

巷道岩爆过程能量演化特征实验研究

梁 鹏^{1,2}, 张艳博^{1,2}, 田宝柱^{1,2}, 姚旭龙^{1,2}, 孙 林^{1,2}, 刘祥鑫^{1,2}

(1. 华北理工大学 矿业工程学院, 河北 唐山 063210; 2. 华北理工大学 河北省矿业开发与安全技术重点实验室, 河北 唐山 063210)

摘要: 开展双轴加载条件下巷道岩爆声发射监测实验, 分析巷道岩爆过程宏观破坏特征, 并与现场岩爆发生过程进行对比研究; 借助声发射能量参数, 分析岩爆宏观破坏过程能量积聚、释放规律及能量的时间效应, 重点探讨水平载荷对岩爆过程能量演化规律的影响, 进一步从能量的角度揭示巷道岩爆的发生机制。研究表明: 巷道岩爆存在平静期、颗粒弹射、岩片剥落伴随颗粒弹射、爆裂喷射 4 个典型阶段特征, 但在颗粒弹射、片状剥离现象后会出现“短暂平静期”, 即巷道岩爆经历了平静期→颗粒弹射→短暂平静期→岩片剥落伴随颗粒弹射→短暂平静期→爆裂喷射的演化过程。巷道岩爆过程平静期对应能量的积聚过程, 颗粒弹射、岩片剥落伴随颗粒弹射和剧烈喷射对应能量的释放过程, 而“短暂平静期”内能量发生机制与水平载荷有关。一方面, 水平载荷增大, 岩爆孕育过程积聚的能量显著增加, 为岩爆发生提供了足够的动力源; 另一方面, 水平载荷增大, “短暂平静期”内能量由积聚过程逐渐转变为释放过程, 导致颗粒弹射到剧烈喷射阶段能量持续释放, 且能量释放速度加快; 上述两方面的综合作用致使高水平载荷下岩爆孕育过程聚集的大量能量在短时间内快速释放, 从而诱发突发性强、破坏性大的岩爆灾害, 同时预测的难度也加大。

关键词: 岩石力学; 巷道岩爆; 声发射; 能量积聚; 能量释放; 岩爆机制

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2019)04 - 0736 - 11

Experimental study on energy evolution characteristics in the process of tunnel rockbursts

LIANG Peng^{1,2}, ZHANG Yanbo^{1,2}, TIAN Baozhu^{1,2}, YAO Xulong^{1,2}, SUN Lin^{1,2}, LIU Xiangxin^{1,2}

(1. School of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063210, China;

2. Key Laboratory of Mining and Safety Technology of Hebei Province, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063210, China)

Abstract: The acoustic emission monitoring experiment of tunnel rockbursts under biaxial loading was carried out. Compared with the process of rockbursts in practical engineering, the macroscopic damage characteristics of tunnel rockburst process was analysed. With the help of acoustic emission energy parameters, the energy accumulation and release law and the time effect of energy during the macro-failure process of rockbursts were analysed. The influence of the horizontal load on the energy evolution law of rockburst process was discussed, and the mechanism of rockbursts was revealed from the point of energy. The results show that roadway rockbursts have four typical stages including quiet period, particle ejection, rock fragmentation accompanied by particle ejection and burst ejection, and that there will be a short quiet period after particle ejection or flake exfoliation.

收稿日期: 2018 - 11 - 30; **修回日期:** 2019 - 01 - 14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51574102, 51774138); 河北省自然科学基金资助项目(E2017209241)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 51574102 and 51774138) and National Natural Science Foundation of Hebei Province(Grant No. E2017209241)

作者简介: 梁 鹏(1987 -), 男, 2015 年于华北理工大学大地测量学与测量工程专业获硕士学位, 现任讲师, 主要从事岩石破裂声发射监测、遥感 - 岩石力学方面的教学与研究。E-mail: hnlp87@163.com。通讯作者: 张艳博(1973 -), 男, 博士, 现任教授。E-mail: fzdn44444@163.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.1407

That is to say, rockbursts experience an evolution process of calm period, particle ejection, short calm period, rock fragmentation accompanied by particle ejection, short calm period and burst ejection. The calm period corresponds to the process of energy aggregation, while the other three typical stages correspond to the process of energy release. The energy generation mechanism in the short quiet period is related to the horizontal load. On one hand, with increasing the horizontal load, the accumulated energy increases significantly in the process of rockburst incubation, which provides enough power source for the occurrence of the rockburst. On the other hand, the energy in the short quiet period gradually changes from the aggregation process to the release process, which leads to a continuous and quick energy release in the process from particle ejection to intense ejection. Under the combined action of the above two aspects, a large amount of energy accumulated in the process of rockburst incubation under a high-level load is released rapidly in a short time, leading to a sudden strong and destructive rockburst disaster which is difficult to predict.

Key words: rock mechanics; tunnel rockburst; acoustic emission; energy accumulation; energy release; rockburst mechanism

1 引 言

岩爆是高地应力环境下地下工程开挖过程中常见的一种动力失稳灾害,其具体表现为围岩呈突发、猛烈弹射或抛掷到开挖空间,直接威胁施工人员、设备的安全,已经成为制约深部地下工程安全建设的瓶颈问题。因此,深入认识和研究岩爆的发生机制,提高岩爆预测的准确性,对于深部地下工程安全施工具有重要的理论和实践意义。

众所周知,任何破坏的发生都是一个从量变到质变的过程,即岩体从微小破裂到破坏的过程,岩爆的发生亦如此。能量转化是物质物理过程的本质特征,从能量的角度去研究岩爆灾害问题,已逐渐引起学者们的重视和关注^[1]。针对岩爆灾害问题,何满潮等^[2-4]从能量角度对岩爆进行了定义,岩爆是能量岩体沿开挖临空面瞬间释放能量的非线性动力学现象,认为岩爆是复合能量综合作用的结果,并将岩爆的发生归结为 3 条定律:能量积聚定律、地质弱面的能量释放定律和工程释放定律,其本质是岩爆的发生对应着能量的突然释放。蔡美峰等^[5-6]提出了岩爆发生的 2 个必要条件:一是岩石必须具有储存高应变能的性质,二是岩体系统必须具备形成高应变能积聚的应力环境。此后,从能量角度分析岩爆越来越得到学者们的认可,并取得了较为丰富的研究成果。于洋等^[7]对锦屏二级水电站深埋隧洞即时型岩爆孕育及发生过程的能量释放展开研究,并运用分形几何原理研究了微震能量分布的变化规律。张镜剑和傅冰骏^[8]认为岩爆的实质是开挖扰动引起岩体中积聚的应变能突然释放诱导的人工地震。苏国韶等^[9]开展了岩爆弹射破坏过程的试验

研究,表明加载速率越大,峰前岩样的裂纹发育与扩展越欠充分,消耗的能量越少,导致峰前集聚的弹性应变能越高,岩爆瞬间所释放的弹射动能越大。徐则民等^[10]从能量的角度分析了地应力对岩爆的影响,地应力越大,岩爆的可能性增大,岩爆释放的总能量中动能的比例增大,岩爆越强烈。宫凤强等^[11]在考虑岩石加载全过程中能耗特性的基础上,提出一种基于线性储能规律和剩余弹性能指数的岩爆倾向性新判据。岩爆的能量释放特征与其破坏后碎屑的破碎程度密切相关,李德建等^[12]借助分形理论,对岩爆碎屑特征进行了分析,深入研究了岩爆过程能量释放特征,得出岩爆与三轴、单轴消耗的能量相比要高出数倍甚至数十倍。

以上研究均表明:岩爆的发生与岩体内部积聚的能量有直接关系,岩体中积聚的能量为岩爆发生提供了条件,而能量的突然释放是导致岩爆灾害的本质原因。对于工程中所发生的岩爆,能量积聚和释放规律是岩爆发生机制研究的重要内容。已有实验研究表明,岩爆过程可划分为平静期、小颗粒弹射、片状剥离和剧烈岩爆 4 个阶段^[2, 13],可见岩爆发生过程中不同的应力调整阶段,应变能的释放过程不同,将引起岩体产生不同形式和程度的破坏。因此,对于岩爆灾害,应该侧重于研究岩爆过程不同的破坏现象及与之相关的能量积聚、释放特征,进而理解岩爆过程能量积聚与释放规律,这对于揭示岩爆灾害发生机制具有重要意义。

基于此,本文通过开展不同水平载荷下巷道岩爆模拟实验,利用声发射技术监测岩爆发生全过程,分析巷道岩爆过程宏观破坏特征,并与工程实际中岩爆破坏现象进行对比分析。在此基础上,借助声发射能量参数,分析岩爆过程不同阶段能量积聚、

释放规律及能量的时间效应，重点探讨水平载荷对岩爆过程能量演化规律的影响，进一步深化巷道岩爆的机制研究。

2 巷道岩爆实验设计

关于巷道岩爆的实验方法，学者们较多采用“先成巷(开孔)，后加载”的应力路径，来进行巷道岩爆模拟实验。陈陆望和白世伟^[14]选取具有岩爆倾向性的相似材料，制作圆形洞室物理模型试件，进行了平面应变物理模型试验；何满潮等^[15-16]采用含孔砂岩，开展了真三轴条件下岩爆模拟实验；齐燕军等^[17]对含预制圆形巷道 4 种岩性模型进行试验，研究深部巷道中岩爆的发生机制。上述“先开孔，后加载”的岩爆模拟方法，认为岩爆的发生主要还是由于掌子面向前推进时引起最大切向应力随之前移而对两侧围岩应力调整加载所导致，着重考虑应力调整作用对围岩的破坏，在应力调整过程中可能诱发岩爆，存在一定的合理性^[18]。

通过对深部巷道开挖过程的受力路径进行深入分析，发现开挖卸荷效应对巷道围岩产生作用，为岩爆的发生提供条件，应力调整为岩爆发生提供了可能，开挖卸荷与应力调整共同构成诱发岩爆的主导因素，二者缺一不可。本文提出了和实际更相符的“应力环境+开挖卸荷+应力调整”的巷道岩爆实验设计思想，在该思想的指导下，紧紧围绕着开挖卸荷、应力调整对诱发岩爆的主导作用，采用“先加载，后成巷，再加载”的岩爆实验方法，实现了岩爆实验中开挖卸荷与应力调整过程的有机统一。

2.1 巷道岩爆实验方法

地下工程中，人工开挖是岩爆发生的外因条件，它破坏了岩体原始的应力平衡状态，原来处于三向受力状态的围岩由于开挖形成临空面，应力重新分布后，围岩局部应力集中，当应力积聚到一定程度时，就会向临空面释放出来，对于硬脆岩体易产生岩爆灾害。已有研究结果表明，巷道围岩发生岩爆存在一个极限深度，在该极限深度范围内的双轴压缩和真三轴压缩状态均是可能发生岩爆的应力状态^[19]。

双轴应力状态是地下洞室围岩的一种典型应力状态，因此，本试验模拟的是围岩为花岗岩的圆形巷道，在双向应力($\sigma_1 > \sigma_2$, $\sigma_3 = 0$)条件下巷道开挖卸荷后，应力调整过程中诱发岩爆破坏的现象。双轴应力状态下巷道岩爆示意图，如图 1 所示。

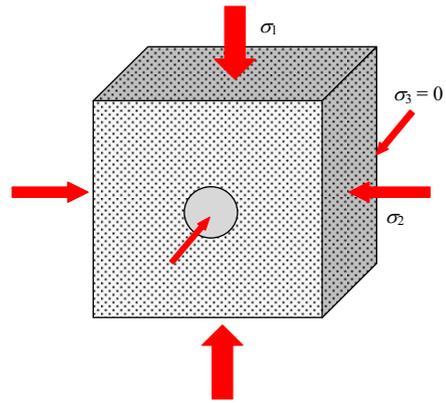
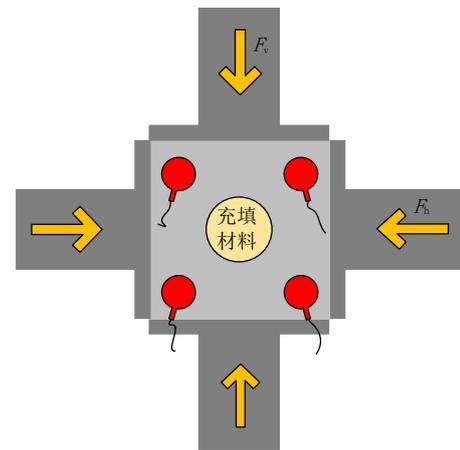


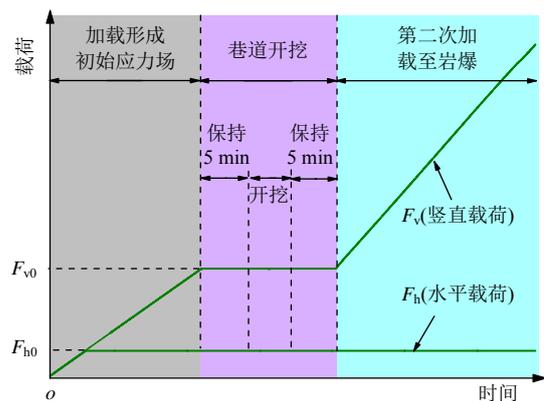
图 1 双轴应力状态下巷道岩爆示意图

Fig.1 Schematic diagram of tunnel rockburst under biaxial stress state

岩爆实验双轴加载方案如图 2 所示，实验过程中 σ_1 和 σ_2 分别通过垂直方向(F_v)和水平方向(F_h)加载来实现，可分为以下 3 个阶段：



(a) 巷道岩爆双轴加载



(b) 双轴加载路径

图 2 巷道岩爆双轴加载方案

Fig.2 Two axis loading plan of tunnel rockburst

(1) 加载形成初始应力场：采用力控方式加载，将垂直方向载荷 F_v 和水平方向载荷 F_h ，以相同的速

率分别加载到 F_{v0} 和 F_{h0} ，形成一定的初始应力场。

(2) 巷道开挖：形成初始应力场后保持 5 min，采用人工开挖的方式，取出试样内部预埋的充填材料，开挖形成巷道，开挖完成后保持 5 min，实现巷道开挖过程中的卸荷效应。

(3) 第 2 次加载至岩爆：保持水平方向载荷 F_h 不变，采用位移控制方式，将垂直方向载荷 F_v 以一定的速率继续加载，通过加载来模拟巷道开挖卸荷后应力调整，应力调整过程中发生岩爆。

2.2 试样制备

为了实现加载后成巷的过程，本文提出了巷道岩爆“岩石+相似材料”组合实验模型设计思想，采用“开孔+充填”的方式制作岩爆试样。

岩爆“花岗岩+相似材料”组合实验模型，主要对充填材料的性质提出了要求，实验要求孔洞内充填相似材料力学参数与实验所选花岗岩力学参数相近，并且具有微膨胀性，使其和岩石能够充分耦合。针对上述实验要求，开展了大量的岩石相似材料研究，最后研发了一种新的岩石相似材料，将特种膨胀水泥和石英砂按照 1:1 的比例混合，然后以水泥和石英砂为基础添加其他物质，其中水为 11%，减水剂为 0.27%，硼酸为 0.2%，碳酸锂为 0.02%，按照此种比例混合后的材料养护 3 d，制成试样孔洞内充填的相似材料。图 3 为相似材料和花岗岩单轴压缩下典型应力 - 应变曲线，从图中可以看出，充填材料和花岗岩力学性质有较高的相似度。实验证明，该相似材料不仅力学性质和岩石相似，且具有微膨胀性，能够满足实验要求。相似材料基本力学参数如表 1 所示。

岩爆“花岗岩+相似材料”组合实验模型制作过程如下：

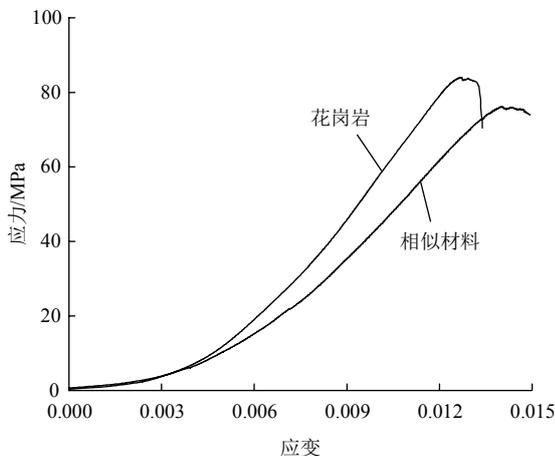


图 3 花岗岩和相似材料应力 - 应变曲线

Fig.3 Stress-strain curves of granite and similar materials

表 1 相似材料基本力学参数

试样编号	单轴抗压强度/MPa	弹性模量/ (10^4 MPa)	波速/($m \cdot s^{-1}$)	密度/($g \cdot cm^{-3}$)
1	76.11	1.07	3 266.296	2.16
2	72.63	1.16	3 486.002	2.08
3	73.86	1.14	3 170.218	2.11
平均值	74.20	1.12	3 307.505	2.17

(1) 开孔：试验用花岗岩取自山东莱州，将矿山采集的花岗岩加工成规格为 150 mm×150mm×150 mm 的标准立方体，加工精度满足常规岩石力学实验要求，在试件中心钻直径为 45 mm 的圆形通孔来模拟圆形巷道。

(2) 充填：试样开孔后，将相似材料浇筑于含孔试件内，并养护 3 d，使二者充分耦合，以备实验过程中将充填材料凿出，来模拟巷道开挖过程，试件模型见图 4。

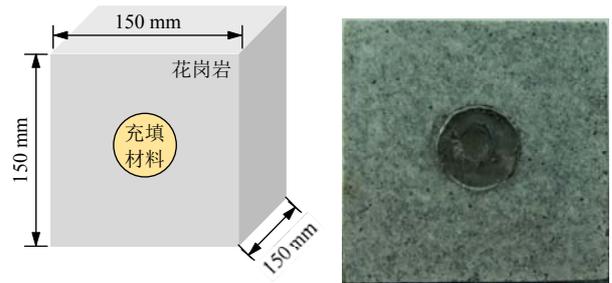
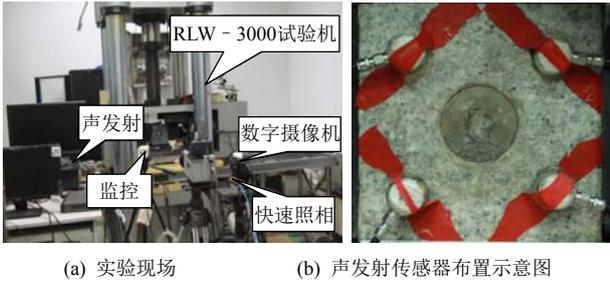


图 4 岩爆“花岗岩+相似材料”组合实验模型

Fig.4 Granite and similar material combining experimental model of rockburst

2.3 实验设备

巷道岩爆实验系统主要包括加载设备、声发射仪和综合观测系统 3 个部分组成，实验系统全景图见图 5。加载设备是型号为 RLW - 3000 伺服控制试验机，声发射采用美国物理声学公司 PAC 生产的 PCI - 2 型多通道声发射监测系统，声发射传感器型号为 R6 α ，频率响应范围为 0~300 kHz，实验时将 8 个声发射传感器布置在试样前后 2 个非加载面上，传感器和试样之间涂上凡士林，增强二者耦合性，声发射传感器布置方式如图 5(b)所示。观测系统主要由高速相机、高清视频监控、数字摄像机组成，构成立体观测系统，该系统可以获得岩石破裂过程中可见光图像，反演裂纹扩展演化过程，同时兼具对整个实验过程的实时监控和全程视频记录等功能。



(a) 实验现场 (b) 声发射传感器布置示意图

图 5 巷道岩爆实验系统全景图

Fig.5 Panorama of tunnel rockburst test system

2.4 不同水平载荷下巷道岩爆实验设计

表 2 为部分工程岩爆发生的基本情况^[20-21], σ_{min} , σ_{max} 分别为地应力的最小值和最大值。根据发生岩爆工程的埋深和地应力条件, 设计实验的初始应力值, 竖直方向初始载荷 $F_{v0} = 800$ kN, 对应的应力值为 35.55 MPa。通过改变初始水平应力, 来模拟应力变化对岩爆的影响, 设计 3 组对比实验, 水平方向初始载荷 F_{h0} 分别为 100, 200 和 300 kN, 对应的应力值分别为 4.44, 8.88 和 13.32 MPa。实验中, 考虑到岩石材料的不均匀性经常造成实验结果的离散性, 在开展实验时, 针对每种水平载荷, 均开展了 5 次重复实验。

表 2 典型岩爆记录^[20-21]
Table 2 Typical rockburst records^[20-21]

工程名称	埋深/m	岩性	σ_{min}/MPa	σ_{max}/MPa
挪威兰峡湾公路隧道	200~1500	片麻岩、花岗片麻岩、片麻闪长岩	9.0	34.0
挪威 Sewage 隧道	130	花岗岩	3.5	35.0
前苏联基洛夫矿	>700	花岗岩	19.0	50.5
中国渔子溪引水隧洞地下厂房	200~650	花岗岩	11.5	30.0~45.0
中国太平峰水工隧道	>300	花岗岩	10.2	30.7

具体加载过程如下: 采用力控制方式, 以 1 kN/s 的加载速率, 将竖直方向载荷 F_v 加载到 $F_{v0} = 800$ kN, 水平方向载荷 F_h 加载到 $F_{h0} = 100$ kN, 形成初始应力场; 保持 5 min 后进行巷道开挖(取出充填体), 采用手工钻进的方法取出充填体, 具体过程如下: 使用锤子从试件一侧敲击充填体, 使充填体快速从花岗岩巷道模型内脱出, 模拟巷道开挖过程, 出现开挖临空面, 开挖后保持 5 min; 第 2 次加载时, 水平方向载荷 F_h 保持不变, 竖直方向载荷 F_v 以加载速率为 0.3 mm/min 继续加载, 直至试样发生岩爆。按照上述方式加载, 改变水平方向初始载荷 F_{h0} , 开展 3 组岩爆对比实验。

实验过程中, 利用声发射仪监测岩爆发生过程, 声发射门槛值为 45 dB, 波形采样率为 1×10^6 次/s,

长度为 2 K。实验中禁止人员走动, 为消除外部环境影响, 将压力机与声发射主机接地, 消除电流引起的噪音。

3 巷道岩爆演化过程

3.1 岩爆演化过程分析

试验过程中利用 VIC-3D 高速相机和高清摄像机拍摄试样洞壁连续破坏画面, 记录了岩爆发生的全过程。不同水平载荷下岩爆过程相似, 以水平载荷 200 kN 为例, 来说明巷道岩爆的演化过程。将实验二次加载起始时间标记为 $t = 0$ 时刻, 图 6 为水平载荷为 200 kN 时岩爆过程洞壁破坏特征演化图。根据实验现象发现, 在较长的一段时间内, 洞壁未发生明显破坏, 孔洞内无明显现象, 此过程为岩爆的孕育过程。910 s 洞壁出现第一次小颗粒弹射, 随后 913 s 洞壁出现明显的颗粒弹射现象, 零星颗粒脱离母体, 产生弹射, 声音细微清脆; 颗粒弹射后洞内又恢复平静, 出现短暂的平静期。1 007 s 洞壁开始产生岩片剥落现象, 剥落的岩片从中间折断为上、下两部分, 随后岩片鼓起, 并向临空面剥落, 到 1 009 s 伴随岩片剥落, 洞壁出现颗粒弹射现象; 岩片剥离伴随颗粒弹射现象后洞壁再次恢复平静, 出现短暂平静期。1 044~1 047 s, 孔洞内壁出现剧烈弹射, 大量岩块、颗粒以一定初速度瞬间抛出, 形成“雾状”弹射, 期间洞壁强烈的爆裂喷射急速发生且有延续性, 具有随时间累进性向洞壁深部发展的特征, 出现不同程度且频繁的噼啪声、爆裂声。

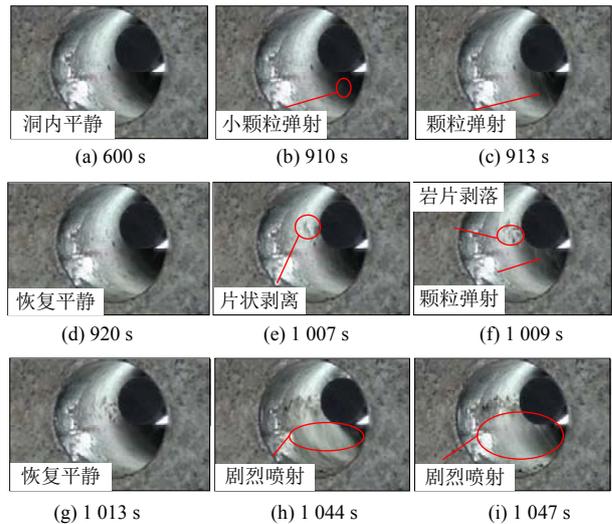


图 6 水平载荷为 200 kN 时巷道岩爆发生过程

Fig.6 Tunnel rockburst process under the horizontal load of 200 kN

通过对水平载荷为 100, 200 和 300 kN 条件下岩爆过程进行综合分析,发现巷道岩爆过程存在 4 个典型阶段:平静期、颗粒弹射、岩片剥落伴随颗粒弹射、爆裂喷射,如图 7 所示,但巷道岩爆在颗粒弹射、片状剥离现象后,会出现短暂的平静期。为了区分岩爆过程第一个平静期阶段,将颗粒弹射、片状剥离后出现的平静期统称为短暂平静期,整体来看,巷道岩爆经历了“平静期→颗粒弹射→短暂平静期→岩片剥落伴随颗粒弹射→短暂平静期→爆裂喷射”演化过程。

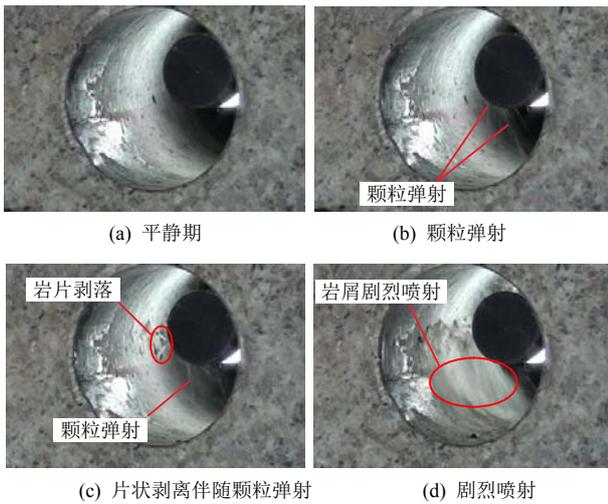


图 7 巷道岩爆过程典型破坏特征

Fig.7 Typical failure characteristics of tunnel rockburst process

3.2 工程现场与模拟实验岩爆发生过程对比分析

图 8 为现场巷道拱顶位置岩爆发生全过程,图 8(a)为平静期阶段,图 8(b)和(c)为巷道拱顶出现颗粒弹射现象,颗粒弹射后出现短暂平静期,持续时间约为 1 s,如图 8(d)所示。图 8(e)~(g)为巷道拱顶一次岩片剥落的全过程,如图中标注所示,巷道拱顶出现岩片剥落现象后,再次出现了短暂的平静期,持续时间约为 6 s,如图 8(h), (i)所示。短暂平静期后,如图 8(j)~(l),巷道拱顶出现颗粒弹射和岩片剥落的位置,大量的岩片瞬间喷出,形成雾状剧烈弹射,且规模不断增大,伴随强烈的爆裂声,发生了强烈岩爆。从现场巷道岩爆发生过程来看,现场巷道岩爆同样经历了平静期、颗粒弹射、岩片剥落和爆裂喷射 4 个阶段,同时在颗粒弹射、片状剥离后出现短暂的平静期。

室内岩爆模拟实验表明,巷道岩爆经历了平静期→颗粒弹射→短暂平静期→岩片剥落伴随颗粒弹射→短暂平静期→爆裂喷射,与现场岩爆发生的过

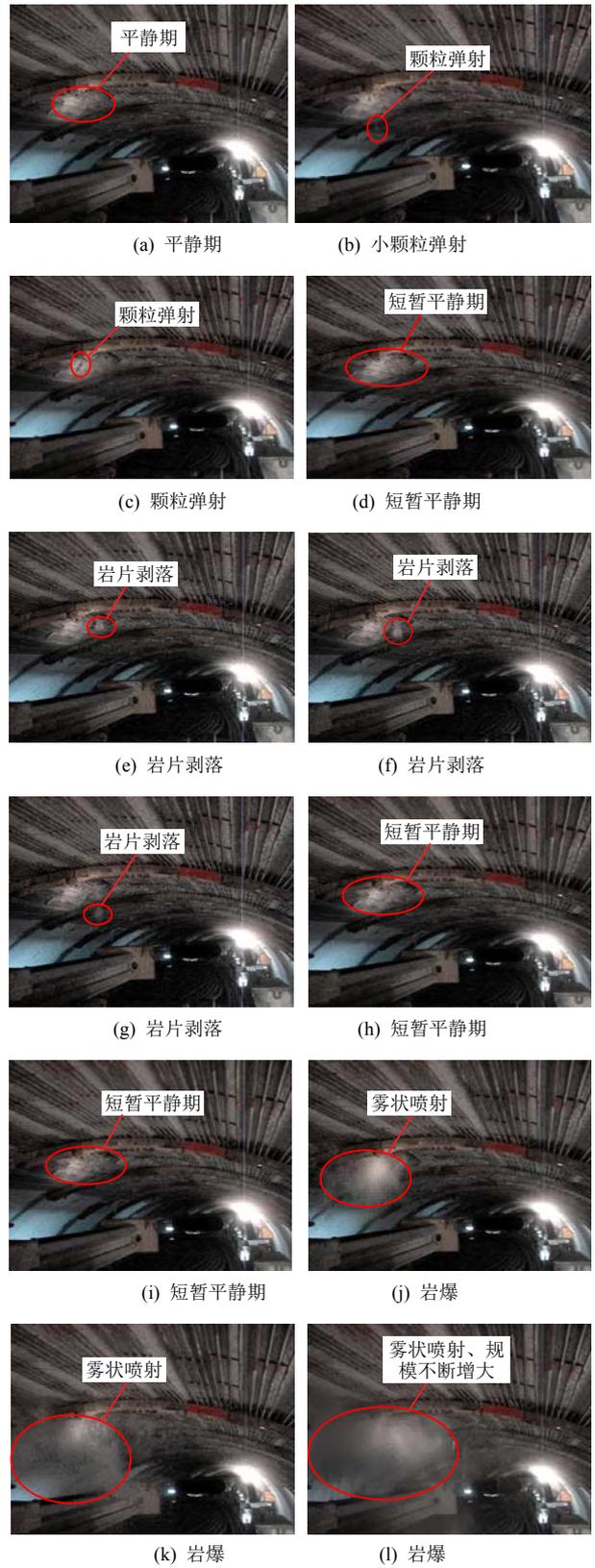


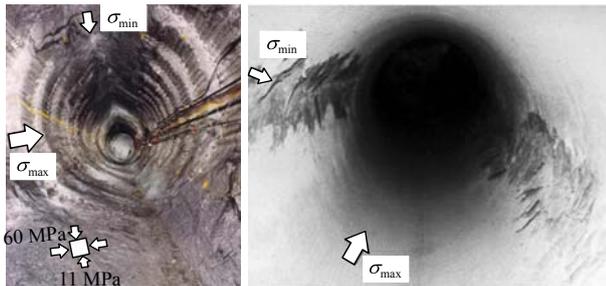
图 8 现场巷道拱顶岩爆发生过程

Fig.8 Process of rockburst in a tunnel vault

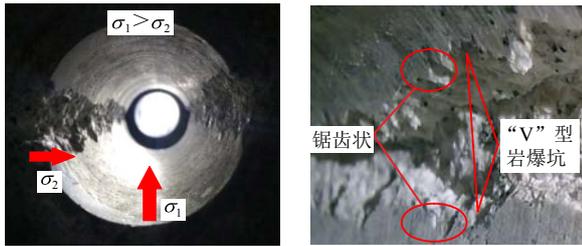
程较一致。可以看出,室内岩爆模拟实验真实再现了现场岩爆发生的全过程,模拟结果与工程实际比较相似。

3.3 工程实际与岩爆模拟实验洞壁破坏形态对比分析

图 9 为工程实际与岩爆模拟实验洞壁破坏形态对比。图 9(a)为加拿大原子能有限公司(atomic energy of canada limited, AECL)地下实验室(underground research laboratory, URL)圆形试验隧道 V 型破坏情况^[22], 图 9(b)为地下矿山提升井侧壁破坏情况^[22], 可以看出, 在图中显示的应力条件下, 洞壁形成 2 条 V 型槽, V 型槽的位置近似垂直于最大主应力方向, 主要原因是该位置的应力集中系数最大。



(a) 圆形实验隧道 V 型破坏^[22] (b) 地下矿山提升井侧壁破坏情况^[22]



(c) 岩爆模拟实验洞壁破坏情况

图 9 工程实际与岩爆模拟实验洞壁破坏形态对比

Fig.9 Comparison of failure patterns of the cave wall between engineering practice and rockburst simulation test

图 9(c)为岩爆模拟实验中试样洞壁破坏情况, 从图中可以看出, 洞壁左右两侧形成对称的 V 型岩爆坑, V 型岩爆坑在空间上延伸, 在左右两侧洞壁形成 2 条对称的 V 型槽。岩破坏断面整体呈 V 型, 断裂面边缘呈锯齿状。实验过程中岩屑以一定散射角弹射而出, 不同岩屑的弹射初速度以及角度不尽相同。当洞壁表面开始出现弹射后, 随着载荷的增加弹射首先沿径向洞壁内部延伸形成岩爆坑, 弹射剧烈程度也随之增加, 当岩爆坑达到一定深度后, 开始沿洞壁向轴向延伸, 逐渐形成与孔洞延伸方向平行的 V 型槽。岩爆所产生的碎屑多为薄片状、棱块状以及粉状, 有锐利边缘, 这与谭以安^[23]指出隧道岩爆实例中岩爆断面、弹射岩块的几何特征一致。

由以上分析可知, 岩爆模拟实验中左右两侧洞

壁形成 2 条对称的 V 型槽, 与实际工程破坏特征相符, 再次证明了岩爆模拟实验的合理性。

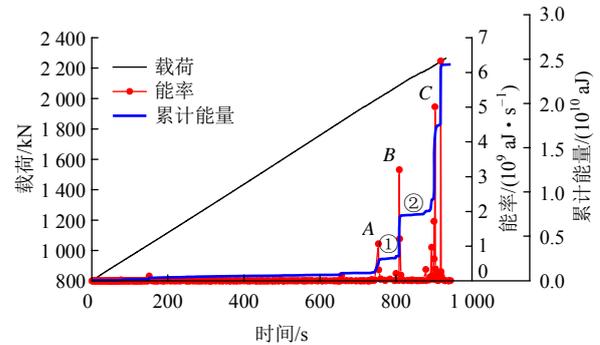
4 巷道岩爆过程能量演化规律

4.1 声发射信号能量参数

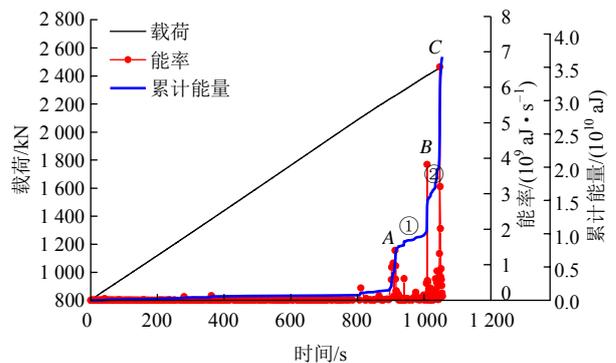
为了分析岩爆过程能量演化特征, 考虑时间因素, 最终选取的声发射能量参数包括 2 个方面: 一是反映破裂时间效应的平均能量演化参数: 声发射能率, 单位时间内声发射事件绝对能量的和; 二是反映岩石总破裂能量演化的参数: 声发射累计能量, 将空间内每个声发射事件能量进行累加, 即可得到累计能量。声发射能率代表了岩爆过程单位时间内释放能量的多少, 累计能量是释放能量的总和, 根据其斜率变化可以描述岩爆过程能量释放和积聚过程, 斜率大代表瞬间释放能量多; 较缓的曲线则代表试件相对稳定, 处于能量的积聚阶段。根据声发射能率及累计能量参数, 系统地研究岩爆过程的能量变化特征。

4.2 岩爆过程能量演化规律

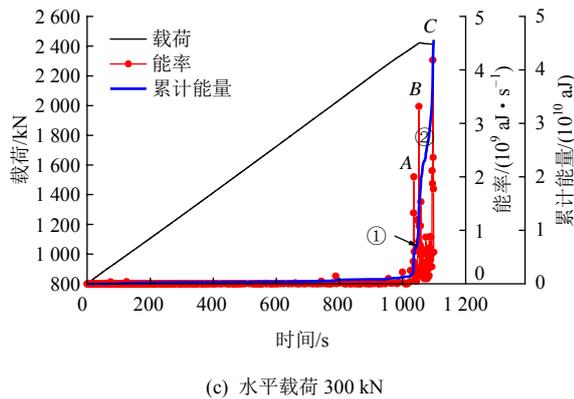
图 10 为不同水平载荷下岩爆过程声发射能率、累计能量随时间演化图。从图 10 可以看出, 岩爆过程声发射能率后期出现多个陡增点, 累计能量近似呈“台阶状”上升, 结合巷道岩爆宏观破坏特征分析发现:



(a) 水平载荷 100 kN



(b) 水平载荷 200 kN



(c) 水平载荷 300 kN

图 10 不同水平载荷下巷道岩爆过程声发射能率、累计能量随时间变化曲线

Fig.10 Curves of AE energy and cumulative energy with time in the process of tunnel rockburst under different horizontal loads

(1) 平静期: 在加载过程 80%的时段里, 孔洞内无明显现象, 处于平静期阶段, 声发射能率维持在较低值, 累计能量平稳变化, 这意味着平静期阶段基本没有能量释放, 为能量的积聚阶段, 外力做功一部分被岩石以弹性变形能的方式储存, 另一部分被岩石内部的非线性变形机制所耗散。

(2) 颗粒弹射: 孔洞内出现颗粒弹射现象, 如图 10 中 A 位置, 相对应声发射能率出现小幅度突升, 累计能量曲线出现台阶的上升段, 可以看出岩爆过程出现颗粒弹射现象时, 能量出现小幅度释放。

(3) 短暂平静期: 颗粒弹射现象后洞壁出现短暂平静期, 如图 10 位置①所示, 可以看出短暂平静期内声发射能率相对较低, 累计能量出现台阶的平缓段。对比分析发现, 水平载荷对累计能量台阶平缓段的斜率有影响, 水平载荷为 100 kN 时, 累计能量台阶平缓段斜率近似为 0, 意味着该阶段基本无能量释放, 主要表现为能量的积聚过程; 水平载荷增加到 300 kN, 台阶平缓段斜率逐渐增大, 意味着能量释放增强。上述分析表明, 水平载荷增大, 短暂平静期内能量由积聚过程转变为释放过程: 水平载荷较小时(100 kN), 短暂平静期内能量属于积聚过程, 水平载荷较大时(300 kN), 短暂平静期内能量属于释放过程。

(4) 片状剥离伴随颗粒弹射: 随着孔洞内出现岩片剥落伴随颗粒弹射, 如图 10 中 B 位置, 声发射能率出现较大幅度的上升, 累计能量曲线再次出现台阶的上升段, 表明能量释放开始加速, 相比颗粒弹射阶段能量释放梯度增大。

(5) 短暂平静期: 片状剥离现象后洞壁再次出

现平静期, 如图 10 位置②所示, 和前一个短暂平静期能量特征相同, 声发射能率相对较低, 累计能量出现台阶的平缓段, 水平载荷增大, 台阶平缓段斜率增大。

(6) 剧烈喷射: 当孔洞内出现剧烈喷射现象, 如图 10 中 C 位置, 声发射能率显著突增, 累计能量曲线近似直线上升, 积聚的能量快速瞬间释放, 能量释放梯度达到最大值。

上述分析发现, 岩爆过程声发射能率出现多个陡增点, 累计能量呈“台阶状”上升, 能率陡增点与累计能量台阶上升段在时间上具有一致性, 分别对应颗粒弹射、岩片剥离伴随颗粒弹射和剧烈喷射等能量释放过程, 台阶的平缓段对应颗粒弹射、片状剥离后出现的短暂平静期。水平载荷增大, 声发射累计能量曲线台阶变陡, 特别是台阶平缓段斜率逐渐增大, 短暂平静期内能量由积聚过程转变为释放过程: 水平载荷较小时(100 kN), 短暂平静期内能量属于积聚过程, 水平载荷较大时(300 kN), 短暂平静期内能量属于释放过程。结合图 10(c)发现水平载荷较大时, 短暂平静期内能量释放与颗粒弹射、片状剥离现象对应的能量释放过程有所区别, 相比颗粒弹射(A 点)、片状剥离(B 点)现象, 短暂平静期内(图 10 位置①和②)声发射能率较低, 累计能量曲线斜率较小, 因此水平载荷较大时, 短暂平静期内能量是一个相对小幅度的释放过程。

因此, 从能量的角度来看, 水平载荷主要通过影响岩爆过程“短暂平静期”内能量的演化机制, 进而影响整个岩爆进程的能量特征。水平载荷较小时, 短暂平静期内能量属于积聚过程; 水平载荷较大时, 短暂平静期内能量属于释放过程。因此, 与岩爆宏观发展过程“平静期→颗粒弹射→短暂平静期→岩片剥落伴随颗粒弹射→短暂平静期→爆裂喷射”相对应: (1) 当水平载荷较小时(100 kN), 岩爆过程能量演化特征是能量积聚→能量释放→能量积聚→能量释放→能量积聚→能量快速释放。宫凤强在巷道岩爆实验研究中指出, 由于洞壁积聚的能量一部分用于围岩的破坏, 一部分转化为动能被消耗, 洞壁储存的能量经过颗粒弹射、片状剥离阶段释放, 能量需要再次聚集, 出现了短暂平静期^[18], 而短暂平静期对应能量积聚过程。(2) 当水平载荷较大时(300 kN), 岩爆过程能量演化特征是能量积聚→能量快速释放, 平静期对应能量积聚过程, 从颗粒弹射到剧烈喷射各个阶段均为能量释放过程。在高水平载荷下, 岩爆平静期(孕育)阶段积聚的能

量多，能量经过颗粒弹射或片状剥离阶段的释放，洞壁储存的弹性能依然高于洞壁进一步破坏所需要的能量，能量还需要继续释放，但释放的速度会有一个稍微减缓的过程，因此高水平载荷下岩爆过程颗粒弹射、片状剥离后同样出现短暂平静期，但短暂平静期内能量的演化机制发生转变，呈现出能量释放的特征。

5 巷道岩爆过程能量的时间效应

通过节 4 的分析，获得了巷道岩爆过程的能量积蓄规律，发现岩爆是能量积聚与释放综合作用的结果。当然，岩爆的发生过程也不是一蹴而就的，结合本文岩爆演化过程阶段的认识，发现岩爆破坏是一个时序渐进过程，即岩爆发生过程各阶段能量积聚与释放特征存在时间效应。正如何满潮院士所述，岩爆过程能量不仅表现出空间上的非均匀积聚，也表现在时间上的非稳定转化^[2]。因此，必须考虑能量的时间效应，结合能量的积蓄规律来认识岩爆过程并找到岩爆的实质。

表 3 为不同水平载荷下巷道岩爆过程各阶段时间统计情况。单纯从时间值来看，水平载荷为 100, 200 和 300 kN 时平静期阶段持续时间分别为 754, 913 和 1 036 s，可见随着水平载荷的增大，岩爆过程平静期阶段持续时间增大。从平静期阶段、颗粒弹射到剧烈喷射阶段时间占比来看，水平载荷增大，平静期阶段时间占比逐渐增大，相对应的颗粒弹射到剧烈喷射阶段时间占比逐渐减小，二者呈现出此消彼长的特征。这意味着高水平载荷下，岩爆发生进程加快，颗粒弹射到剧烈喷射的发展过程更为迅速，一旦出现颗粒弹射现象，将在较短的时间内发生岩爆。

表 3 巷道岩爆过程各阶段时间占比统计

Table 3 Time proportion of tunnel rockburst at different stages

水平载荷/kN	平静期持续时间/s	平静期阶段时间占比/%	颗粒弹射到剧烈喷射阶段时间占比/%
100	754	83.50	16.50
200	913	87.20	12.80
300	1 036	94.53	5.47

节 4 岩爆过程能量积蓄规律表明，不论是何种水平载荷，平静期阶段均对应能量的积聚过程。当水平载荷较小时，颗粒弹射到剧烈喷射阶段的能量表现出释放 - 积聚的循环过程；当水平载荷较大时，

从颗粒弹射到剧烈喷射各个阶段均为能量释放过程。考虑能量的时间效应，一方面水平载荷增大，平静期阶段持续时间增大，积聚的能量显著增加，这不仅增加了高水平载荷下岩爆发生的可能性，而且也为高水平载荷下岩爆发生提供了足够的动力源；另一方面，水平载荷增大，颗粒弹射到剧烈喷射的发展过程表现出能量释放特征，且使岩爆进程加快，该过程发展更为迅速，导致高水平载荷下聚集的能量在较短的时间内快速释放。因此，在上述两方面综合作用下，致使高水平载荷下岩爆孕育过程(平静期阶段)积聚的能量在瞬间快速释放，从而诱发突发性强、破坏性大的岩爆灾害，同时预测的难度也加大。

6 讨论

论文模拟了双向应力($\sigma_1 > \sigma_2$, $\sigma_3 = 0$)条件下巷道开挖卸荷后，应力调整过程中诱发的岩爆。实验中 σ_1 和 σ_2 分别通过竖直方向和水平方向施加载荷来实现，竖直载荷为 800 kN，水平载荷分别是 100, 200 和 300 kN，设计了 3 组不同初始应力环境下岩爆模拟实验。

从岩爆的能量积聚与释放规律来看，当水平载荷为 100 kN 时，岩爆过程能量演化特征是能量积聚→能量释放→能量积聚→能量释放→能量积聚→能量快速释放；当水平载荷为 300 kN 时，岩爆过程能量演化特征是能量积聚→能量快速释放。如果将“能量积聚→能量释放”作为一个能量转化单元，可以看出水平载荷为 100 kN 时岩爆整个过程能量转化单元循环出现了 3 次，而水平载荷为 300 kN 时岩爆整个过程仅出现 1 个能量转化单元。这意味着当水平载荷较低时，岩爆过程可能包含多个“能量积聚→能量释放”的能量转化单元，这些能量转化单元循环出现，当第 3 个能量转化单元中积聚过程出现时，岩爆有可能发生。需要指出的是，此时需结合第 3 个能量转化单元中能量释放水平及梯度变化作进一步分析，来判断岩爆是否发生。水平载荷增大，岩爆过程能量转化单元出现的次数会减少，甚至只存在一个“能量积聚→能量释放”的能量转化单元，一旦只出现这种现象，往往意味着强岩爆的发生。

实验结果表明，水平载荷增大，不仅影响岩爆过程能量积聚与释放规律，而且影响岩爆过程能量积聚与释放的时间效应，正是在 2 种影响的叠加作

用下, 致使高水平载荷下巷道岩爆孕育过程积聚的能量多, 且发生过程能量释放的快, 从而诱发突发性强、破坏性大的强岩爆。从现场情况来看, 随着地下工程向深部拓展, 地应力增大, 地下工程开挖卸荷诱发的高强度岩爆频发。因此, 在深部高地应力条件下巷道岩爆防控方面, 应紧紧围绕着岩爆过程能量的积聚和释放 2 个环节来考虑, 尽可能地减少岩爆孕育过程积聚的能量, 同时降低岩爆发生过程能量的释放速度。为此, 提出了巷道岩爆“两步走”的防控思路, 第一步: 减小能量聚集, 通过优化断面形状及尺寸、降低开挖速率等措施, 综合确定开挖方案, 降低开挖造成巷道围岩的局部高能量聚集; 第二步: 降低能量释放速率, 采用吸能锚杆、喷层和钢筋网等支护方法, 尽可能吸收岩爆破坏时释放的能量, 进而降低能量的释放速率。

7 结 论

(1) 巷道岩爆过程存在 4 个典型阶段特征: 平静期、颗粒弹射、岩片剥落伴随颗粒弹射、爆裂喷射, 但在颗粒弹射、片状剥离现象后, 会出现“短暂平静期”, 即巷道岩爆经历了平静期→颗粒弹射→短暂平静期→岩片剥落伴随颗粒弹射→短暂平静期→爆裂喷射的演化过程。室内岩爆模拟实验真实再现了现场岩爆发生的全过程, 模拟结果与工程实际相符。

(2) 巷道岩爆过程能量积聚与释放规律表现为: 岩爆平静期阶段对应能量的积聚过程, 颗粒弹射、岩片剥离伴随颗粒弹射和剧烈喷射阶段对应能量的释放过程, 而颗粒弹射、片状剥落后“短暂平静期”内能量发生机制与水平载荷有关, 水平载荷增大, “短暂平静期”内能量由积聚过程逐渐转变为释放过程。岩爆过程能量演化存在“能量积聚→能量释放”的转化单元, 水平载荷增大, 岩爆过程能量转化单元循环出现的次数减小, 甚至只出现一次, 而这往往意味着强岩爆的发生。

(3) 结合岩爆过程能量积聚与释放规律及能量的时间效应来看, 一方面, 水平载荷增大, 平静期阶段持续时间增大, 岩爆孕育过程积聚的能量显著增加, 为岩爆发生提供了足够的动力源; 另一方面, 水平载荷增大, 颗粒弹射到剧烈喷射表现出能量持续释放的特征, 且该阶段持续时间减小, 能量释放速度加快。在上述两方面综合作用下, 致使高水平载荷下岩爆孕育过程能量积聚的多, 而发生过程能

量释放的快, 积聚的大量能量在短时间内快速释放, 从而诱发突发性强、破坏性大的岩爆灾害, 同时预测的难度也加大。

参考文献(References):

- [1] 谢和平, 鞠 杨, 黎立云, 等. 岩体变形破坏过程的能量机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1 729 - 1 740.(XIE Heping, JU Yang, LI Liyun, et al. Energy mechanism of deformation and failure of rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(9): 1 729 - 1 740.(in Chinese))
- [2] 何满潮, 苗金丽, 李德建, 等. 深部花岗岩试样岩爆过程试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 865 - 876.(HE Manchao, MIAO Jinli, LI Dejian, et al. Experimental study on rock burst processes of granite specimen at great depth[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 865 - 876.(in Chinese))
- [3] 何满潮, 姜耀东, 赵毅鑫. 以复合能量转化为中心的冲击地压控制理论[C]// 深部开采基础理论与工程实践. 北京: 科学出版社, 2006: 205 - 214.(HE Manchao, JIANG Yaodong, ZHAO Yixin. Control theory of coal blast on the principle of transform of compound energy[C]// Investigation on the Basic Theory and Engineering in Deep Mining. Beijing: Science Press, 2006: 205 - 214.(in Chinese))
- [4] 何满潮, 钱七虎. 深部岩体力学研究进展[C]// 第九届全国岩石力学与工程学术大会论文集. 北京: 科学出版社, 2006: 49 - 62.(HE Manchao, QIAN Qihu. Study development on rock mechanics at great depth[C]// Proceedings of the 9th Academic Meeting Thesis of Chinese Rock Mechanics and Engineering. Beijing: Science Press, 2006: 49 - 62.(in Chinese))
- [5] 蔡美峰, 王金安, 王双红, 等. 玲珑金矿深部开采岩体能量分析与岩爆综合预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(1): 38 - 42.(CAI Meifeng, WANG Jin'an, WANG Shuanghong, et al. Analysis of energy distribution and prediction of rock burst during deep mining excavation in Linglong gold mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(1): 38 - 42.(in Chinese))
- [6] 蔡美峰, 冀 东, 郭奇峰. 基于地应力现场实测与开采扰动能量积聚理论的岩爆预测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(10): 1 973 - 1 980.(CAI Meifeng, JI Dong, GUO Qifeng. Study of rockburst prediction based on in-situ stress measurement and theory of energy accumulation caused by mining disturbance[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(10): 1 973 - 1 980.(in Chinese))
- [7] 于 洋, 冯夏庭, 陈炳瑞, 等. 深埋隧洞不同开挖方式下即时型岩爆微震信息特征及能量分形研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(9): 2 622 - 2 628.(YU Yang, FENG Xiating, CHEN Bingrui, et al.

- Analysis of energy fractal and microseismic information characteristics about immediate rockbursts in deep tunnels with different excavation methods[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(9): 2 622 - 2 628.(in Chinese))
- [8] 张镜剑, 傅冰骏. 岩爆及其判据和防治[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(10): 2 035 - 2 042.(ZHANG Jingjian, FU Bingjun. Rock burst and its criteria and control[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(10): 2 035 - 2 042.(in Chinese))
- [9] 苏国韶, 蒋剑青, 冯夏庭, 等. 岩爆弹射破坏过程的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(10): 1 990 - 1 999.(SU Guoshao, JIANG Jianqing, FENG Xiating, et al. Experimental study of ejection process in rockburst[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(10): 1 990 - 1 999.(in Chinese))
- [10] 徐则民, 吴培关, 王苏达, 等. 岩爆过程释放的能量分析[J]. *自然灾害学报*, 2003, 12(3): 104 - 110.(XU Zemin, WU Peiguan, WANG Suda, et al. Analysis of energy released in process of rock burst[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2003, 12(3): 104 - 110.(in Chinese))
- [11] 宫凤强, 闫景一, 李夕兵. 基于线性储能规律和剩余弹性指数指标的岩爆倾向性判据[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(9): 1 993 - 2 014.(GONG Fengqiang, YAN Jingyi, LI Xibing. A new criterion of rock burst proneness based on the linear energy storage law and the residual elastic energy index[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(9): 1 993 - 2 014.(in Chinese))
- [12] 李德建, 贾雪娜, 苗金丽, 等. 花岗岩岩爆试验碎屑分形特征分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(增 1): 3 280 - 3 289.(LIDejian, JIA Xuena, MIAO Jinli, et al. Analysis of fractal characteristics of fragment from rockburst test of granite[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(Supp.1): 3 280 - 3 289.(in Chinese))
- [13] GONG F, LUO Y, LI X, et al. Experimental simulation investigation on rockburst induced by spalling failure in deep circular tunnels[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 81: 413 - 427.
- [14] 陈陆望, 白世伟. 坚硬脆性岩体中圆形洞室岩爆破坏的平面应变模型试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(12): 2 504 - 2 509.(CHEN Luwang, BAI Shiwei. Research on plane strain model test of rockburst of circular cavern in hard brittle rockmass[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(12): 2 504 - 2 509.(in Chinese))
- [15] 何满潮, 刘冬桥, 宫伟力, 等. 冲击岩爆试验系统研发及试验[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(9): 1 729 - 1 739.(HE Manchao, LIU Dongqiao, GONG Weili, et al. Development of a testing system for impact rockburst[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(9): 1 729 - 1 739.(in Chinese))
- [16] HE M, XIA H, JIA X, et al. Studies on classification, criteria and control of rockbursts[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2012, 4(2): 97 - 114.
- [17] 齐燕军, 东兆星, 靖洪文, 等. 不同岩性巷道岩爆灾变特征模型试验研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2017, 46(6): 1 239 - 1 250.(QI Yanjun, DONG Zhaoxing, JING Hongwen, et al. Experimental modelling on failure characteristics of rockburst with different properties tunnel[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2017, 46(6): 1 239 - 1 250. (in Chinese))
- [18] 司雪峰, 宫凤强, 罗 勇, 等. 深部三维圆形洞室岩爆过程的模拟试验[J]. *岩土力学*, 2018, 39(2): 621 - 634.(SI Xuefeng, GONG Fengqiang, LUO Yong, et al. Experimental simulation on rockburst process of deep three-dimensional circular cavern[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(2): 621 - 634.(in Chinese))
- [19] 许东俊, 章 光, 李廷芥, 等. 岩爆应力状态研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2000, 19(2): 169 - 173.(XU Dongjun, ZHANG Guang, LI Tingjie, et al. On the stress state in rockburst[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, 19(2): 169 - 173.(in Chinese))
- [20] 徐林生, 王兰生, 李天斌. 国内外岩爆研究现状综述[J]. *长江科学院院报*, 1999, 16(4): 24 - 28.(XU Linsheng, WANG Lansheng, LI Tianbin. Present situation of rockburst research at home and abroad[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 1999, 16(4): 24 - 28.(in Chinese))
- [21] 苗金丽. 岩爆的能量特征实验分析[博士学位论文][D]. 北京: 中国矿业大学, 2009.(MIAO Jinli. Experimental analysis of the energy characteristics of rockburst[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2009.(in Chinese))
- [22] HOEK E, MARTIN C D. Fracture initiation and propagation in intact rock-A review[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2014, 6(4): 287 - 300.
- [23] 谭以安. 岩爆形成机制研究[J]. *水文地质工程地质*, 1989, (1): 34 - 38.(TAN Yi'an. Formation mechanism research of rockburst[J]. *Journal of Hydrogeology and Engineering Geology*, 1989, (1): 34 - 38.(in Chinese))