynamic and static response of coal and rock in stope under transient excitation of structure

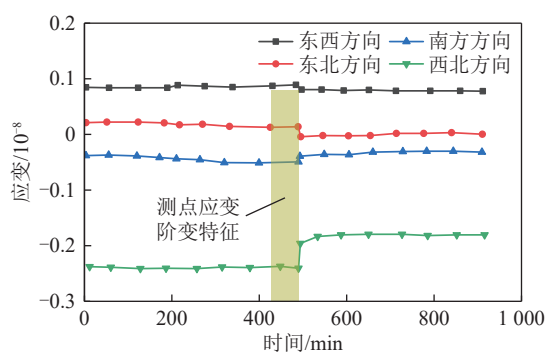


图2 地震前、后围岩应变阶变现象现场实测^[19]

Fig.2 Field measurement of strain step change phenomenon of surrounding rock before and after earthquake ^[19]

如图 1c~图 1f 所示。

基于覆岩空间结构视角开展研究的优点是,容易揭示采场空间不同区域煤岩力学响应的内在联系与发生机理。例如,对于图 1c 中基本顶 AC 的破断,如果仅从基本顶 AC 的视角分析,当基本顶 AC 破断后,破断部分 AB 掉落采空区,岩层中的 BC 段回弹-振动,瞬时释放应变能,形成震源,产生动载,使采场煤岩产生动力学响应;在该视角下,只能得出矿震中耗散的能量来自震源处瞬时释放的应变能。上述认知主要是基于已有地震的研究思路和弹性动力学的理念得出的,动载主要与震源处应变能的释放量与释放速度,以及应力波传输介质的物理力学属性和离震源的距离有关,只考虑了基本顶 AC 的活动规律,忽略了基本顶 AC 破断后相邻岩层间相互作用关系的瞬时改变。

如果从覆岩空间结构的视角,以及系统动力学和结构动力学的理念分析,对比图 1c 与图 1f 可知,由于基本顶 AC 破断前、后的煤岩结构存在差异,其对应的静态力学响应必然存在差异。这其中,基本顶 AC 的破断,相当于其破裂面内力的瞬时卸载,岩层中的 BC 段回弹-振动、瞬时释放应变能;同时,支撑载荷 q 的瞬时卸载,又导致采空区上覆岩层的瞬时下沉-振动、瞬时释放重力势能,即矿震中耗散的能量应当来自于覆岩瞬时释放的应变能和重力势能。并且,由于覆岩空间结构子系统的结构特征及其所处的力学环境存在差异,造成结构瞬变后采场空间不同区域煤岩的动、静态力学响应也存在差异。例如,图 1c 中基本顶 AC 的破断-回弹和关键层的瞬时下沉,导致图 1f 中临近结构瞬变区域的载荷层 I 被瞬时加载,而临近结构瞬变区域的煤体会被瞬时卸载。

可见,矿震是一种典型的煤岩动力学问题,要想准确揭示矿震发生时采场煤岩的动态力学响应规律,需要基于采场煤岩结构的基本特征,采用动力学方法展开研究。遗憾的是,由于实际工程中采场煤岩结构

的复杂性,目前缺乏采场尺度煤岩动力学研究的精细化方法。但本质上,采场煤岩静态力学响应的阶变过程,就是其动态力学响应的演化过程,只是观察时间尺度不同得出的不同结果,2 者之间存在紧密的内在联系。因此,可基于动静法的理念^[26],通过研究矿震发生前、后 2 个稳态时采场煤岩静态力学响应的阶变规律,逆向分析矿震发生时采场煤岩的动态力学响应特征。

然而,目前对采场煤岩静态力学响应的阶变现象未引起足够关注,除了在现场实测中偶有报道外^[27-29],如图 3 所示,鲜见针对该问题的系统性研究,这主要是对采场煤岩动态力学响应的认知不足和研究方法的局限性造成的。例如,在传统矿压研究中,主要聚焦于破裂面内覆岩块体结构失稳机理与稳定性准则等方面的研究,很少涉及煤岩结构失稳后的动力学过程。

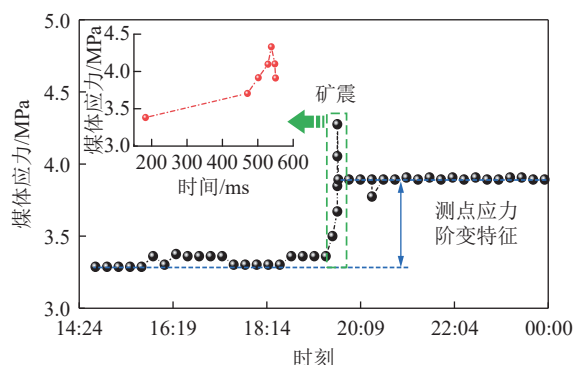


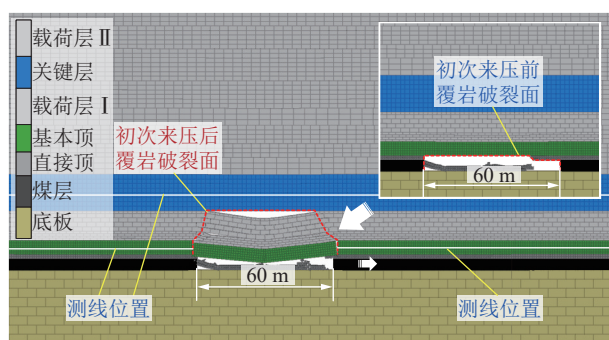
图3 矿震前、后煤体应力阶变现象现场实测^[27]

Fig.3 Field measurement results of stress step changes in coal mass before and after mining earthquakes^[27]

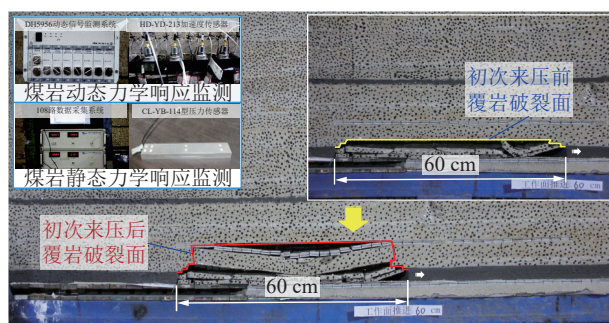
在矿震研究中,主要通过理论分析和数值计算等方法,分析矿震发生前煤岩静态应力场和应变能场的分布特征,确定煤岩应力集中区和应变能聚集区的作用位置等,依此进行冲击地压的危险性评价。需要注意的是,对于动力学问题,即使采用静力学方法,也要对比矿震发生前、后 2 个稳态时的情况,单纯分析矿震发生前或发生后的情况,对实际工程的指导作用有限。例如,要想确定矿震发生时煤岩应变能场的演变规律,至少要对分析矿震发生前、后 2 个稳态时煤岩应变能场的分布特征,才能在某种程度上确定煤岩应变能的聚集与释放特征。一些学者尝试结合矿震发生时的微震监测结果等,通过在数值模型中添加动力源,依此分析采场煤岩的动态力学响应特征。但其力学本质与图 1a 所示 $F(\infty) = 0$ 的情况一致,未考虑坚硬岩层破断后煤岩结构的瞬变特征。应力波消失后,如果煤岩的力学性质未发生劣化,其静态力学响应不会发生阶变。

2 结构瞬变激励下采场煤岩的力学响应

由上述分析可知,在坚硬岩层破断等诱发的矿震中,煤岩结构的瞬变,会导致其影响范围内采场煤岩动态力学响应的发生和静态力学响应的阶变,且其动、静力学响应存在紧密的内在关联。以下基于文献[18]的工程背景,通过3DEC离散元数值计算方法,辅以模拟实验,如图4所示,以初次来压时基本顶的破断为例,研究结构瞬变激励下采场煤岩的力学响应。



(a) 3DEC离散元数值计算



(b) 平面物理相似模拟实验

图4 坚硬岩层破断前、后覆岩空间结构的瞬变特征

Fig.4 Transient characteristics of spatial structure of overlying rock before and after the rupture of hard rock layers

2.1 煤岩应力场的阶变特征

以垂直应力 σ_{zz} 为例,分析煤岩应力场的阶变特征。在图4a所示结构瞬变前、后的2个稳态时,提取模型各单元的垂直应力。并以结构瞬变前的量为基准,则结构瞬变后模型各单元垂直应力的阶变量 $\Delta\sigma_{zz}$ 可表示为

$$\Delta\sigma_{zz} = \sigma_{zz2} - \sigma_{zz1} \quad (1)$$

式中: σ_{zz1} 和 σ_{zz2} 分别为结构瞬变前、后2个稳态时模型各单元的垂直应力, MPa。

图5为煤岩垂直应力场的阶变特征,图中的红色区域为应力的正阶变区或骤增区,蓝色区域为应力的负阶变区或骤减区。可以看出:

1) 由于初次来压时覆岩空间结构的瞬变特征具有对称性,煤岩垂直应力场的阶变特征也具有对称性。

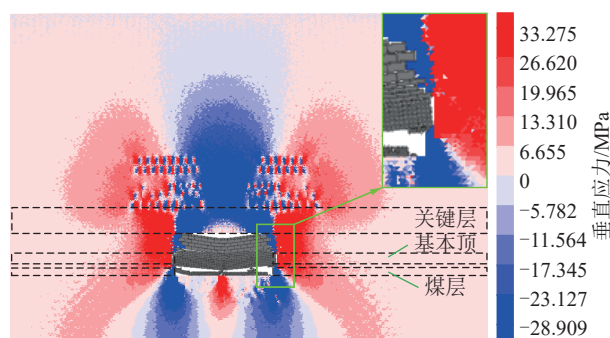


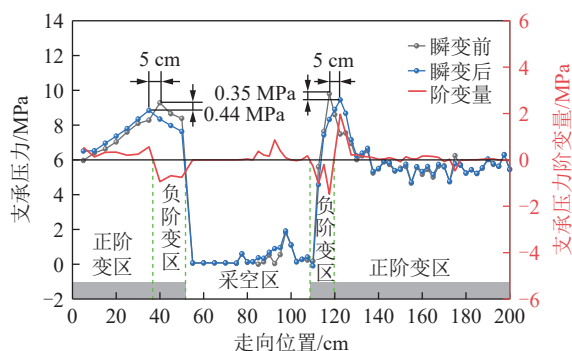
图5 采场煤岩垂直应力场的阶变特征

Fig.5 Step variation characteristics of the vertical stress field of coal and rock in the mining area

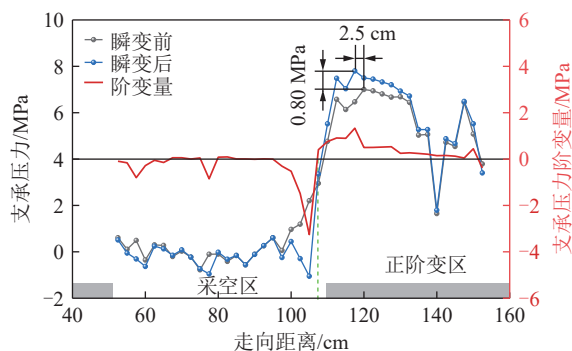
整体而言,采空区上方覆岩和采空区两侧底板的应力骤减,形成应力负阶变区;采空区外侧煤岩的应力骤增,形成应力正阶变区。

2) 受基本顶的破断-回弹和覆岩载荷传递路径瞬变影响,临近采空区侧煤体的支承压力骤减,而深部区域的骤增,支承压力的峰值减小、峰值位置向煤体深部跃迁,与图6a所示的模拟实验结果一致,也验证了本文数值计算方法的正确性。本质上,上述现象与临空巷切顶卸压后的情况一致,2者的力学机理相同,都是煤岩结构发生改变后形成的结果。

3) 与之相反的是,受关键层及其上覆岩层的瞬时



(a) 煤体支承压力阶变特征



(b) 基本顶支承压力阶变特征

图6 煤岩支承压力阶变特征模拟实验结果

Fig.6 Simulation experimental results of step change characteristics of coal rock abutment pressure

下沉和基本顶的破断-回弹影响,采空区两侧基本顶、载荷层 I 和关键层的应力骤增。基本顶支承压峰峰值增大,而峰值位置向采空区侧跃迁,与图 6b 所示的模拟实验结果一致。

2.2 煤岩位移场的阶变特征

以垂直位移 u_z 为例,分析煤岩位移场的阶变特征。在图 4a 所示结构瞬变前、后的 2 个稳态时,提取模型各单元的垂直位移。并以结构瞬变前的量为基准,则结构瞬变后模型各单元垂直位移的阶变量 Δu_z 可表示为

$$\Delta u_z = u_{z2} - u_{z1} \quad (2)$$

式中: u_{z1} 和 u_{z2} 分别为结构瞬变前、后 2 个稳态时模型各单元的垂直位移, m。

煤岩垂直位移场的阶变特征如图 7、图 8 所示,图 7 中的红色区域为位移的正阶变区或回弹区,蓝色区域为位移的负阶变区或下沉区。可以看出:

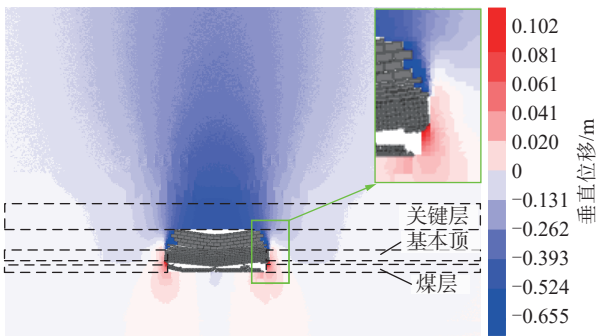


图 7 采场煤岩垂直位移场的阶变特征

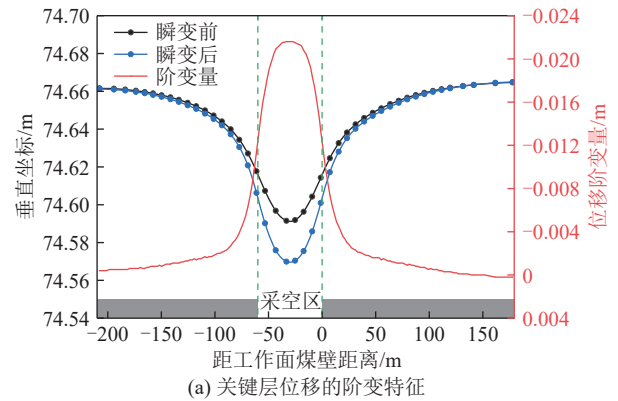
Fig.7 Step change characteristics of vertical displacement field of coal rock in stope

1) 由于初次来压时覆岩空间结构的瞬变特征具有对称性,煤岩垂直位移场的阶变特征也具有对称性。并且,受基本顶(或结构瞬变区域)的破断-卸荷影响,采空区上方关键层及其上覆岩层整体下沉,形成位移负阶变区,如图 8a 所示,且离采空区越近,下沉量越大。

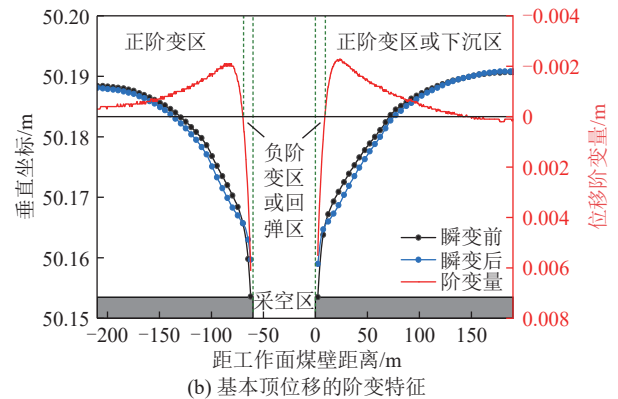
2) 受基本顶的破断-回弹影响,临近采空区两侧基本顶、煤体和下方底板的位移量减小,出现回弹,形成位移正阶变区。与此同时,受覆岩载荷转移影响,采空区两侧深部区域的基本顶、煤体下沉,如图 8b 所示,但其下沉量远较采空区上方覆岩的情况小。

2.3 煤岩势能场的阶变特征

机械能包含动能和势能,势能又包含弹性势能(应变能)和重力势能^[30]。在结构瞬变前、后的 2 个稳态时,采场煤岩的动能为 0。在 2 个稳态间的非稳态过程(矿震)中,煤岩的动能不为 0,如图 9 所示,但其



(a) 关键层位移的阶变特征



(b) 基本顶位移的阶变特征

图 8 不同区域煤岩垂直位移的阶变特征

Fig.8 Step change characteristics of vertical displacement of coal rock in different regions

会因煤岩的破裂、阻尼等被耗散。对于坚硬岩层破断等无外界能量输入的情况,矿震中耗散的能量只能来自于采场煤岩瞬时释放的势能。

结合上述煤岩应力、位移的分析方法,提取图 4a 所示结构瞬变前、后 2 个稳态时目标区域的应力、应变和位移等计算结果文件,结合弹性理论,计算结构单元的应变能和重力势能,进而通过做差,分析煤岩势能场的阶变特征。这其中,煤岩的重力势能以模型底部为基准进行计算。由弹性理论可得^[31],模型单元的应变能 V_ϵ 和重力势能 V_G 可表示为

$$V_\epsilon = \frac{V}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)]$$

$$V_G = mgz \quad (3)$$

式中: V 为单元体积, m^3 ; μ 为泊松比; E 为弹性模量, MPa; σ_1 、 σ_2 和 σ_3 分别为单元应力状态下的 3 个主应力, MPa; m 为单元质量, kg; z 为单元垂向位置坐标, m。

以结构瞬变前的量为基准,则瞬变后模型各单元应变能与重力势能的阶变量为

$$\Delta V_\epsilon = V_{\epsilon 2} - V_{\epsilon 1}$$

$$\Delta V_G = V_{G 2} - V_{G 1} \quad (4)$$

式中: ΔV_ϵ 和 ΔV_G 分别为模型单元应变能和重力势能

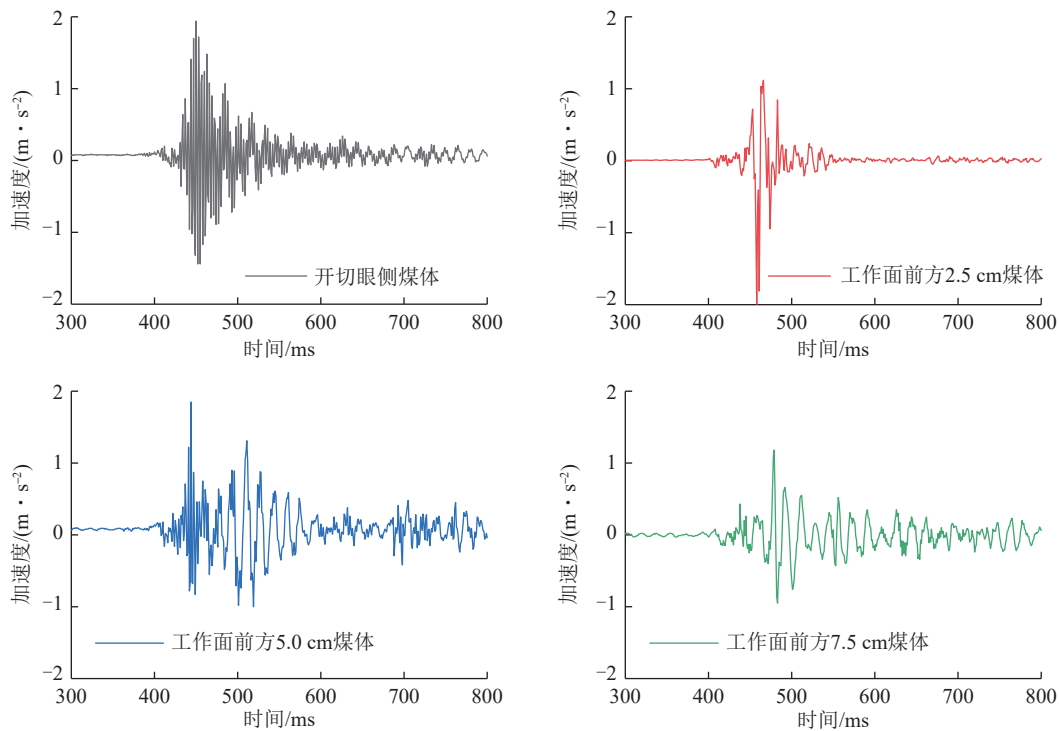
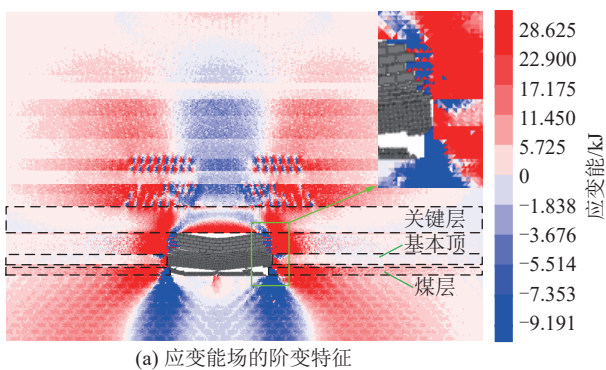
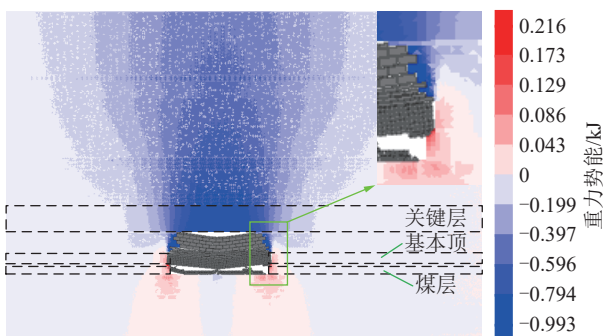


图9 煤体动力学响应特征模拟实验结果

Fig.9 Simulation experiment results of dynamic mechanical response characteristics of coal mass



(a) 应变能场的阶变特征



(b) 重力势能场的阶变特征

图10 采场煤岩势能场的阶变特征

Fig.10 Step change characteristics of potential energy field of coal rock in stope

的阶变量, J ; V_{e1} 与 V_{G1} 与 V_{e2} 和 V_{G2} 分别为结构瞬变前、后 2 个稳态时模型单元的应变能和重力势能, J 。

煤岩应变能和重力势能的阶变特征如图 10 和

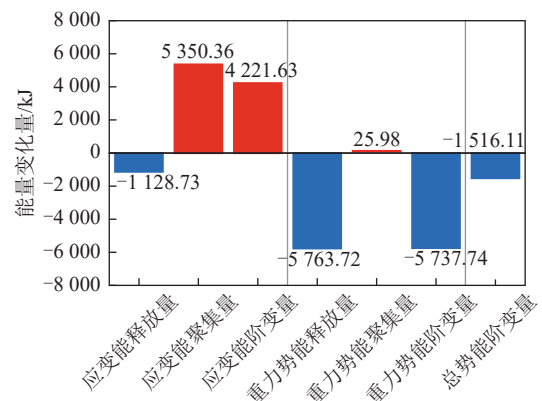


图11 采场煤岩总势能的阶变特征

Fig.11 Step change characteristics of total potential energy of coal rock in stope

图 11 所示, 图 10 中的红色区域为应变能和重力势能的正阶变区或聚集区, 蓝色区域为应变能和重力势能的负阶变区或释放区。

可以看出:

1) 由于初次来压时覆岩空间结构的瞬变特征具有对称性, 煤岩应变能场和重力势能场的阶变特征也具有对称性。这其中, 煤岩应变能场的阶变特征与垂直应力场的阶变特征相似, 而煤岩重力势能场的阶变特征与垂直位移场的阶变特征相似。

2) 煤岩应变能的释放区主要集中在采空区上方覆岩和下方底板的应力释放区, 而聚集区主要集中在采空区两侧煤岩的应力骤增区。煤岩的重力势能呈

整体释放趋势, 仅在采空区两侧煤岩的回弹区域略有增大, 且采空区上方覆岩重力势能的释放特征尤为明显。

3) 基本顶破断后, 其岩层中部分的应变能不会减小, 反而会增大。且整体而言, 采场煤岩应变能的聚集量大于释放量, 而其重力势能的释放量远大于聚集量, 且煤岩重力势能的释放量远大于应变能的释放量。即矿震发生后采场煤岩的总势能瞬时减小, 这其中, 总应变能瞬时增大, 而总重力势能瞬时减小, 如图 11 所示。

3 结构瞬变激励下冲击地压的发生机理

由上述分析可知, 矿震发生后除了震源处的应变能会发生瞬变外, 更大范围的煤岩应力场、位移场、应变能场和重力势能场等力学响应也会发生瞬变。以下基于上述分析, 结合动静法的理念, 采用理论分析方法, 研究结构瞬变激励下冲击地压的发生机理。

3.1 煤体受载阶变的发生机理

结合图 4 所示初次来压前、后覆岩空间结构的瞬变特征, 以及图 5 和图 6 所示煤岩应力场的阶变特征, 可构建图 12 所示采场煤岩受载阶变的力学模型。

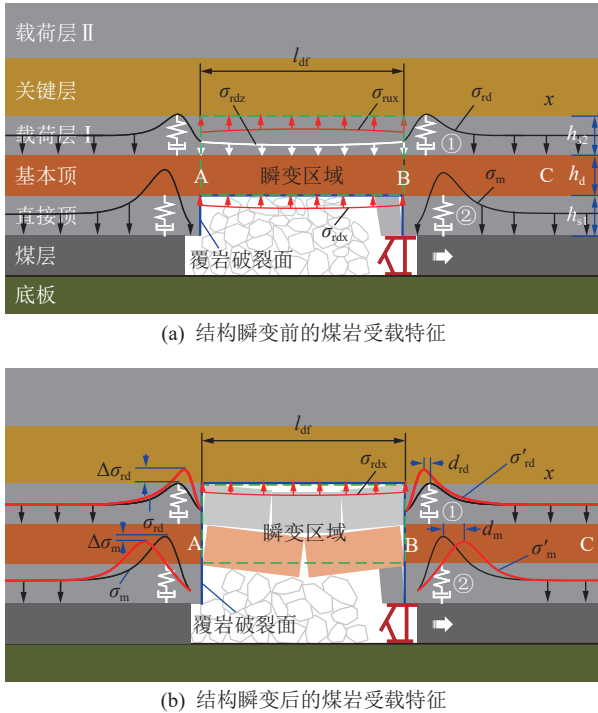


图 12 结构瞬变前、后煤岩受载阶变力学模型

Fig.12 Mechanical model of coal rock loading step changes before and after structural transients

图 12 中, σ_m 与 σ'_m 和 σ_{rd} 与 σ'_{rd} 分别为结构瞬变前、后 2 个稳态时作用在煤体和基本顶上的支承压力, MPa; σ_{rdz} 为结构瞬变前稳态时作用在基本顶破断区

域的支承压力, MPa; σ_{rdx} 为采空区矸石的支撑载荷, MPa; $\Delta\sigma_m$ 和 $\Delta\sigma_{rd}$ 分别为煤体和基本顶支承压力峰值的阶变量, MPa; d_{mf} 和 d_{rdf} 分别为煤体和基本顶支承压力峰值位置的跃迁距离, m; σ_{rux} 为载荷层 I 对上位关键层的支撑载荷, MPa; l_{df} 为初次来压步距, m; h_{s1} 、 h_d 和 h_{s2} 分别为直接顶、基本顶和载荷层 I 的厚度, m。

3.1.1 坚硬岩层破断—卸荷造成的煤体受载阶变

由图 12a 可知, 基本顶破断 (或结构瞬变) 前, 采空区两侧煤体承担的载荷总量 F_m , 等于原岩应力状态下的情况减去直接顶的自重和矸石支撑载荷, 根据平衡条件可得

$$F_m = 2 \int_{l_{df}/2}^{l_{mfh}} \sigma_m dx = \sigma_{m0} (2l_{mfh} + l_{df}) - \gamma_{s1} h_{s1} l_{df} - \int_{-l_{df}/2}^{l_{df}/2} \sigma_{rdx} dx \quad (5)$$

式中: l_{mfh} 为煤体的超前采动影响范围 (取坚硬岩层破断前、后的极大值), m; γ_{s1} 为直接顶的容重, kN/m^3 ; σ_{m0} 为原岩应力状态下作用在煤体上的应力, MPa。

由图 12b 可知, 基本顶破断后, 基本顶破断岩块及其上覆载荷层掉落采空区, 煤体上承担的载荷总量瞬时减小。根据平衡条件, 可得结构瞬变后采空区两侧煤体承担的载荷总量 F'_m 为

$$F'_m = 2 \int_{l_{df}/2}^{l_{mfh}} \sigma_{mf} dx = \sigma_{m0} (2l_{mfh} + l_{df}) - (\gamma_{s1} h_{s1} + \gamma_d h_d + \gamma_{s2} h_{s2}) l_{df} - \int_{-l_{df}/2}^{l_{df}/2} \sigma_{rdx} dx \quad (6)$$

式中: γ_d 和 γ_{s2} 分别为基本顶与载荷层 I 的容重, kN/m^3 。

由式 (5) 和式 (6) 可得, 结构瞬变后, 采空区两侧煤体承担的载荷总量的阶变量 ΔF_m 为

$$\Delta F_m = F'_m - F_m = -(\gamma_d h_d + \gamma_{s2} h_{s2}) l_{df} \quad (7)$$

由式 (7) 可以看出, 结构瞬变后采空区两侧煤体上总承载量的减小量, 等于结构瞬变区域覆岩的自重载荷。此外, 煤体的受载特征还与基本顶的活动规律密切相关, 以下基于弹性地基理论, 进一步分析结构瞬变激励下基本顶的活动规律, 及其对煤体受载特征的影响。

3.1.2 坚硬岩层回弹—下沉造成的煤体受载阶变

3.1.2.1 基本顶的受载特征与力学模型

结构瞬变后, 除了煤体上的载荷会发生瞬变外, 基本顶的受载特征也会发生瞬变。由图 12a 可知, 结构瞬变前采空区两侧基本顶承担的载荷总量 F_{rd} 可表示为

$$F_{rd} = 2 \int_{l_{df}/2}^{l_{rdh}} \sigma_{rd} dx = \sigma_{rd0} (2l_{rdh} + l_{df}) - \int_{-l_{df}/2}^{l_{df}/2} \sigma_{rdz} dx \quad (8)$$

式中: l_{rdh} 为基本顶的超前采动影响范围, m; σ_{d0} 为原岩应力状态下作用在基本顶上的载荷, MPa。

由图 12b 可得, 结构瞬变后采空区两侧基本顶承担的载荷总量 F'_{rd} 可表示为

$$F'_{\text{rd}} = 2 \int_{l_{\text{df}}/2}^{l_{\text{rdh}}} \sigma'_{\text{rd}} dx = \sigma_{\text{d0}} (2l_{\text{rdh}} + l_{\text{df}}) - (\gamma_{\text{d}} h_{\text{d}} + \gamma_{\text{s2}} h_{\text{s2}}) l_{\text{df}} - \int_{-l_{\text{df}}/2}^{l_{\text{df}}/2} \sigma_{\text{rdx}} dx \quad (9)$$

由式 (8) 和式 (9) 可得, 结构瞬变后, 采空区两侧基本顶上总承载量的阶变量 ΔF_{rd} 为

$$\Delta F_{\text{rd}} = F'_{\text{rd}} - F_{\text{rd}} = \int_{-l_{\text{df}}/2}^{l_{\text{df}}/2} (\sigma_{\text{ruX}} - \sigma_{\text{rdx}}) dx \quad (10)$$

由于层间载荷 σ_{ruX} 远大于采空区矸石的支撑载荷 σ_{rdx} , 因此式 (10) 等号的右边项为正值, 即相较于结构瞬变前的情况, 在结构瞬变后, 结构瞬变区域外侧基本顶上承担的载荷总量瞬时增大, 这与前文的模拟实验和数值计算结果一致。

在实际工程中, 煤岩的受载特征复杂, 为理论求解方便, 以下将岩层上的作用载荷简化为均布载荷。据此, 基于上述力学分析, 沿倾向取单位宽度, 在结构瞬变前、后的 2 个稳态时, 图 12 中基本顶 BC 段的力学模型如图 13 所示。图 13 中, M_{B} 为基本顶破裂面 B 截面处的弯矩, kN · m; Q_{B} 为基本顶破裂面 B 截面处的剪力, kN; q_{rd} 为基本顶破断前上覆岩层对其的作用载荷, kN/m; Δq_{rd} 为基本顶破断后转移至采空区两侧基本顶上的载荷, kN/m; l_{rdf} 为载荷 Δq_{rd} 的作用范围, m; k 为基本顶以下煤岩的等效地基系数, kN/m³。

3.1.2.2 基本顶岩梁动态力学响应力学分析

由图 13, 并结合图 12 所述力学分析可知, 基本顶破断后, 除了其破裂面的内力 Q_{B} 和 M_{B} 会被瞬时卸

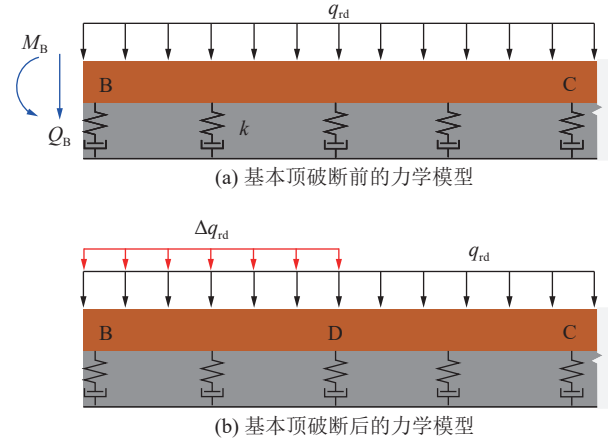


图 13 基本顶破断前、后的力学模型

Fig. 13 Mechanical models before and after basic top fracture

载外, 其上表面亦存在载荷 Δq_{rd} 的瞬时加载。简化起见, 假设在基本顶瞬时破断时, 载荷 Δq_{rd} 和内力 Q_{B} 与 M_{B} 为被瞬间加、卸载的。

由弹性地基理论^[32], 可得基本顶岩梁挠度 $z(x, t)$ 的动力学控制方程为

$$EI \frac{\partial^4 z}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} + c \frac{\partial z}{\partial t} + kz = q(x) \quad (11)$$

式中: ρ 为基本顶岩梁密度, kg/m³; A 基本顶岩梁的横截面面积, m²; E 为基本顶岩梁的弹性模量, N · m²; I 为基本顶岩梁的惯性矩, m⁴; c 为地基黏度, N · m/s; $q(x)$ 为作用域基本顶岩梁上的载荷, 可表示为

$$q(x) = \begin{cases} q_{\text{rd}} + \Delta q_{\text{rd}} & 0 < x < l_{\text{rdf}} \\ q_{\text{rd}} & l_{\text{rdf}} < x \end{cases} \quad (12)$$

则由式 (11) 和式 (12), 可得图 13b 中岩梁 BD 段的动态响应方程 $z_{\text{BD}}(x, t)$ 为

$$z_{\text{BD}}(x, t) = [e^{-\beta_1 x} (A_1 \cos \beta_1 x + B_1 \sin \beta_1 x) + e^{\beta_1 x} (C_1 \cos \beta_1 x + D_1 \sin \beta_1 x)] e^{-\zeta \omega_n t} (\cos \omega_d t + E_1 \sin \omega_d t) + e^{-\beta_0 x} (A_3 \cos \beta_0 x + B_3 \sin \beta_0 x) + e^{\beta_0 x} (C_3 \cos \beta_0 x + D_3 \sin \beta_0 x) + \frac{q(x)}{k} \quad (13)$$

岩梁 DC 段的动态响应方程 $z_{\text{DC}}(x, t)$ 为

$$z_{\text{DC}}(x, t) = e^{-\beta_1 x} (A_2 \cos \beta_1 x + B_2 \sin \beta_1 x) e^{-\zeta \omega_n t} (\cos \omega_d t + E_2 \sin \omega_d t) + e^{-\beta_0 x} (A_4 \cos \beta_0 x + B_4 \sin \beta_0 x) + \frac{q(x)}{k} \quad (14)$$

式中: A_i 、 B_i 、 C_i 和 D_i 为未知系数 ($i = 1, 2, 3, 4$), 可通过如下的初始条件和边界条件求解, 即

$$\begin{aligned} z|_{x=0} &= z_0|_{x=0}, & \frac{\partial z}{\partial x}|_{x=0} &= \frac{dz}{dx}|_{x=0}, \\ \frac{\partial z}{\partial t}|_{t=0} &= 0, & \frac{\partial^2 z}{\partial x^2}|_{x=0} &= 0, & \frac{\partial^3 z}{\partial x^3}|_{x=0} &= 0 \end{aligned} \quad (15)$$

3.1.2.3 基本顶的动态响应及其对煤体受载的影响

将计算参数代入式 (13) 和式 (14), 可得图 14 所示基本顶破断后岩层中 BC 段的动态响应特征。其中,

图 14a 为不同时刻基本顶岩梁的变形特征, 图 14b 为基本顶岩梁 $x = 0$ 和 $x = 50$ m 位置处挠度随时间的变化特征。

可以看出:

1) 基本顶破断后, 其岩层中的部分发生振动, 势能瞬变, 并对其相邻的围岩形成冲击作用。当其稳定后, 临近采空区侧区域回弹, 形成回弹区或位移正阶变区; 回弹区以里部分区域下沉, 形成下沉区或位移负阶变区, 如图 14a 所示, 与图 8b 所示的数值计算结

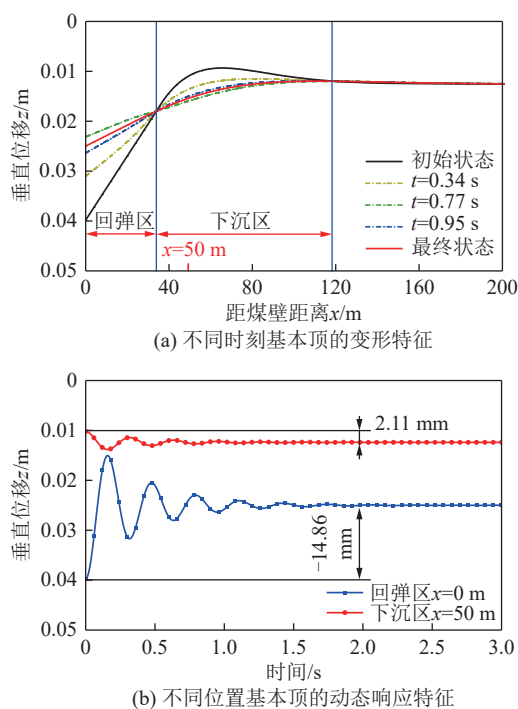


图14 结构瞬变激励下基本顶的动态力学响应特征

Fig.14 Dynamic mechanical response characteristics of main roof under structural transient excitation

果一致。

2) 基本顶破断后,回弹区域的瞬态响应是向上运动,而下沉区域的瞬态响应是向下运动,且在后续的振动过程中都不能恢复到初始的位置,如图14b所示。因此,回弹区的基本顶会对其下方煤岩形成瞬时的卸载,而对其上方覆岩形成瞬时的加载,下沉区的情况与之相反。

3) 结合图12所述基本顶受载阶变的力学分析和图8a所示关键层的位移阶变特征可知,除了转移载荷 Δq_{rd} 的作用外,关键层的瞬时下沉和基本顶的瞬时回弹,会对临近采空区的侧载荷层 I 形成瞬时的加持作用。这也是造成图5和图6b中采空区两侧围岩应力骤增,以及图10a中采空区两侧围岩应变能聚集的根本原因。

4) 结合图12所述煤体受载阶变的力学分析可知,基本顶的破断,除了会使煤体的总承载量减小外,其回弹区域的向上运动会使该区域煤体的承载量骤减,而下沉区域的向下运动又会使该区域煤体的承载量骤增。这也是造成图6a中煤体支承压力的峰值减小,而峰值位置向煤体深部跃迁的根本原因。

3.2 一种煤岩最大动载量的估算方法

可以看出,结构瞬变后,工作面前方煤体的支承压力会发生瞬变,由图15中瞬变前的支承压力 $\sigma_m(x, y)$,演变为瞬变后的 $\sigma'_m(x, y)$,峰值减小、峰值位置跃迁。由于基本顶等坚硬岩层的破断过程较短暂,因此可近

似认为结构瞬变过程中煤体上的阶变载荷是被瞬时施加的。煤体上作用载荷的骤变,会导致冲击应力的形成。

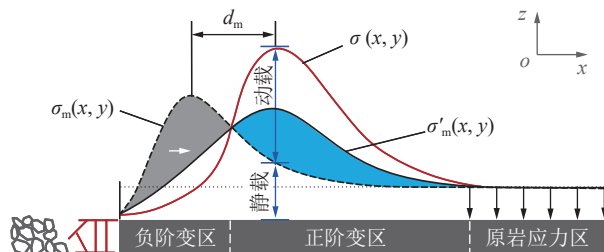


图15 结构瞬变下煤岩体动-静载荷叠加原理示意

Fig.15 Schematic diagram of superposition principle of dynamic and static load of coal and rock mass under transient structure

要精确分析外部载荷作用下煤体的冲击应力,需考虑弹、塑性体内应力波的传播,计算过程较复杂。在工程应用中,常采用粗略但偏于安全的能量法进行估算^[23]。根据图15所示结构瞬变前、后2个稳态时煤体支承压力的分布特征,工作面前方任意位置处支承压力的阶变量 $\Delta\sigma_m(x, y)$ 可表示为

$$\Delta\sigma_m(x, y) = \sigma'_m(x, y) - \sigma_m(x, y) \quad (16)$$

由能量法可得,作用于煤体上的最大动载量 $\sigma_d(x, y)$ 为静态应力阶变量 $\Delta\sigma_m(x, y)$ 的2倍^[18, 26],即

$$\sigma_d(x, y) = 2[\sigma'_m(x, y) - \sigma_m(x, y)] \quad (17)$$

由式(17)可知,在煤体应力的负阶变区,由于坚硬岩层的回弹-卸载,其动载量为“负值”;而煤体应力的正阶变区,由于坚硬岩层的下沉-加载,其动载量为“正值”。因此,坚硬岩层破断诱发的矿震中,并非所有区域的煤体都会被瞬时加载,部分区域的煤体也会被瞬时卸载。

由此可得,矿震中作用在工作面前方煤体上的瞬时最大支承压力 $\sigma(x, y)$ 为

$$\sigma(x, y) = \sigma_m(x, y) + \sigma_d(x, y) = 2\sigma'_m(x, y) - \sigma_m(x, y) \quad (18)$$

需注意的是,在以上动载的计算中,需要结构瞬变后的情况,这在结构瞬变前是无法获知的。在实际情况中,可结合相邻工作面或盘区开采过程中,结构瞬变前、后支承压力分布的现场实测结果,以及模型实验和数值计算的研究结果进行估算。在此基础上,由式(18)确定开采过程中可能出现的瞬时最大支承压力,进而对采场煤岩的动力学响应进行事前的危险性评估。

3.3 煤岩结构瞬变诱冲机理

由上述分析可知,初次来压时基本顶等坚硬岩层

的瞬变破断, 会对采场煤岩形成动-静载荷的叠加作用, 使采场煤岩产生动力学响应。对于周期来压, 以及相邻采空区坚硬岩层破断的情况, 亦可按照类似的模拟分析, 其力学本质是相同的, 如图 16 所示。

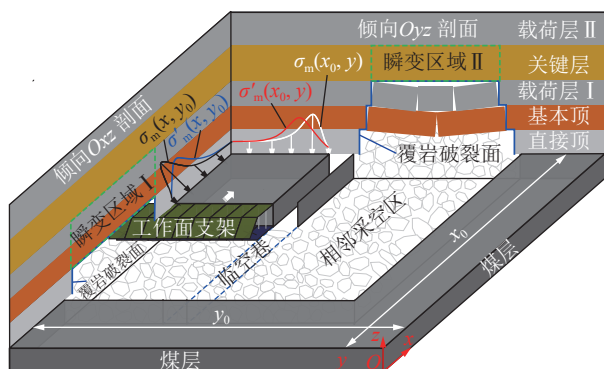


图 16 覆岩变形破坏的三维剖面示意

Fig.16 Schematic diagram of three-dimensional section of overburden rock deformation and failure

需注意的是, 在坚硬岩层的破断-振动过程中, 临近结构瞬变区域的煤体会被瞬时卸载, 而深部区域的煤体会被瞬时加载。因此, 单纯从煤体受载的角度分析, 来压时工作面后方坚硬岩层的瞬时破断, 会对工作面前方煤体的高静载区域形成瞬时卸载 (或动载为负值), 导致工作面区域的煤体不容易发生冲击地压。同理, 相邻采空区上覆坚硬岩层的瞬时破断, 也会对临空巷周边煤体的高静载区域形成瞬时卸载, 使其不容易发生冲击地压。而本质上, 工作面后方和相邻采空区坚硬岩层破断后对煤体的卸载效应, 与临空巷切顶卸压的力学机理一致, 都是煤岩结构改变后形成的结果。那么, 对实际工程中坚硬岩层的破断诱冲击机

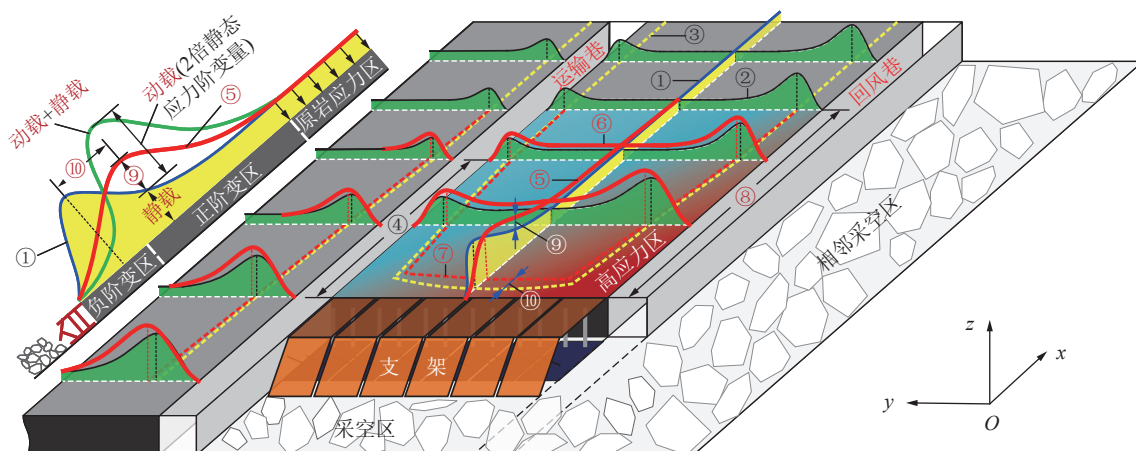
理, 是否有更合理的力学解释?

众所周知, 作用于工作面前方煤体上的载荷 $\sigma_m(x, y)$, 除了原岩应力 $\sigma_{m0}(x, y)$ 外, 亦包含工作面后方采空区和相邻采空区覆岩空间结构转移的覆岩自重载荷 $\sigma_{oxz}(x, y)$ 和 $\sigma_{oyz}(x, y)$, 即

$$\sigma_m(x, y) = \sigma_{m0}(x, y) + \sigma_{oxz}(x, y) + \sigma_{oyz}(x, y) \quad (19)$$

在工作面前方煤体和临空巷煤体上形成应力集中区, 即走向和倾向支承压力峰值, 如图 16 所示。这其中, 走向支承压力 $\sigma_{oxz}(x, y)$ 的分布特征、峰值与作用位置等, 主要受控于工作面后方采空区覆岩空间结构的力学性能; 而倾向支承压力 $\sigma_{oyz}(x, y)$ 的分布特征、峰值与作用位置等, 主要受控于相邻采空区覆岩空间结构的力学性能。

因此, 工作面后方采空区覆岩空间结构的瞬变, 会对工作面前方煤体的高静载区域形成瞬时卸载, 但其不会对回采巷道煤体的高静载形成卸载。同时, 由于相邻采空区覆岩的变形破坏已经发生, 对应的覆岩空间结构也相对稳定, 即使其发生了瞬变, 也是对临空巷道煤体高静载区域的瞬时卸载。也就是说, 单纯看工作面后方或相邻采空区坚硬岩层的破断, 都是对结构瞬变区域附近煤体的瞬时卸载, 对应区域的煤体不容易发生冲击地压。但从整个覆岩空间结构的视角分析, 回采过程中工作面后方坚硬岩层的瞬时破断, 会使走向支承压力 $\sigma_{oxz}(x, y)$ “瞬时前移”, 如图 17 所示。其结果是, 工作面前方煤体的高静载区域出现“高静载+负动载”的应力状态, 而临空巷煤体的高静载区域则出现“高静载+正动载”的应力状态, 导致回采巷道容易发生冲击地压, 而工作面不容易发生冲击



注: ①与⑤—瞬变前、后煤体支承压力的走向分布特征 (蓝色与红色实线); ②与⑥—瞬变前、后煤体支承压力的倾向分布特征 (黑色与红色实线); ③与⑦—瞬变前、后煤体支承压力峰值位置的迹线 (黄色与红色虚线); ④与⑧—瞬变前、后的超前采动影响范围; ⑨—支承压力阶变量; ⑩—支承压力峰值位置跃迁距离。

图 17 结构瞬变激励下工作面前方煤体动、静载叠加原理示意

Fig.17 Schematic diagram of dynamic and static load superposition principle of coal body in front of working face under structural transient excitation

地压。

例如,对于图 18 所示工作面前方 x_0 位置处临空巷道的情况。图中, σ_{bmin} 为发生冲击地压的临界应力, MPa; $\sigma_m(x_0, y)$ 和 $\sigma(x_0, y)$ 分别为结构瞬变前巷旁煤体上支撑压力和结构瞬变后巷旁煤体上瞬时最大支撑压力的倾向分布特征, MPa; ΔH 为结构瞬变后顶板的瞬时最大下沉量, m; l_C 和 l_B 分别为结构瞬变前巷旁煤体的塑性区宽度和结构瞬变后力学性质发生瞬变的弹性区煤体宽度, m。

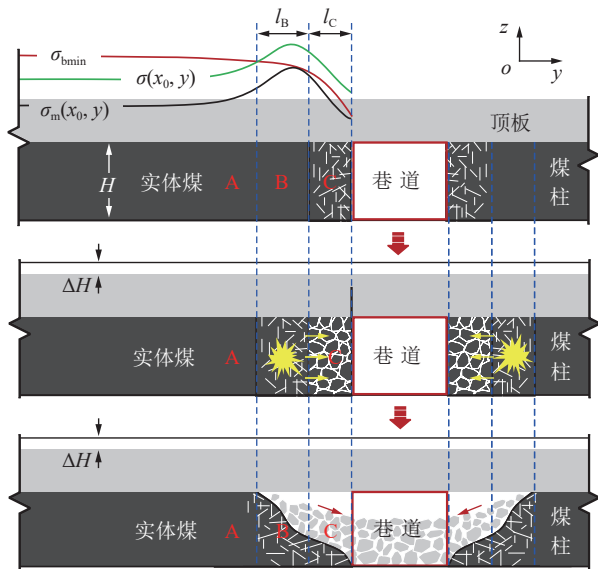


图 18 动-静载荷作用下冲击地压发生机理示意

Fig.18 Schematic diagram of the mechanism of rock burst under dynamic-static load

工作面后方坚硬岩层的破断,导致工作面后方采空区覆岩空间结构的载荷传递路径发生瞬变,工作面前方 x_0 位置处覆岩的承载量瞬时增大、顶板瞬时下沉,煤体支撑压力随之瞬时增大。由于覆岩的下沉具有整体性,巷道顶板暴露等局部区域上受载与约束的差异对其影响有限。因此,可近似认为距离工作面相同距离 x_0 处巷道周边顶板的瞬时最大下沉量 ΔH 及其形成的动载量 $\sigma_d(x_0, y)$ 相等。因此,在顶板瞬时下沉过程中,距离工作面 x_0 位置处,作用在煤体上的瞬时最大支撑压力 $\sigma(x_0, y)$ 可表示为

$$\sigma(x_0, y) = \sigma_m(x_0, y) + \sigma_d(x_0, y) \quad (20)$$

当最大支撑压力 $\sigma(x_0, y)$ 超过由煤体物理力学性质等所决定的某一临界应力 σ_{bmin} 时,发生冲击地压^[15],如图 18 所示。在此过程中,巷旁煤体的力学性质与行为将发生瞬变,如图 19 所示。图 19 中,红色框为对应图 18 中弹性 B 区或塑形 C 区煤体在结构瞬变前的位置; v_0 为发生冲击地压时抛出煤块的速度, m/s。

顶板瞬时下沉时,图 18 中弹性 A 区的煤体被瞬

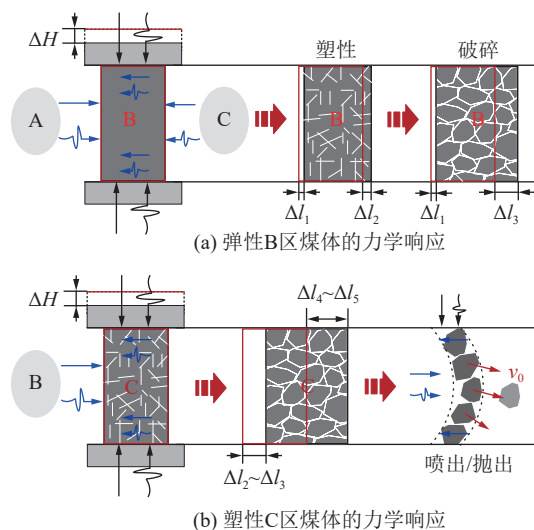


图 19 动-静载荷作用下巷旁煤体的力学响应

Fig.19 Mechanical response of roadside coal under dynamic-static load

时挤压,受顶、底板及其左侧实体煤限制,只能向约束较小的巷道方向瞬时鼓出。要获取弹性 A 区煤体瞬时鼓出量的精确解较为困难,但由于其竖直方向的载荷远大于水平方向。因此,可将其近似考虑为高为 H_0 的受压柱体,则弹性 A 区煤体右侧向巷道方向的瞬时移出量 Δl_1 可近似表示为

$$\Delta l_1 = \frac{\Delta H}{H_0} \mu l_A \quad (21)$$

式中: μ 为煤体的泊松比; l_A 为弹性 A 区变形煤体的等效宽度, m。

对于弹性 B 区的煤体,在载荷 $\sigma(x_0, y)$ 作用下,其力学性质由弹性状态瞬变为塑性,甚至破碎状态。在此过程中,伴随着顶板瞬时下沉-挤压和弹性 A 区煤体的瞬时鼓出-推挤,以及弹性 B 区煤体破坏后的瞬时体积膨胀等影响,破坏后的弹性 B 区煤体将向约束较小的巷道方向瞬时膨出。当弹性 B 区煤体的力学性质瞬变为塑性和破碎状态时,其对应右侧向巷道方向的瞬时移出量 Δl_2 和 Δl_3 可依次表示为

$$\Delta l_2 = \Delta l_1 + l_B \left(\frac{H_0}{H_0 - \Delta H_{ft} - \Delta H} \gamma_{ts} - 1 \right) \quad (22)$$

$$\Delta l_3 = \Delta l_1 + l_B \left(\frac{H_0}{H_0 - \Delta H_{ft} - \Delta H} \gamma_{tp} - 1 \right) \quad (23)$$

式中: γ_{ts} 和 γ_{tp} 分别为煤体由弹性到塑性和破碎状态的瞬时体积膨胀系数。

对于塑性 C 区的煤体,在载荷 $\sigma(x_0, y)$ 作用下,其力学性质由塑性状态瞬变为破碎状态。在此过程中,伴随着顶板瞬时下沉-挤压和弹性 B 区煤体的瞬时破坏-膨胀-推挤,以及塑性 C 区煤体 2 次破坏后的瞬时

体积膨胀等影响, 2 次破坏后的塑性 C 区煤体将向临空的巷道方向瞬时喷出或抛出。根据弹性 B 区煤体力学性质的瞬变情况, 即当弹性 B 区煤体由弹性状态瞬变为塑性和破碎状态时, 2 次破坏后的塑性 C 区煤体的右侧向巷道方向的瞬时移出量 Δl_4 和 Δl_5 可依次表示为

$$\Delta l_4 = \Delta l_2 + l_c \left(\frac{H_0}{H_0 - \Delta H_{ft} - \Delta H} \gamma_{sp} - 1 \right) \quad (24)$$

$$\Delta l_5 = \Delta l_3 + l_c \left(\frac{H_0}{H_0 - \Delta H_{ft} - \Delta H} \gamma_{sp} - 1 \right) \quad (25)$$

式中: γ_{sp} 为煤体由塑性到破碎状态的瞬时体积膨胀系数。

以弹性 B 区煤体瞬变为破碎状态为例, 将式 (21) 和式 (23) 代入式 (25), 并整理可得

$$\Delta l_5 = \frac{\Delta H}{H_0} \mu l_A + l_B \left[\frac{\gamma_{tp}}{1 - (\Delta H_{ft} + \Delta H)/H_0} - 1 \right] + l_c \left[\frac{\gamma_{sp}}{1 - (\Delta H_{ft} + \Delta H)/H_0} - 1 \right] \quad (26)$$

由式 (26) 可以看出, 动静载荷作用下, 巷旁煤体的运动是一个多因素交互耦合的复杂运动过程, 在顶板的瞬时下陷—挤压、弹性 A 区煤体的瞬时鼓出—推挤, 以及弹性 B 区煤体的瞬时破坏—膨胀—推挤作用下, 2 次破坏后的塑性 C 区煤体将向巷道方向瞬时膨出; 当上述作用载荷较大时, 2 次破坏后的塑性 C 区煤体将以某一速度 v_0 向巷道方向瞬时喷出或抛出, 形成冲击地压。

由于弹性 A 区煤体的瞬时鼓出量和塑性 C 区煤体的储能量是相对有限的, 因此, 弹性 B 区煤体在上述过程中扮演着至关重要的角色。当弹性 B 区煤体上原始存储的能量和顶板瞬时下陷时输入的能量之和 U 为

$$U = \frac{H_0}{2E} \int_{l_c}^{l_c+l_b} [\sigma_m(x_0, y)]^2 dx + \Delta H \left[\int_{l_c}^{l_c+l_b} \sigma_m(x_0, y) dx + l_B \Delta \sigma_m \right] \quad (27)$$

大于其瞬时破坏, 以及破碎煤体碰撞、摩擦等消耗的能量, 且能将 2 次破坏后的塑性 C 区煤体瞬时推出时, 将发生具有“破坏性”的煤体抛出等动力灾害现象。上述过程可形象的理解为, 当巷旁煤体在图 19a 所示的动、静载荷作用下, 当其大于由煤体物理力学性质等所决定的某一临界应力 σ_{bmin} 时, 弹性 B 区煤体的瞬时破坏—体积膨胀, 形成图 18b 所示的类似“爆炸”现象。在其作用下, 2 次破坏后的塑性 C 区煤体将被瞬时推入巷道, 形成图 18c 所示的冲击地压现象。

由此也可以看出, 巷旁煤体的塑性区宽度越小, 损耗的能力越小, 发生冲击地压的可能性越大。理想情况下, 当巷旁煤体的塑性区 l_c 宽度为 0 时, 破碎的弹性 B 区煤体将会瞬时喷出。

同时, 结合式 (23), 可得弹性 B 区煤体的力学性质发生瞬变时, 其右侧相对于左侧的瞬时膨出距离 $\Delta l'_3$ 可表示为

$$\Delta l'_3 = l_B \left[\frac{\gamma_{tp}}{1 - \sigma(x_0, y)/E} - 1 \right] \quad (28)$$

由式 (28) 可以看出, 弹性 B 区煤体破坏后的瞬时膨出量与煤体的物理力学特性及其所受的动—静载荷密切相关, 且其随着煤体瞬时破坏范围 l_B 、动静载荷 $\sigma(x_0, y)$ 、瞬时体积膨胀系数 γ_{tp} 的增大, 以及弹性模量 E 的减小而增大。这其中, 煤体瞬时破坏范围 l_B 又与煤体的物理力学特性及其所受的动、静载荷相关。

3.4 调结构、控响应的防治理念

由上述分析可以看出, 结构瞬变激励下回采巷道煤体发生冲击地压的概率与煤体的物理力学特性和动、静载荷密切相关。这其中, 煤体所受的动、静载荷不仅与覆岩空间结构的力学性能和瞬变特征密切相关, 也与煤体自身的物理力学特性密切相关。

对于静载, 由于煤体越坚硬、强度越大, 煤体的冲击倾向性越高^[33], 煤体支承压力的分布也越“陡峭”^[34], 对应煤体支承压力的峰值越大。因此, 通过密集钻孔等方式弱化巷旁煤体, 不仅减小了煤体的冲击倾向性, 也会使巷旁煤体支承压力的峰值减小、峰值位置向深部煤体迁移, 且增大了图 18 中巷旁煤体的塑性区宽度, 可有效降低了冲击地压发生的概率。

并且, 由于临空巷旁煤体的支承压力主要来自于相邻采空区覆岩空间结构传递的覆岩自重载荷, 相邻采空区覆岩空间结构的倾向几何尺度越大, 巷旁煤体的支承压力也越大。因此, 通过临空巷切顶卸压, 使巷旁煤体的支承压力峰值减小、峰值位置向深部煤体迁移, 可在一定程度上减小巷旁煤承受的静载。但切顶卸压未从根本上减小巷旁煤体承载量, 只有通过人为构造或预留超大煤柱等方式^[35], 减小相邻采空区覆岩空间结构的倾向几何尺度, 才能减小相邻采空区覆岩空间结构传递的载荷, 从根本上解决临空巷旁煤体支承压力过大的问题。

对于动载, 如图 20 所示。图 20a 中的红色虚、实线, 对应结构瞬变前、后稳态时坚硬煤体上支承压力的分布特征; 蓝色虚、实线, 对应结构瞬变前、后稳态时松软煤体上支承压力的分布特征。图 20b 中, 黑色虚线为结构瞬变前的支承压力分布特征; 红色和蓝色

实线为结构瞬变后,对应不同结构瞬变程度(或峰值跃迁距离 d_3 和 d_4) 2 种情况下的支承压力分布特征。

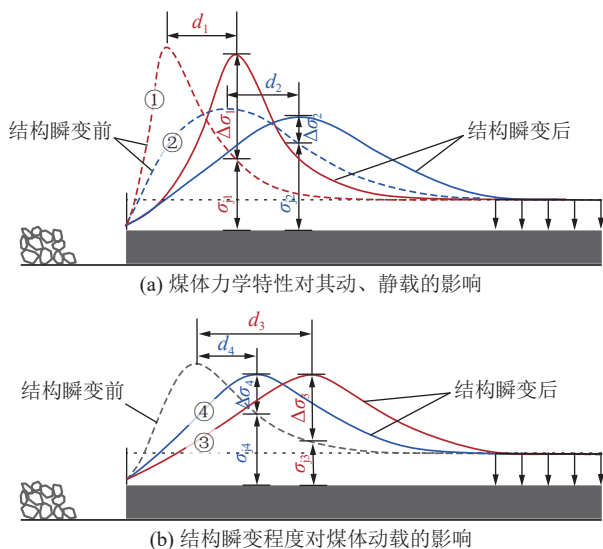


图 20 煤岩动-静载荷影响因素分析示意

Fig.20 Schematic diagram of influencing factors analysis of coal-rock dynamic-static load

由图 20a, 并结合式 (17) 可知, 在结构瞬变程度相当的情况下, 即 $d_1 = d_2$ 时, 煤体越坚硬, 其对应的支承压力分布越“陡峭”, 结构瞬变前、后的静态应力阶变量越大, 对应的动载量也会越大。因此, 弱化巷旁煤体, 不能可以减小静载和冲击倾向性, 亦可降低结构瞬变后形成的动载。

并且, 对于同样的煤体, 如图 20b 所示, 覆岩空间结构的瞬变程度越大, 支承压力峰值位置的跃迁距离越大, 即 $d_3 > d_4$, 结构瞬变前、后的静态应力阶变量越大, 对应的动载量也越大。因此, 通过水力压裂弱化坚硬顶板和充填开采等方式, 减小坚硬岩层的破断步距与范围, 降低工作面后方覆岩空间结构的瞬变程度, 可有效降低工作面前方煤体上的动载量。

综合上述分析可以看出, 采场煤岩的力学响应与覆岩空间结构的力学性能和瞬变特征密切相关。在实际工程中, 应结合具体工程背景, 基于煤岩结构与其动、静力学响应的内在关联, 基于“调结构、控响应”的理念, 建立针对性的防控措施。需说明的是, 本文主要是通过近水平煤层开采坚硬岩层瞬时破断的情况, 阐述了煤岩结构瞬变诱冲的科学理念, 该理念亦可应用于断层、急倾斜煤层等特殊地质构造的情况。

例如, 对于乌东矿区的近直立煤层群, 在以往回采过程中, B1-2 煤层未发生冲击地压, 而 B3-6 煤层的顶、底巷都发生过冲击地压。一般认为, B3-6 煤层的顶板或岩柱破断后, 震源处应变能瞬时释放形成的动载和原始静载叠加作用下形成的瞬时挤压或夹持

效应, 是导致 B3-6 煤层发生冲击地压的主因, 如图 21 所示。

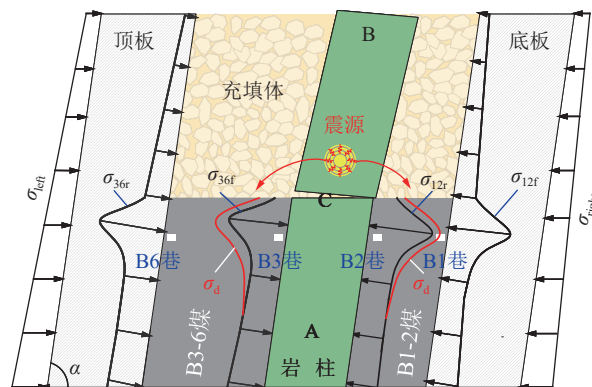


图 21 乌东矿区近直立煤层群开采示意

Fig.21 Schematic diagram of mining near vertical coal seam group in Wudong mining area

但基于已有理念, 以岩柱的瞬时破断为例, 通过进一步的力学分析可知, 岩柱破断前, 受岩柱自重影响, 岩柱对 B1-2 煤层的作用载荷大于其对 B3-6 煤层的作用载荷; 因此, 岩柱破断前, B1-2 煤层顶板侧煤体承受的静载 σ_{12r} 大于 B3-6 煤层底板侧煤体承受的静载 σ_{36r} , 即 $\sigma_{12r} > \sigma_{36r}$ 。岩柱破断后, 震源与 B1-2 煤层和 B3-6 煤层的距离相当, 应力波的传输介质也近乎一致; 因此, 岩柱破断后, B1-2 煤层和 B3-6 煤层承受的动载量 σ_d 相等。

按照上述逻辑, 仅从煤体受载的角度看, 岩柱破断后, B1-2 煤层顶板侧煤体的“动载+静载”大于 B3-6 煤层底板侧煤体的“动载+静载”, 即 $\sigma_{12r} + \sigma_d > \sigma_{36r} + \sigma_d$, B1-2 煤层发生冲击地压的概率大于 B3-6 煤层, 这显然与实际情况不符。按照本文理念, 从煤岩结构瞬变的角度分析, 可以较好地解释岩柱破断后 B3-6 煤层容易发生冲击地压而 B1-2 煤层不发生的原因。限于篇幅, 将另文论述。

4 结 论

1) 覆岩空间结构是其范围内的采场煤岩产生不同力学响应的内、外因, 坚硬岩层破断等子系统的瞬时失稳, 会导致覆岩空间结构大系统的瞬变, 进而造成其影响范围内采场煤岩动态力学响应(矿震)的发生和静态力学响应的阶变。并且, 结构瞬变后, 采场煤岩的动、静力学响应存在紧密的内在联系, 可通过对其静态力学响应阶变规律的研究, 逆向分析矿震发生时采场煤岩的动态力学响应特征。

2) 矿震发生时, 除了震源处的应变能会发生瞬变外, 更大范围的煤岩应力场、位移场、应变能场和重力势能场等力学响应也会发生瞬变, 且其与覆岩空间结

构的瞬变特征密切相关。整体而言,采场煤岩应变能的聚集量大于释放量,而其重力势能的释放量远大于聚集量,且煤岩重力势能的释放量远大于应变能的释放量,即矿震中耗散的能量由采场煤岩瞬时释放的应变能和重力势能两部分构成。

3) 受坚硬岩层破断后的卸荷、回弹和下沉影响,临近破断区域的煤体会被瞬时卸载,而深部区域的煤体会被瞬时加载。工作面后方坚硬岩层的瞬变破断,会使走向支承压力“瞬时而移”,导致工作面前方煤体的高静载区域出现“高静载+负动载”的应力状态,而临空巷煤体的高静载区域则出现“高静载+正动载”的应力状态,这也是造成回采巷道容易发生冲击地压而工作面不容易发生冲击地压的根本原因。

4) 回采巷道煤体发生冲击地压的概率与煤体的物理力学特性,及其所受的动、静载荷密切相关。并且,煤体所受的动、静载荷不仅与覆岩空间结构的力学性能和瞬变特征密切相关,也与煤体自身的物理力学特性密切相关。在实际工程中,应结合具体工程背景,基于煤岩结构与其动、静力学响应的内在关联,基于“调结构、控响应”的理念,建立针对性的防控措施。

参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] 窦林名, 田鑫元, 曹安业, 等. 我国煤矿冲击地压防治现状与难题[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 152–171.
DOU Linming, TIAN Xinyuan, CAO Anye, et al. Present situation and problems of coal mine rock burst prevention and control in China[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 152–171.
- [3] 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 rockburst in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1844–1851.
- [4] 齐庆新, 潘一山, 舒龙勇, 等. 煤矿深部开采煤岩动力灾害多尺度分源防控理论与技术架构[J]. 煤炭学报, 2018, 43(7): 1801–1810.
QI Qingxin, PAN Yishan, SHU Longyong, et al. Theory and technical framework of prevention and control with different sources in multi-scales for coal and rock dynamic disasters in deep mining of coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(7): 1801–1810.
- [5] 曹安业, 窦林名, 白贤栖, 等. 我国煤矿矿震发生机理及治理现状与难题[J]. 煤炭学报, 2023, 48(5): 1894–1918.
CAO Anye, DOU Linming, BAI Xianxi, et al. State-of-the-art occurrence mechanism and hazard control of mining tremors and their challenges in Chinese coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 1894–1918.
- [6] 齐庆新, 窦林名. 冲击地压理论与技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2008.
- [7] ROMASHOV A N, TSYGANKOV S S. Generalized model of rock bursts[J]. Journal of Mining Science, 1993, 28(5): 420–423.
- [8] CHEN Z H, TANG C A, HUANG R Q. A double rock sample model for rockbursts[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(6): 991–1000.
- [9] HUDSON J A, CROUCH S L, FAIRHURST C. Soft, stiff and servo-controlled testing machines: A review with reference to rock failure[J]. Engineering Geology, 1972, 6(3): 155–189.
- [10] KIDYBIŃSKI A. Bursting liability indices of coal[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1981, 18(4): 295–304.
- [11] 李玉生. 冲击地压机理及其初步应用[J]. 中国矿业学院学报, 1985, 14(3): 59–61.
LI Yusheng. Rockburst mechanism and its preliminary application[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1985, 14(3): 59–61.
- [12] 齐庆新, 史元伟, 刘天泉. 冲击地压粘滑失稳机理的实验研究[J]. 煤炭学报, 1997, 22(2): 144–148.
QI Qingxin, SHI Yuanwei, LIU Tianquan. Mechanism of instability caused by viscous sliding in rock burst[J]. Journal of China Coal Society, 1997, 22(2): 144–148.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 窦林名, 何江, 曹安业, 等. 煤矿冲击矿压动静载叠加原理及其防治[J]. 煤炭学报, 2015, 40(7): 1469–1476.
DOU Linming, HE Jiang, CAO Anye, et al. Rock burst prevention methods based on theory of dynamic and static combined load induced in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(7): 1469–1476.
- [16] 姜福兴, 冯宇, KOUAME K J A, 等. 高地应力特厚煤层“蠕变型”冲击机理研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(10): 1762–1768.
JIANG Fuxing, FENG Yu, et al. Mechanism of creep-induced rock burst in extra-thick coal seam under high ground stress[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(10): 1762–1768.
- [17] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2803–2813.
HE Manchao, XIE Heping, PENG Suping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2803–2813.
- [18] 罗生虎, 王同, 伍永平, 等. 结构瞬变激励下采场煤岩的力学响应[J]. 煤炭学报, 2023, 48(12): 4406–4416.
LUO Shenghu, WANG Tong, WU Yongping, et al. Mechanical re-

- sponse of coal and rock in stope under transient excitation of structure[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(12): 4406–4416.
- [19] 邱泽华, 石耀霖. 地震造成远距离应力阶变的观测实例[J]. 中国科学 (D 辑: 地球科学), 2003, 33(S1): 60–64.
- QIU Zehua, SHI Yaolin. Observation example of remote stress step change caused by earth-quake[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2003, 33(S1): 60–64.
- [20] 岳冲, 孙玺皓, 牛安福, 等. 2021 年青海玛多 $M_s7.4$ 地震同震应力场与形变台站同震阶变分布关系探讨[J]. 中国地震, 2022, 38(2): 189–198.
- YUE Chong, SUN Xihao, NIU Anfu, et al. Discussion on the relationship between the co-seismic stress field and the distribution co-seismic step among deformation observation stations from the Maduo $M_s7.4$ earthquake[J]. Earthquake Research in China, 2022, 38(2): 189–198.
- [21] 钱鸣高, 石平五, 许家林. 矿山压力与岩层控制[M]. 2 版. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2010.
- [22] 宋振骥. 实用矿山压力控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1988.
- [23] 王家臣, 王蕾, 郭尧. 基于顶板与煤壁控制的支架阻力的确定[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1619–1624.
- WANG Jiachen, WANG Lei, GUO Yao. Determining the support capacity based on roof and coal wall control[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1619–1624.
- [24] 罗生虎, 伍永平, 解盘石, 等. 大倾角煤层走向长壁开采支架稳定性力学分析[J]. 煤炭学报, 2019, 44(9): 2664–2672.
- LUO Shenghu, WU Yongping, XIE Panshi, et al. Mechanical analysis of support stability in longwall mining of steeply dipping seam[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(9): 2664–2672.
- [25] 赵雁海, 俞缙, 周晨华, 等. 考虑主应力轴偏转影响的远场拱壳围岩压力拱效应表征[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(10): 1842–1850, 1958.
- ZHAO Yanhai, YU Jin, ZHOU Chenhua, et al. Characterization of pressure arching effect of arch shell surrounding rock considering deviation of principal stress axis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(10): 1842–1850, 1958.
- [26] 孙训方, 方孝淑, 关来泰. 材料力学 (II)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [27] 杜涛涛. 矿震震动传播与响应规律[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(3): 418–425.
- DU Taotao. Propagation and response laws of mine seism[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(3): 418–425.
- [28] 唐岳松, 孙文超, 李增强, 等. 冲击地压矿井充填开采工作面采动应力激增与跌落机制[J]. 煤炭学报, 2024, 49(S1): 22–35.
- TANG Yuesong, SUN Wenchao, LI Zengqiang, et al. Mining induced stress surge and drop mechanisms in backfilling panel of a coal burst mine[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(S1): 22–35.
- [29] 朱志洁, 王洪凯, 张宏伟, 等. 多层坚硬顶板综放开采矿压规律及控制技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(7): 1–6.
- ZHU Zhijie, WANG Hongkai, ZHANG Hongwei, et al. Study on rock pressure law and control technology under multi-layer hard roof in fully-mechanized top coal caving face[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(7): 1–6.
- [30] 阮诗伦, 马红艳. 理论力学[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [31] 徐芝纶. 弹性力学-上册[M]. 5 版. 北京: 高等教育出版社, 2016.
- [32] 黄义, 何芳社. 弹性地基上的梁、板、壳[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [33] 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.
- [34] 谢和平, 周宏伟, 刘建锋, 等. 不同开采条件下采动力学行为研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(7): 1067–1074.
- XIE Heping, ZHOU Hongwei, LIU Jianfeng, et al. Mining-induced mechanical behavior in coal seams under different mining layouts[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(7): 1067–1074.
- [35] 罗生虎, 王同, 伍永平, 等. 近场调控、远场隔离煤岩动力灾害区域防控方法: CN116838342A[P]. 2023–10–03.