



煤炭学报  
Journal of China Coal Society  
ISSN 0253-9993, CN 11-2190/TD

## 《煤炭学报》网络首发论文

题目： 基于煤岩系统刚度变化的冲击地压全过程探讨  
作者： 蔡武, 刘爱鑫, 朱旭明, 袁莎莎, 窦林名  
DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2025.0191  
网络首发日期: 2025-08-12  
引用格式: 蔡武, 刘爱鑫, 朱旭明, 袁莎莎, 窦林名. 基于煤岩系统刚度变化的冲击地压全过程探讨[J/OL]. 煤炭学报. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2025.0191>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

doi:10.13225/j.cnki.jccs.2025.0191

# 基于煤岩系统刚度变化的冲击地压全过程探讨

蔡武<sup>1,2</sup>, 刘爱鑫<sup>1,2</sup>, 朱旭明<sup>1,2</sup>, 袁莎莎<sup>2</sup>, 窦林名<sup>2</sup>

(1.中国矿业大学 煤炭精细勘探与智能开发全国重点实验室, 江苏 徐州 221116; 2.中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** 煤矿冲击地压因其发生过程的复杂性、突发性、多样性等特点, 其监测预警与防治一直是困扰学术界及采矿界的世界性难题, 该难题涉及的冲击地压全过程(孕育-启动-显现-结束)机理尚未得到有效揭示。本文在总结采场应力环境和动静载叠加诱冲理论的基础上, 建立了顶板-煤层-底板冲击系统模型, 探讨了基于煤岩系统刚度变化的冲击地压全过程解释, 包括基于刚度变化的位移突变和能量释放两个准则, 以及一种广义刚度启动条件和塑性变形与载荷增量两种动载诱冲效应; 开展了组合煤岩试样的真三轴准静载、循环加卸载和动静组合实验, 分别验证了刚度启动静载条件、塑性变形型和载荷增量型动载诱冲效应。结果表明, 刚度启动静载条件是煤体屈服刚度大于顶底板围岩刚度, 叠加动载作用下的广义刚度启动条件等价于降低围岩刚度, 由此推导出的位移突变和能量释放准则可以预测冲击地压的时空位置; 塑性变形型动载诱冲效应的本质是峰前累积的永久塑性变形超过准静载条件下的冲击启动临界应变值; 载荷增量型动载诱冲效应的本质是输入的动载能量大于峰前应力状态发展至峰后冲击启动时所需的耗散能, 且存在剩余弹性能释放; 冲击地压定义的科学内涵包括冲击载体、物理参量和宏观现象三个特征, 其中, 刚度变化响应、表征和匹配是指导冲击地压监测与防治的关键。煤岩系统刚度变化解释了顶底板围岩加载系统与受载煤体的相对刚度变化对冲击地压的影响, 以及由此引发的能量动态平衡问题, 综合了动静载叠加、强度、刚度、能量、冲击倾向性等理论的核心思想, 可为揭示冲击地压全过程机理和能量释放规律提供新的视角。

**关键词:** 冲击地压; 刚度变化; 位移突变; 能量释放; 真三轴实验

中图分类号: TD 353

文献标识码: A

## An investigation into coal burst process based on the stiffness variation of coal-rock system

CAI Wu<sup>1,2</sup>, LIU Aixin<sup>1,2</sup>, ZHU Xuming<sup>1,2</sup>, YUAN Shasha<sup>2</sup>, DOU Linming<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory for Fine Exploration and Intelligent Development of Coal Resources, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** The monitoring, early warning, and prevention of coal burst in underground coal mines have remained a worldwide challenge perplexing both academia and mining industry, due to its inherent characteristics of process complexity, sudden occurrence, and diverse manifestation patterns. The underlying mechanisms governing the entire process of coal burst evolution (preparation-initiation-manifestation-termination) have not yet been effectively elucidated. Based on summarizing the mining-induced stress environment and the dynamic-static load superposition theory for coal burst initiation, a roof-coal seam-floor burst system model is established, and the full coal burst process is discussed based on the stiffness variation of coal-rock system, including two criteria of displacement mutation and energy release based on stiffness variation, as well as a generalized stiffness initiation condition and two dynamic load-induced coal burst effects (plastic deformation and load increment). True triaxial

基金项目: 国家自然科学基金(52374101, W2421032, 52227901); 江苏省国际科技合作/港澳台科技合作计划(重点国别产业技术研发合作项目)(BZ2024024); 国家重点研发计划课题(2022YFC3004603); 中国矿业大学研究生创新计划项目资助(2023WLJCRZL043)。

作者简介(通讯作者): 蔡武(1988-), 男, 湖南桃江人, 博士, 研究员/博士生导师。E-mail: caiwu@cumt.edu.cn

quasi-static loading, cyclic loading-unloading, and combined dynamic-static loading experiments on composite coal-rock specimens were carried out, which respectively validate the static load-induced coal burst condition of stiffness initiation and the dynamic load-induced coal burst effects of plastic deformation and load increment. The results indicate that coal burst will be induced by static loading while the yield stiffness of the coal is greater than the loading stiffness of surrounding rock, including roof and floor. The generalized stiffness initiation condition under superimposed dynamic loading is equivalent to the stiffness reduction of surrounding rock. As a result, the displacement mutation and energy release criteria can predict the spatiotemporal positions of coal burst occurrence. The essence of the plastic deformation-type induced coal burst effect is that the pre-peak accumulated permanent plastic deformation exceeds the critical strain value for the coal burst initiation under quasi-static loading condition. The essence of the load increment-type induced coal burst effect is that the input dynamic loading energy is greater than the dissipation energy required for the stress-strain development from the pre-peak state to the post-peak coal burst initiation. The scientific connotation of the coal burst definition includes three characteristics with initiation object, physical parameters, and macroscopic phenomena. Amongst, stiffness variation response, characterization and matching are the keys to guiding coal burst monitoring and prevention. The stiffness variation of coal-rock systems explains the influence of relative stiffness variations between the roof-floor surrounding rock loading system and the loaded coal on coal burst process, as well as the consequent dynamic energy equilibrium issues. It has integrated the core concepts of coal burst theories of dynamic-static load superposition, strength, stiffness, energy, and bursting liability, which could provide references for revealing the full-process mechanisms and energy release patterns of coal bursts.

**Key words:** Coal burst; stiffness variation; displacement mutation; energy release; true-triaxial experiment

## 0 引言

冲击地压因其发生过程的复杂性、突发性、多样性等特点,其监测预警与防治一直是困扰学术界及采矿界的世界性难题<sup>[1-4]</sup>。冲击地压全过程(孕育-启动-显现-结束)机理作为解决该难题的关键尚未得到有效揭示,如煤岩体物性和结构特征如何影响应力初始状态、扰动孕育阶段应力源头如何演化、失稳启动阶段应力源头有何特征等。齐庆新等<sup>[5]</sup>基于冲击地压源头防治思想,首次提出了上述冲击地压从孕灾到成灾的全过程概念,并指出突破冲击地压全过程再现技术难题是联通冲击地压基础研究与工程实践的关键所在。当前,冲击地压理论的发展主要基于强度<sup>[6]</sup>、刚度<sup>[7,8]</sup>、能量<sup>[9-11]</sup>、冲击倾向性<sup>[12-14]</sup>、三准则<sup>[15]</sup>、变形失稳<sup>[16]</sup>等经典理论的完善与扩充,如三因素理论<sup>[17]</sup>、扰动响应失稳理论<sup>[18]</sup>、动静载叠加诱冲理论<sup>[19,20]</sup>、冲击启动理论<sup>[21]</sup>、蠕变失稳理论<sup>[22]</sup>等。

强度理论认为受载煤体达到极限强度时便会开始破坏。该理论仅关注应力是否超过煤体强度,但未解释峰后失稳,忽略了煤岩系统的刚度匹配问题。因此,强度理论只解释了煤体为什么破坏,但煤体破坏并不一定会引起冲击地压,冲击地压还与煤体的瞬间破坏有关,而刚度理论补充了强度失效后的系统行为。

Cook 等<sup>[23]</sup>基于能量的平衡与转化思想,提出

了能量理论,认为当释放能量大于消耗能量时,剩余能量在短时间内大量释放便会引起冲击地压。随着压力试验机的出现, Petukhov<sup>[24]</sup>及 Cook 等<sup>[25]</sup>人发现,岩石试件在刚度较小的柔性试验机上会发生动态破坏,这也能用来说明冲击地压,进而形成了刚度理论。该理论认为,如果试验机的刚度小于煤体峰后刚度,则在煤体屈服破坏期间试验机-煤体系统释放的能量将会大于煤体可以吸收的能量,导致冲击地压发生。Salamon 等<sup>[7]</sup>于 1970 年首次提出局部矿井刚度,该理论与刚度理论基本一致,只是研究对象改为了不同开采位置下的煤层及其顶底板的相应刚度,即当加载系统(顶底板围岩)的刚度小于负载系统刚度(煤体),便会导导致不稳定破坏。

综上所述,能量理论仅关注能量积累-释放平衡过程,未明确刚度在能量分配中的作用,而刚度理论揭示了煤岩系统失稳的力学本质(即 1.3 节揭示的位移突变准则)和能量释放的触发机制(即 1.4 节揭示的能量释放准则),但刚度理论仍忽略了矿震、爆破振动等动载扰动的影响。

根据长期理论研究、实验室实验、现场试验,一致认为冲击地压的发生必须要满足强度、能量和冲击倾向性三个条件。其中,强度条件认为煤岩体上所受的应力要超过煤岩体强度,煤岩体才会发生破坏;能量条件认为煤岩体中聚集能量的释放速度大于消耗能量的速度;冲击倾向性条件表示煤岩体具有发生脆性破坏的能力。以上三个条件均为必要

条件，即煤岩体所受的应力没有超过煤岩体的强度，煤岩系统就不会发生破坏，就不会出现冲击地压；煤岩系统中虽然能够聚集能量，但耗散的速度大于聚集的速度，就不会突然释放，也不会发生冲击地压；如果煤岩系统没有突然破坏的能力，就不会发生冲击地压。

综合研究发现，冲击地压机理研究可归纳为如下共识：冲击地压孕育与发生过程是动静载叠加作用的结果，是煤岩体能量聚集、耗散与释放的结果，也是应力-渗流-裂隙多场孕灾环境与工程扰动耦合致灾的结果。其中，动静载叠加诱冲理论不仅从广义上涵盖了强度、刚度与能量理论要义，还综合考虑了采动静载应力和动载扰动叠加的影响。因此，本文在动静载叠加理论的基础上，通过建立顶板-煤层-底板冲击载体系统模型，发展冲击地压孕育-启动-显现-结束全过程解释，包括基于刚度变化的位移突变和能量释放两个准则，以及一种广义刚度启动条件和两种动载诱冲效应，试图为冲击地压全过程提供一种新的综合解释。

## 1 冲击地压全过程探讨

### 1.1 冲击地压全过程应力环境

地下煤体开挖引起应力场扰动，横向上在工作面前方及巷道周围煤体中形成超过原岩应力的应力集中区，即支承压力区。同时开挖引起覆岩破坏及运移，在纵向上形成垮落带、裂隙带、弯曲下沉带，并对应于横向支承压力区的峰后破坏区 DE、峰前塑性区 BD、弹性区 AB，如图 1 所示<sup>[26-28]</sup>。

采场周围应力状态受煤层埋深、地质不连续体和采矿活动的影响，与顶底板岩层结构的稳定性密切相关。在深部高地应力条件下，原岩处于准静水压力状态，因此，深部工作面前方煤岩体的应力环境改变起始于准静水压力状态，随着工作面的推进，煤层中的支承压力（即垂向应力）由三向等压的静水压力状态逐渐升高至峰值应力，而后伴随煤体的破坏进入卸压状态，垂向应力逐渐降低直至煤壁处的单向残余强度状态，其真实应力路径如图 1 中的 GABDE 路径所示；另一方面，水平应力则由三向等压，静水压力状态逐渐减低至 0，即卸压，真实

应力路径如图 1 中的 GF 路径所示。

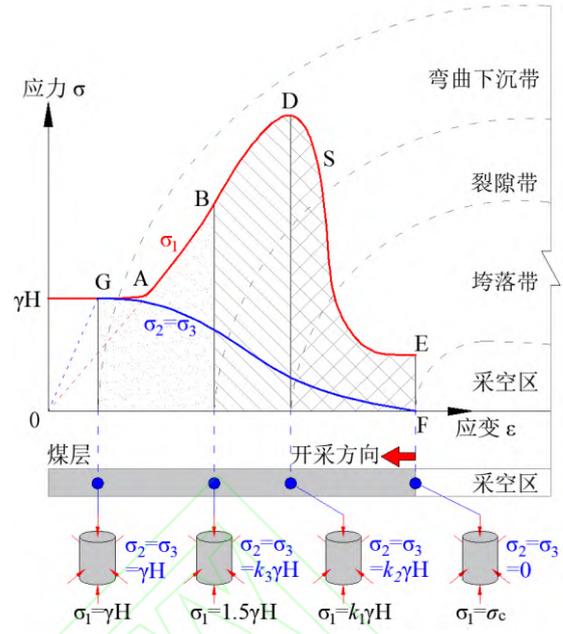


图 1 采场应力环境与覆岩结构对应关系

Fig. 1 Correlation between mining-induced stress field and overlying strata structural configuration

井下震动响应对应的割煤、移架、机械振动、爆破、顶底板破断、煤体及顶板结构失稳、煤炮、断层滑移等采掘扰动动载与采场及巷道周围煤体的支承压力（静载）叠加（图 2），一旦超过煤体的承载极限便容易产生冲击地压动力灾害。即冲击地压的动静载叠加诱发机理可抽象为<sup>[20]</sup>：

$$\sigma_s + \sigma_d \geq \sigma_{bmin} \quad (1)$$

式中， $\sigma_s$  为采动煤岩体静载应力、 $\sigma_d$  为采掘扰动动载、 $\sigma_{bmin}$  为启动冲击地压的临界应力。其能量角度解释为煤体-围岩系统在力学平衡状态被打破时，释放能量大于破坏过程消耗能量状态下的动力现象：

$$\frac{dU_R}{dt} + \frac{dU_C}{dt} + \frac{dU_S}{dt} \geq \frac{dU_b}{dt} \quad (2)$$

式中， $U_R$  为围岩中储存的能量； $U_C$  为煤体中储存的能量； $U_S$  为动载输入的能量； $U_b$  为煤岩体破坏过程消耗的能量。上述冲击地压启动的力能准则综合考虑了采动静载应力和动载扰动叠加的影响，但其内在的力能驱动本质仍需进一步明确。

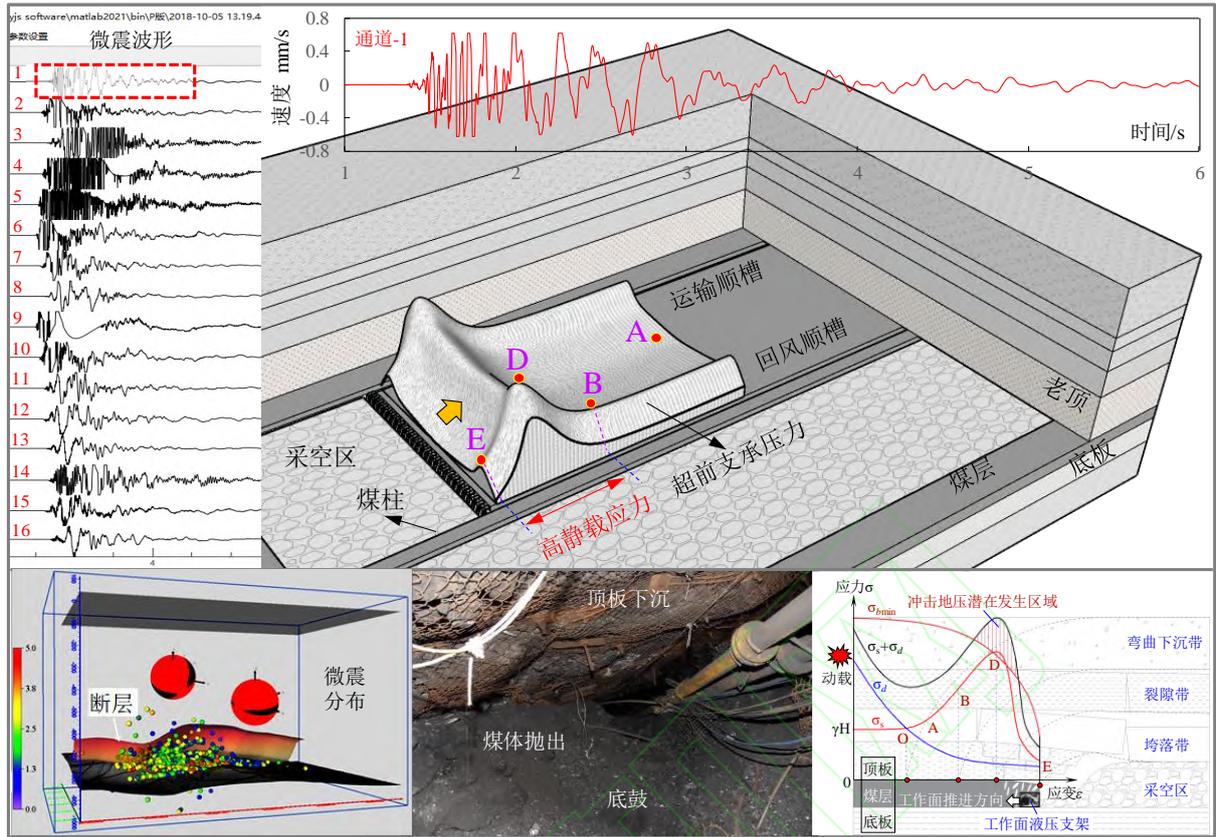


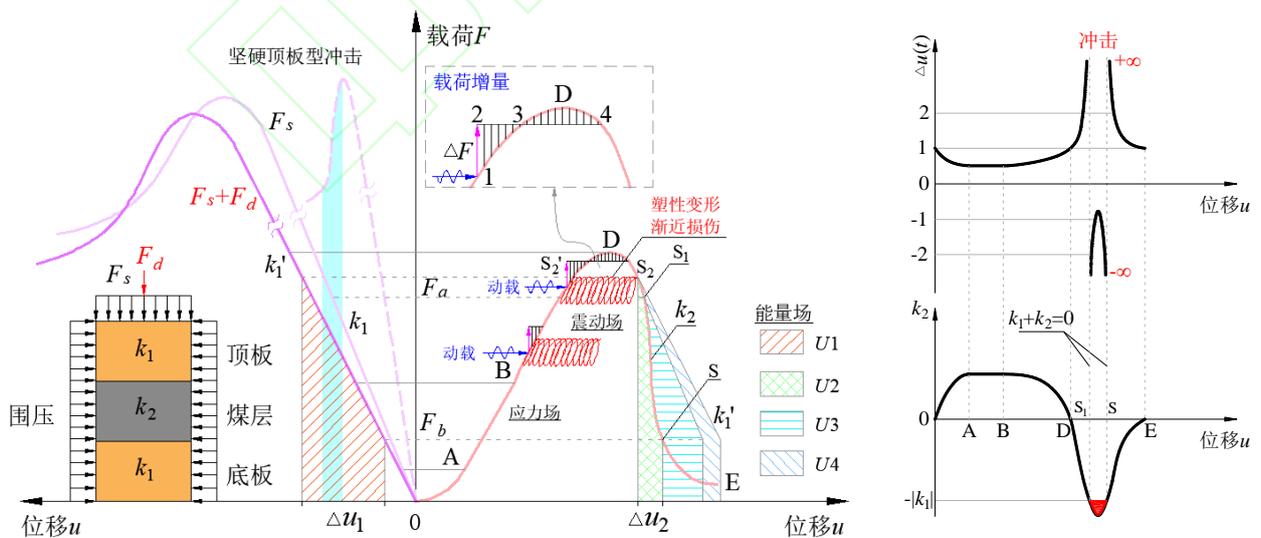
图2 采场动静应力环境与动静载叠加诱发冲击地压机理示意图<sup>[29]</sup>

Fig. 2 Coal burst triggering mechanism under coupled static-dynamic stress environments and superimposed loading in mining stope

### 1.2 顶板-煤层-底板冲击系统模型

根据如图2所示的采场动静应力环境与动静载叠加诱发冲击地压机理模型，建立如图3(a)所示的顶板-煤层-底板冲击载体系统模型<sup>[30]</sup>。随着煤层采掘推进，工作面前方煤体的受载载荷-位移关系可由图中右边曲线描述；将顶板与底板视为一完整围

岩，且强度远大于煤层，其受载载荷-位移关系可由图中左边曲线表述。图中， $U_1$  为冲击过程中围岩释放弹性能； $U_2$  为冲击过程中煤层对围岩释放弹性能的消耗； $U_3$  为冲击过程中系统整体释放的剩余弹性能； $U_4$  为额外输入能量。



(a) 顶板-煤层-底板冲击载体系统模型

(b) 煤岩系统刚度变化驱动的冲击地压全过程演化

图3 煤岩系统刚度变化驱动的冲击地压全过程模型及机理

Fig. 3 Full process model and mechanism of coal burst driven by stiffness variation of coal rock system

根据顶板-煤层-底板冲击载体系统模型的载荷-位移曲线，对于平衡状态，满足条件：

$$f(u_1) = f(u_2) \quad (3)$$

$$u_1 = u - u_2 \quad (4)$$

上述两式两边分别对时间求导，并整理后可得：

$$\Delta u(t) = \frac{u_2'(t)}{u'(t)} = \frac{1}{1 + \frac{k_2}{k_1}} \quad (5)$$

式中， $u$ 为系统总位移； $u_1$ 为围岩位移； $u_2$ 为煤体位移； $f(u_1)$ 、 $f(u_2)$ 分别为围岩、煤体的载荷-位移特性曲线； $\Delta u(t)$ 表示煤体位移速率（ $u_2'(t)$ ）与系统总位移速率（ $u'(t)$ ）的比值； $k_1=df(u_1)/du_1$ 为围岩刚度， $k_2=df(u_2)/du_2$ 为煤体刚度，其中，峰前加载刚度为正，峰后屈服刚度为负。

整个顶板-煤层-底板冲击载体系统灾变破坏过程的微震-载荷-变形能转换关系可由下式表示：

$$\begin{aligned} U_3 = U_1 - U_2 &\approx -\frac{k_1 + k_2}{2k_1} \cdot (F_a + F_b) \cdot \Delta u_2 \\ &= \frac{k_1 + k_2}{2k_1 \cdot k_2} \cdot (F_a^2 - F_b^2) \end{aligned} \quad (6)$$

式中， $F_a$ 、 $F_b$ 分别为冲击前后的载荷值。

根据图 3 (a) 中的载荷-位移曲线，可获得参量 $\Delta u(t)$ 随刚度变化的演化曲线（图 3 (b)），可知顶板-煤层-底板冲击载体系统的刚度变化不仅体现了煤层与围岩系统的初始刚度关系，还强调了刚度在加载、损伤、破坏等不同阶段的动态变化特征，可为揭示冲击地压的全过程机理提供新的视角。

进一步结合式 (5)，可获得冲击地压孕育-启动-显现-结束全过程解释如下：

(1) AB 阶段： $k_1$  和  $k_2$  均大于 0、且保持不变，此时  $k_1+k_2>0$ ； $\Delta u(t)$  也保持不变，顶底板围岩和煤层均处于弹性储能阶段，属于冲击孕育阶段。

(2) BD 阶段： $k_2$  逐渐减小至 0， $k_1$  保持不变，此时  $k_1+k_2>0$ ； $\Delta u(t)$  随着  $k_2/k_1$  比值的减小而增加，顶底板围岩继续积聚弹性能，但煤体开始产生塑性变形，该阶段煤体中的微裂隙开始萌生、孕育和扩展，对应产生微震/声发射现象，属于冲击前兆阶段。

(3) DS<sub>1</sub> 阶段： $k_2$  小于 0、且逐渐减小， $k_1$  保持不变，此时  $k_1+k_2 \geq 0$ 、 $U_3 \leq 0$ ；当  $k_1+k_2=0$  时，对应图中  $S_1$  点，此时  $\Delta u(t) \rightarrow \infty$ ，对应冲击启动时刻。

(4) S<sub>1</sub>E 阶段： $k_2$  小于 0、且先减小后增大， $k_1$  保持不变，状态由  $k_1+k_2<0$ 、 $U_3>0$  过渡到  $k_1+k_2>0$ 、 $U_3<0$ ； $\Delta u(t)$  随着  $k_2/k_1$  比值的先减后增而先增后减，属于冲击显现至结束阶段。

当顶板-煤层-底板冲击系统叠加动载（ $\sigma_d$ ）时，相比于准静载作用下释放的冲击能量  $U_3$ ，其能量释放将增加  $U_4$ ，此时等价于围岩刚度从  $k_1$  降低至  $k_1'$ ，同时冲击启动位置从  $S_1$  提前至  $S_2$ 。因此，动静载叠加诱发冲击地压的启动条件包括静载作用下

$k_1+k_2=0$  和动静载叠加作用下  $k_1'+k_2=0$ ，即称之为冲击地压的广义刚度启动条件。

对于矿震，尤其是远场震源动载，其作用模式相当于循环加卸载，由于煤岩材料的非均质性本质，矿震动载引起的每次加卸载将使煤体产生永久变形，此时当动载作用时间足够长时，对于应力状态处于  $S_2'$  的煤体在叠加动载作用下，可启动类似准静载作用下位于  $S_2$  应力状态下的冲击条件。换句话说，循环加卸载作用下，煤体内部损伤累积，刚度非线性衰减，形成“刚度弱化区”。该类动载诱冲效应称之为疲劳动载型塑性变形诱冲效应。

对于工作面断层滑移、顶板破断等产生的瞬间动载，其作用模式相当于施加一瞬间载荷增量  $\Delta F$ ，当面积  $S_{123}>S_{3D4}$  时，对于应力状态处于峰前 1 处的煤体在叠加动载作用下，可启动类似准静载作用下位于峰后 4 处应力状态的冲击条件<sup>[31]</sup>。该类动载诱冲效应称为冲击动载型载荷增量诱冲效应。

作为普适性分析，绘制出刚度变化全域的位移速率比 $\Delta u(t)$ 分布相图，如图 4 所示。由图可知，受载组合煤岩体的任一过程状态均可在该相图中进行表示：第一象限表示煤岩均处于峰前加载阶段；第二象限表示煤体处于峰前加载阶段、岩体处于峰后屈服阶段，即岩体强度小于煤体强度的组合，冲击破坏发生在岩体，属于岩爆研究的范畴；第三象限表示煤岩均已处于峰后屈服阶段，属于煤岩体处于完全破坏状态；第四象限表示煤体处于峰后屈服阶段、岩体处于峰前加载阶段。其中，煤体灾变冲击全过程（OABDS<sub>1</sub>SE）位于第一、第四象限。值得注意的是，理想静载作用下的 OA 与 BD、DS<sub>1</sub> 与 SE 直线应重合，即岩体围岩刚度  $k_1$  保持不变；由于动载叠加作用等效于降低围岩刚度，此处采取了围岩降刚度处理。

根据定义可知，刚度是指材料在受力时抵抗弹性变形的能力（载荷-位移特性），弹性模量反映的是材料在受力时产生弹性变形的能力（应力-应变特性）。两者之间的关系为  $E=2G(1+\nu)$ ，其中  $E$  代表弹性模量， $G$  为刚度， $\nu$  是泊松比。因此，刚度通常采用弹性模量来衡量，载荷-位移通常采用应力-应变替代。为便于习惯性分析，下文均采用弹性模型和应力-应变对刚度和载荷-位移进行替代。

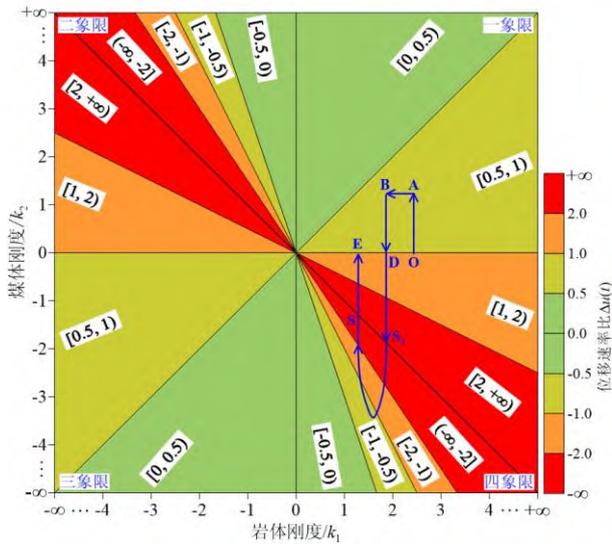


图 4 基于刚度变化相图的冲击地压全过程解释

Fig. 4 Whole process interpretation of coal burst based on phase diagram of stiffness variation

### 1.3 基于刚度变化的位移突变准则

当  $k_1+k_2=0$  时,  $\Delta u(t) \rightarrow \infty$ , 对应冲击地压启动时刻, 即为冲击地压发生的位移突变准则。

为验证该突变准则, 基于式 (5) 计算仿真了刚度变化条件下  $\Delta u(t)$  的演化过程, 如图 5 所示。设计三种组合煤岩, 即  $k_1$  分别为 200、800、2000, 其中, 全应力应变曲线为某一真实煤体受载时的应力应变演化过程。 $k_1$  值越小表示顶底板围岩整体刚

度越低, 反之则越大。由图可知, 在峰前塑性阶段的应力降位置和峰后多个位置均出现了位移突变现象, 即  $\Delta u(t)$  瞬间增大、甚至趋于无穷大, 同时能量释放也很明显, 但最大能量释放(主震)位置位于峰后对应  $k_1+k_2=0$  的位置; 顶底板围岩刚度越低, 越容易触发冲击, 且冲击发生时破坏更为剧烈; 对于坚硬顶板(刚度越大), 煤体破坏时顶板释放能量越少, 且煤体很难发生静载型冲击式破坏。以上现象与赵同彬等学者<sup>[32]</sup>开展的变刚度加载煤岩破坏实验结果一致。

值得注意的是, 以上重点关注的是煤体冲击破坏, 当  $k_1+k_2$  远大于 0 时, 即高刚度顶底板围岩, 对于顶板-煤层-底板整个冲击系统, 煤体很难发生冲击式破坏, 通常属于充分损伤破坏模式。此时, 顶板往往处于大面积弯曲下沉或采空悬置状态, 一旦达到其自身极限强度, 顶板破坏释放的能量将非常巨大, 这种情况下容易导致整体系统发生如图 3 (a) 所示的顶板型冲击, 此时顶板释放的能量就是冲击释放的整体能量。当  $k_1+k_2$  远小于 0 时, 即低刚度软弱顶底板围岩, 此时, 围岩不具备积聚弹性能的能力, 顶板-煤层-底板整体系统不易达到平衡, 巷道易变形难支护, 一般不容易发生冲击地压。

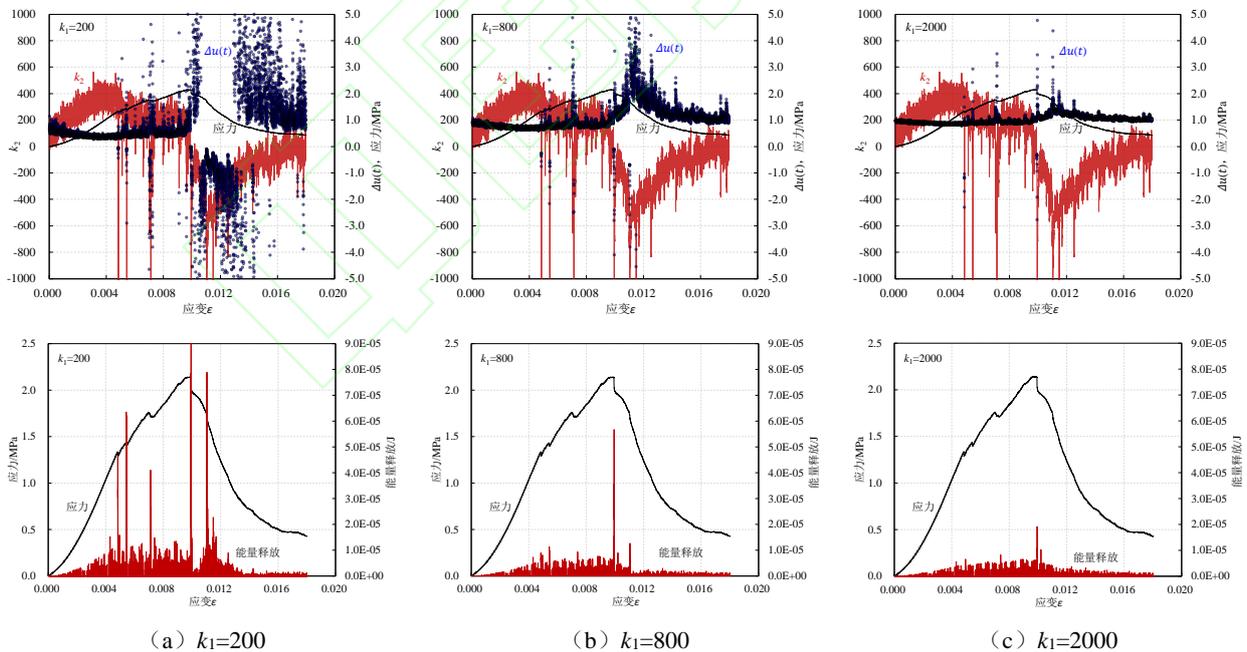


图 5 基于刚度变化的位移突变准则数值仿真计算

Fig. 5 Numerical simulation of displacement catastrophe criterion based on stiffness variation

对于真实采动应力环境(图 1), 工作面前方煤体破坏前后的应力状态可由图 6 描述, 可知工作面前方 ES 区域的煤体主要以拉伸、拉剪、纯剪破坏

的片帮、颗粒弹射现象为主, 此时煤体不易积聚弹性能、且破坏时产生的应力降和能量释放较小, 不易发生冲击地压。工作面前方 SD 区域的煤体主要

以压剪破坏为主，此时煤体容易积聚弹性能、且破坏时产生的应力降和能量释放也大，极易诱发冲击地压；工作面前方 DA 区域的煤体处于峰前弹塑性应力状态，未达到破坏。这与动静叠加诱冲机理（图 2 右下角）和位移突变准则（图 3（a））推测的冲击地压潜在发生时空位置位于峰后的结论一致。

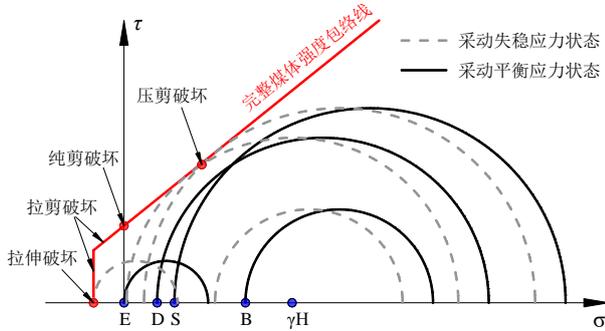


图 6 采动煤体破坏与冲击地压时空位置预测

Fig. 6 Mining induced coal failure and prediction of temporal and spatial position of coal burst

### 1.4 基于刚度变化的能量释放准则

当  $k_1+k_2 \leq 0$  时， $U_3 \geq 0$ ，对应冲击地压启动后的弹性能释放大，表征了冲击地压强度，即为冲击地压发生的能量释放准则。

为验证该能量释放准则，采用 FLAC<sup>3D</sup> 数值模拟软件开展了基于顶板-煤层-底板冲击载体系统模型的冲击地压刚度启动条件与能量释放过程的数

值试验，其能量释放 ( $U_{SE}$ ) 计算公式如下<sup>[28]</sup>：

$$U_A = \sum_{w=1}^W \sum_{n=1}^N \left\{ \frac{1}{2} \cdot (\sigma_{ij}^{n,w-1} + \sigma_{ij}^{n,w}) \cdot \varepsilon_{ij}^{n,w} \cdot V^n \cdot t \right\} \quad (7)$$

$$U_{SE} = \sum_{n=1}^N (U_A^n - U_E^n - U_D^n) \quad (8)$$

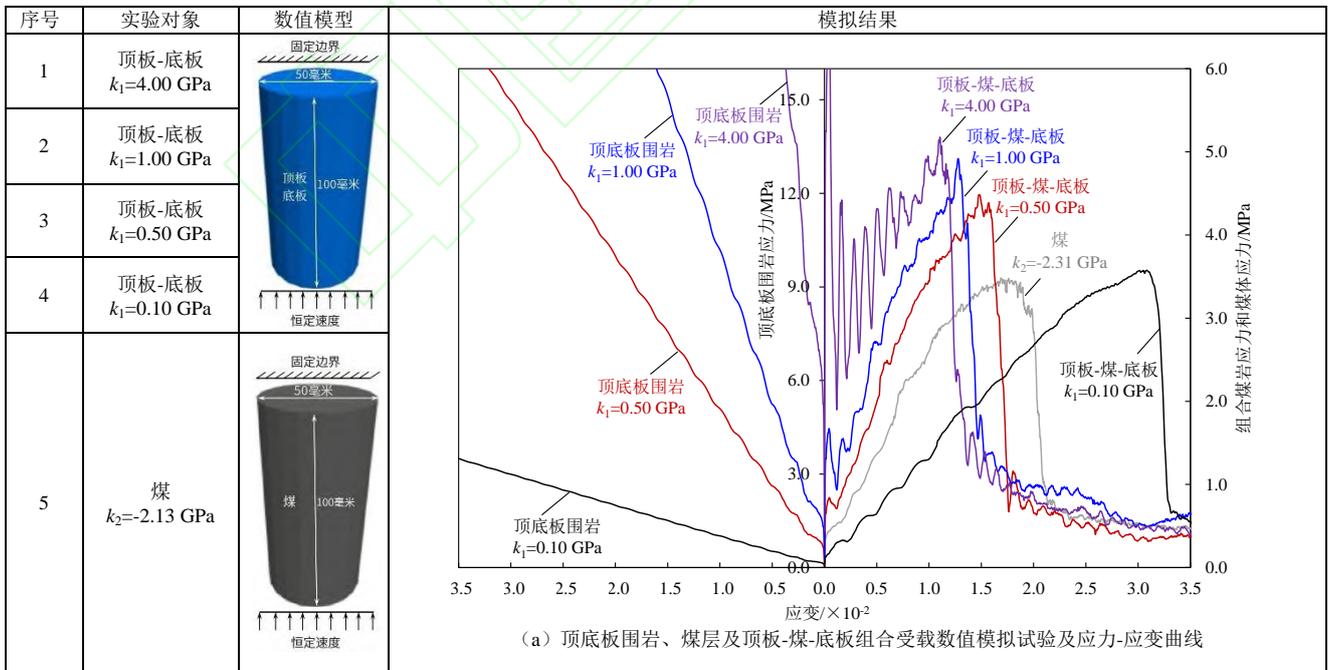
式中， $U_A^n - U_E^n - U_D^n > 0$ ； $\sigma_{ij}^{n,w}$ 、 $\varepsilon_{ij}^{n,w}$  分别为单元体的应力与应变， $n$  为单元体编号 ID， $w$  为当前计算步； $t$  为两个求解步之间的间隔； $V$  为单元体体积； $U_E$  和  $U_D$  分别采用内置函数  $z\_wetot$  和  $z\_wptot$  计算。

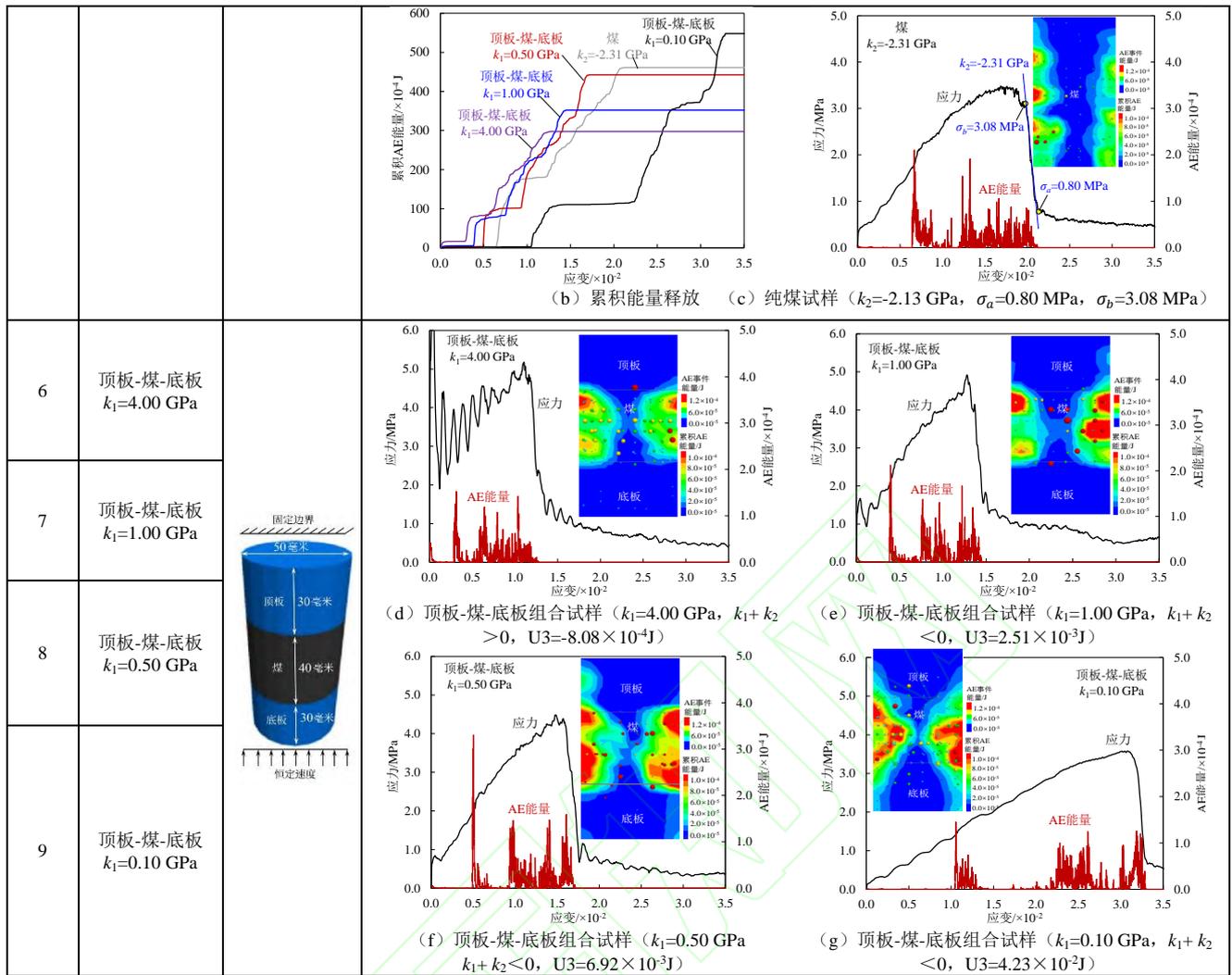
通过开展 9 种数值试验<sup>[30]</sup>发现（表 1）：除方案 6 对应的  $k_1=4.00$  GPa、 $k_2=-2.31$  GPa，即  $k_1+k_2 > 0$  条件下的  $U_3=-8.08 \times 10^{-4}$  J<0 以外，其余均满足  $k_1+k_2 < 0$ ，并且能量释放大于 0，其值随  $k_1$  的减小而越大；随着  $k_1$  减小，累积释放能量的空间分布特征从表面的局部少量集中（图（d））、发展至内部（图（e）和（f））、最终贯通（图（g））；随着  $k_1$  减小，峰后阶段释放的能量聚集现象更为显著，对应将会发生的冲击地压动力破坏事件；随着  $k_1$  减小，累积总能量增加（图（b））。

综上所述，基于刚度变化的能量释放准则分析了煤层与围岩系统之间的刚度关系，以及由此引发的能量动态平衡问题。

表 1 基于刚度变化的能量释放准则数值模拟计算

Table 1 Numerical simulation of energy release criterion based on stiffness variation





注：加载速度为  $5.0 \times 10^{-7} \text{ m/step}$ 。顶板及底板参数： $E_r=4.00 \text{ GPa}$ 、 $1.00 \text{ GPa}$ 、 $0.50 \text{ GPa}$ 、 $0.10 \text{ GPa}$ ， $\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$ ， $\nu = 0.20$ ， $\varphi = 30^\circ$ ， $c = 5.30 \text{ MPa}$ ， $\sigma_t = 2.00 \text{ MPa}$ ， $m_c = 0.605$ ， $F_c = 0.0025$ ， $\varepsilon_c = 0.0002$ ， $m_\psi = 0.2013$ ， $F_\psi = 7.397 \times 10^{-6}$ ， $\varepsilon_\psi = 0.0001$ ， $\psi_0 = 14.95$ ；煤体参数： $E_c = 0.25 \text{ GPa}$ ， $\rho = 1300 \text{ kg/m}^3$ ， $\nu = 0.25$ ， $\varphi = 30^\circ$ ， $c = 0.53 \text{ MPa}$ ， $\sigma_t = 0.20 \text{ MPa}$ ， $m_c = 0.605$ ， $F_c = 0.0025$ ， $\varepsilon_c = 0.0005$ ， $m_\psi = 0.2013$ ， $F_\psi = 7.397 \times 10^{-6}$ ， $\varepsilon_\psi = 0.0001$ ， $\psi_0 = 14.95$ 。其中， $m_c$ 、 $F_c$ 、 $\varepsilon_c$ 、 $m_\psi$ 、 $F_\psi$ 、 $\varepsilon_\psi$ 、 $\psi_0$ 为粘聚力和剪胀角下基于塑性应变损伤本构模型的拟合参数， $E_r$ 为围岩的弹性模量， $E_c$ 为煤体的弹性模量， $\rho$ 为密度， $\nu$ 为泊松比， $\varphi$ 为摩擦角， $c$ 为粘聚力， $\sigma_t$ 为抗拉强度。具体细节见参考文献[30, 33]。

## 2 冲击地压全过程实验

由第1章可知，基于煤岩系统刚度变化的冲击地压全过程解释包括位移突变和能量释放两个准则，以及一种广义刚度启动条件和两种动载诱冲效应（载荷增量与塑性变形）。根据煤层采掘实际应力路径，通过采集煤岩试样，设计组合煤岩试样的真三轴准静载、循环加卸载和动静组合实验，分别用于验证刚度启动静载条件、载荷增量型和塑性变形型动载诱冲效应。

### 2.1 实验过程与设计

煤岩样加工尺寸分别为  $75 \text{ mm} \times 75 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 、 $75 \text{ mm} \times 75 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ ，试样加工参照《煤和岩石物理力学性质测定方法》相关标准进行，共加工了砂岩-煤-砂岩、泥岩-煤-砂岩、泥岩-煤-泥岩三种顶底板组合结构试样。实验采用中国矿业大学自主研发的真三轴加卸载动静组合试验系统用于实现真

三轴应力环境，并实时采集应力位移数据，期间采用 NAC GX-3 高速相机捕捉试样破坏瞬间（图7）。

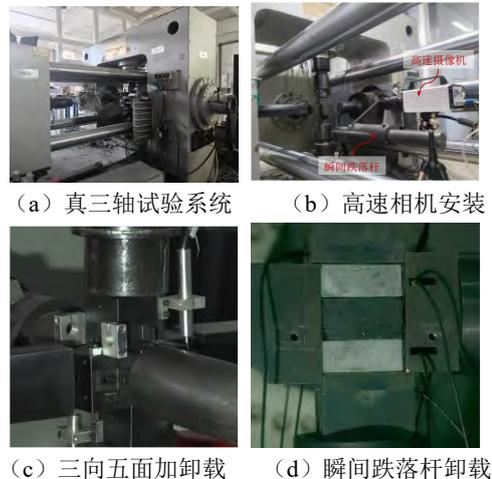


图7 实验设备及试样安装情况

Fig. 7 Experimental equipment and sample installation

针对刚度启动静载条件实验，为还原现场开采实际工况，设计如图8(a)所示的真三轴准静载实

验, 实验过程包括初始应力加载阶段、原岩应力保压阶段、巷道开挖阶段和工作面开采阶段; 对于塑性变形型和载荷增量型动载诱冲实验, 则在真三轴准静载实验基础上, 当实验加载至图 8 (a) 中 A 点所示工作面开采阶段后, 分别设计循环加卸载 (图 8 (b)) 和动静组合 (图 8 (c)) 实验。实验过程的具体详细参数见文献[34]。

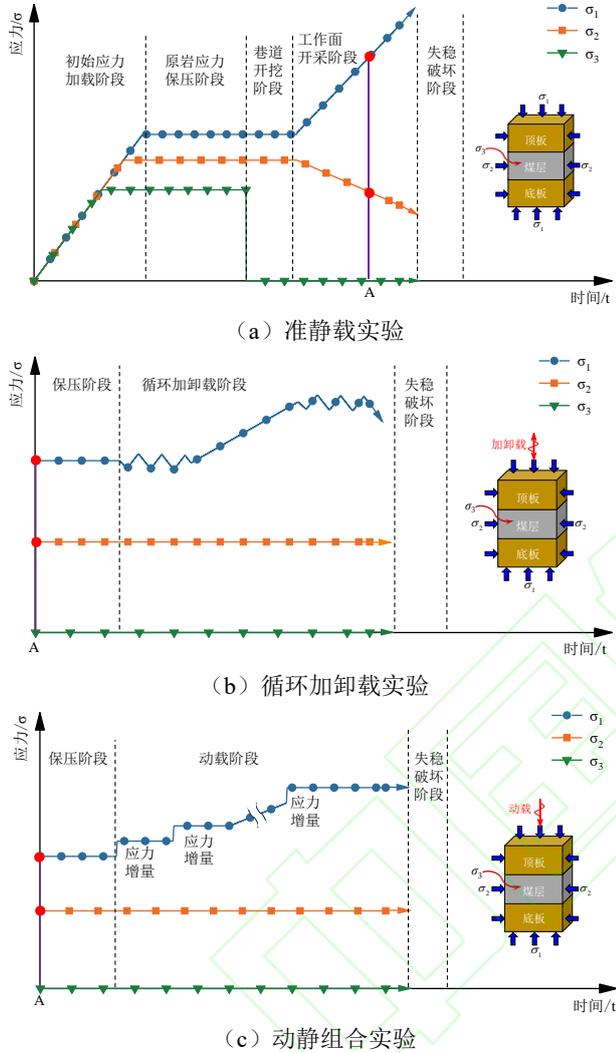


图 8 冲击地压全过程实验设计

Fig. 8 Experimental design of whole process of coal burst

## 2.2 常规物理力学性质测试

本次实验所用煤样取自山东某煤矿工作面煤块, 顶板岩样取自工作面采空区顶板冒落岩块, 底板岩样取自掘进工作面。其中顶板岩样为泥岩, 煤样内生裂隙发育, 底板岩样为细砂岩。

分别取 4 块顶底板岩样及煤样进行单轴压缩实验, 得到全应力-应变曲线, 如图 9 所示, 其中煤样刚度  $k_2=46.52\text{GPa}$ 、 $\sigma_a=8.08\text{MPa}$ 、 $\sigma_b=1.40\text{MPa}$ , 泥岩  $k_1=7.19\text{GPa}$ , 砂岩  $k_1=12.65\text{GPa}$ 。根据式 (6) 分别计算“砂岩-煤-砂岩”和“泥岩-煤-泥岩”冲击载体系统在理论上启动冲击时能够释放的弹性能密

度  $U_3$  分别为  $1822.2\text{J/m}^3$  和  $3726.1\text{J/m}^3$ , 结果均大于 0、且  $k_1+k_2<0$ , 表明这两种煤岩组合系统在准静载状态下便可启动冲击地压过程, 均无需外部额外的动载能量输入, 且泥岩-煤-泥岩组合在理论上的煤体冲击破坏过程更加剧烈。

三种组合煤岩试样 (泥岩-煤-泥岩、泥岩-煤-砂岩、砂岩-煤-砂岩) 的平均单轴抗压强度分别为  $19.24\text{MPa}$ 、 $20.54\text{MPa}$ 、 $21.78\text{MPa}$ , 泥岩、煤、砂岩纯煤岩试样的平均单轴抗压强度分别为  $33.06\text{MPa}$ 、 $9.70\text{MPa}$ 、 $96.95\text{MPa}$ 。结果表明, 组合试样的抗压强度高于纯煤试样、低于纯泥岩及纯砂岩试样, 即煤岩组合系统的强度不仅与煤岩性质有关, 还与不同煤岩组合相关联, 因此, 开展实际采掘应力路径下顶板-煤层-底板组合煤岩试样的力能演化实验是研究冲击地压全过程演化的有效途径之一。

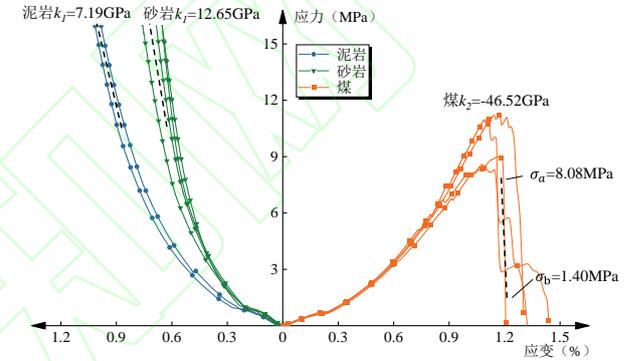


图 9 顶底板岩样与煤样全应力-应变曲线

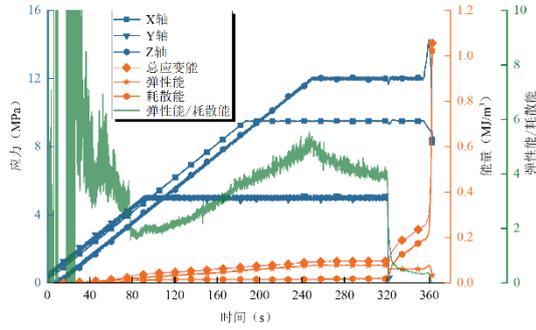
Fig. 9 Total stress-strain curves of roof and floor rock samples and coal samples

## 2.3 刚度启动动静载条件实验

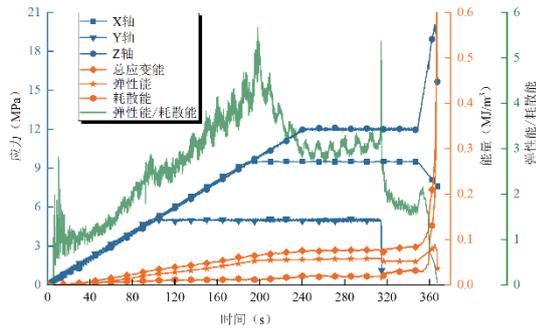
针对刚度启动动静载条件, 分别取泥岩-煤-泥岩、泥岩-煤-砂岩、砂岩-煤-砂岩三种不同顶底板组合各三块试样开展真三轴准静载实验, 试样编号分别为 nmn-1、nmn-2、nmn-3、nms-1、nms-2、nms-3、sms-1、sms-2、sms-3。挑选具有代表性的 nmn-3、nms-1、sms-2 三块组合试样进行分析, 如图 10、11 所示的应力、能量及应力-应变曲线。其中, 能量计算方法采用文献[35]提出的能量计算原理: 假设岩石单元在外力加载过程中没有与外部环境进行热交换, 处于完全封闭状态, 外力对试样所做的功转化为输入的总应变能, 并由弹性能和耗散能组成。

由煤岩体能量演化规律可知 (图 10), 三种组合煤岩试样的能量演化曲线具有相似特征, 均可划分为五个阶段: 初始加载压密阶段→弹性加载段→应力保压阶段→单面卸载阶段→临近破坏及破坏阶段。不同之处在于弹性能整体占比相差较大, 其中, 泥岩-煤-泥岩试样、泥岩-煤-砂岩试样、砂岩-煤-砂岩试样的平均最大储能密度 (弹性能/总应变

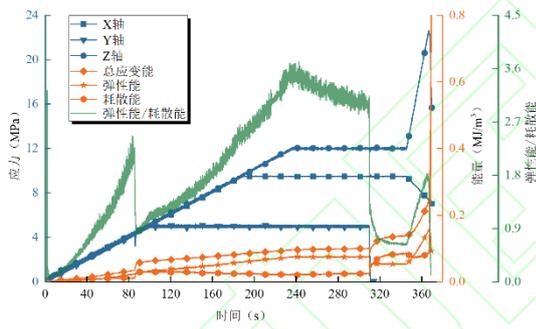
能) 依次为 0.862、0.784、0.778。这意味着泥岩-煤-泥岩试样具有更好的储能能力, 在相同的外部能量输入条件下, 会储存更多的弹性能, 当失稳破坏时可释放更多的能量。



(a) nmn-3



(b) nms-1

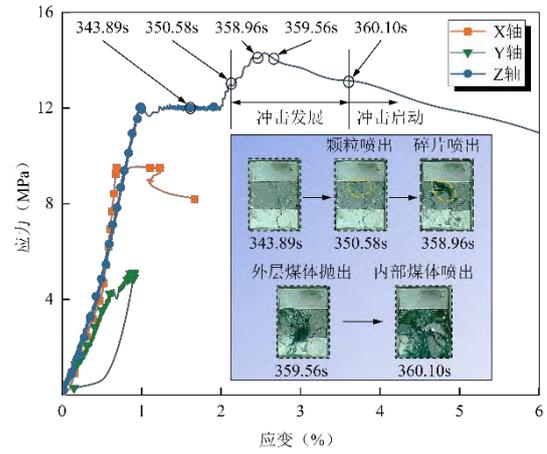


(c) sms-2

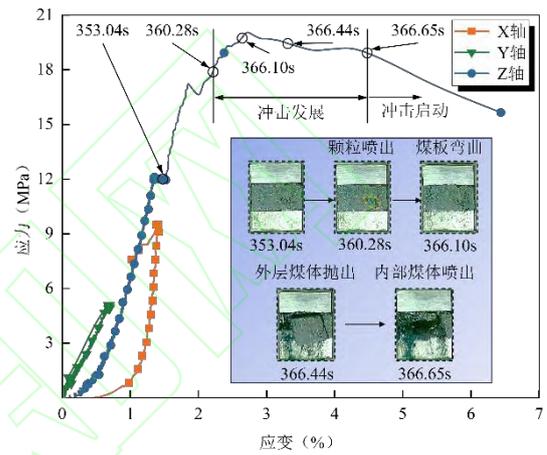
图 10 真三轴准静载实验的应力能量演化曲线

Fig. 10 Stress energy evolution curve of true triaxial quasi static load experiment

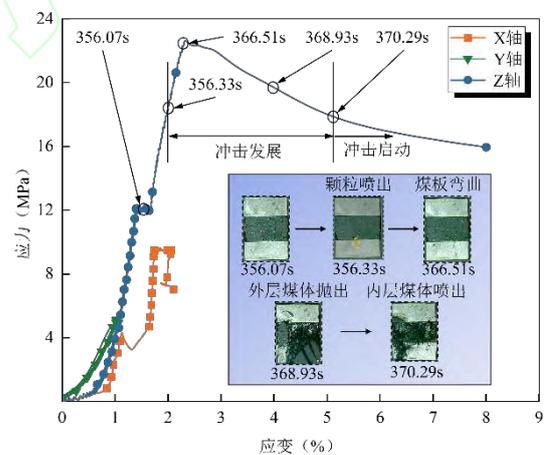
由高速相机捕捉到的冲击破坏过程可知 (图 11), 不同煤岩组合试样的冲击演化过程主要包括颗粒和碎片弹射、煤岩板弯曲并分裂、煤体外壳破裂抛出以及煤体内部大量颗粒喷出四个阶段。本文将自第一次颗粒弹射起至最后煤体大量喷出的时间作为冲击启动持续时间。经统计可知, 泥岩-煤-泥岩、泥岩-煤-砂岩、砂岩-煤-砂岩组合试样的平均冲击启动时间分别为 6.68s、8.40s、10.04s, 即泥岩-煤-泥岩组合比泥岩-煤-砂岩缩短了 20.48%, 比砂岩-煤-砂岩缩短了 33.47%。这表明顶底板强度最低的泥岩-煤-泥岩组合试样在准静载实验条件下冲击启动时间更短, 更容易启动, 而强度更高的泥岩-煤-砂岩和砂岩-煤-砂岩组合冲击启动门槛更高。



(a) nmn-3



(b) nms-1



(c) sms-2

图 11 真三轴准静载实验应力-应变与煤岩冲击破坏特征

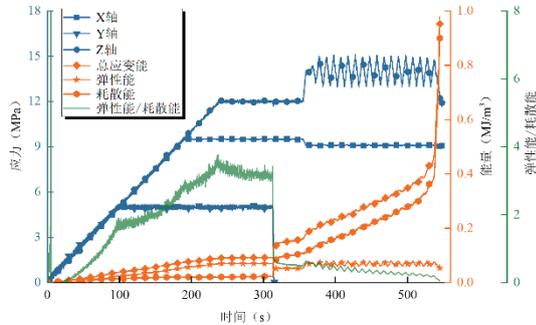
Fig. 11 Stress-strain curve of true triaxial quasi-static load test and characteristics of coal rock impact failure

综合应力-时间、应力-应变曲线可知, 随着顶底板强度的增大, 应力降速率由 1.57MPa/s 逐渐降低至 0.46MPa/s, 平均峰值应变由 2.77% 逐渐降低至 2.48%。煤岩组合系统发生冲击时的应力降速率越大, 对应系统破坏越剧烈; 而峰值应变越大, 对应系统发生冲击破坏时的变形越大。因此, 顶底板强度越弱, 如泥岩-煤-泥岩组合, 冲击破坏程度越剧

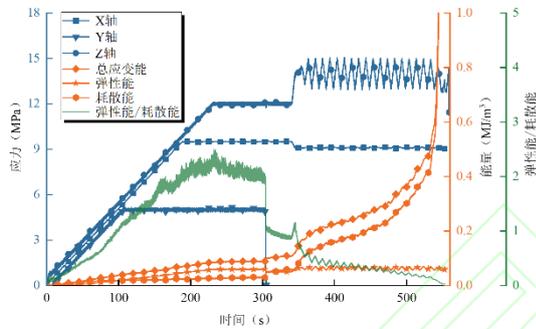
烈，这也验证了 1.4 节和 2.2 节关于不同煤岩组合冲击破坏时能量释放程度的理论计算结果。

## 2.4 塑性变形型动载诱冲实验

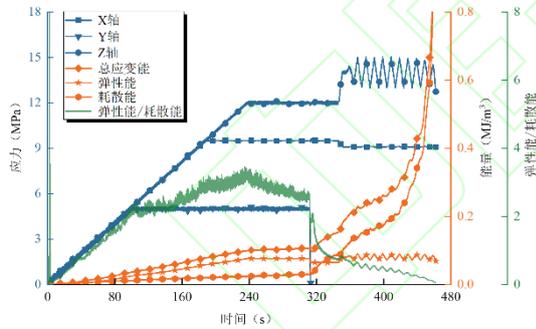
针对塑性变形型动载诱冲效应，取三个泥岩-煤-砂岩组合试样开展真三轴条件下的循环加卸载实验，试样编号为 nms-4、nms-5、nms-6。根据实验结果绘制应力-时间、能量-时间和应力-应变曲线，如图 12、13 所示。



(a) nms-4



(b) nms-5



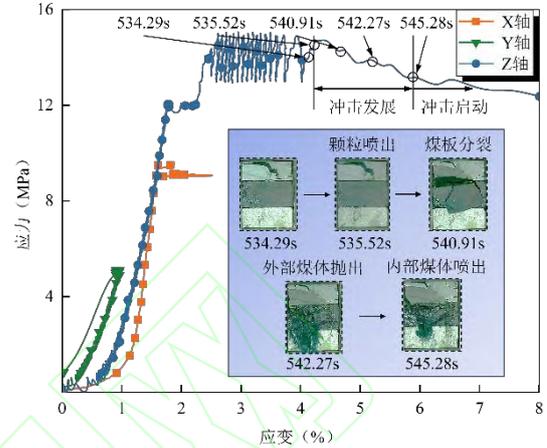
(c) nms-6

图 12 真三轴循环加卸载实验的应力能量演化曲线

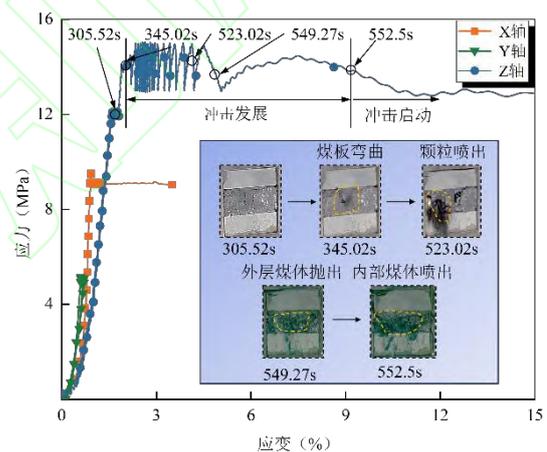
Fig. 12 Stress energy evolution curve of true triaxial cyclic loading and unloading experiment

由应力-时间曲线（图 12）可知，循环加卸载条件下的泥岩-煤-砂岩组合试样破坏强度为 14.74MPa、14.36MPa、14.52MPa，平均 14.54MPa。相比于准静载条件下同类型组合试样的平均破坏强度 20.54MPa，其强度降低了 29.2%。这表明组合煤岩体在循环加卸载作用下会产生累积塑性变形，造成永久损伤，且每一次加卸载都会加剧这种损伤，导致试样强度不断降低，最终破坏时的承载能力出现明显下降。并且随着循环加卸载次数的增多，试

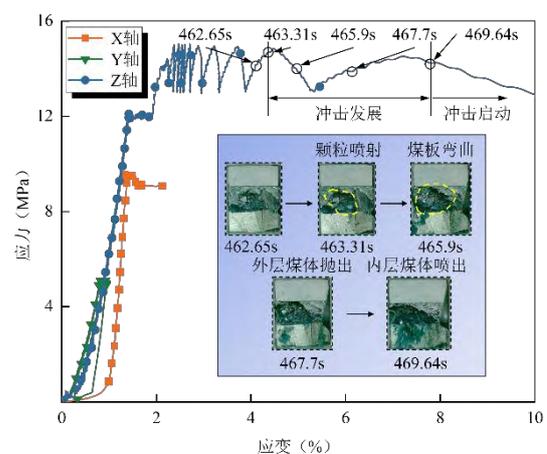
样破坏时的应力降也随之增大。例如，nms-5 试样经历的加卸载次数为 22 次，试样破坏时垂向应力降为 2.92MPa，比 nms-4 试样经历 17 次加卸载的应力降 2.83MPa 高出 3.18%，比 nms-6 试样经历 10 次加卸载的应力降 1.79MPa 高出 63.13%，这也证明了循环加卸载次数越多对煤岩体内部结构的破坏越大，煤岩体更容易启动冲击破坏。



(a) nms-4



(b) nms-5



(c) nms-6

图 13 真三轴循环加卸载实验应力-应变与煤岩破坏特征

Fig. 13 Stress strain and coal rock failure characteristics of true triaxial cyclic loading and unloading test

由能量演化过程可知（图 12），每进行一次加

卸载，弹性能占比均会降低，表明循环加卸载疲劳型动载会造成试样损伤，消耗储存的弹性能，当损伤累积到一定程度便会导致煤岩体失稳破坏，一旦破坏时的刚度状态满足位移突变准则 ( $k_1+k_2<0$ )，便可启动冲击地压。

由高速相机捕捉到的冲击破坏过程可知（图 13），循环加卸载作用下煤岩冲击启动时间较长，最长为 248.48s（nms-5 试样）。多次循环加卸载导致煤岩体内部裂隙、缺陷充分发展破坏，表现为整个冲击过程出现多次多处煤体颗粒碎片冲出。

选取真三轴准静载实验中的 nms-1、nms-3 和循环加卸载实验中的 nms-4、nms-5 以及 nms-6 试样的垂向应力-应变曲线进行对比分析，如图 14 所示。结果显示，循环加卸载条件下的试样强度低于准静载条件，表明循环加卸载产生的累积永久塑性变形会降低试样强度，使得试样在未达到峰值强度条件即可进入不稳定破坏阶段，甚至触发冲击启动，此时对应的应变（C 点）大于等于准静载条件冲击启动时的应变（B 点）。

综上所述，塑性变形型动载诱冲效应本质是峰前累积的永久塑性变形超过准静载条件下的冲击启动临界应变值。

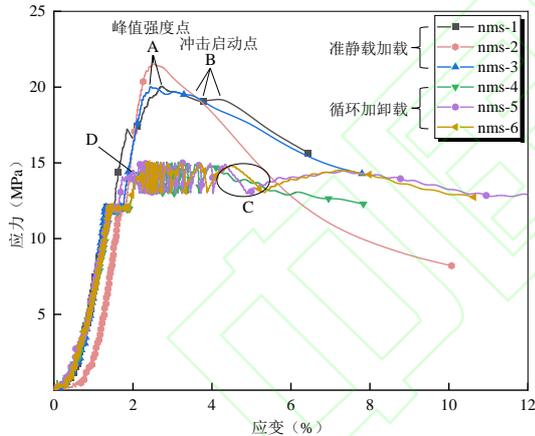


图 14 静载与循环加卸载实验应力-应变曲线对比

Fig. 14 Comparison of stress-strain curves between static loading and cyclic loading and unloading experiments

## 2.5 载荷增量型动载诱冲实验

针对载荷增量型动载诱冲效应，取三块泥岩-煤-砂岩组合试样开展真三轴条件下逐级瞬间加载的动静组合实验，试样编号为 nms-7、nms-8、nms-9。根据实验结果绘制应力-时间、能量-时间和应力-应变曲线，如图 15、16 所示。

由应力-时间曲线可知（图 15），动静组合条件下的峰值强度为 20.08MPa、18.01MPa、18.24MPa，平均 18.78MPa，比准静载条件下同类型煤岩组合试样的强度（20.54MPa）降低了 8.6%，比循环加卸

载条件下同类型煤岩组合试样的强度（14.54MPa）升高了 29.2%，说明逐级瞬间加载的动静组合条件会降低煤岩强度，此时更容易触发冲击条件，但作用机制不同于循环加卸载，持续的循环加卸载是通过累积塑性变形、不断弱化试样强度，从而降低其承载能力触发冲击启动。此外，峰后平均应力降速率为 1.30MPa/s，高于准静载作用下同类型组合煤岩样的 0.71MPa/s，表明多次瞬间加载可进一步促进峰后试样的能量释放，加剧试样破坏。

由能量演化过程可知（图 15），每一次载荷增量均会不同程度地增加煤岩体弹性能，且弹性能占比瞬间增大，意味着瞬间载荷增量给煤岩体输入的能量不仅满足了耗散所需要的能量，甚至还提供了额外的弹性能。当弹性能占比增大到煤岩体的储能极限时，便会提前出现失稳破坏、甚至冲击现象。

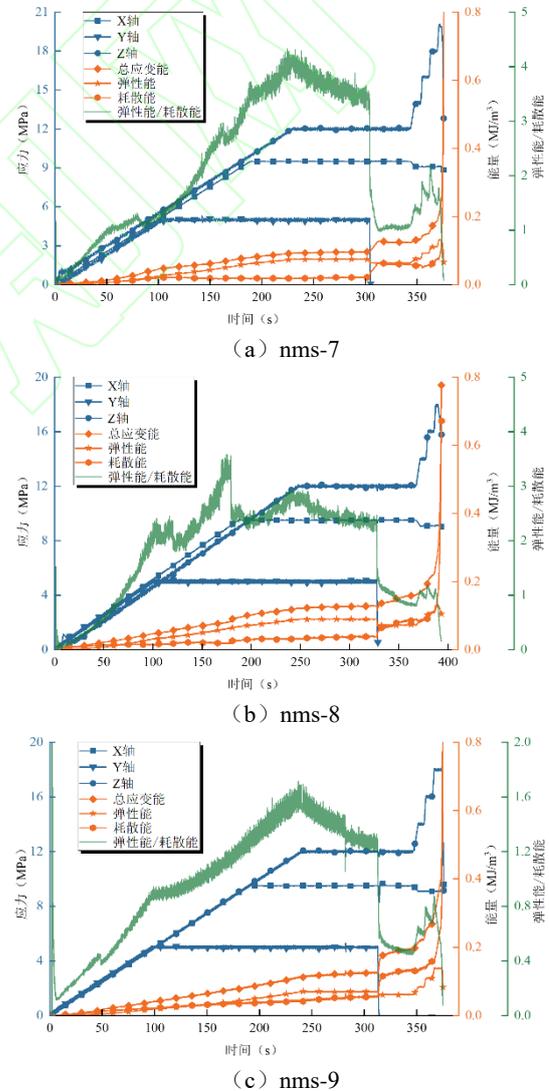


图 15 真三轴动静组合实验的应力能量演化曲线

Fig. 15 Stress energy evolution curve of true triaxial static and dynamic combination experiment

由高速相机捕捉到的冲击破坏过程可知（图 16），

试样破坏过程均经历了前期稳定阶段、碎片及颗粒弹出阶段、煤岩弯曲破裂阶段、外层煤体颗粒及碎片大量抛出阶段、内层煤体颗粒快速喷出阶段、煤岩结构坍塌阶段。在施加载荷增量之后，组合煤岩试样的破坏集中体现为煤体颗粒及碎片抛出与喷射，而顶底板相对较为完整，其原因可能是煤体在载荷增量作用下受到充分破坏，丧失了承载能力，在顶底板之间无法起到有效支撑作用，使得裂纹扩展至煤岩交界面被隔断。

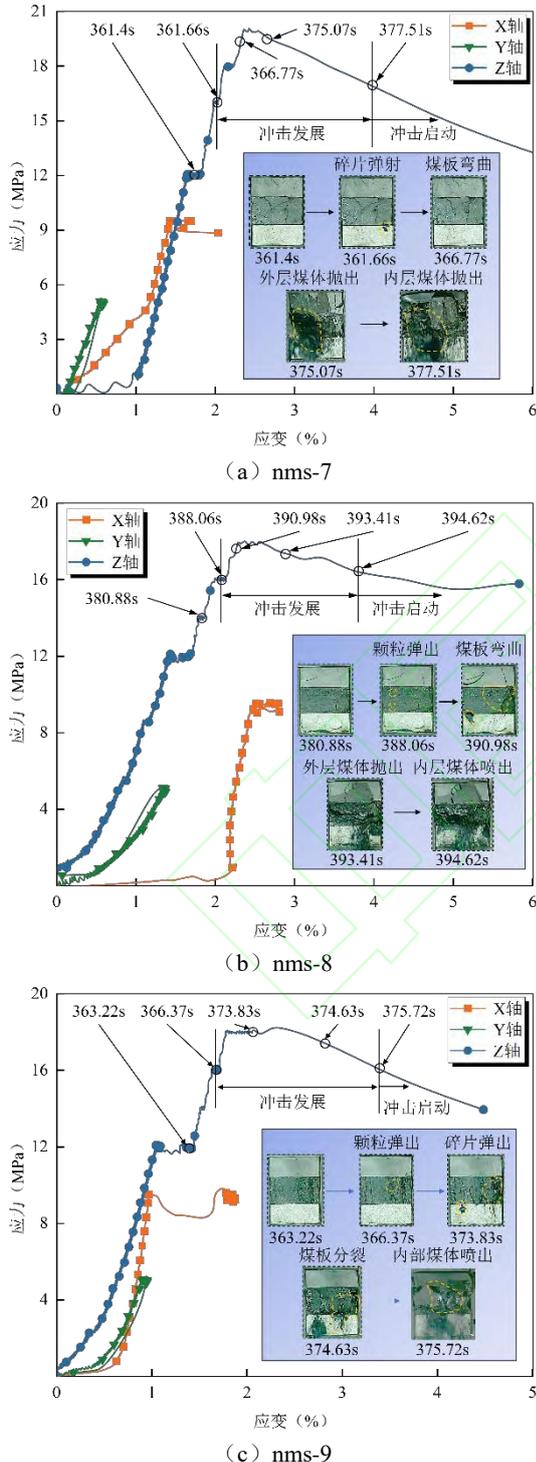


图 16 真三轴动静组合实验应力-应变与煤岩冲击破坏特征  
Fig. 16 Stress-strain and coal rock burst failure characteristics

of true triaxial dynamic and static combination experiment

由应力-应变曲线可知(图 16)，峰值垂直应变为 2.43%、2.37%、2.30%，平均 2.36%，小于准静载作用下的平均峰值垂直应变 2.50%，表明瞬间载荷增量动载能促进煤岩体提前进入峰后破坏阶段。

选取载荷增量型动载诱冲效应实验中 nms-7、nms-8、nms-9 试样的 Z 向应力应变曲线进行分析，作为对比，图 17 中还给出了准静载实验中 nms-1、nms-2、nms-3 试样的应力应变曲线。由图可知，施加动载前的试样应力应变特征一致，施加动载后的峰值应变减小，同时峰值强度降低。由载荷增量型瞬间动载诱冲效应机制可知，瞬间载荷增量动载能使应力状态处于峰前位置点 1 的组合煤岩突变成为位置点 4 的应力状态(图 17 (a))。这时尽管位置点 4 的应力值(平均 18.78MPa)小于准静载状态下峰值 D 点应力(平均 20.54MPa)，但只要动载输入能量(面积  $S_{123}$ )大于煤岩损伤耗散能(面积  $S_{3D4}$ )，就可提前促使煤岩破坏从峰前位置点 1 发展至峰后位置点 4 的冲击启动条件，此时应力-应变响应曲线为 1-3-5。如果施加一次动载后， $S_{123} < S_{3D4}$ ，即输入的能量不足以达到冲击所需的能量条件，此时应力状态将发展至峰前位置点 4 的位置(图 17 (b)，满足  $S_{123} = S_{345}$ )，实际应力-应变响应曲线为 1-3-4，后续需多次动载、直至发展至峰后冲击启动位置，最终应力和能量曲线呈现出阶梯形状。

综上所述，载荷增量型动载诱冲效应本质是输入的动载能量大于煤岩峰前应力状态发展至峰后冲击启动时所需的耗散能，且存在剩余弹性能释放。

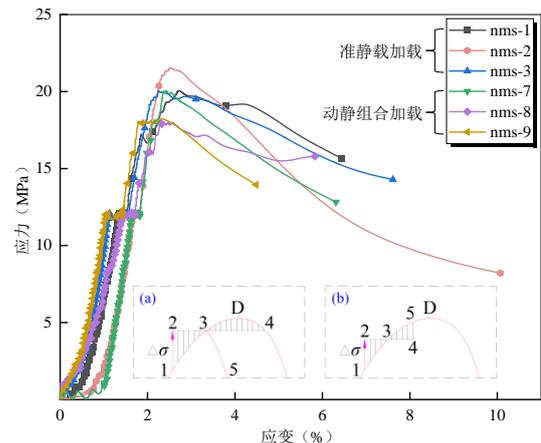


图 17 静载与动静组合实验的应力-应变曲线对比

Fig. 17 Comparison of stress-strain curves between static load and dynamic static combined experiments

### 3 分析与讨论

#### 3.1 冲击地压定义与科学内涵

冲击地压是指井巷和工作面周围煤(岩)体内

积聚弹性变形能的瞬时释放而产生突然、剧烈破坏的动力现象，常伴有煤（岩）体瞬间位移、抛出、巨响及气浪等。由定义可提炼出冲击地压发生的三个核心特征：①冲击载体特征：井巷和工作面周围煤（岩）体；②物理参量特征：能量瞬时释放和产生瞬间位移；③宏观现象特征：煤岩体突然剧烈破坏，产生抛出、巨响及气浪等动力现象。其中宏观现象特征是冲击载体特征和物理参量特征综合的必然结果。

本文基于煤岩系统刚度变化的冲击地压全过程探讨是通过分析顶板-煤层-底板组合体在采动应力（掘进期间瞬间卸载和回采期间加卸载）全生命周期演化过程中的煤岩体刚度变化，进而推导出基于刚度变化的煤岩组合体位移变化（ $\Delta u(t)$ ，见式（5））和能量释放（ $U_3$ ，见式（6））演化规律，并给出冲击地压孕育-启动-显现-结束的全过程解释，这与岩石破裂全过程、孕震全序列、煤柱型冲击地压尖点突变理论具有很好的一致性<sup>[36-37]</sup>。其中，顶板-煤层-底板组合体符合冲击载体特征；位移突变判据（ $\Delta u(t) \rightarrow \infty$ ）及其对应的能量瞬时释放（ $U_3 > 0$ ），表征了物理参量特征。因此，煤岩系统刚度变化不仅从位移突变与能量瞬时释放全面解释了冲击地压的定义，还解释了冲击地压孕育-启动-显现-结束的全过程。其核心在于分析了煤层与围岩系统之间的刚度关系，以及由此引发的能量动态平衡问题，可为揭示冲击地压的触发机制和能量释放规律提供参考。主要贡献包括：

（1）发展了动静载叠加诱冲理论：考虑了采动静载应力和动载扰动叠加的影响，包括一种广义刚度启动条件和两种动载诱冲效应（载荷增量与塑性变形）；揭示出动载输入等价于降低顶底板围岩加载系统的刚度。

（2）丰富了强度、能量、刚度和冲击倾向性理论：建立了基于刚度变化的冲击地压启动位移突变准则和能量释放准则；定量给出了冲击地压启动的时空位置位于峰后，即强度理论是刚度理论的一个特例；提出了基于刚度变化相图的冲击地压孕育-启动-显现-结束全过程解释，包括煤体和围岩的加载及屈服刚度变化的全域组合分析，可为煤岩冲击倾向性的新指标构建、特别是组合煤岩体冲击倾向性鉴定标准的完善提供新视角。

### 3.2 煤岩系统刚度变化与冲击地压适用性

煤岩系统刚度变化关注施载体（顶底板围岩）与受载体（煤柱或煤体）的相对刚度变化对冲击地压的影响。当加载系统刚度低于受载煤体的屈服刚度时，系统能量释放速度加快，导致煤体失稳并诱

发冲击，揭示出刚度变化对能量积累与释放的关键作用。

专家学者从理论分析、数值模拟、实验室实验等多方面研究了刚度变化在主导冲击地压发生的关键作用。例如，潘一山等<sup>[38-39]</sup>基于考虑峰后残余强度的煤岩本构关系推导出冲击地压发生的理论解，进而得出冲击地压发生的临界载荷、临界采深的理论公式，并结合 StrataKing 与冲击地压扰动响应失稳理论，提出了圆形巷道扰动响应失稳理论的数值模拟方法；高富强等<sup>[40-41]</sup>采用数值模拟研究了局部矿山刚度在工作面开采过程中的演变规律，并利用室内实验模拟煤层开挖引起的应力集中及局部矿井刚度降低，发现当煤体的峰后刚度低于一定值时将会发生冲击破坏。蔡明等<sup>[42]</sup>通过提高试验机刚度，得到了脆硬岩石完整的应力应变曲线；顾金才等<sup>[43]</sup>通过改进试验方案和试验装置，研究发现在峰后选用变形刚度小于试件刚度的弹簧给试件施加弹性力时，便会出现抛掷型岩爆（冲击）现象；马庆等<sup>[44]</sup>利用可调整加载系统刚度的试验机对煤样进行压缩测试，也得到了相似的结论，即试验机刚度越小，煤样破坏时间越短，喷出的煤块越多。

本文从理论分析、数值模拟、实验室实验等多方面验证了煤岩系统刚度变化诠释冲击地压全过程的适用性。例如，从冲击载体、刚度变化、位移突变、能量释放等多角度解释了冲击地压定义的科学内涵及其全过程发展，并设计了真实采掘应力路径下组合煤岩试样的真三轴实验，不仅考虑了加载系统（顶底板围岩）刚度变化带来的冲击破坏差异，而且三种加卸载动静组合方式还极大还原了真实的采掘过程，以及顶板破断、矿震、爆破等动载扰动的影响。该原理的工程化应用主要体现如下：

（1）冲击地压机理：基于煤岩系统刚度变化的全过程解释。煤体脆性越高，峰后屈服刚度越陡，越容易引发突变失稳；节理、断层等降低局部刚度，改变失稳模式；不规则采场、断层与褶皱等局部刚度突变区形成高应力集中，容易成为能量释放触发点；静态加载作用下的刚度随应变缓慢衰减，系统可通过蠕变调整应力；动态冲击加载下刚度瞬时下降，能量快速释放，如矿震、爆破等扰动触发冲击。

（2）冲击地压监测：刚度变化响应与表征。利用微震、地音、钻屑、应力、变形等监测数据反演刚度变化，预警临界失稳状态，如刚度变化率超过阈值；峰后阶段煤岩体的屈服刚度难以实时监测，可采用波速、电阻率等变化表征的间接指标。煤岩系统刚度变化驱动力能诱冲效应包括静载、动载和能量三种效应，分别对应应力、震动和能量三场监

测<sup>[45]</sup>。

(3) 冲击地压防治：刚度变化匹配。采取大直径卸压钻孔、爆破、注水等技术降低煤体峰后屈服刚度，增加能量耗散；采用爆破、压裂等手段弱化煤岩体，降低局部刚度，促进能量的缓慢释放；支护刚度无法匹配围岩刚度时，加剧失稳风险，同时滞后支护会导致煤岩体能量过度积累；采用柔性-刚性复合支护，即初期允许围岩适度变形（释放能量），后期通过高刚度支护抑制大变形，并实时监测刚度变化，动态调整支护参数；控制采掘速度，避免形成高刚度应力壳结构。

综上所述，煤岩系统刚度变化的指导核心在于根据采动煤岩体的刚度变化响应规律，通过监测表征煤岩体刚度变化，以及设计煤岩体冲击系统的刚度变化匹配，实现能量可控释放。

## 4 结论

本文在总结冲击地压孕育-启动-显现-结束全过程的采场应力环境和动静载叠加诱冲机理的基础上，通过建立顶板-煤层-底板冲击系统模型，探讨了基于煤岩系统刚度变化的全过程解释，包括基于刚度变化的位移突变和能量释放两个准则，以及一种广义刚度启动条件和载荷增量与塑性变形两种动载诱冲效应，并分别采用组合煤岩试样的真三轴准静载实验、循环加卸载实验和动静组合实验验证了刚度启动静载条件、载荷增量型和塑性变形型动载诱冲效应，主要结论如下：

(1) 冲击地压的刚度启动静载条件是顶底板围岩加载系统刚度低于受载煤体的屈服刚度，以此对应基于刚度变化的位移突变和能量释放准则可以预测冲击地压的时空位置；叠加动载作用下的广义刚度启动条件等价于降低了围岩刚度。

(2) 塑性变形型动载诱冲效应的本质是峰前累积的永久塑性变形超过准静载条件下的冲击启动临界应变值；载荷增量型动载诱冲效应的本质是输入的动载能量大于峰前应力状态发展至峰后冲击启动时所需的耗散能，且存在剩余弹性能释放。

(3) 冲击地压定义的科学内涵包括冲击载体、物理参量和宏观现象三个特征，可由顶板-煤层-底板冲击系统模型、基于刚度变化的位移突变和能量释放进行量化表征，其中，刚度变化响应、表征和匹配是指导冲击地压监测与防治的关键。

(4) 基于煤岩系统刚度变化的冲击地压全过程分析解释了顶底板围岩加载系统与受载煤体的相对刚度变化对冲击地压的影响，并由此引发的能量动态平衡问题；同时综合了动静载叠加诱冲、强

度、刚度、能量、冲击倾向性等理论的核心思想，可为揭示冲击地压的全过程机理和能量释放规律提供新的视角。

## 参考文献

- [1] WANG, J., Apel, D. B., Dyczko, A., et al. Analysis of the damage mechanism of strainbursts by a global-local modeling approach[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2022, 14(6): 1671-1696.
- [2] Zhang, C., Canbulat, I., Hebblewhite, B., et al. Assessing coal burst phenomena in mining and insights into directions for future research[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2017, 179: 28-44.
- [3] PAN, Y., SONG, Y., LUO, H., et al. Coalbursts in China: theory, practice and management[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2024, 16(1): 1-25.
- [4] 王国法, 潘一山, 赵善坤, 等. 冲击地压煤层如何实现安全高效智能开采[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(01): 1-14.  
WANG Guofa, PAN Yishan, ZHAO Shankun, et al. How to realize safe-efficient-intelligent mining of rock burst coal seam[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(1): 1-14.
- [5] 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): 1861-1874.  
QI Qingxin, MA Shizhi, SUN Xikui, et al. Theory and technical framework of coal mine rock burst origin prevention[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(5): 1861-1874.
- [6] A-N Romashov, Tsygankov S-S. Generalized model of rock bursts[J]. *Journal of Mining Science*, 1993, 28(5):420-423.
- [7] M-D-G Salamon. Stability, instability and design of pillar workings[J]. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 1970, 7(6): 613-631.
- [8] Z-H CHEN, 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] S-P Singh. Burst energy release index[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1988, 21(2): 149-155.
- [10] Y-H XU, CAI M. Influence of strain energy released from a test machine on rock failure process[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2018, 55(6): 777-791.
- [11] John-A Hudson, Crouch Steven-L, Fairhurst Charles. Soft, stiff and servo-controlled testing machines; a review with reference to rock failure; Review[J]. *Engineering Geology*, 1972, 6(3): 155-189.
- [12] CAI Wu, DOU Linming, SI Guangyao, et al. A principal component analysis/fuzzy comprehensive evaluation model for coal burst liability assessment[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2016, 8162-69.

- [13] A Kidybiński. Bursting liability indices of coal[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1981, 18(4): 295-304.
- [14] J-A WANG, Park H-D. Comprehensive prediction of rockburst based on analysis of strain energy in rocks[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2001, 16(1): 49-57.
- [15] 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, (03): 42-48.  
LI Yusheng. Mechanism of rockburst and its preliminary application[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 1985, (03): 42-48.
- [16] 章梦涛. 冲击地压机理的探讨[J]. *阜新矿业学院学报*, 1985, (S1): 65-72.  
ZHANG Mengtao. Discussion on mechanism of coal burst [J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)*, 1985, (S1): 65-72.
- [17] 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, (02): 34-38.  
QI Qingxin, SHI Yuanwei, LIU Tianquan. Experimental study on stick slip instability mechanism of coal burst[J]. *Journal of China Coal Society*, 1997, (02): 34-38.
- [18] 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(08): 2091-2098.  
PAN Yishan. Disturbance response instability theory of rockburst in coal mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(8): 2091-2098.
- [19] 窦林名, 何江, 曹安业, 等. 动载诱发冲击机理及其控制对策探讨[C]//中国煤炭学会成立五十周年高层学术论坛论文集. 2012: 294-299.  
DOU Linming, HE Jiang, CAO Anye, *et al.* Mechanism and prevention methods discussion on coal mine rock burst induced by dynamic load[C]// *Proceedings of the high level academic forum on the 50th anniversary of the founding of the China Coal Society*. 2012: 294-299.
- [20] 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(07): 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.
- [21] 潘俊锋, 丁宇, 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(03): 586-596.  
PAN Junfeng, DING Ning, MAO Debing, *et al.* Theory of rock-burst start-up during coal mining[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(03): 586-596.
- [22] 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, KOUAME K. J. A., *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.
- [23] Cook N. G. W., E. Hoek, J. P. G. Pretorius, *et al.* Rock mechanics applied to study of rockbursts[J]. *Journal of South African Institute of Mining & Metallurgy*, 1966, 435-528.
- [24] Petukhov. 煤矿冲击地压[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1980.  
Petukhov. Coal burst in coal mine[M]. Beijing: Emergency Management Press, 1980.
- [25] Cook, N.G.W. A note on rockburst considered as a problem of stability [J]. *J. South Afr. Int. Min. Metallurgy*, 1965, 65: 437-446.
- [26] Peng SS. *Longwall Mining*, second ed. Englewood, USA: Society for mining, metallurgy, and exploration, Inc. (SME); 2006.
- [27] 谢和平, 周宏伟, 刘建峰, 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.
- [28] CAI Wu, DOU Linming, SI Guangyao, *et al.* A new seismic-based strain energy methodology for coal burst forecasting in underground coal mines[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 123: 104086.
- [29] Yanjiang CHAI, Linming DOU, Wu CAI, *et al.* Experimental investigation into damage and failure process of coal-rock composite structures with different roof lithologies under mining-induced stress loading[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2023, 1365-1609.
- [30] Wu CAI, Xianxi BAI, Guangyao Si, *et al.* A monitoring investigation into rock burst mechanism based on the coupled theory of static and dynamic stresses[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53(12): 5451-5471.
- [31] Zubelewicz A, Mroz Z. Numerical simulation of rock burst processes treated as problems of dynamic instability[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1983, 16(4): 253-274.
- [32] 赵同彬, 尹延春, 谭云亮, 等. 变刚度加载试验系统的研制及其在煤岩破坏力学行为测试中的应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(09): 1846-1857.  
ZHAO Tongbin, YIN Yanchun, TAN Yunliang, *et al.* Development of variable stiffness loading test system and its application in failure mechanical behavior test of coal and rock [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(9): 1846-1857.
- [33] Wu CAI, Linming DOU, Yang JU, *et al.* A plastic strain-based damage model for heterogeneous coal using cohesion and dilation an-

- gle[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, 110: 151-160.
- [34] 蔡武, 朱旭明, 陆强, 等. 冲击矿压演化过程的力能作用原理: 理论分析与实验设计[J]. *徐州工程学院学报(自然科学版)*, 2022, 37(04), 62-70.
- CAI Wu, ZHU Xuming, LU Qiang, *et al.* Force energy action principle of coal burst evolution process: theoretical analysis and experimental design[J]. *Journal of Xuzhou Institute of Technology (Natural Sciences Edition)*, 2022, 37(04): 62-70.
- [35] 黎立云, 谢和平, 鞠杨, 等. 岩石可释放应变能及耗散能的实验研究[J]. *工程力学*, 2011, 28(03):35-40.
- LI Liyun, XIE Heping, JU Yang, *et al.* Experimental investigations of releasable energy and dissipative energy within rock[J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 28(03): 35-40.
- [36] 徐曾和, 徐小荷, 唐春安. 坚硬顶板下煤柱岩爆的尖点突变理论分析[J]. *煤炭学报*, 1995, (05): 485-491.
- XU Zenghe, XU Xiaohu, TANG Chun'an. Theoretical analysis of sharp point mutation of rock burst in coal pillar under hard roof[J]. *Journal of China Coal Society*, 1995, 20(5): 485-491.
- [37] 唐春安, 徐小荷. 岩石破裂全过程与孕震全序列[J]. *地震学报*, 1991, (04): 517-521+534.
- TANG Chunan, XU Xiaohu. Complete process of rock failure and the complete course of seismogeny[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 1991, 13(4): 517-521.
- [38] 潘一山, 代连朋. 煤矿冲击地压发生理论公式[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(03): 789-799.
- PAN Yishan, DAI Lianpeng. Theoretical formula of rock burst in coal mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(03): 789-799.
- [39] 潘一山, 王学滨, 郑一方, 等. 冲击地压扰动响应失稳理论并行计算[J]. *煤炭学报*, 2025, 50(1): 81-91.
- PAN Yishan, WANG Xuebin, ZHENG Yifang, *et al.* Parallel computing of disturbance response instability theory of rockbursts[J]. *Journal of China Coal Society*, 2025, 50(1): 81-91.
- [40] GAO, F., KANG, H., LOU, J., *et al.* Evolution of local mine stiffness with mining process: insight from physical and numerical modeling[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52, 3947-3958.
- [41] GAO, F., YUAN, G., LIU, W., *et al.* Experimental study of strain-bursts caused by stress concentration and local mine stiffness decrease as mining proceeds[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2023, 56, 7495-7507.
- [42] CAI M, HOU PY, ZHANG XW, *et al.* Post-peak stress-strain curves of brittle hard rocks under axial-strain-controlled loading[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 147: 104921.
- [43] 顾金才, 范俊奇, 孔福利, 等. 抛掷型岩爆机制与模拟试验技术[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(06): 1081-1089.
- GU Jincai, FAN Junqi, KONG Fuli, *et al.* Mechanism of ejective rockburst and model Testing technology[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(06): 1081-1089.
- [44] MA, Q., LIU, X., TAN, Y., *et al.* Experimental study of loading system stiffness effects on mechanical characteristics and kinetic energy calculation of coal specimens[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2024, 57, 9941-9957.
- [45] 窦林名, 姜耀东, 曹安业, 等. 煤矿冲击矿压动静载的“应力场-震动波场”监测预警技术[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(04): 803-811.
- DOU Linming, JIANG Yaodong, CAO Anye, *et al.* Monitoring and pre-warning of rock burst hazard with technology of stress field and wave field in underground coalmines[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(4): 803-811.