

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.054



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 基于三维离散元的岩爆突变点处动力行为与能量演化研究

魏蕤<sup>a</sup>, 赵程<sup>a,b</sup>, 钱源<sup>a</sup>

(同济大学 a. 土木工程学院; b. 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 岩爆突变失稳时刻的动力行为及其能量演化是揭示岩爆形成机制的关键。参考失稳理论和刚度理论设计岩爆-围岩组合体试样的三维离散元数值模型, 并通过二次开发实现系统能量演化过程的可视化, 模拟岩爆的抛掷现象, 据此研究岩爆突变点处系统失稳的时序特征、自发性静动状态转换的动力学行为和系统能量演化之间的关联, 探讨岩爆的动力灾变机制。结果表明: 在岩爆突变点岩爆体到达峰值应力略早于围岩体, 岩爆体峰值后自身的破裂软化形成了对围岩体的主动卸荷, 使其应力由增变降; 被卸荷的围岩体发生向岩爆体的快速回弹变形, 并通过做功使自身储存的弹性能向岩爆体汇聚, 两者的能量被岩爆体瞬间一并释放, 引发块体的抛掷; 在此过程中, 两子系统相互作用形成的正反馈调节机制使破裂过程逐步加快, 最终引发动态失稳。

**关键词:** 岩爆; 突变点; 动力行为; 能量演化; 离散元

中图分类号: TU457 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2025)03-0102-11

## Dynamic behavior and energy evolution at rockburst mutation moment based on DEM

WEI Rui<sup>a</sup>, ZHAO Cheng<sup>a,b</sup>, QIAN Yuan<sup>a</sup>

(a. College of Civil Engineering; b. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China)

**Abstract:** The dynamic behavior and energy evolution of rockburst at the moment of sudden instability are the key to reveal rockburst formation mechanism. Based on the instability theory and stiffness theory, a combination model consists of rockburst body and its surrounding rock was established using the three-dimension discrete element method (DEM). With it the energy evolution process of the system is visualized through secondary development and the ejection phenomenon of rockburst is simulated successfully. Based on the numerical simulation, the tempo characteristics and energy evolution patterns of instability of the system are studied. The results show that the rockburst rock body reaches the peak stress slightly earlier than the surrounding rock body. The rupture and softening of the rockburst body after the peak stress results in the unloading of the surrounding rock body, and causes its stress change from increases to decreases. The surrounding rock mass then has a rapid

收稿日期: 2023-02-04

基金项目: 国家自然科学基金(U196510013, U22A20597)

作者简介: 魏蕤(1997-), 主要从事岩石力学研究, E-mail: 2032645@tongji.edu.cn

赵程(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: zhaocheng@tongji.edu.cn。

Received: 2023-02-04

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (Nos. U196510013, U22A20597)

Author brief: WEI Rui (1997-), main research interest: rock mechanics, E-mail: 2032645@tongji.edu.cn.

ZHAO Cheng (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: zhaocheng@tongji.edu.cn.

rebound deformation to the rockburst body, and the elastic energy stored in the surrounding rock body converges to the rockburst body. In this process, the positive feedback regulation mechanism formed by the interaction of the two subsystems accelerates the fracture process and finally leads to dynamic instability. The research results can provide theoretical reference and technical support for further revealing the rockburst mechanism.

**Keywords:** rockburst; mutation moment; dynamic behavior; energy evolution; discrete element method

近年来,在“向地球深部进军”科技战略的指导下,深埋地下工程建设步入了新的高峰期。在深部矿井、交通隧道、水电站工程、地下军事工程等深埋硐室的施工中,岩爆灾害时有发生,已成为危害工程安全、影响工程进度的普遍问题,并造成了严重的人员伤亡和经济损失<sup>[1-5]</sup>。如何在施工中避免岩爆成为摆在科技工作者和工程建设人员面前的重要课题。对此,钱七虎指出,规避岩爆事故重在机理研究,不仅应从岩石材料方面考虑岩爆性质,更重要的是从工程系统的角度讨论岩爆现象,并且注意研究岩爆从静力学学到动力学的全过程<sup>[6]</sup>。

对于应变型岩爆而言,其灾变过程涉及到岩体状态“静动转换”的问题。具体而言,在硐室开挖后,随着洞壁围岩的应力调整,主要发生准静态的收敛变形,突变失稳时,静态变形瞬间变为明显动力破坏,岩爆体获得了使其抛掷而出的动能。这一静动状态转换的过程具有自发性,其合理解释对于岩爆机理从静力学到动力学的跨越具有重要意义。摸清岩爆机理首先需深入认识其灾变的全过程,并重点关注灾害在突变点的动力行为和能量演化。目前对岩爆全程过程的研究已取得了诸多有益的成果。例如,何满潮等<sup>[7]</sup>认为,花岗岩岩爆全过程具有平静期、小颗粒弹射、片状剥离伴随着颗粒混合弹射及全面崩塌4个阶段;Li等<sup>[8]</sup>将岩爆孕育演化划分为以下过程:应力调整、能量聚积、裂隙萌生-扩展-贯通、破裂岩体崩落和弹射;顾金才等<sup>[9]</sup>提出,岩爆过程中的动、静状态转化是由洞壁围岩对岩爆体释放的能量有剩余造成的;章梦涛<sup>[10]</sup>认为,岩爆发生突然破坏的原因不是强度问题,而是变形稳定性不够、丧失稳定性的问题。已有研究成果在岩爆现象的刻画、灾变阶段的划分、应力与能量的演化等方面做出了重要贡献,促进了对岩爆发生过程和内在机理的更深入认识。然而,岩爆灾变全过程中的重要关注点——岩爆突变点的动力过程目前几乎没有文献详细报道。岩爆的突变点是岩爆由静到动的转折点,是解释岩爆自发性的关键点,因此,认识这一点的力学行为及其能量演化对于摸清岩爆形成机制具有十分重要的意义。

基于岩石试样尺度的物理模拟和数值模拟是

研究岩爆机理的重要手段,而成功模拟出岩爆抛掷现象的重要前提是灾变机理和触发机制的深入理解。目前,岩爆模拟已取得了不少成果,但受限于对岩爆机制的认识不完全到位,即使满足现有研究点给出的岩爆条件,也很难模拟出岩爆的抛掷现象<sup>[9]</sup>。一个重要原因在于,诸多物理试验和数值模拟只是从材料层面关注岩石的力学与能量特性。然而,岩爆是人为开挖地下硐室引起的,一块单独的岩石难以出现自发性的动力破坏,岩爆的产生应当与岩爆体周围的岩体(以下简称围岩体)密切相关。对此,Li等<sup>[11]</sup>指出,应当重视围岩体在应变岩爆灾变中扮演的角色,顾金才等<sup>[9]</sup>、刘建新等<sup>[12]</sup>、王来贵等<sup>[13]</sup>、向鹏等<sup>[14]</sup>也通过创新性地设计或改进试验装置、设计新的试验试样或数值试样,考虑了围岩体的作用,在符合工程实际的应力条件或简化条件下成功模拟了岩爆现象,并取得了岩爆机理的诸多新认识,逐步实现了岩爆研究从材料到结构的跨越。研究岩爆的形成机制,需以正确模拟出岩爆的抛掷现象为前提,因此,应当考虑围岩体对岩爆的驱动作用,可从岩石力学系统的角度探讨围岩体和岩爆体的相互作用机制。

笔者以岩爆突变点的动力行为和能量演化为研究对象,从岩石力学系统的角度出发,设计岩石组合体试样,成功模拟了岩爆的抛掷现象。为便于探讨岩爆形成机制,利用Fish语言编程对离散元方法进行二次开发,实现了对组合体内部各子系统的力学及能量参数的记录与可视化,据此挖掘岩爆特征、力学行为和能量变化之间的关联,探讨岩爆的灾变过程、静动转换机制和背后的能量驱动机制。

## 1 模型建立

### 1.1 基于系统理论的岩爆数值模型

由于具有建模方便、可重复性强、计算结果直观等优点,数值分析方法被广泛使用。常用的模拟手段有有限差分法、有限元法和离散元法等<sup>[15-22]</sup>。由于有限差分和有限元方法是基于连续介质理论,采用其模拟岩爆,无法直接观测到岩爆的抛掷现象,通常采用岩爆判据和相应云图相结合的方式判断岩爆发生的可能性<sup>[23-27]</sup>,是岩爆的间接模拟方法。

由于多数岩爆判据往往是岩爆发生的必要条件而非充分条件,导致其准确性难以保障,采用此类模拟评判岩爆的准确性还有待进一步考量。由于允许块体之间产生平移、开裂,甚至脱离,离散元方法对岩体大变形具有较好的处理能力,在正确设计模型的基础上具有直接模拟出岩爆抛掷现象的能力。此外,由于不需要结合岩爆判据,所得结果更为直观且准确。即便如此,多数研究,尤其是采用小尺度试件的模型,依然无法得到抛掷现象,往往呈现出变形和开裂的脆性破坏特征。数值模拟的结果是对目前灾害机理认识的外在表现,因此,准确模拟出岩爆抛掷现象,是分析岩爆机理的重要前提。为此,笔者采用块体离散元方法,在满足岩爆的条件下,具有直接产生岩爆的可能。

岩爆的成功模拟同样依赖于合理的模型设计。模型的设计思路重点参考了岩爆的刚度理论和失稳理论。失稳理论认为,岩爆是岩爆体和弹性围岩组成的力学平衡系统在外界扰动下的失稳现象,岩爆体应变软化发生破裂引起整个系统的失稳,使围

岩也参与能量释放<sup>[28]</sup>。刚度理论认为,当岩石试验机的加载刚度小于试件全应力应变曲线后半段斜率时,破坏瞬间试验机中积蓄的能量会向岩石释放,使之发生岩爆<sup>[29]</sup>。笔者基于这两种理论,不仅着眼于岩爆体本身,还将周边一定范围内对其产生力学和能量作用的围岩体考虑在内,两者共同组成一个完整的岩石力学系统,如图 1(a)所示。图 1(a)中的理论模型能较好地刻画岩爆体和围岩的关系,近年来已经得到顾金才等<sup>[9]</sup>、向鹏等<sup>[14]</sup>的重视。但其形状难以直接用于岩石力学的实验和数值研究,为便于计算,突出岩爆的核心机制,王来贵等<sup>[13]</sup>、林鹏等<sup>[30]</sup>以及《冲击地压测定、监测与防治方法》(GB/T 25217.3—2019)将其简化为串联的岩-岩组合体和煤-岩组合体试样。笔者同样取出如图 1(a)所示的岩爆系统中任意具有代表性的局部区域建立一个简化的串联岩石组合体试样,如图 1(b)所示。此外,为深刻探讨围岩体对岩爆的作用,还设计了一个对照实验,如图 1(c)所示,其试样和组合体试样中的岩爆体完全相同,但无围岩体参与。

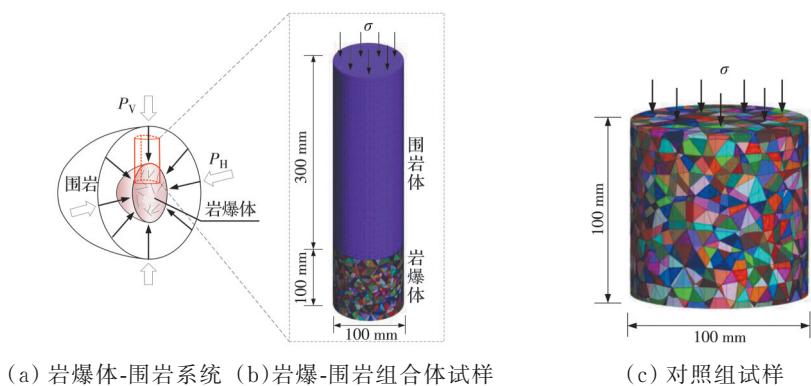


图 1 岩爆-围岩组合体试样和对照组试样

Fig. 1 The bursting rock-surrounding rock combination specimen and its control specimen

岩爆体设置为直径 100 mm、高为 100 mm 的圆柱体岩样,采用虚拟节理离散为若干块体,以保证一定条件下能够出现开裂与块体抛掷现象;围岩体是岩爆体周围较为完整的岩石,直径和岩爆体相同,为满足岩爆的刚度理论,长度设置为岩爆体的 3 倍,岩爆前后其依然保持为弹性或局部少量塑性的完整状态,因此不予离散。

考虑到隧道开挖后周边岩体的应力调整,隧洞将发生收敛变形,深埋硬岩隧道的洞壁岩体通常处于切向受压状态,切向应力  $\sigma_\theta$  在此处达到最大,而径向应力  $\sigma_r$  为 0,如图 2 所示。为此,在不考虑隧道轴向应力的条件下,可将试样简化为单轴受压状态。采用准静态位移加载方式,在上下两端以恒定的速度缓慢加载,大小限制为 0.005 m/s。排除采用应

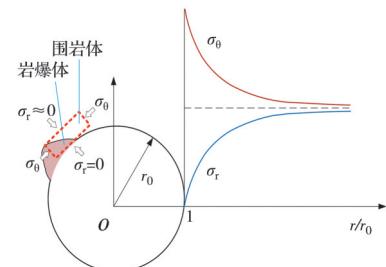


图 2 隧道周边应力分布与组合体试样受力状态

Fig. 2 The stress distribution of the tunnel boundary and the stress state of the combination specimen

力加载方式下岩样失稳瞬间试验机压头突然向下位移而使岩样动态破坏的可能性。

岩石材料以锦屏二级水电站白山组大理岩<sup>[31]</sup>为模拟对象,其物理力学参数如表 1 所示。在数值模型中,单元的本构采用莫尔-库伦模型,虚拟节理采

用库伦滑移模型。由于岩爆体中存在虚拟节理,需要分别对围岩体和岩爆体赋予不同的参数,使之均表现出表1所示的宏观力学特性。其中,虚拟节理

和新生裂纹的参数如表2所示。对照组试样与试验组中的岩爆体各参数完全相同,加载速率也保持一致。

表1 白山组大理岩的宏观力学特性<sup>[31]</sup>Table 1 Macroscopic mechanical properties of the Baishan Formation Marble<sup>[31]</sup>

| 密度 $d$ /(kg/m <sup>3</sup> ) | 体积模量 $K$ /Pa          | 剪切模量 $G$ /Pa          | 黏聚力 $c$ /Pa        | 内摩擦角 $\varphi$ /(°) | 张拉强度 $\sigma_t$ /Pa |
|------------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|---------------------|---------------------|
| 2 700                        | $2.44 \times 10^{10}$ | $2.18 \times 10^{10}$ | $3.73 \times 10^7$ | 33.69               | $5 \times 10^6$     |

表2 虚拟节理和新生裂纹的宏观力学特性

Table 2 Macroscopic mechanical properties of the virtual joints and new cracks

| 节理   | 法向刚度 $k_n$ /(10 <sup>12</sup> Pa/m) | 切向刚度 $k_s$ /(10 <sup>12</sup> Pa/m) | 节理张拉强度 $\sigma$ /(10 <sup>6</sup> Pa) | 节理黏聚力 $c$ /Pa      | 内摩擦角 $\varphi$ /(°) |
|------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|--------------------|---------------------|
| 虚拟节理 | 3                                   | 1.5                                 | 1                                     | $4 \times 10^7$    | 33.69               |
| 新生节理 | 3                                   | 1.5                                 | 0                                     | $8.37 \times 10^6$ | 5                   |

## 1.2 基于Fish语言的离散元方法开发

### 1.2.1 弹性应变能的分区域计算与可视化

岩爆是能量驱动下的岩石剧烈破坏,研究系统内部的能量演化对于岩爆灾变机理的探讨尤为重要。尽管3DEC已能计算出弹性应变能的大小,但仅限于模型整体,而无法实现对本模型中的两个子系统进行单独的计算,更无法绘制应变能云图。因此,难以研究系统内部能量的转化机制,为此,需通过二次开发满足这一需求。3DEC采用的离散元方法使分区域计算成为可能,其块体(block)组成和二次开发用到的单元(zone)和节点(gridpoint)的示意如图3所示。

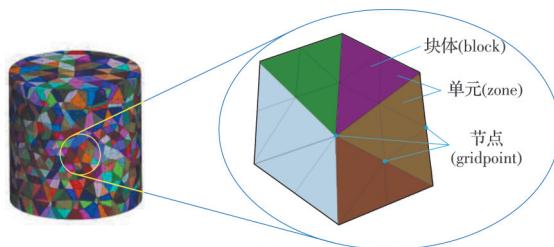


图3 3DEC中的块体、单元和节点

Fig. 3 Block, zone and gridpoint in 3DEC

把岩爆体和围岩体中的块体划分为不同的组(group),块体内存储的应变能  $E_{ez}$  根据式(1)<sup>[32]</sup>计算,获得每个单元的弹性应变能密度  $U_{ez}$  和体积  $V$  之积,遍历组内的全部 zone 并累加求得。其中,弹性应变能密度  $U_{ez}$  由式(2)<sup>[32-33]</sup>求得,并据此编制弹性应变能密度的计算程序。采用 zone extra 的方法得到岩爆体和围岩的能量密度云图,实现分区域对弹性应变能密度的计算与可视化。

$$E_{ez} = \sum_{i=1}^{n_g} \sum_{j=1}^{n_z} U_{ez_j} V_j \quad (1)$$

$$U_{ez} = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_1\sigma_3 + \sigma_2\sigma_3)] \quad (2)$$

### 1.2.2 抛掷块体的动能计算

3DEC可以显示块体速度大小而无法显示块体的动能,然而岩爆过程中往往伴随着小块体的高速弹出而动能相对较小,或有大块体低速运动而动能较大,因此,相比速度而言,动能是反映岩爆剧烈程度更为综合的指标,是岩爆能量演化的重要关注对象。已有的动能计算程序无法进行抛掷颗粒的选择性计算。针对上述问题,通过每个单元上节点的质量与速度,按照式(3)<sup>[32]</sup>求取并累加计算每个块体的动能。把整体试样的节点按照岩爆体和围岩体的范围分为两个部分,分别求取其动能。

$$E_k = \sum_{i=1}^{n_{gp}} \frac{1}{2} m_i (v_x^2 + v_y^2 + v_z^2) \quad (3)$$

当模型的加载稳定后,由于位移加载会引起块体细微的恒定变形,内部质点会随着变形发生极小的移动,使整个试样的节点具有一个很小的速度。这一速度不能反映试样的非稳定变形,需要将其过滤掉。根据这一数值对岩爆体内的块体速度进行筛选,将速度大于平均速度的块体视为岩爆过程中弹射出的块体,筛选出速度大于这一数值的块体,计算其动能,经过筛选速度后,由于压缩变形产生的动能得以过滤,从而更准确地刻画岩爆过程中弹射出的块体的动能。此外,筛选出弹射块体的速度,亦可用于求取所有弹射块体的平均速度。

## 2 结果分析

### 2.1 岩爆灾变演化全过程

模型中试验组的岩爆体发生了强烈的抛掷现象,成功模拟了岩爆的灾变演化过程,图4和图5分别为岩爆体的应力-时间步数曲线和应力-应变曲线。曲线上A点为峰值点,B点为残余强度起始点,C点为B点后一点。根据这两条曲线可把岩爆过程简单划分为3个阶段,分别为岩爆发生前的孕灾阶

段( $OA$ 段)、岩爆发生时的灾变阶段( $AB$ 段)和岩爆发生后的灾后阶段( $B$ 点之后)。各特征点对应的岩爆现象如图6所示。

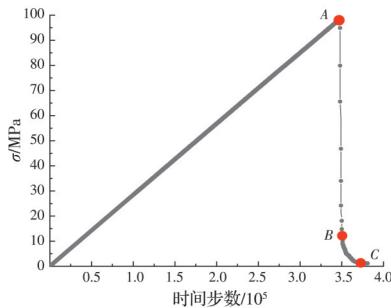


图4 岩爆体应力-时间步数曲线

Fig. 4 The stress-number of timestep curve of the bursting rock

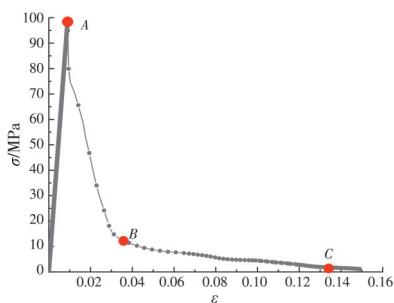


图5 岩爆体应力-应变曲线

Fig. 5 The stress-strain curve of the bursting rock

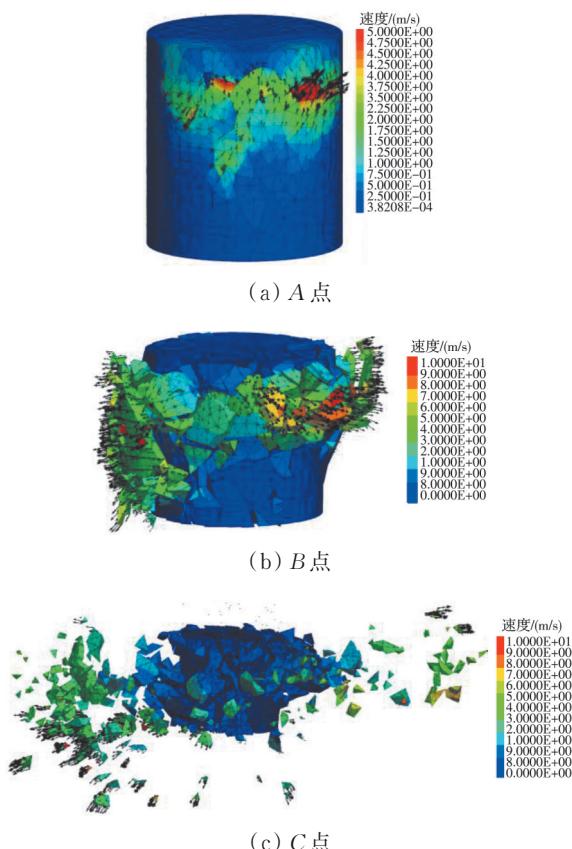


图6 岩爆体特征点对应的岩爆现象

Fig. 6 Rockburst phenomenon at the typical points

在孕灾阶段,岩石的硬脆性使之主要发生弹性压缩变形。越过峰值点 $A$ 后,岩爆体开始失稳并进入灾变阶段,即 $AB$ 段。 $A$ 点是稳定变形与失稳的临界点,此刻局部位置严重破裂,部分岩块正欲脱离母岩。越过 $A$ 点后应力骤降,并伴随着破裂的快速发展,这一阶段岩爆体彻底失稳,块体弹射的区域迅速扩大,发生明显的岩爆现象。从峰值强度到残余强度消耗的时间仅为峰前的1.45%,说明岩爆灾变瞬时完成,表现了其突发性。到达残余变形点 $B$ 时,岩爆体经历了 $AB$ 段的失稳过程,破碎严重,应力大幅度降低,几乎无继续承载的能力(图4)。此时,大量块体弹射而出(图6(b)),最高时速可达10 m/s,平均速度为1.48 m/s,单个块体最大动能达0.06 J,抛掷块体总动能为2.94 J。到达 $C$ 点时,在 $B$ 点脱离母岩的块体经过一段时间的飞行,散落于岩爆体四周,抛掷而出的块体有大有小,有远有近,与真实岩爆现象较为一致。

相比上述剧烈的岩爆动力破坏现象,对照组试样只发生了静态的脆性破坏。其应力-时间步数和应力-应变曲线分别如图7、图8所示。可以发现,试样的应力从峰值点 $A'$ 迅速突降到 $B'$ ,表明岩石具有明显的脆性。不同的是,对照组在应力陡降后的峰值强度较大,在 $B'$ 为47.2 MPa,后续在这一值附近发生连续的起伏变化,而岩爆体在剧烈破坏后几乎无残余强度。其原因可从图6与图9的对比中发

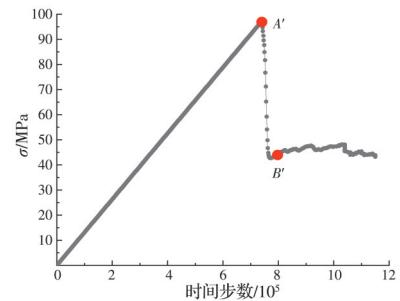


图7 对照组的应力-时间步数曲线

Fig. 7 The stress-number of timesteps of the control specimen

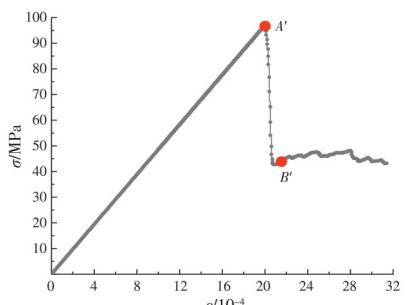


图8 对照组的应力-应变曲线

Fig. 8 The stress-strain curve of the control specimen

现,实验组中岩爆体破坏后大量块体抛之而出,剩余块体相对较少且破碎严重,完全丧失了完整性,而几乎无法继续承载,残余强度接近为0;而对照组的岩样在峰值A'点突然地失稳使局部区域体破裂,如图9(a)所示,部分块体因破裂获得了很小的速度,最大不超过0.8 m/s,但随着B'C'段应力的逐渐释放,到C'时大规模破裂逐渐结束,大部分区域不再具有明显的速度,亦无块体抛掷,总体上相对较为完整,因此有一定的承载能力和残余强度。

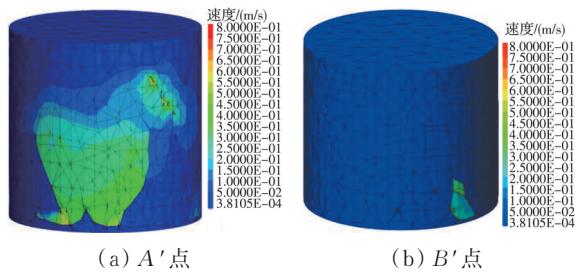


图9 对照组特征点对应的脆性破坏现象

Fig. 9 The brittle failure phenomena of the control specimen at the typical points

图4和图7表明,试验组和对照组的失稳都在瞬间完成,但从图8可见对照组试样失稳后产生的轴向应变较小,而在图5中其产生的应变很大,B点之后曲线仿佛像拖着一条“长长的尾巴”。这种现象表明岩爆体在失稳过程中被严重压缩,轴向变形严重,而同样采用相同位移加载的对照组却只发生了极小的变形,说明岩爆体的破坏可能受到了上部围岩体的猛烈冲击,在瞬间产生了猛烈的压缩变形。从两组试验现象来看,大规模岩爆的发生伴随着较大的变形速率。

## 2.2 岩爆突变点的两体时序变化特征

AB段是岩爆的灾变阶段,其中,A点是岩爆体由稳定突变为失稳的转折点,也是实现由静到动的自发性状态转变的突变点,是岩爆灾变机理研究应当重点关注的时刻。为认识这一短暂的时间区域内系统的灾变演化行为,绘制岩爆体和围岩体的应力-时间步数曲线,如图10所示。由图10可见,在峰前的压缩变形阶段,两条曲线几乎重合,共同受压且变形协调。到达峰值后,两曲线均急速下降,并迅速到达残余应力。在整个过程中应力峰值区域存在细微的差异,而岩爆的形成机制就蕴藏在这种差异的背后。需要指出的是,对于岩爆体而言,其应力峰值代表了强度极限,越过峰值表明岩石发生了结构性破坏;而对围岩体而言,根据岩爆的刚度理论和失稳理论,峰值是应力积累的最大值,由于外界约束的减弱对围岩体产生卸荷,而使之应力降低,形成峰后阶段。

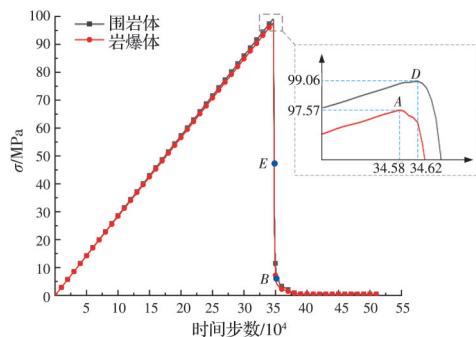


图10 岩爆体和围岩体的应力时序变化

Fig. 10 Stress-time sequence of the bursting rock and the surrounding rock

峰值区域的放大图显示,在峰值应力附近,岩爆体和围岩体并非同时越过峰值点。岩爆体在A点越过峰值点,失去继续承载的能力,此时围岩体的应力依然在缓慢增长,经过短暂的时间,到D点才逐渐越过峰值点。在AD时间段,岩爆体虽然发生软化,但应力下降相对缓慢,而在D点之后,曲线斜率突变,应力快速下降,围岩体的应力也随之逐渐加快跌落,围岩体的卸荷变得更加猛烈。这种两体应力的时序变化特征说明两子系统存在一定的相互作用和互相影响,共同推动了岩爆动力灾害的形成。

系统的失稳必定伴随着内部质点的运动,应力是系统失稳的一种表征方式,而动能则是失稳和质点运动的更直观体现,为此绘制了两条在峰值附近的应力和动能曲线,如图11所示。为避免试样端部位移加载引起动能误差,两条动能曲线均过滤了由此引起的微小动能,保证所得动能完全是由非稳定变形引起的。从图11可见,在岩爆体的峰值点A之前,两体主要发生稳定的压缩变形,动能非常小,甚至均接近于0;到达峰值点A后,岩爆体开始失稳,动能迅速上升(af段),由于此时围岩体尚未因卸荷而发生回弹,岩爆体这种动能的增加可能主要源

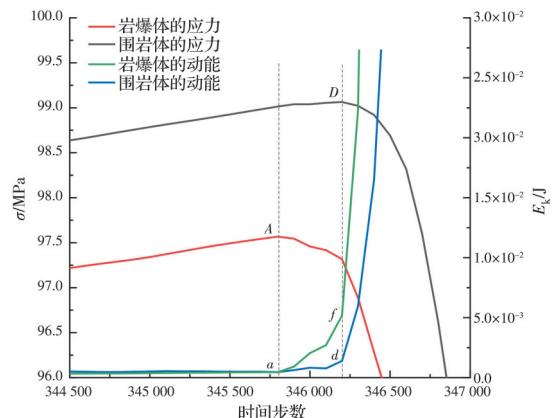


图11 岩爆突变点处岩爆体和围岩体的应力时序变化

Fig. 11 Stress-time sequence of the bursting rock and the surrounding rock at mutation moment

于内部的破裂引起了破裂区的质点运动。在围岩体应力峰值点  $D$  之前, 岩爆体的动能虽有明显上升趋势, 而由于尚未卸荷, 围岩体动能依然变化不大 ( $ad$  段)。当围岩体越过峰值点  $D$  时, 动能激增, 说明围岩体由于卸荷而发生反向的回弹变形, 这一行为相应地也引起了岩爆体的动能急速增长, 说明围岩体的卸荷回弹作用于岩爆体, 成为引起岩爆体突发性失稳和内部质点运动的直接原因。

岩爆体和围岩体在突变点附近均表现出非常一致的时序变化特征, 这一规律是由系统中两体相互作用造成, 在突变失稳时刻, 岩爆体损伤破裂导致对围岩体的卸荷, 当卸荷到一定程度时, 围岩体发生剧烈回弹而出现运动, 这种运动作用于岩爆体, 形成对岩爆体的动力加载, 加剧了岩爆体的破碎进程, 引起内部块体的运动, 并在动力作用下发生抛掷现象。因此, 突变失稳时刻, 岩爆体由静到动的自发性状态变化由两体时序变化规律控制, 其中围岩体的卸荷回弹是突变的主要推动力。两体的时序变化规律是促使岩爆产生动力突变的直接原因, 欲揭示动力突变的内在原因, 还需进一步关注表观现象背后的能量演化规律。

### 2.3 岩爆突变点的能量演化规律

为便于可视化系统的能量演化过程, 图 12 和图 13 分别绘制了围岩体和岩爆体在特征点  $A, D, E$  和

$B$  的应变能密度云图, 其中,  $E$  点为  $AB$  突变阶段的中点。图 14 为此 4 点对应的岩爆体裂纹分布图。在岩爆体的应力峰值点  $A$ , 岩爆体和围岩体都积累了大量弹性应变能(图 12(a)和 13(a)), 围岩体中弹性应变能均匀分布, 只有其底部边界受岩爆体的影响而局部稍有减小; 此刻的岩爆体处于失稳的临界点, 弹性应变能较大且整体分布相对均匀, 但由于其非均质性, 在应变局部化的影响下, 部分区域出现能量集中现象, 例如图 13(a)中的区域 I。由于峰前已有损伤, 此时岩爆体部分区域有裂纹发育(图 14(a)), 且图 13(a)中区域 II 在峰前有一小块飞出的区域, 其应变能已经得到充分释放, 呈现出深蓝色。

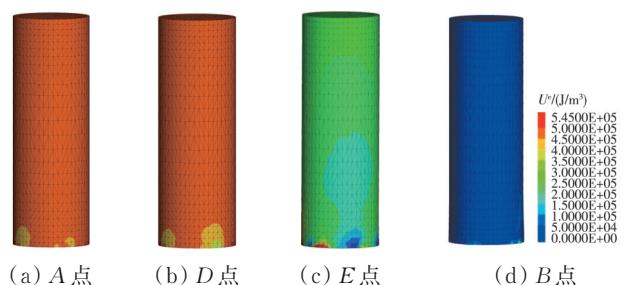


图 12 特征点对应的围岩体弹性应变能密度云图

Fig. 12 Elastic strain energy density of the surrounding rock at the typical points

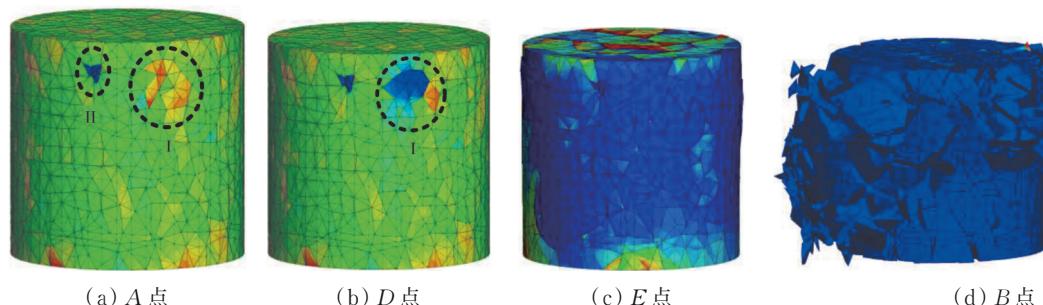


图 13 特征点对应的岩爆体弹性应变能密度云图

Fig. 13 Elastic strain energy density of the bursting rock at the typical points

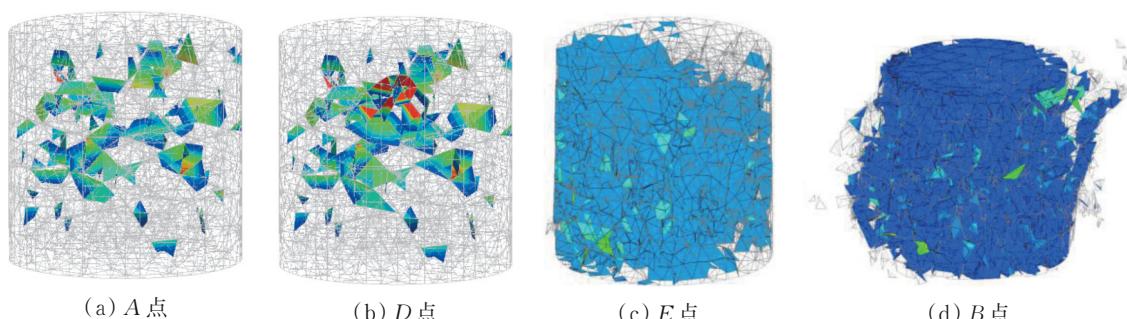


图 14 特征点对应的岩爆体裂纹分布

Fig. 14 Crack distribution of the bursting rock at the typical points

A点后岩爆体开始失稳,从A点到D点极其短暂的时间内,岩爆体破裂加快,裂纹分布范围迅速增加,如图14(b)所示。由于局部破裂的加剧,在D点之前能量高度集中的局部区域I已率先脱离母岩,出现明显的弹性能释放现象(图13(b))。而AD段围岩体的应力依然保持小幅度增长,整体上能量继续积累,由于尚未卸荷,相比图13(a),此时的图13(b)无较大变化。AD段岩爆体损伤破裂的加剧使之难以继续承担来自围岩体的压力,自身的软化到达一定程度时,对围岩体底部的支撑能力降低,使之失去有力支撑而发生卸荷。在D点后即使外力继续对围岩体进行加载,也难以使其继续发生压缩变形,到达了压缩变形的极限。也反映出岩爆体存在峰值应力是由于自身破裂软化,无法继续承担荷载而出现应力下降;但围岩体存在峰值应力是由于岩爆体软化引起的主动卸荷。

由于围岩体底部无法被岩爆体继续约束,在D点之后,围岩体发生迅速的回弹变形,由于其顶部被外力约束,底部产生剧烈的向下位移,类似于被压缩的弹簧一端失去限制而迅速伸长。回弹速度最大达到4.16 m/s,约为失稳临界点D时的26.6倍(图15(a)、(b))。在强烈的回弹变形中,围岩体储存的弹性能得以快速释放,如图12(c)所示,弹性能呈现出整体式减小,在灾变阶段完成时几乎全部释放(图12(d))。围岩体的回弹变形通过自由端位移的形式向其下部的岩爆体施加动力荷载并对其做功,把前期储存的能量集中向岩爆体释放,这一行为加剧了岩爆体的破裂,如图14(c)、(d)所示,在围岩体对其做功之后,裂纹急剧增多,遍布整个岩爆

体。严重的破裂使破碎块体失去周围块体的约束,外界传输和自身储存的应变能在瞬间得以彻底释放,如图13(c)、(d)所示,形成了足够大的能量释放率,引发大量块体的抛掷,造成强烈的岩爆现象。

因此,在突变失稳时刻,两体之间的时序变化规律使系统发生应力和能量驱动下的动力学过程。这一过程中,两体由灾变前的相互约束,变为灾变时的互相促进。结合文献[13]提出的正反馈调节机制,可将岩爆自发性的静动状态转换机制表述为:硐室开挖后洞壁出现应力调整,径向应力突降为0,而切向应力逐渐增加,使洞壁承受的压应力逐渐增加,由此引起的洞壁的收敛变形使弹性应变能大量积累;在这一条件下,由于硐室应力在周向上的不均匀性和岩体自身的不均质性,洞壁局部区域应力集中明显,率先达到峰值强度,这一区域即可认为是后续的岩爆体。岩爆体在峰后短时间内裂纹迅速扩展,自身软化加剧,到达一定程度时难以继续约束同样受压而发生弹性压缩变形的周围较完整岩体(即模型中的围岩体),并引起围岩体一侧的卸荷行为。因一侧失去约束,围岩体发生回弹变形,回弹具有相当的速度,围岩体自身出现了由静到动的状态转变,并形成对岩爆体的动力加载,释放自身储存的能量并通过做功的方式向岩爆体汇聚,这一行为又加剧了岩爆体原有的破坏进程,使之更为破碎。岩爆体的进一步破裂反过来又加快了围岩的卸荷速率,如此循环,其间围岩体的直接动力加载作用和内在的能量汇聚使岩爆体受到冲击,引起足够大的能量释放率,触发动力过程,最终导致岩爆发生。

### 3 讨论

随着岩爆研究的不断深入,围岩体在促进岩爆灾变中所起的作用正逐渐被重视。文献[9]开展的岩爆模拟试验对岩爆的理论认识和后续的研究工作具有重要的启发性意义。试验首先采用普通油压试验机对单个脆性水泥砂浆试样进行单轴压缩,结果试样只发生了静态的脆性破坏,如图16(a)所示。通过对现有岩爆试验难以产生岩爆抛掷现象的原因进行了深入分析,提出围岩对岩爆体产生能量汇聚是抛掷型岩爆发生的重要前提这一观点,并指出模拟试验必须实现对岩爆体迅速的能量补充方可模拟出岩爆。据此,通过在试验机加载端下安装弹簧研制出新的岩爆模拟装置,用被压缩的弹簧近似代替围岩体对岩爆体的挤压作用,形成了弹簧-试样串联的力学系统,用以模拟岩爆-围岩体系统,其原理如图16(b)所示。利用新研发的试验装置再次对相同的水泥砂浆试样进行单轴压缩,出现了强

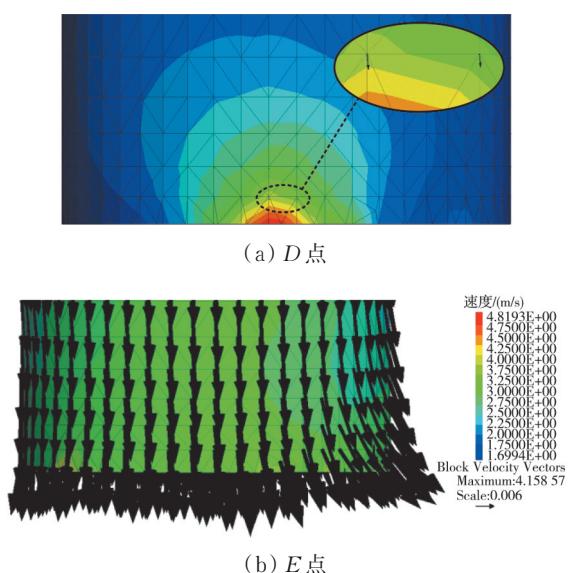


图15 特征点对应的围岩体底部速度

Fig. 15 Velocity of the bottom of surrounding rock at the typical points

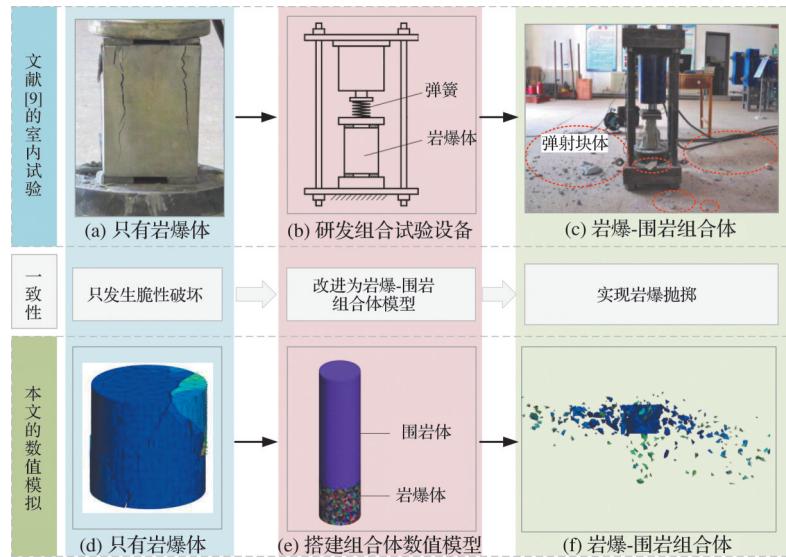


图 16 岩爆-围岩组合体数值模拟与文献[9]中试验的一致性

Fig 16 The consistency of the experiments in literature [9] and the numerical simulation of the bursting rock-surrounding rock combination specimen

烈的岩爆现象,如图 16(c)所示。笔者在借鉴其理论思想的基础上,开展数值试验,所得的岩爆现象(图 16(f))以及对照组的脆性破坏现象(图 16(a))与其一致,证明数值模型设计合理,并得到了良好的模拟结果。

试验已证实了围岩体对岩爆体具有促进作用,即岩爆的能量来自于哪里已有结论,但欲完全弄清楚是如何促进的,也就是系统的能量是如何释放的,岩爆由静到动的状态转化是如何实现的,尚有距离。这就要求重点展开刻画系统在灾变启动时刻的演化过程和应力与能量的传递规律。捕捉系统失稳时刻的时序过程,并实现过程中能量的可视化是达到这一目的的可行方法,对于进一步深入揭示岩爆的灾变机理具有重要意义。这正是现有试验难以实现的地方。笔者采用二次开发三维离散元方法开展数值试验,实现了失稳时刻能量的记录与可视化,所得的岩爆系统时序变化特征和启动机制可作为对现有岩爆试验研究的一个有效补充。

笔者发现围岩体对岩爆体的回弹作用及其带来的能量传递是触发岩爆动力破坏的关键。对于岩爆的防治不能只关注将要发生岩爆的岩体本身,更应该着眼于控制岩爆体周围一定范围内岩体(即围岩体)的变形,在一定程度上限制甚至阻断围岩体向岩爆体的应力与能量传递,也可采取措施减弱其传递速度,使原应力集中区域缓慢地发生脆性破坏,逐渐释放能量。为此需要研究体系化的岩爆监测与防治手段,首先应当研发相应的监测技术,实现对洞壁应力集中部位的识别和监测,找准应力集中的中心区域,划分出能够对岩爆体产生影响的围岩体的范围;其次,在这一范围内,对靠近洞壁屈服

点的部位及沿着围岩体向岩爆体将要释放变形的方向,采用人工成缝的方法,如切缝法、预裂爆破法、成排泄压孔法等形成隔断,阻断或减弱围岩体对岩爆体的作用。

## 4 结论

基于三维离散元方法,开展岩石组合体试样的岩爆模拟数值试验,从力学和能量角度研究灾变点的动力行为及其能量演化,探究岩爆动力灾变的形成机制,证实了岩爆的正反馈调节机制,得出如下结论:

1)在灾变突变失稳时刻,岩爆体到达峰值应力略早于围岩体,岩爆体在峰值应力后自身破裂软化加剧,无法继续承担荷载,这一行为引起系统的失稳,是对围岩体的主动卸荷,围岩体在一端失去约束后应力不再增长,转而释放。

2)围岩体被卸荷后发生向岩爆体的快速回弹变形,通过自由端对岩爆体做功的形式,使自身储存的弹性应变能向岩爆体汇聚,外界传输和岩爆体自身储存的能量瞬间被彻底释放,形成足够大的能量释放率,引发块体的抛掷。

3)由岩爆体和围岩体组成的系统中存在正反馈调节机制,岩爆体峰后的破裂软化引起围岩体的瞬态卸荷,导致其回弹变形并作用于岩爆体,加剧了岩爆体的破坏进程。岩爆体的进一步破坏又加快了围岩体的卸荷速率,如此循环,最终导致岩爆。

本研究对岩爆模型进行高度抽象与合理简化,后续研究可在此基础上进一步考虑三维应力状态,开展复杂应力状态下的三轴试验、模型试验与现场试验。

## 参考文献

- [1] 钱七虎. 岩爆、冲击地压的定义、机制、分类及其定量预测模型[J]. 岩土力学, 2014, 35(1): 1-6.  
QIAN Q H. Definition, mechanism, classification and quantitative forecast model for rockburst and pressure bump [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(1): 1-6. (in Chinese)
- [2] GAO F Q, KAISER P K, STEAD D, et al. Strain-burst phenomena and numerical simulation of self-initiated brittle rock failure [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2019, 116: 52-63.
- [3] XIAO Y X, FENG X T, LI S J, et al. Rock mass failure mechanisms during the evolution process of rockbursts in tunnels [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2016, 83: 174-181.
- [4] 兰恒星, 张宁, 李郎平, 等. 川藏铁路可研阶段重大工程地质风险分析[J]. 工程地质学报, 2021, 29(2): 326-341.  
LAN H X, ZHANG N, LI L P, et al. Risk analysis of major engineering geological hazards for sichuan-tibet railway in the phase of feasibility study [J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(2): 326-341. (in Chinese)
- [5] 宫凤强, 潘俊峰, 江权. 岩爆和冲击地压的差异解析及深部工程地质灾害关键机理问题[J]. 工程地质学报, 2021, 29(4): 933-961.  
GONG F Q, PAN J F, JIANG Q. The difference analysis of rock burst and coal burst and key mechanisms of deep engineering geological hazards [J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(4): 933-961. (in Chinese)
- [6] 中国科协学会学术部. 岩爆机理探索[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2011.  
China Association for Science and Technology. Exploration of rockburst mechanism [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2011. (in Chinese)
- [7] 何满潮, 苗金丽, 李德建, 等. 深部花岗岩试样岩爆过程实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 865-876.  
HE M C, MIAO J L, LI D J, et al. Experimental study on rockburst processes of granite specimen at great depth [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 865-876. (in Chinese)
- [8] LI S J, FENG X T, LI Z H, et al. *In situ* monitoring of rockburst nucleation and evolution in the deeply buried tunnels of Jinping II hydropower station [J]. Engineering Geology, 2012, 137/138: 85-96.
- [9] 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(6): 1081-1089.  
GU J C, FAN J Q, KONG F L, et al. Mechanism of ejective rockburst and model testing technology [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(6): 1081-1089. (in Chinese)
- [10] 章梦涛. 冲击地压失稳理论与数值模拟计算[J]. 岩石力学与工程学报, 1987, 6(3): 197-204.  
ZHANG M T. Instability theory and mathematical model for coal/rock bursts [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1987, 6(3): 197-204. (in Chinese)
- [11] LI C C, ZHAO T B, ZHANG Y B, et al. A study on the energy sources and the role of the surrounding rock mass in strain burst [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2022, 154: 105114.
- [12] 刘建新, 唐春安, 朱万成, 等. 煤岩串联组合模型及冲击地压机理的研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(2): 276-280.  
LIU J X, TANG C A, ZHU W C, et al. Rock - coal model for studying the rockburst [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(2): 276-280. (in Chinese)
- [13] 王来贵, 习彦会, 潘纪伟, 等. 动力弹射型岩爆发生机理及反馈机制[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2016, 35(4): 365-370.  
WANG L G, XI Y H, PAN J W, et al. Occurrence and feedback mechanism of dynamic ejection rock-burst [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2016, 35(4): 365-370. (in Chinese)
- [14] 向鹏, 纪洪广, 蔡美峰, 等. 抛掷型岩爆震源体能量动态释放机制与几何尺度特征[J]. 岩土力学, 2018, 39(2): 457-466.  
XIANG P, JI H G, CAI M F, et al. Dynamic energy release mechanism and geometric scale feature of ejection rockburst source [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(2): 457-466. (in Chinese)
- [15] WANG J, APEL D B, PU Y Y, et al. Numerical modeling for rockbursts: A state-of-the-art review [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2021, 13(2): 457-478.
- [16] 赵菲, 何满潮, 李德建, 等. 真三轴卸载煤爆实验破坏特征演化分析[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(1): 142-150.  
ZHAO F, HE M C, LI D J, et al. Damage evolution in the fracture process of coal burst during true triaxial unloading test [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(1): 142-150. (in Chinese)
- [17] 齐庆新, 陈尚本, 王怀新, 等. 冲击地压、岩爆、矿震的关系及其数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1852-1858.  
QI Q X, CHEN S B, WANG H X, et al. Study on the relations among coal bump, rockburst and mining tremor with numerical simulation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1852-1858. (in Chinese)

- [18] 苏国韶, 冯夏庭, 江权, 等. 高地应力下地下工程稳定性分析与优化的局部能量释放率新指标研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2453-2460.
- SU G S, FENG X T, JIANG Q, et al. Study on new index of local energy release rate for stability analysis and optimal design of underground rockmass engineering with high geostress [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(12): 2453-2460. (in Chinese)
- [19] 田青峰, 袁照辉, 张睿, 等. 高地应力水平岩层隧道岩爆机制研究: 以大峡谷隧道为例[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(Sup1): 223-231.
- TIAN Q F, YUAN Z H, ZHANG R, et al. Rockburst mechanism of Daxiagu tunnel in horizontal rock formation with high crustal stress[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(Sup1): 223-231. (in Chinese)
- [20] GAO F Q, KANG H P, LI J Z. Numerical simulation of fault-slip rockbursts using the distinct element method [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 110: 103805.
- [21] 王之东, 黎立云, 陈滔, 等. 矿柱岩爆模型试验中能量释放研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(Sup 2): 177-185, 208.
- WANG Z D, LI L Y, CHEN T, et al. Study of energy release in model tests on pillar rockburst [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(Sup 2): 177-185, 208. (in Chinese)
- [22] WANG J A, 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.
- [23] GONG F Q, WANG Y L, LUO S. Rockburst proneness criteria for rock materials: Review and new insights [J]. Journal of Central South University, 2020, 27(10): 2793-2821.
- [24] 谷明成, 何发亮, 陈成宗. 秦岭隧道岩爆的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(9): 1324-1329.
- GU M C, HE F L, CHEN C Z. Study on rockburst in Qingling tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(9): 1324-1329. (in Chinese)
- [25] 尚彦军, 张镜剑, 傅冰骏. 应变型岩爆三要素分析及岩爆势表达[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(8): 1520-1527.
- SHANG Y J, ZHANG J J, FU B J. Analyses of three parameters for strain mode rockburst and expression of rockburst potential [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(8): 1520-1527. (in Chinese)
- [26] LAN H X, MARTIN C D, ANDERSSON J C. Evolution of in situ rock mass damage induced by mechanical-thermal loading [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2013, 46(1): 153-168.
- [27] ANDERSSON J C, MARTIN C D, STILLE H. The Äspö Pillar Stability Experiment: part II—Rock mass response to coupled excavation-induced and thermal-induced stresses [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(5): 879-895.
- [28] 王来贵, 黄润秋, 张倬元, 等. 超前强扰诱发岩石力学系统失稳及其防灾意义的探讨[J]. 自然灾害学报, 1997, 6(2): 55-59.
- WANG L G, HUANG R Q, ZHANG Z Y, et al. Discussion on instability of rock mechanics system induced by advanced strong disturbance and its disaster prevention significance [J]. Journal of Natural Disasters, 1997, 6(2): 55-59. (in Chinese)
- [29] 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, 20(5): 485-491.
- XU Z H, XU X H, TANG C A. Theoretical analysis of a cusp catastrophe bump of coal pillar under hard rocks [J]. Journal of China Coal Society, 1995, 20(5): 485-491. (in Chinese)
- [30] 林鹏, 唐春安, 陈忠辉, 等. 二岩体系统破坏全过程的数值模拟和实验研究[J]. 地震, 1999, 19(4): 413-418.
- LIN P, TANG C A, CHEN Z H, et al. Numerical and experimental study of deformation and failure behavior in a double rock specimen system [J]. Earthquake, 1999, 19(4): 413-418. (in Chinese)
- [31] 张春生, 陈祥荣, 侯靖, 等. 锦屏二级水电站深埋大理岩力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(10): 1999-2009.
- ZHANG C S, CHEN X R, HOU J, et al. Study of mechanical behavior of deep-buried marble at Jinping II hydropower station [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(10): 1999-2009. (in Chinese)
- [32] Itasca, Consulting Group Inc. 3DEC 3 Dimension Distinct Element Code: User's Manual [M]. Minnesota, USA, 2005.
- [33] 谢和平, 鞠杨, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3003-3010.
- XIE H P, JU Y, LI L Y. Criteria for strength and structural failure of rocks based on energy dissipation and energy release principles [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3003-3010. (in Chinese)

(编辑 胡玲)