

# 结构瞬变激励下覆岩应变能场和重力势能场的演变机理

罗生虎<sup>1,2</sup>, 高佳波<sup>1,2</sup>, 闫壮壮<sup>2,3</sup>, 伍永平<sup>2,3</sup>, 解盘石<sup>2,3</sup>, 韩刚<sup>4</sup>, 王红伟<sup>2,3</sup>,  
田程阳<sup>2,3</sup>, 王同<sup>5</sup>, 孙明明<sup>4</sup>

(1. 西安科技大学 理学院, 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. 西安科技大学能源学院, 陕西 西安 710054; 4. 中煤能源研究院有限责任公司, 陕西 西安 710054; 5. 安徽理工大学 矿业工程学院, 安徽 淮南 232001)

**摘要:** 揭示覆岩能量场的聚集与释放机理, 是煤岩动力灾害防治的理论基础。采用模拟试验、数值计算和理论分析相结合的方法, 通过构建坚硬岩层破断前、后 2 个稳态时的力学模型, 对比分析了结构瞬变前、后采场煤岩受载的阶变特征, 研究了结构瞬变激励下覆岩应变能和重力势能聚集与释放的演变机理。结果表明: 受自重应力场和采动卸荷效应影响, 采动影响范围内的各岩层相互作用、相互制约, 存在紧密且复杂的力学联系。坚硬岩层破断诱发的结构瞬变, 打破了岩层间原有旧秩序的平衡, 导致岩层间的力学联系发生瞬变, 覆岩载荷传递路径亦发生瞬变, 覆岩的应变能场和重力势能场随之改变。并且覆岩载荷传递路径的瞬变, 会对采场空间不同区域的煤岩形成不同的瞬时加、卸载, 造成不同区域覆岩能量的演变特征存在差异。这其中, 下位坚硬岩层破断后, 破裂面内力的瞬时卸载和覆岩载荷传递路径瞬变形成的瞬时加载, 使其邻近采空区的部分区域瞬时向上回弹、释放应变能, 回弹区以里的部分区域瞬时下沉、释放重力势能。与此同时, 结构瞬变区域支撑载荷的瞬时卸载, 使上位坚硬岩层瞬时下沉、变形量骤增, 重力势能释放而应变能聚集。本质上, 结构瞬变激励下采场煤岩的动力学响应过程, 是采场煤岩原有时空结构被打破后向新时空结构演化的动力学过程, 存在应变能、重力势能和动能的相互转换, 并伴随有应变能和重力势能的聚集与释放。且整体而言, 覆岩应变能的释放区域较小, 主要集中在瞬时卸载区, 其余区域瞬时增大; 而重力势能的释放范围较大, 仅在下位坚硬岩层的回弹区域略有增大。

**关键词:** 结构瞬变; 应变能; 重力势能; 聚集与释放; 煤岩动力灾害

中图分类号: TD324 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2025)02-0768-13

## Evolution mechanism of strain energy field and gravitational potential energy field of overlying rock under transient excitation of structure

LUO Shenghu<sup>1,2</sup>, GAO Jiabo<sup>1,2</sup>, YAN Zhuangzhuang<sup>2,3</sup>, WU Yongping<sup>2,3</sup>, XIE Panshi<sup>2,3</sup>, HAN Gang<sup>4</sup>,  
WANG Hongwei<sup>2,3</sup>, TIAN Chengyang<sup>2,3</sup>, WANG Tong<sup>5</sup>, SUN Mingming<sup>4</sup>

(1. College of Sciences, 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. School of Energy Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 4. China Coal Energy Research Institute, Ltd., Xi'an 710054, China; 5. School of Mining Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

收稿日期: 2024-12-22 策划编辑: 郭晓炜 责任编辑: 宫在芹 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.0896

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

通讯作者: 闫壮壮(1998—), 男, 陕西延安人, 博士研究生。E-mail: 1278569119@qq.com

引用格式: 罗生虎, 高佳波, 闫壮壮, 等. 结构瞬变激励下覆岩应变能场和重力势能场的演变机理[J]. 煤炭学报, 2025, 50(2): 768-780.

LUO Shenghu, GAO Jiabo, YAN Zhuangzhuang, et al. Evolution mechanism of strain energy field and gravitational potential energy field of overlying rock under transient excitation of structure[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(2): 768-780.



移动阅读

**Abstract:** Revealing the aggregation and release mechanism of overlaying rock energy field is the theoretical basis for the prevention and cure of coal-rock dynamic disasters. By means of simulation experiment, numerical calculation and theoretical analysis, the mechanical models of two steady states before and after hard rock breaking were established. The step change characteristics of coal and rock under load before and after structural transient were compared and analyzed. The evolution mechanism of strain energy and gravitational potential energy accumulation and release of overlying rock under structural transient excitation was studied. The results show that it is affected by self-weight stress field and mining unloading effect, the rock strata within the mining influence range interact and restrict each other, and there is a close and complex mechanical connection. The structural transient induced by hard rock breaking, it breaks the balance of the original old order between the rock strata. It leads to the transient change of the mechanical relation between the strata and the load transfer path of the overlying strata. The strain energy field and the gravitational potential energy field of the overlying strata change accordingly. In addition, the transient change of overburden load transfer path will cause different instantaneous loading and unloading of coal and rock in different areas of stope space, resulting in differences in the energy evolution characteristics of overlying strata in different regions. Among them, after the fracture of the lower hard rock stratum, the instantaneous unloading of the internal force of the fracture surface and the instantaneous loading formed by the transient transition of the load transfer path of the overlying rock make some areas near the goaf instantaneously rebound upward and release strain energy, the instantaneous subsidence and release of gravitational potential energy in some areas within the rebound zone. At the same time, the instantaneous unloading of the support load in the transient region of the structure makes the upper hard rock layer sink instantaneously and the deformation increase sharply, and the gravitational potential energy is released and the strain energy is accumulated. In essence, the dynamic mechanical response process of coal rock in mining field under transient excitation of structural is a dynamic process of the evolution of the original space-time structure of coal rock in mining field to the new space-time structure after the original space-time structure of coal rock in mining field is broken. There is a mutual conversion of strain energy, gravitational potential energy and kinetic energy, accompanied by the aggregation and release of strain energy and gravitational potential energy. On the whole, the release area of overlaying rock strain energy is small, mainly concentrated in the instantaneous unloading area, and the rest areas increase instantaneously. The release range of gravitational potential energy is large, and only the rebound area of the lower hard rock layer increases slightly.

**Key words:** structural transients; strain energy; gravitational potential energy; aggregation and release; coal-rock dynamic disaster

## 0 引言

截至 2023 年, 我国冲击地压矿井达到 146 处<sup>[1]</sup>, 冲击地压等煤岩动力灾害已成为深部矿井开采面临的主要灾害之一<sup>[2-4]</sup>。煤岩动力灾害的发生与覆岩能量场的聚集与释放密切相关<sup>[5]</sup>, 因此, 揭示覆岩能量场的演变机理, 对煤岩动力灾害的防治具有重要意义。

近年来, 众多学者和工程技术人员通过理论分析、数值计算和现场实测等方法, 对不同开采条件下覆岩的受载特征与破坏机理<sup>[6-9]</sup>、覆岩结构的力学性能与活动规律<sup>[10-13]</sup>、覆岩应力场的三维传递特征与动态演化规律<sup>[14-16]</sup>、覆岩应变能场的聚集释放规律与诱冲机理<sup>[17-20]</sup>等方面展开广泛而深入的研究, 为煤岩动力灾害的防治提供了有力保障, 并为相关研究奠定了基础。但已有的研究工作主要集中于坚硬岩层等子系统的瞬时失稳特征, 忽略了在其影响下采场煤岩结构大系

统的瞬变特征及其作用下煤岩的动、静力学响应, 且未考虑覆岩重力势能的释放规律及其对煤岩动力灾害的影响。并且, 随着开采深度和强度的增大, 煤岩动力灾害日趋严重, 其相关的岩层范围已超出了本工作面和一般概念下基本顶的范畴, 需要在更大的几何范畴内探讨采场煤岩结构的力学性能与力学响应<sup>[21]</sup>。

在煤岩动力灾害的研究中, 对覆岩能量场的研究主要聚焦于覆岩的应变能, 且一般认为, 坚硬岩层瞬时破断等诱发的矿震, 会形成震源, 瞬时释放应变能, 并以应力波的形式向外传递应变能, 对地下工程结构造成损坏<sup>[22-23]</sup>。已有的研究工作, 在坚硬岩层破断前或矿震发生前, 主要聚焦于覆岩应力集中区与应变能聚集区的作用位置与分布特征等; 在坚硬岩层破断后, 主要通过微震监测等手段, 获取震源位置和应变能释放规律, 为煤岩动力灾害的防治奠定了基础, 但其忽略了坚硬岩层破断后相邻岩层受载特征与力学响应

的瞬变。

在地下煤层开采中,受自重应力场和采动卸荷效应影响,采动影响范围内的各岩层相互作用、相互制约,存在紧密且复杂的力学联系,是一个有机的力学系统。任一坚硬岩层的瞬时破断等,必然会导致其影响范围内采场煤岩受载特征与力学响应的瞬变。并且,从应变能、位移等基本力学参量的定义可知,矿震发生时覆岩应变能的瞬时释放,意味着覆岩应变的瞬变,应变的瞬变又意味着覆岩位移的瞬变,而位移的瞬变则意味着覆岩重力做功,重力势能瞬时释放。可见,在坚硬岩层破断等诱发的矿震中,不仅有覆岩应变能的瞬时释放,亦存在覆岩重力势能的瞬时释放,而目前鲜见针对该领域的研究。

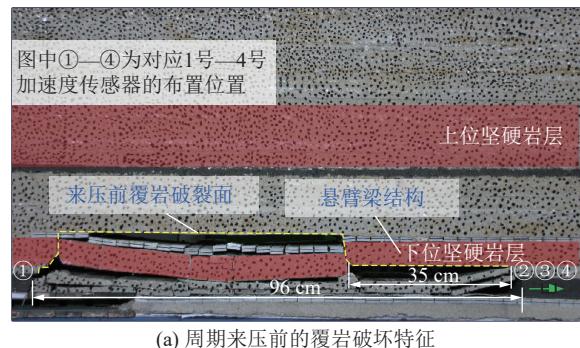
笔者曾基于结构动力学理论,提出坚硬岩层破断等诱发的覆岩空间结构瞬变,会导致采场煤岩动态力学响应的发生和静态力学响应的阶变,且动态演化过程中煤岩破裂、阻尼等耗散的能量由覆岩释放的应变能和重力势能2部分构成<sup>[24-25]</sup>;但其主要是对理念的论述,缺乏系统的研究。据此,笔者在已有研究工作基础上,首先采用模拟试验方法,基于煤岩应力和加速度的监测结果,分析覆岩能量场的演化规律;进而通过数值计算方法,通过对模型前、后处理模块的二次开发,研究结构瞬变激励下覆岩应变能场和重力势能场的聚集与释放规律;最后通过理论分析方法,研究覆岩应变能场和重力势能场阶变的发生机理,研究结果对煤岩动力灾害防治有一定的理论参考价值。

## 1 覆岩能量场演化的模型试验

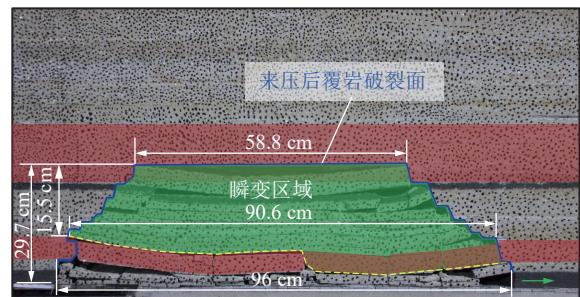
模型试验的研究方案参见文献[24]。鉴于文献[24]已通过该模型试验第3次周期来压时的情况,阐述了结构瞬变激励下煤岩动、静力学响应的基本特征。为此,以下主要通过该模型试验第1次周期来压时的情况,借助煤体和下位坚硬岩层上的应力监测结果和煤体的加速度监测结果,推演覆岩能量场的演化规律,如图1—图3所示。

由图1—图3可以看出,第1次周期来压时覆岩空间结构的瞬变特征,及其诱发的动、静力学响应,与文献[24]中第3次周期来压时的情况基本一致,但同时可以发现:

1)采场煤岩的动、静力学响应特征与覆岩空间结构的瞬变特征密切相关。由于周期来压时,下位坚硬岩层的破断区域(或结构瞬变区域)主要集中在工作面侧,因此其诱发的动、静力学响应亦集中在工作面侧的围岩中,开切眼侧的现象不明显。例如,图2中,1号加速度布置于开切眼侧,未监测到明显信号;图



(a) 周期来压前的覆岩破坏特征



(b) 周期来压后的覆岩破坏特征

图1 周期来压前、后覆岩空间结构的瞬变特征

Fig.1 Transient characteristics of spatial structure of overlying strata before and after the periodic weighting

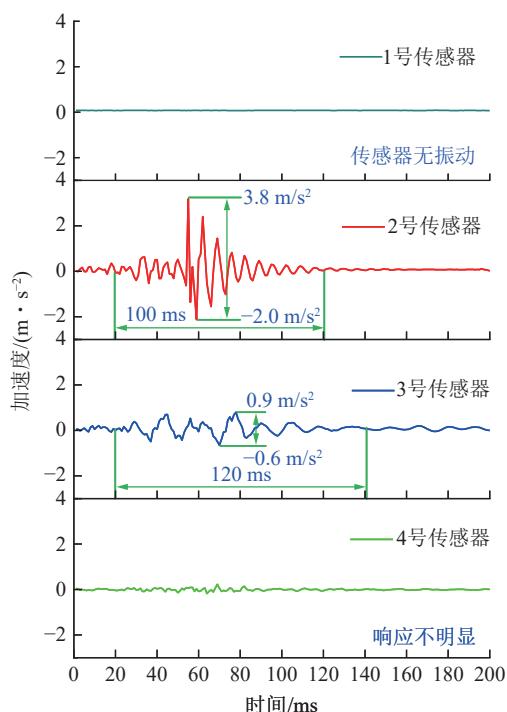


图2 结构瞬变激励下采场煤岩的动态力学响应特征

Fig.2 Dynamic mechanical response characteristics of coal rock in mining under transient excitation of structural

3a 中,切眼侧煤体支承压力的阶变特征也不明显。

2)采场空间不同区域煤岩静态力学响应的阶变特征存在显著差异。对比图3a与图3b所示煤体与下位坚硬岩层上支承压力的阶变特征可知,来压后,

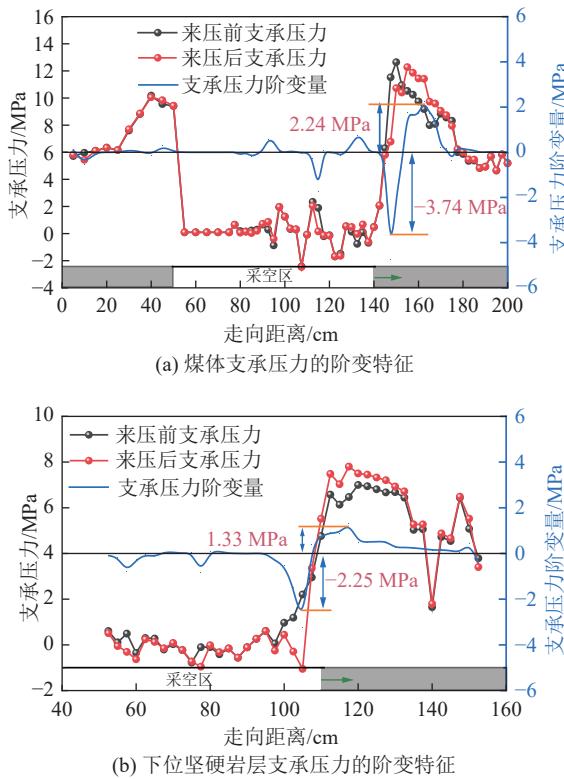


图3 结构瞬变激励下采场煤岩静态力学响应的阶变特征

Fig.3 Step change characteristics of static mechanical response of coal rock in mining under transient excitation of structural

媒体上支承压力的峰值骤减、峰值位置向煤体深部跃迁;与之相反的是,下位坚硬岩层上支承压力的峰值骤增、峰值位置向采空区侧跃迁。究其原因,主要是由覆岩载荷传递路径的瞬变和煤岩结构子系统活动规律的差异造成的。

3) 结构瞬变后,除了应变能外,亦存在重力势能的瞬时释放。对比图1a与图1b可知,下位坚硬岩层的破断,会对上位坚硬岩层形成瞬时卸载,导致覆岩瞬时下沉,重力做功。而由图3所示煤岩支承压力的阶变特征可知,煤岩受载特征的阶变,意味着其应力、位移等力学响应的瞬变;而位移的瞬变意味着外力会做功,由于采场煤岩所受的载荷均来自于上覆岩层的自重载荷,因此,位移的瞬变也意味着覆岩重力势能的瞬变。同时,结合图2所示采场煤岩的动态力学响应特征可知,结构瞬变过程中存在应变能、重力势能和动能的相互转换。

由此可见,结构瞬变激励下采场煤岩的动态力学响应过程或矿震中,存在覆岩应变能、重力势能和动能的相互转换,且其动态演化过程中煤岩破裂、阻尼等耗散的能量由覆岩释放的应变能和重力势能两部分构成。本质上,结构瞬变激励下采场煤岩静态力学响应的阶变过程,也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,二者之间存

在紧密的力学关联。由于模型试验获取的数据有限,只能做一些简单的推理。为此,以下通过数值计算方法,进一步研究结构瞬变激励下覆岩应变能和重力势能的聚集与释放特征。

## 2 覆岩能量场的聚集与释放特征

### 2.1 数值计算模型的建立与可行性验证

依据文献[24]的矿井地质资料,选取同物理模拟试验一致的地质参数,采用3DEC离散元数值计算软件,建立图4所示的平面数值计算模型。其中,模型长度为400 m,高度为180 m。为尽可能避免边界效应对数值模拟结果的影响,将模型左、右两侧各留设150 m的边界煤柱。采用固定边界条件方式限制模型边界位移,在模型顶部施加3.75 MPa均匀载荷模拟岩层自重。采用Mohr-Coulomb准则,模型块体数为11 721,单元数为384 410。

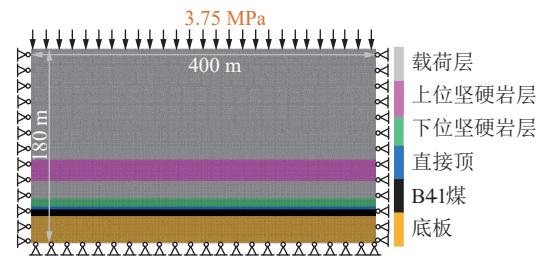


图4 数值计算模型

Fig.4 Numerical calculation model

在3DEC数值计算中,岩层块体和节理单元的破坏是一个准静态的渐进演化过程,不能模拟坚硬岩层等脆性材料的瞬时破断特征。为此,本文尝试通过软件内置的Fish语言,对前处理模块进行二次开发,以实现坚硬岩层的瞬时破断。其核心思想是,以最大拉应力为指标,每次推采完成后,遍历整个坚硬岩层,进行节理面强度判定。若是,解开节理约束;若否,进行下一步开挖。此外,模型计算结束后,通过布置测线、测面等,提取目标区域的应力、位移等结果文件,并通过弹塑性理论等,对结果文件进行数-力映射分析,以实现低价值弱关联数据向高价值强关联数据的转变。

图5为第1次周期来压(工作面推进距离为90 m)时,媒体和下位坚硬岩层上支承压力的阶变特征。由图中可以看出:

1)受结构瞬变影响,采场煤岩静态力学响应的阶变特征明显,且煤体上的阶变特征与下位坚硬岩层上的阶变特征存在显著差异;结构瞬变后煤体上的支承压力峰值骤减,而下位坚硬岩层上的支承压力峰值骤增。

2)对媒体而言,结构瞬变后,工作面前方10 m范围内的支承压力骤减,形成负阶变区,最大阶变量为

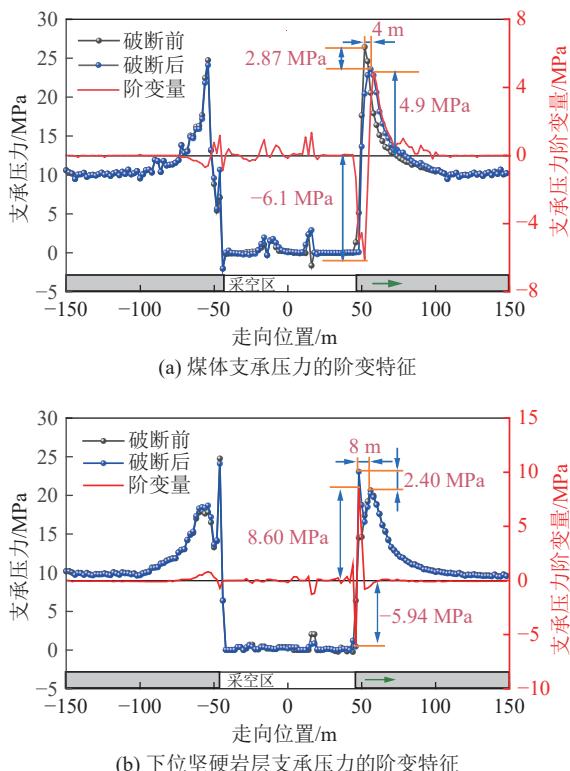


图 5 煤岩支承压力的阶变特征

Fig.5 Step change characteristics of abutment pressure of coal rock

6.1 MPa; 工作面前方 10~42 m 范围内的支承压力骤增, 形成正阶变区, 最大阶变量为 4.9 MPa。

3) 对于下位坚硬岩层而言, 结构瞬变后, 工作面前方 4 m 范围内的支承压力骤减, 形成负阶变区, 最大阶变量为 5.94 MPa; 工作面前方 4~10 m 范围内的支承压力骤增, 形成正阶变区, 最大阶变量为 8.6 MPa。

可以看出, 数值计算结果与模拟试验结果在定量上有差别, 但其在定性上是一致的, 这也验证了本文数值计算方法的可行性和正确性。

## 2.2 覆岩应变能场和重力势能场的阶变特征

在下位坚硬岩层破断前、后(或结构瞬变前、后)的 2 个稳态时, 通过布置测面, 提取覆岩破裂面以外区域单元的应力、应变和位移等结果文件, 对结果文件进行数-力映射分析。其中, 模型单元的应变能与重力势能可表示为

$$E_e = \frac{v}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)] \quad (1)$$

$$E_G = mgz$$

式中:  $E_e$  为单元应变能,  $J$ ;  $v$  为单元体积,  $m^3$ ;  $E$  为弹性模量,  $Pa$ ;  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  为单元的 3 个主应力,  $Pa$ ;  $\mu$  为泊松比;  $E_G$  为单元重力势能,  $J$ ;  $m$  为单元质量,  $kg$ ;  $z$  为单元垂直坐标,  $m$ 。

以结构瞬变前的量为基准, 则瞬变后模型各单元

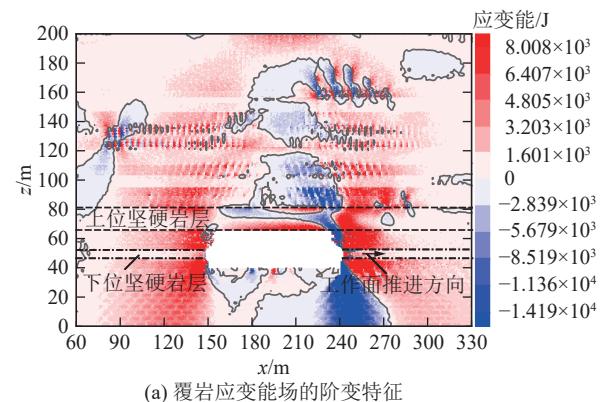
应变能与重力势能的阶变量为

$$\Delta E_e = E_{e2} - E_{e1} \quad (2)$$

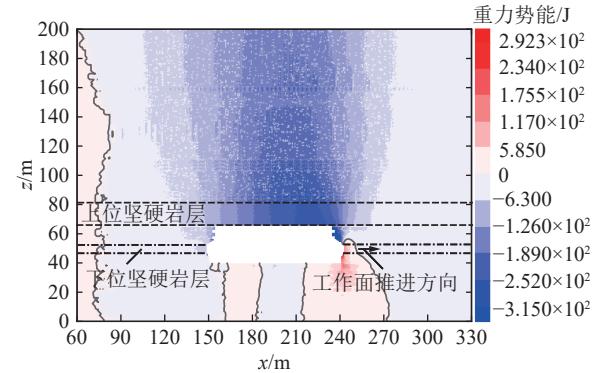
$$\Delta E_G = E_{G2} - E_{G1}$$

式中:  $\Delta E_e$  和  $\Delta E_G$  分别为模型单元应变能和重力势能的阶变量,  $J$ ;  $E_{e1}$  和  $E_{G1}$  与  $E_{e2}$  和  $E_{G2}$  分别为瞬变前、后模型单元的应变能和重力势能,  $J$ 。

由式(2)可知, 当其为正值时, 表示结构瞬变后该单元的应变能或重力势能瞬时增大(聚集), 反之则减小(释放)。图 6 所示为基于结构瞬变前、后的计算结果, 根据式(1)和式(2), 获取的覆岩应变能和重力势能场的阶变特征。



(a) 覆岩应变能场的阶变特征



(b) 覆岩重力势能场的阶变特征

图 6 结构瞬变激励下覆岩能量场的阶变特征  
Fig.6 Step change characteristics of overlaying rock energy field under transient excitation of structural

图 6 中的红色区域为对应应变能和重力势能的增大区(或聚集区), 蓝色区域为对应应变能和重力势能的减小区(或释放区)。由图中可以看出:

1) 相对于结构瞬变前, 瞬变后覆岩应变能和重力势能场的阶变特征明显, 覆岩的应变能整体增大, 仅在下位坚硬岩层破裂区的影响范围内减小; 覆岩的重力势能整体减小, 仅在下位坚硬岩层回弹区域增大。这是因为, 来压时下位坚硬岩层的瞬时破断, 会对上位坚硬岩层形成瞬时卸载, 覆岩整体下沉, 重力做功; 且覆岩下沉意味着其变形量的增大, 应变能随之

增大。

2) 覆岩应变能和重力势能聚集与释放的范围较大, 不存在单一点源的情况, 且不同区域覆岩应变能和重力势能的阶变特征存在显著差异。这是因为, 在自重应力场和采动卸荷效应影响下, 采动影响范围内的各岩层存在紧密且复杂的力学联系, 下位坚硬岩层破断诱发的结构瞬变, 导致岩层间的力学联系发生瞬变, 覆岩应变能和重力势能随之改变; 并且, 由于覆岩空间结构各子系统的结构特征与活动规律存在显著差异, 导致结构瞬变后采场空间不同区域覆岩能量的阶变特征存在差异。

3) 周期来压时, 覆岩应变能和重力势能场的阶变特征沿走向非对称, 能量的聚集与释放区域主要集中于工作面侧围岩中。这是因为, 煤岩的动、静力学响应特征与结构的瞬变特征密切相关, 周期来压时结构瞬变区域主要集中于工作面一侧, 导致覆岩应变能和重力势能的聚集与释放区域亦集中于工作面侧围岩中。

由此可见, 坚硬岩层破断诱发的矿震(或结构瞬变诱发的煤岩动力学响应), 是采场煤岩原有时空结构(或旧平衡态)被打破, 向新时空结构(或新平衡态)演化的动力学过程, 该过程中不仅有覆岩应变能的瞬时聚集与释放, 也存在覆岩重力势能的瞬时聚集与释放, 且重力势能的释放量大于应变能的释放量。

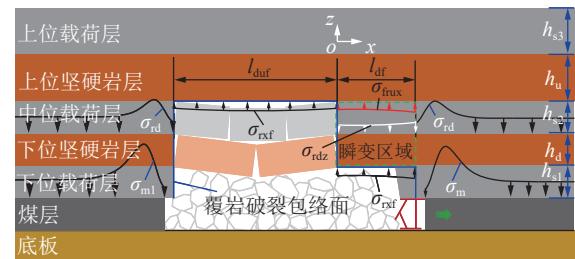
### 3 覆岩能量聚集与释放的发生机理

以下通过构建结构瞬变前、后2个稳态时的力学模型, 对比分析采场煤岩受载特征与静态力学响应的阶变特征, 研究结构瞬变激励下覆岩应变能和重力势能聚集与释放的发生机理。

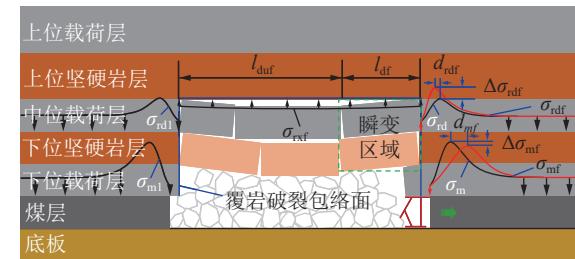
#### 3.1 煤岩受载特征阶变的发生机理

基于图1和图3所示的模拟试验结果, 构建图7所示采场煤岩受载阶变的力学模型。在以下理论分析中, 以下位坚硬岩层未发生破断时的边界为坐标原点O, 以工作面推进方向为x轴, 以铅垂方向为z轴。

图7中,  $\sigma_{rd}$ 与 $\sigma_{rdf}$ , 以及 $\sigma_m$ 与 $\sigma_{mf}$ 分别为结构瞬变前、后2个稳态时工作面前方下位坚硬岩层和煤体上的支承压力, Pa;  $\sigma_{rd1}$ 和 $\sigma_{m1}$ 为开切眼侧下位坚硬岩层和煤体上的支承压力, Pa;  $\Delta\sigma_{rdf}$ 和 $\Delta\sigma_{mf}$ 分别为下位坚硬岩层与煤体上支承压力峰值的阶变量, Pa;  $d_{rdf}$ 和 $d_{mf}$ 分别为下位坚硬岩层与煤层上支承压力峰值位置的跃迁距离, m;  $\sigma_{rxf}$ 为采空区矸石对上覆岩层的支撑载荷, Pa;  $\sigma_{rdz}$ 为结构瞬变前, 下位坚硬岩层在瞬变区域的支承压力, Pa;  $\sigma_{rux}$ 为瞬变区域中位载荷层对上位坚硬岩层的支撑载荷, Pa;  $l_{duf}$ 为初次来压步距, m;  $l_{df}$ 为周期来压步距, m;  $h_{s1}$ 、 $h_d$ 和 $h_{s2}$ 分别为下位载荷层、



(a) 结构瞬变前的受载特征



(b) 结构瞬变后的受载特征

图7 结构瞬变前、后采场煤岩受载的力学模型

Fig.7 Mechanical model of coal and rock loading in stope before and after structural transient

下位坚硬岩层和中位载荷层的厚度, m。

#### 3.1.1 下位坚硬岩层受载阶变力学分析

对于图7a所示结构瞬变前的情况, 由铅垂方向的平衡条件, 即 $\sum F_z = 0$ , 可得该状态下工作面前方下位坚硬岩层的总承载量 $F_{rd}$ 为

$$F_{rd} = \int_{l_{df}}^{l_{rdh}} \sigma_{rd} dx = \sigma_{d0} (2l_{rdh} + l_{duf} + l_{df}) - \int_{-l_{rdh}}^{-l_{duf}} \sigma_{rd1} dx - \int_{-l_{duf}}^0 \sigma_{rxf} dx - \int_0^{l_{df}} \sigma_{rdz} dx - (\gamma_d h_d + \gamma_{s2} h_{s2}) l_{duf} \quad (3)$$

式中:  $l_{rdh}$ 为下位坚硬岩层的超前采动影响范围, m;  $\sigma_{d0}$ 为原岩应力状态下作用在下位坚硬岩层上的应力(包含坚硬岩层的自重), Pa;  $\gamma_d$ 和 $\gamma_{s2}$ 为分别为下位坚硬岩层与中位载荷层的容重, N/m<sup>3</sup>。

对于图7b所示结构瞬变后的情况, 根据图1—图3所示的模拟试验结果可知, 由于周期来压时的结构瞬变区域及其诱发的动、静力学响应均集中于工作面侧的围岩中, 开切眼侧的现象不明显。因此, 可认为下位坚硬岩层在切眼侧的支承压力 $\sigma_{rd1}$ 保持不变, 而工作面侧下位坚硬岩层的支承压力由 $\sigma_{rd}$ 演变为 $\sigma_{rdf}$ 。据此, 由平衡条件可得该状态下工作面前方下位坚硬岩层的总承载量 $F_{rdf}$ 为

$$F_{rdf} = \int_{l_{df}}^{l_{rdh}} \sigma_{rdf} dx = \sigma_{d0} (2l_{rdh} + l_{df} + l_{duf}) - \int_{-l_{rdh}}^{-l_{duf}} \sigma_{rd1} dx - \int_{-l_{duf}}^{l_{df}} \sigma_{rxf} dx - (\gamma_d h_d + \gamma_{s2} h_{s2}) (l_{df} + l_{duf}) \quad (4)$$

根据式(3)和式(4), 可得相较于结构瞬变前, 瞬变后工作面前方下位坚硬岩层总承载量的阶变量

$\Delta F_{rd}$  可表示为

$$\Delta F_{rd} = F_{rd} - F_{rd} = - \int_{l_{df}}^{l_{mfh}} (\sigma_{rd} - \sigma_{rd}) dx = - (\gamma_d h_d + \gamma_{s2} h_{s2}) l_{df} + \int_0^{l_{df}} (\sigma_{rdz} - \sigma_{rxf}) dx \quad (5)$$

式(3)中, 结构瞬变前下位坚硬岩层在瞬变区域的支承压力  $\sigma_{rdz}$ , 在考虑下位坚硬岩层结构效应的情况下可表示为

$$\int_0^{l_{df}} \sigma_{rdz} dx \leq \int_0^{l_{df}} \sigma_{rux} dx + (\gamma_d h_d + \gamma_{s2} h_{s2}) l_{df} \quad (6)$$

简化起见, 令式(6)的左、右两侧项相等, 并将其代入式(5), 整理可得

$$\Delta F_{rd} = \int_0^{l_{df}} (\sigma_{rux} - \sigma_{rxf}) dx > 0 \quad (7)$$

由式(7)可知, 由于结构瞬变前中位载荷层对上覆岩层的支撑载荷  $\sigma_{rux}$  远大于砾石对上覆岩层的支撑载荷  $\sigma_{rxf}$ ; 因此, 下位坚硬岩层承载量的阶变量  $\Delta F_{rd}$  恒为正。即相较于瞬变前, 瞬变后工作面前方下位坚硬岩层的承载量瞬时增大, 这与物理、数值试验结果一致。究其原因, 是因为下位坚硬岩层破断后, 中位载荷层对上位坚硬岩层的支撑载荷  $\sigma_{rux}$  不会消失, 而是转移至工作面前方, 导致工作面前方下位坚硬岩层的承载量增大。

### 3.1.2 媒体受载阶变力学分析

对于图7a所示结构瞬变前的情况, 由铅垂方向的平衡条件, 可得该状态下工作面前方媒体的总承载量  $F_m$  为

$$F_m = \int_{l_{df}}^{l_{mfh}} \sigma_m dx = \sigma_{m0} (2l_{mfh} + l_{duf} + l_{df}) - (\gamma_d h_d + \gamma_{s2} h_{s2}) l_{duf} - \gamma_{s1} h_{s1} (l_{df} + l_{duf}) - \int_{-l_{mfh}}^{-l_{df}} \sigma_{m1} dx - \int_{-l_{df}}^{l_{df}} \sigma_{rxf} dx \quad (8)$$

式中:  $l_{mfh}$  为媒体的超前采动影响范围, m;  $\sigma_{m0}$  为原岩应力状态下作用于媒体的应力 (包含煤层自重), Pa;  $\gamma_{s1}$  为下位载荷层的容重, N/m<sup>3</sup>。

对于图7b所示结构瞬变后的情况, 根据图1—图3所示的模拟试验结果, 亦可认为开切眼侧媒体的支承压力  $\sigma_{m1}$  保持不变, 而工作面侧媒体的支承压力由  $\sigma_m$  演变为  $\sigma_{mf}$ 。据此, 由平衡条件可得该状态下工作面前方媒体的总承载量  $F_{mf}$  为

$$F_{mf} = \int_{l_{df}}^{l_{mfh}} \sigma_{mf} dx = \sigma_{m0} (2l_{mfh} + l_{duf} + l_{df}) - (\gamma_{s1} h_{s1} + \gamma_d h_d + \gamma_{s2} h_{s2}) (l_{duf} + l_{df}) - \int_{-l_{mfh}}^{-l_{df}} \sigma_{m1} dx - \int_{-l_{df}}^{l_{df}} \sigma_{rxf} dx \quad (9)$$

由式(8)与式(9), 可得相较于结构瞬变前, 瞬变

后工作面前方媒体总承载量的阶变量  $\Delta F_m$  为

$$\Delta F_m = F_{mf} - F_m = - \int_{l_{df}}^{l_{mfh}} (\sigma_m - \sigma_{mf}) dx = - (\gamma_d h_d + \gamma_{s2} h_{s2}) l_{df} < 0 \quad (10)$$

由式(10)可知, 工作面前方媒体承载量的阶变量  $\Delta F_m$  恒为负, 即相较于瞬变前, 瞬变后工作面前方媒体的承载量瞬时减小, 该结论与物理和数值模拟结果一致。究其原因, 是因为下位坚硬岩层破断后, 结构瞬变区域的岩块掉落采空区, 会对媒体形成瞬时的卸载。

### 3.2 坚硬岩层静态力学响应阶变的发生机理

在实际工程中, 采场煤岩的受载特征较复杂, 为理论求解简便, 以下将覆岩载荷简化为均布载荷。同时, 结合3.1小节的力学分析可知, 结构瞬变后, 坚硬岩层破裂面内力的瞬时卸载和覆岩载荷传递路径瞬变形成的瞬时加载, 会对采场空间不同区域的煤岩形成不同的瞬时加、卸载。对于上位坚硬岩层而言, 会在结构瞬变区域形成瞬时卸载; 对下位坚硬岩层而言, 除了会在破裂面形成瞬时卸载外, 转移的载荷亦会在其上表面形成瞬时加载。据此, 沿工作面倾向取单位宽度, 则在结构瞬变前、后的2个稳态时, 下位和上位坚硬岩层的力学模型如图8和图9所示。

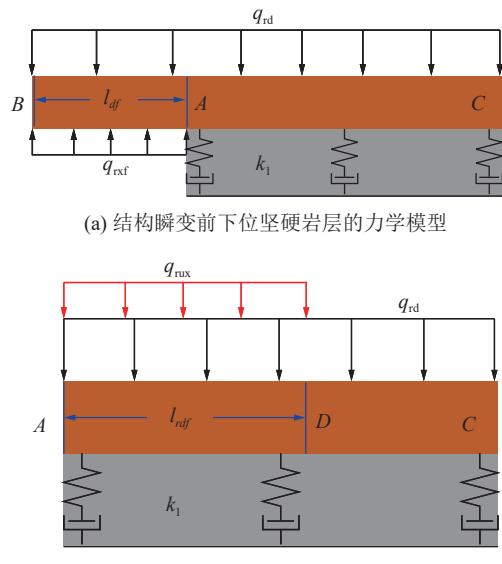


图8 结构瞬变前、后下位坚硬岩层的力学模型

Fig.8 Mechanical model of lower hard rock strata before and after structural transient

图8和图9中,  $q_{rd}$  为上覆岩层作用于下位坚硬岩层处的载荷, N/m;  $q_{rxf}$  为采空区砾石的支撑载荷, N/m;  $q_{rux}$  为下位坚硬岩层破断后转移的载荷, N/m;  $l_{df}$  为荷载  $q_{rux}$  作用范围, m;  $k_1$  下位坚硬下方煤岩的等效地基系数, N/m<sup>3</sup>。 $q_{ru}$  为上覆岩层作用于上位坚硬岩层的载

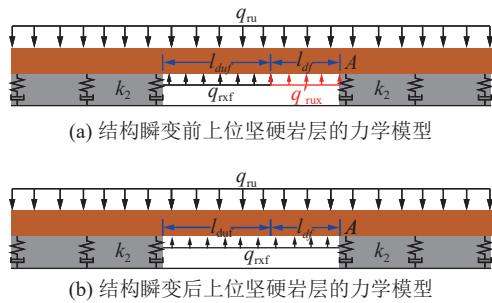


图 9 结构瞬变前、后上位坚硬岩层的力学模型

Fig.9 Mechanical model of upper hard rock strata before and after structural transient

荷, N/m;  $q'_{\text{rux}}$  为中位载荷层对上位坚硬岩层的支撑载荷, N/m;  $k_2$  上位坚硬下方煤岩的等效地基系数, N/m<sup>3</sup>。

### 3.2.1 瞬变前下位坚硬岩层的静态力学响应

对于图 8a 所示结构瞬变前下位坚硬岩层的力学模型, 可将其分为图 10 所示的 2 部分单独求解。图 10 中,  $M_{\text{Aq}}$  为 A 截面处的弯矩, N/m;  $Q_{\text{Asq}}$  为 A 截面处的剪力, N。

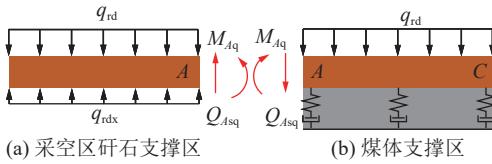


图 10 结构瞬变前下位坚硬岩层的力学模型

Fig.10 Mechanical model of lower hard rock strata before structural transient

对于图 10a 所示结构瞬变区域的岩梁部分, 其对应的挠曲线微分方程为

$$EI \frac{d^2 z_{11}(x)}{dx^2} = M_{11}(x) \quad (11)$$

式中:  $M_{11}(x)$  为结构瞬变区域岩梁的弯矩方程, 可表示为

$$M_{11}(x) = M_{\text{Aq}} + Q_{\text{Asq}}(l_{\text{df}} - x) - \frac{q_{\text{rd}} - q_{\text{rdx}}}{2}(l_{\text{df}} - x)^2 \quad (12)$$

则由式(11)和式(12), 可得其对应的挠曲线方程  $z_{11}(x)$  为

$$z_{11}(x) = A_{11} + B_{11}x - \frac{x^2}{24EI} \left[ -12M_{\text{Aq}} + 6l_{\text{df}}^2(q_{\text{rd}} - q_{\text{rdx}}) - 4l_{\text{df}}(3Q_{\text{Asq}} + q_{\text{rd}}x - q_{\text{rdx}}x) \right] - \frac{x^2}{24EI} \left[ x(4Q_{\text{Asq}} + q_{\text{rd}}x - q_{\text{rdx}}x) \right] \quad (13)$$

式中:  $A_{11}$  和  $B_{11}$  为未知常量。

对于图 10b 所示工作面前方的岩梁部分, 由弹性

地基梁理论<sup>[26]</sup>, 可得其对应的挠曲线微分方程为

$$\frac{d^4 z_{12}(x)}{dx^4} + 4\beta_1^4 z_{12}(x) = \frac{q_{\text{rd}}}{EI} \quad (14)$$

式中:  $\beta_1 = (k_1 / EI)^{1/4}$  为常量, m<sup>-1</sup>;  $E$  为弹性模量, Pa;  $I$  为惯性矩, m<sup>4</sup>。其对应的挠曲线方程  $z_{12}(x)$  可表示为

$$z_{12}(x) = e^{-\beta_1 x} (C_{12} \cos \beta_1 x + D_{12} \sin \beta_1 x) + \frac{q_{\text{rd}}}{k_1} \quad (15)$$

式中:  $C_{12}$  和  $D_{12}$  为未知常量。

同时, 由 A 截面处弯矩、剪力条件可得

$$\begin{aligned} EI \frac{d^2 z_{12}(x)}{dx^2} \bigg|_{x=l_{\text{df}}} &= M_{\text{Aq}} = \frac{q_{\text{rdx}} - q_{\text{rd}}}{2} l_{\text{df}}^2 \\ EI \frac{d^3 z_{12}(x)}{dx^3} \bigg|_{x=l_{\text{df}}} &= Q_{\text{Asq}} = (q_{\text{rd}} - q_{\text{rdx}}) l_{\text{df}} \end{aligned} \quad (16)$$

将式(15)代入式(16)中, 可得未知常量  $C_{12}$  和  $D_{12}$  为

$$\begin{aligned} C_{12} &= -\frac{e^{l_{\text{df}}\beta_1} \left[ (Q_{\text{Asq}} + M_{\text{Aq}}\beta_1) \cos l_{\text{df}}\beta_1 + M_{\text{Aq}}\beta_1 \sin l_{\text{df}}\beta_1 \right]}{2EI\beta_1^3} \\ D_{12} &= \frac{e^{l_{\text{df}}\beta_1} \left[ M_{\text{Aq}}\beta_1 \cos l_{\text{df}}\beta_1 - (Q_{\text{Asq}} + M_{\text{Aq}}\beta_1) \sin l_{\text{df}}\beta_1 \right]}{2EI\beta_1^3} \end{aligned} \quad (17)$$

对于未知常量  $A_{11}$  和  $B_{11}$ , 可根据 A 截面处的连续性条件确定。由 A 截面处的连续性条件可得

$$\begin{aligned} z_{11}l_{\text{df}} &= z_{12}l_{\text{df}} \\ z'_{11}l_{\text{df}} &= z'_{12}l_{\text{df}} \end{aligned} \quad (18)$$

下面结合上述分析, 进一步分析岩梁的弯曲应变能和外载所做的功。需说明的是, 下位坚硬岩层破断后, 图 10a 所示的破断部分 AB 掉落采空区, 其释放的重力势能和应变能对工作面前方煤岩的影响较小, 以下主要分析图 10b 所示工作面前方的岩梁部分。

由材料力学<sup>[27]</sup>可知, 梁的弯曲应变能密度可近似表示为

$$\nu_{\varepsilon} = \frac{1}{2} \sigma \varepsilon \quad (19)$$

式中:  $\nu_{\varepsilon}$  为弯曲应变能密度, J/m<sup>3</sup>;  $\sigma$  为弯曲正应力, Pa;  $\varepsilon$  为弯曲正应变。式(19)中的弯曲正应力  $\sigma$  可表示为

$$\sigma = \frac{M(x)}{I_z} z_0 \quad (20)$$

式中:  $M(x)$  为弯矩方程, N · m;  $I_z$  为横截面惯性矩, m<sup>4</sup>;  $z_0$  为距中性轴距离, m。则任意  $z_0$  处的正应变  $\varepsilon$  和曲率半径  $R$  之间的关系为

$$\varepsilon = \frac{z_0}{R} \quad (21)$$

式中:曲率半径  $R$  可表示为

$$R(x) = \frac{1}{\rho} = \frac{[1 + w'(x)]^{\frac{3}{2}}}{w''(x)} \quad (22)$$

式中:  $\rho$  为曲率半径,  $\text{m}^{-1}$ ;  $w(x)$  为岩梁的挠曲线方程,  $\text{m}$ 。

将式 (20) 和式 (21) 代入式 (19) 可得, 梁的弯曲应变能密度为

$$v_e(x) = \frac{1}{2} E z_0^2 \frac{w''(x)^2}{[1 + w'(x)^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (23)$$

则由式 (23), 可得任意  $x$  位置处单位长度岩梁上存储的弯曲应变能, 即弯曲应变能线密度  $E'_e(x)$  为

$$E'_e(x) = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \frac{1}{2} E z_0^2 \frac{w''(x)^2}{[1 + w'(x)^2]^{\frac{3}{2}}} dz \quad (24)$$

式中:  $h$  为下位坚硬岩层厚度,  $\text{m}$ 。

因此, 由式 (15) 和式 (24), 可得图 10b 所示岩梁部分的弯曲应变能线密度  $E'_{e12}(x)$  为

$$E'_{e12}(x) = \frac{Eh^3}{24} \frac{z_{12}''(x)^2}{[1 + z_{12}'(x)^2]^{\frac{3}{2}}}, l_{\text{df}} \leq x \leq \infty \quad (25)$$

同时, 由式 (15), 可得其任意  $x$  位置处单位长度岩梁上外部载荷所做功, 即外载功线密度  $E'_{G12}(x)$  可表示为

$$E'_{G12}(x) = q_{\text{rd}} z_{12}(x), l_{\text{df}} \leq x \leq \infty \quad (26)$$

由于任意岩层的外载均来自于其上覆岩层的自重载荷, 因此外部载荷所做的功也反映了上覆岩层重力所做的功。

### 3.2.2 瞬变后下位坚硬岩层的静态力学响应

对于图 8b 所示结构瞬变后下位坚硬岩层的力学模型, 亦可将其分为图 11 所示的 2 部分求解。图 11 中,  $M_{Dq}$  为  $D$  截面处的弯矩,  $\text{N} \cdot \text{m}$ ;  $Q_{Dsq}$  为  $D$  截面处的剪力,  $\text{N}$ 。

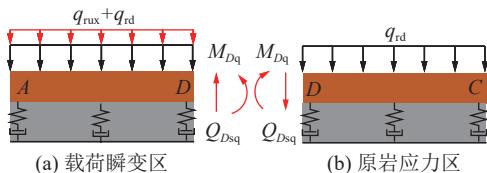


图 11 结构瞬变后下位坚硬岩层的力学模型

Fig.11 Mechanical model of lower hard rock stratum after structural transient

对于图 11a 所示的岩梁部分, 根据弹性地基理

论<sup>[26]</sup>, 可得其对应的挠曲线方程  $z_{21}(x)$  为

$$z_{21}(x) = e^{\beta_1 x} (A_{21} \cos \beta_1 x + B_{21} \sin \beta_1 x) + e^{-\beta_1 x} (C_{21} \cos \beta_1 x + D_{21} \sin \beta_1 x) + \frac{q_{\text{rd}} + q_{\text{rux}}}{k_1} \quad (27)$$

式中:  $A_{21}$ 、 $B_{21}$ 、 $C_{21}$  和  $D_{21}$  为未知常量。

同理, 对于图 11b 所示岩梁部分, 根据弹性地基理论<sup>[26]</sup>, 挠曲线方程  $z_{22}(x)$  可表示为

$$z_{22}(x) = e^{-\beta_1 x} (C_{22} \cos \beta_1 x + D_{22} \sin \beta_1 x) + \frac{q_{\text{rd}}}{k_1} \quad (28)$$

式中:  $C_{22}$  和  $D_{22}$  为未知常量。

对于式 (27) 和式 (28) 中的未知常量  $A_{21}$ 、 $B_{21}$ 、 $C_{21}$ 、 $D_{21}$ 、 $C_{22}$  和  $D_{22}$ , 可根据  $A$  截面处的边界条件和  $D$  截面处的连续性条件确定。即, 由  $A$  截面处的边界条件可得

$$z''_{21}(l_{\text{df}}) = 0 \quad z'''_{21}(l_{\text{df}}) = 0 \quad (29)$$

由  $D$  截面处的连续性条件可得

$$\begin{aligned} z_{21}(l_{\text{df}} + l_{\text{rdf}}) &= z_{22}(l_{\text{df}} + l_{\text{rdf}}) \\ z'_{21}(l_{\text{df}} + l_{\text{rdf}}) &= z'_{22}(l_{\text{df}} + l_{\text{rdf}}) \\ z''_{21}(l_{\text{df}} + l_{\text{rdf}}) &= z''_{22}(l_{\text{df}} + l_{\text{rdf}}) \\ z'''_{21}(l_{\text{df}} + l_{\text{rdf}}) &= z'''_{22}(l_{\text{df}} + l_{\text{rdf}}) \end{aligned} \quad (30)$$

由式 (24)、式 (27) 和式 (28), 可得图 11a 和 11b 所示岩梁部分的弯曲应变能线密度  $E'_{e21}(x)$  和  $E'_{e22}(x)$  分别为

$$\begin{aligned} E'_{e21}(x) &= \frac{Eh^3}{24} \frac{z_{21}''(x)^2}{[1 + z_{21}'(x)^2]^{\frac{3}{2}}}, l_{\text{df}} \leq x \leq l_{\text{rdf}} \\ E'_{e22}(x) &= \frac{Eh^3}{24} \frac{z_{22}''(x)^2}{[1 + z_{22}'(x)^2]^{\frac{3}{2}}}, l_{\text{rdf}} \leq x \leq \infty \end{aligned} \quad (31)$$

由式 (27) 和式 (28), 可得图 11a 和 11b 所示岩梁部分的外载功线密度  $E'_{G21}(x)$  和  $E'_{G22}(x)$  分别为

$$\begin{aligned} E'_{G21}(x) &= (q_{\text{rd}} + q_{\text{rux}}) z_{21}(x), l_{\text{df}} \leq x \leq l_{\text{rdf}} \\ E'_{G22}(x) &= q_{\text{rd}} z_{22}(x), l_{\text{rdf}} \leq x \leq \infty \end{aligned} \quad (32)$$

### 3.2.3 下位坚硬岩层静态力学响应的阶变机理

由上述力学分析可以看出, 受结构瞬变影响, 下位坚硬岩层在瞬变前、后的受载特征与力学响应存在显著差异。据此, 下面以瞬变前的量为基准, 分析下位坚硬岩层静态力学响应的阶变机理。

由式 (15)、式 (27) 和式 (28), 可得工作面前方下位坚硬岩层位移的阶变量  $\Delta z(x)$  为

$$\Delta z(x) = \begin{cases} z_{21}(x) - z_{12}(x), l_{\text{df}} \leq x \leq l_{\text{rdf}} \\ z_{22}(x) - z_{12}(x), l_{\text{rdf}} \leq x \leq \infty \end{cases} \quad (33)$$

由式 (25) 和式 (31), 可得工作面前方下位坚硬岩

层弯曲应变能线密度的阶变量  $\Delta E'_e(x)$  为

$$\Delta E'_e(x) = \begin{cases} E'_{e21}(x) - E'_{e12}(x), & l_{df} \leq x \leq l_{rdf} \\ E'_{e22}(x) - E'_{e12}(x), & l_{rdf} \leq x \leq \infty \end{cases} \quad (34)$$

由式(26)和式(32), 可得工作面前方下位坚硬岩层上外载功线密度的阶变量  $\Delta E'_G(x)$  为

$$\Delta E'_G(x) = \begin{cases} E'_{G21}(x) - E'_{G12}(x), & l_{df} \leq x \leq l_{rdf} \\ E'_{G22}(x) - E'_{G12}(x), & l_{rdf} \leq x \leq \infty \end{cases} \quad (35)$$

对式(34)和式(35)沿  $x$  积分, 可得工作面前方下位坚硬岩层上弯曲应变能和外载功的阶变量。同时, 对于图9所示上位坚硬岩层的情况, 可用类似方法求解, 限于篇幅, 这里不再赘述。

### 3.3 算例与分析

表1所示为模型中基本参量的取值, 将其代入式(15)、式(25)一式(28)和式(31)一式(35)中, 可得结构瞬变前、后2个稳态时下位坚硬岩层的静态力学响应及其对应的阶变特征。

表1 模型中相关物理参数

Table 1 Related physical parameters in the model

参数	数值
周期来压步距 $l_{df}/\text{m}$	30
载荷作用距离 $l_{rdf}/\text{m}$	30
初次来压步距 $l_{duf}/\text{m}$	60
下位载荷层地基系数 $k_1/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	$1.0 \times 10^5$
中位载荷层地基系数 $k_2/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	$1.0 \times 10^5$
覆岩容重 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	25
埋深 $h/\text{m}$	300
坚硬岩层厚度 $h_1/\text{m}$	10
上位坚硬岩层厚度 $h_2/\text{m}$	15
两点间距离 $d/\text{m}$	0.5
弹性模量 $E/\text{Pa}$	$8.0 \times 10^{11}$

图12所示为结构瞬变前、后2个稳态时, 下位坚硬岩层的位移、应变能等静力学响应特征及其对应的阶变规律, 由图中可以看出:

1) 相对于结构瞬变前, 瞬变后下位坚硬岩层在临空侧区域回弹、深部区域下沉, 位移阶变特征明显。这时因为, 受破裂面内力  $Q_{Asq}$  和  $M_{Aq}$  的瞬时卸载影响, 工作面前方  $30 \text{ m} < x < 70 \text{ m}$  范围内下位坚硬岩层的瞬时回弹, 临空侧最大回弹量为  $0.096 \text{ m}$ ; 而转移载荷  $q_{rux}$  的瞬时加载, 又造成回弹区域以里  $70 \text{ m} < x < 205 \text{ m}$  范围内下位坚硬岩层的瞬时下沉, 最大下沉量为  $-0.016 \text{ m}$ , 如图12a所示。结合重力势能的定义可知, 图12a中下位坚硬岩层位移的阶变特征与

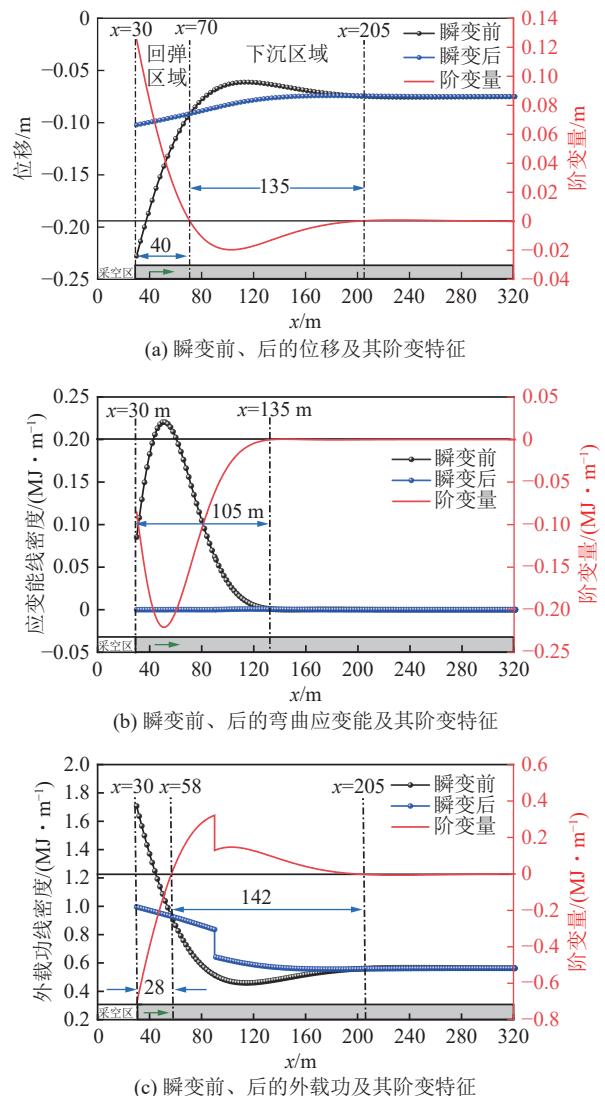


图12 瞬变前、后下位坚硬岩层的静态力学响应特征

Fig.12 Static mechanical response characteristics of lower hard rock strata before and after transient

图6b中工作面一侧下位坚硬岩层区域重力势能的阶变特征一致。

2) 相对于结构瞬变前, 瞬变后下位坚硬岩层的弯曲应变能减小(释放), 而重力势能在临空侧区域增大(聚集)、深部区域减小, 应变能和重力势能的阶变特征明显。这是因为, 受破裂面内力  $Q_{Asq}$  和  $M_{Aq}$  的瞬时卸载和临空侧区域的瞬时回弹卸荷影响, 工作面前方  $30 \text{ m} < x < 135 \text{ m}$  范围内下位坚硬岩层的弯曲应变能瞬时释放, 如图12b所示。同时, 根据重力势能的定义可知, 重力势能的阶变规律与位移的情况一致, 如图12a所示。

3) 相对于结构瞬变前, 瞬变后下位坚硬岩层上的外载功(或其上覆岩层自重载荷所做的功)在临空侧区域减小、深部区域增大, 阶变特征明显。这是因为, 虽然有转移载荷  $q_{rux}$  的瞬时加载, 但下位坚硬岩层破

断后的回弹量较大,造成工作面前方  $30 \text{ m} < x < 58 \text{ m}$  范围内下位坚硬岩层上的外载功瞬时减小。同时,转移载荷  $q_{\text{rux}}$  的瞬时加载和深部区域的瞬时下沉,又导致深部  $58 \text{ m} < x < 205 \text{ m}$  范围内下位坚硬岩层上的外载功增大,如图 12c 所示。

图 13 所示为结构瞬变前、后 2 个稳态时,上位坚硬岩层的位移、应变能等静力学响应特征及其对应的阶变规律,由图中可以看出:

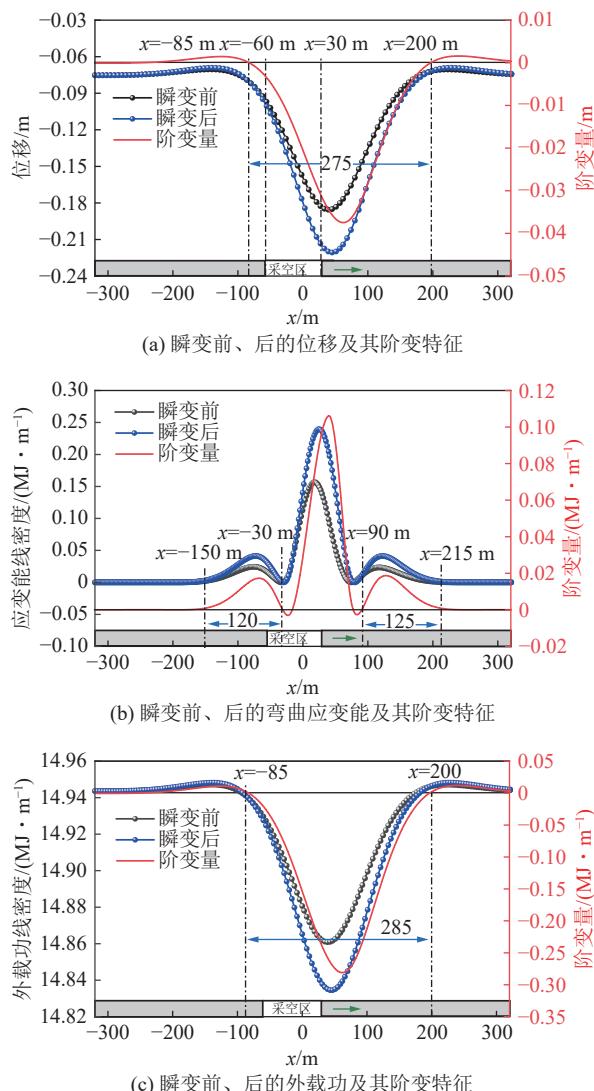


图 13 瞬变前、后上位坚硬岩层的静态力学响应特征  
Fig.13 Static mechanical response characteristics of upper hard rock strata before and after transient

1) 相对于结构瞬变前,瞬变后的上位坚硬岩层整体下沉,在深部区域略由翘曲,位移阶变特征明显,且沿走向非对称。这其中,受瞬变区域的瞬时卸荷(由  $q'_{\text{rux}}$  瞬变为  $q_{\text{rxf}}$ )影响,  $-85 \text{ m} < x < 200 \text{ m}$  范围内的上位坚硬岩层瞬时下沉,最大下沉量为  $-0.037 \text{ m}$ 。同时,由于结构瞬变区域集中于工作面侧,导致上位坚硬岩层位移的阶变特征沿走向非对称,其最大阶变区域集

中于工作面侧,如图 13a 所示,这与图 6b 中上位坚硬岩层区域重力势能的阶变特征一致。

2) 相对于结构瞬变前,瞬变后上位坚硬岩层的弯曲应变能整体增大、重力势能整体减小,阶变特征明显,且沿着走向非对称。这是因为,受瞬变区域的瞬时卸载(由  $q'_{\text{rux}}$  瞬变为  $q_{\text{rxf}}$ )影响,上位坚硬岩层的变形量和下沉量增大,弯曲应变能随之增大,而重力势能随之减小。且受结构的非对称瞬变影响,应变能和重力势能的阶变沿走向非对称,如图 13b 所示。

3) 相对于结构瞬变前,瞬变后上位坚硬岩层上的外载功整体增大,阶变特征明显,且沿走向非对称。这是因为,受瞬变区域的瞬时卸荷(由  $q'_{\text{rux}}$  瞬变为  $q_{\text{rxf}}$ )和覆岩下沉影响,  $-85 \text{ m} < x < 200 \text{ m}$  范围内上位坚硬岩层上的外载功增大,如图 13c 所示。由于上位坚硬岩层上的载荷均来自于上覆岩层的自重载荷,因此也反映了上覆岩层的自重载荷做功,重力势能释放。

可以看出,虽然文中的数值计算和理论分析是在诸多假设与简化的前提下完成的,其计算结果在定量上必然与实际工程存在差异,但在定性上却揭示了坚硬岩层破断诱发的矿震中,瞬时释放的能量包含应变能和重力势能两部分。并且,矿震发生时,并非仅是单一点源的应变能释放过程,而是覆岩应变能、重力势能和动能相互转换、聚集和释放的复杂动力学响应过程。但其本质,又是由坚硬岩层破断引起的,是采场煤岩原有时空结构被打破,向新时空结构演化的动力学过程。因此,在煤岩动力灾害的防治中,应根据实际工程背景,结合结构瞬变与煤岩动、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。

## 4 结 论

1) 坚硬岩层瞬变破断诱发的煤岩结构瞬变,会导致采场煤岩动态力学响应的发生和静态力学响应的阶变,且煤岩的动、静力学响应特征与覆岩空间结构的瞬变特征密切相关。周期来压时,下位坚硬岩层的瞬时破断导致其诱发的力学响应主要集中于工作面一侧的围岩中,切眼侧的现象不明显。

2) 结构瞬变前、后,采场煤岩经历了由原有的时空结构被打破,向新时空结构演化的动力学过程。在此动态演化过程中,不存在单一点源的应变能释放,而是一个覆岩应变能、重力势能和动能的相互转换、聚集与释放的复杂动力学过程,且其耗散的能量包含应变能和重力势能 2 部分。

3) 结构瞬变形成的瞬时卸载与载荷转移,会对采

场空间不同区域的煤岩形成不同的瞬时加、卸载,造成采场空间不同区域覆岩应变能和重力势能的聚集与释放规律存在差异。整体而言,覆岩应变能的释放范围较小,主要聚集于瞬时卸载区;而覆岩重力势能则整体处于释放状态,仅在下位坚硬岩层回弹区域略有增大。

4)下位坚硬岩层破裂面内力的瞬时卸载和转移载荷的瞬时加载,造成其临空侧区域的瞬时回弹和深部区域的瞬时下沉,导致下位坚硬岩层的弯曲应变能瞬时释放,而重力势能的聚集与释放规律与其运动规律一致。与此同时,上位坚硬岩层在瞬变区域的瞬时卸载,会造成其整体下沉、变形量增大,覆岩重力势能释放,而应变能增大。

### 参考文献(References):

- [1] 潘一山,肖永惠,罗浩,等.冲击地压矿井安全性研究[J].煤炭学报,2023,48(5):1846-1860.  
PAN Yishan, XIAO Yonghui, LUO Hao, et al. Study on safety of rockburst mine[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 1846-1860.
- [2] 李楠,李保林,陈栋,等.冲击破坏过程微震波形多重分形及其时变响应特征[J].中国矿业大学学报,2017,46(5):1007-1013.  
LI Nan, LI Baolin, CHEN Dong, et al. Multi-fractaland time-varying response characteristics of microseismic waves during the rockburst process[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(5): 1007-1013.
- [3] 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.
- [4] 齐庆新,王守光,李海涛,等.冲击地压应力流理论及其数值实现[J].煤炭学报,2022,47(1):172-179.  
QI Qingxin, WANG Shouguang, LI Haitao, et al. Stress flow theory for coal bump and its numerical implementation[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 172-179.
- [5] 姚精明,何富连,徐军,等.冲击地压的能量机理及其应用[J].中南大学学报(自然科学版),2009,40(3):808-813.  
YAO Jingming, HE Fulian, XU Jun, et al. Energy mechanism of rock burst and its application[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2009, 40(3): 808-813.
- [6] 钱鸣高,缪协兴,何富连.采场“砌体梁”结构的关键块分析[J].煤炭学报,1994,19(6):557-563.  
QIAN Minggao, MIAO Xiexing, HE Fulian. Analysis of key block in the structure of voussoir beam in longwall mining[J]. Journal of China Coal Society, 1994, 19(6): 557-563.
- [7] 伍永平,解盘石,王红伟,等.大倾角煤层开采覆岩空间倾斜砌体结构[J].煤炭学报,2010,35(8):1252-1256.  
WU Yongping, XIE Panshi, WANG Hongwei, et al. Incline masonry structure around the coal face of steeply dipping seam mining[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(8): 1252-1256.
- [8] 潘俊锋,刘少虹,高家明,等.深部巷道冲击地压动静载分源防治理论与技术[J].煤炭学报,2020,45(5):1607-1613.  
PAN Junfeng, LIU Shaohong, GAO Jiaming, et al. Prevention theory and technology of rock burst with distinguish dynamic and static load sources in deep mine roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5): 1607-1613.
- [9] 许家林,朱卫兵,王晓振,等.浅埋煤层覆岩关键层结构分类[J].煤炭学报,2009,34(7):865-870.  
XU Jialin, ZHU Weibing, WANG Xiaozhen, et al. Classification of key strata structure of overlying strata in shallow coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(7): 865-870.
- [10] 崔峰,贾冲,来兴平,等.近距离强冲击倾向性煤层上行开采覆岩结构演化特征及其稳定性研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(3):507-521.  
CUI Feng, JIA Chong, LAI Xingping, et al. Study on the evolution characteristics and stability of overburden structure in upward mining of short distance coal seams with strong burst tendency[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(3): 507-521.
- [11] 朱卫兵,于斌.大空间采场远场关键层破断形式及其对矿压显现的影响[J].煤炭科学技术,2018,46(1):99-104.  
ZHU Weibing, YU Bin. Breakage form and its effect on strata behavior of far field key stratum in large space stope[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(1): 99-104.
- [12] 宋振骐,文志杰,蒋宇静,等.采动力学与岩层控制关键理论及工程应用[J].煤炭学报,2024,49(1):16-35.  
SONG Zhenqi, WEN Zhijie, JIANG Yujing, et al. Key theory of mining dynamics and strata control and its engineering application [J]. China Industrial Economics, 2024, 49(1): 16-35.
- [13] 朱志洁,张宏伟,陈蓥,等.综放开采覆岩大结构作用下的冲击地压形成机制[J].煤炭科学技术,2018,46(5):54-59.  
ZHU Zhijie, ZHANG Hongwei, CHEN Ying, et al. Mechanism study of rock burst induced by overburden large structural action of fully-mechanized caving mining[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(5): 54-59.
- [14] 张晨阳,潘俊锋,夏永学,等.底煤厚度对巷道底板冲击地压的影响机制及其应用分析[J].煤炭学报,2020,45(12):3984-3994.  
ZHANG Chenyang, PAN Junfeng, XIA Yongxue, et al. Influence mechanism and application analysis of bottom coal layer thickness on floor rock burst[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(12): 3984-3994.
- [15] 罗生虎,王同,伍永平,等.大倾角煤层群长壁开采承载拱与间隔岩层采动应力演化特征[J].煤炭学报,2023,48(2):551-562.  
LUO Shenghu, WANG Tong, WU Yongping, et al. Evolution characteristics of mining stress of bearing arch and interval strata in longwall mining of steeply dipping coal seam groups[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 551-562.
- [16] 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.  
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.

- al Engineering, 2021, 43(10): 1842–1850.
- [17] 蓝航, 杜涛涛, 彭永伟, 等. 浅埋深回采工作面冲击地压发生机理及防治[J]. 煤炭学报, 2012, 37(10): 1618–1623.  
LAN Hang, DU Taotao, PENG Yongwei, et al. Rock-burst mechanism and prevention in working face of shallow buried coal-seam[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(10): 1618–1623.
- [18] 李振雷, 何学秋, 窦林名. 综放覆岩破断诱发冲击地压的防治方法与实践[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(1): 162–171.  
LI Zhenlei, HE Xueqiu, DOU Linming. Control measures and practice for rock burst induced by overburden fracture in top-coal caving mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(1): 162–171.
- [19] 贺虎, 窦林名, 巩思园, 等. 覆岩关键层运动诱发冲击的规律研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(8): 1260–1265.  
HE Hu, DOU Linming, GONG Siyuan, et al. Rock burst rules induced by cracking of overlying key stratum[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(8): 1260–1265.
- [20] 刘晓辉, 薛洋, 郑钰, 等. 冲击荷载下煤岩破碎过程能量释放研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(S2): 3201–3211.  
LIU Xiaohui, XUE Yang, ZHENG Yu, et al. Study on energy release during coal and rock crushing under impact load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(S2): 3201–3211.
- [21] 姜福兴. 采场覆岩空间结构观点及其应用研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(1): 30–33.  
JIANG Fuxing. Viewpoint of spatial structures of overlying strata and its application in coal mine[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2006, 23(1): 30–33.
- [22] 朱建波, 马斌文, 谢和平, 等. 煤矿矿震与冲击地压的区别与联系及矿震扰动诱发初探[J]. 煤炭学报, 2022, 47(9): 3396–3409.  
ZHU Jianbo, MA Binwen, XIE Heping, et al. Differences and connections between mining seismicity and coal bursts in coal mines and preliminary study on coal bursts induced by mining seismicity [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(9): 3396–3409.
- [23] 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.
- [24] 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 response of coal and rock in stope under transient excitation of structure[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(12): 4406–4416.
- [25] 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, (S1): 60–64.  
QIU Zehua, SHI Yaolin. Observation example of remote stress step change caused by earthquake[J]. Scientia Sinica (Terra), 2003(S1): 60–64.
- [26] 龙驭球. 弹性地基梁的计算[M]. 北京: 人民教育出版社, 1981.
- [27] 张涛然, 晁晓洁, 郭丽红. 材料力学[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2018.