

局部震动诱发煤体非稳态裂纹扩展及其冲击显现特征

鞠明和^{1,2}, 朱 涵^{1,2}, 窦林名^{3,4,5}, 胡李华^{1,2}, 韩泽鹏^{3,4}, 马小涛^{3,4}

(1. 中国矿业大学 深地工程智能建造与健康运维全国重点实验室, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 力学与土木工程学院, 江苏 徐州 221116; 3. 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; 4. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116; 5. 中国矿业大学 江苏省矿山地震监测工程实验室, 江苏 徐州 221116)

摘 要:为探明脆性煤体受静载作用下细观裂纹演化规律及宏观冲击显现特征, 通过实验和模拟相结合的方法开展了煤样受压脆性破断的声发射信号演化及应力降过程研究。结果表明, 煤体瞬时应力降过程裂纹演化规律与常规准静态受载过程在裂纹扩展诱发机制和裂纹扩展模式及范围方面均有显著差异: 瞬时应力降中局部裂纹剪切滑移引发的大能量震动事件诱发其临自由面细观拉伸裂纹快速扩展贯通, 进而形成碎屑并弹射飞出, 其过程以拉伸裂纹动态扩展为主, 而剪切裂纹在形成贯通面过程中产生; 煤体受载大能量震动事件呈局部积聚并向周边扩展的规律, 其形成的扰动诱发煤体局部细观裂纹快速扩展贯通及结构动态失稳, 引发煤体宏观应力降及冲击显现现象; 另外, 震动事件、应力降及冲击显现存在时序性。煤体冲击显现烈度与应力降前后刚度比及释放能量正相关, 所测试煤样临界刚度比约为 18.2, 小于此值时无明显冲击显现现象, 反之, 随着刚度比和释放能量增大相继呈现少量碎屑弹射、大量碎屑弹射、碎块弹射和剧烈煤爆 4 种冲击显现现象; 冲击显现中碎屑弹射速度及动能随刚度比增大有一定的上升趋势, 同时碎屑极限速度也相应增大。静载作用下煤体动态失稳过程的研究及结论对理解煤矿冲击矿压孕育演化过程及致灾机理有一定的借鉴作用。

关键词:局部震动; 冲击矿压; 裂纹扩展; 应力降; 动静载; 刚度比

中图分类号: TD324 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2023)05-2035-14

Local seismicity induced unstable crack propagation in a coal and its effect on coal burst characteristics

JU Minghe^{1,2}, ZHU Han^{1,2}, DOU Linming^{3,4,5}, HU Lihua^{1,2}, HAN Zepeng^{3,4}, MA Xiaotao^{3,4}

(1. State Key Laboratory of Intelligent Construction and Healthy Operation & Maintenance of Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. State Key Laboratory of Coal Exploration and Intelligent Mining, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 4. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 5. Jiangsu Engineering Laboratory of Mine Earthquake Monitoring and Prevention, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: In this study, the acoustic emission evolution and stress drop processes of brittle coal specimens under quasi-static compression were investigated by experiments and numerical simulations, to reveal the pattern of mesoscopic crack evolution and its effect on the macroscopic coal burst characteristics. The results indicate that the crack evolution law during an instantaneous stress drop is dramatically different from that under quasi-static compression, in terms of both the in-

收稿日期: 2023-02-09 修回日期: 2023-04-27 责任编辑: 王 凡 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.0139

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52104101, 52227901); 中国博士后科学基金资助项目 (2022M713369)

作者简介: 鞠明和 (1990—), 男, 江苏建湖人, 副研究员, 硕士生导师, 博士。E-mail: minghe.ju@cumt.edu.cn

引用格式: 鞠明和, 朱涵, 窦林名, 等. 局部震动诱发煤体非稳态裂纹扩展及其冲击显现特征[J]. 煤炭学报, 2023, 48(5): 2035-2048.

JU Minghe, ZHU Han, DOU Linming, et al. Local seismicity induced unstable crack propagation in a coal and its effect on coal burst characteristics[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 2035-2048.

duction mechanism and the pattern and scope of crack propagation. Upon an instantaneous stress drop, mesoscopic tensile cracks around the free face rapidly propagate and coalesce. Subsequently, massive debris are formed and ejected, due to slippage-triggered high-energy seismicity events. During the process, tensile cracks are dominant while shear cracks are mainly generated during crack coalescence. In addition, high-energy seismicity events are localized and then extend peripherally, where the dynamic disturbance leads to rapid evolution of local mesoscopic cracks and structural instability. As a result, stress drop and coal burst take place at the macroscopic scale. Generally, temporality among seismicity, stress drop and coal burst was found. Moreover, coal burst intensity is correlated with the stiffness ratio and released energy of a stress drop event. The critical stiffness ratio is 18.2 for coal specimens in this study, below which no coal burst occurs. With the increase of stiffness ratio and energy release, four types of coal burst behavior, i.e. slight debris ejection, massive debris ejection, block ejection, and coal bump, successively take place. The mean ejection velocity and kinetic energy of debris, as well as the maximum debris ejection velocity, generally increase with the rise of stiffness ratio. Conclusions and findings in this paper are beneficial to the understanding of coal burst mechanism under quasi-static compression.

Key words: local seismicity; coal/rock burst; crack propagation; stress drop; dynamic and static pressure; stiffness ratio

深部煤炭长壁工作面回采过程中微震分布在空间上跨度较大,分布于采空区投影面及构造带附近的微震信号来源较好理解,而现场微震事件定位及冲击显现发生位置表明在超前工作面较远距离仍会产生微震事件积聚甚至大矿震事件,进而引发冲击矿压^[1]。这种受轻微采动影响甚至无采动影响的集中静载荷型冲击矿压在一些煤矿较为常见。潘俊锋^[2]统计发现义马矿区千秋煤矿和跃进煤矿超过 70% 的冲击矿压都发生在不受采动影响的实体煤巷道。这种静载荷型冲击矿压预测难度大,一方面是没有明确的潜在外部动载源,另一方面静载迁移与叠加过程难以捕捉量化。目前对该类型冲击矿压的形成机制尚未有统一说法。笔者认为,这种远场冲击矿压仍在冲击矿压动静载叠加诱冲理论框架内^[3],只是动载来源是脆性煤岩体在高静载下其非均质性导致的局部快速破裂激发的动载,是一种内源动载,该动载与静载叠加诱发巷道冲击矿压,其与煤岩静载的叠加相较于外动载源更为复杂,存在实时动静耦合加卸载过程。

通常,深部巷道和工作面围岩在围压作用下产生如图 1(a) 所示的损伤破裂分区。而对于脆性程度不一的围岩,其分区范围、围岩变形及微震特征都会有所差异,脆性程度低的围岩在高应力下易发生大变形破坏,而脆性程度高的围岩更易发生冲击矿压或岩爆^[4]。对于脆性煤岩体,开挖后其围岩裂纹演化过程与实验室煤岩样受压损伤破裂过程(图 1(b))存在一定的相似性^[1,5]。峰前阶段,细观尺度上,试样经历内部裂纹萌生、扩展及贯通过程,而裂纹的扩展及贯通模式受材料性质及加载方式等影响,而在宏观尺度上,则对应不同量级和数量的矿震发生过程。峰后卸载过程,如果是瞬时应力降形式的弹脆性破坏,煤岩将

产生显著的冲击显现现象,实验室和现场中其发生机理相似^[1,6-7]。但总体而言,上述是一种理想化的裂纹扩展过程,且前人研究中极少涉及静态加载过程中阶段性应力降、裂纹扩展模式变化及诱发煤岩动力显现特征方面的探讨。

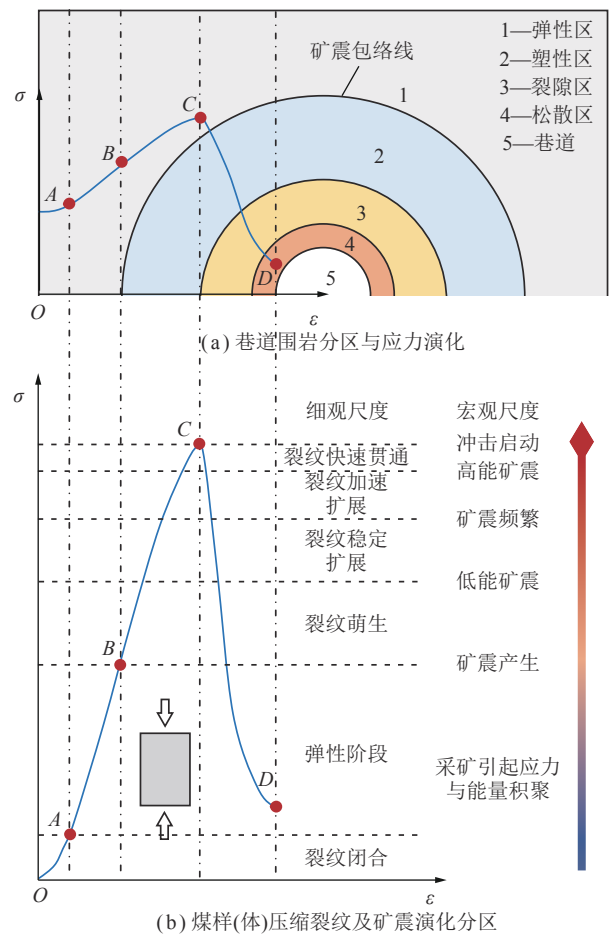


图 1 巷道围岩和煤样受压损伤破裂及分区关联性^[1,5]
Fig.1 Damage evolution of roadway surrounding rock/coal and coal specimen under compression, and their zoning relevance^[1,5]

针对冲击矿压/岩爆研究,目前主要关注两方面问题:①煤岩样(体)在一定应力环境下能量积聚与释放规律及其冲击危险性;②采动/掘进过程中围岩结构及应力变化的致震甚至致灾风险评估及分析^[1,8],而对静载荷型冲击矿压的孕震机制、煤岩细观裂纹演化规律及冲击矿压发生机理研究不足。目前已有不少室内试验及数值模拟方法简化现场条件研究静载作用下脆性煤岩动力破坏过程。从加载方式角度区分,研究主要归为3类:①单轴压缩^[9];②真三轴加载单面卸载^[10-11];③煤岩巷(隧)道多轴加载^[12-13]。总体上,上述3种实(试)验的煤岩动力灾害孕育演化过程有其相似性:①在煤岩表层区域会形成“浅窝型”或“V字型”冲击坑^[9,14];②冲击坑深部或多或少会产生剪切破裂面;③冲击坑内煤岩碎屑呈片状破裂且尺寸差异较大;④冲击过程中产生大量张拉裂纹和少量剪切裂纹,碎屑以拉伸破坏为主^[10,15]。另外,GAO等^[16-17]通过离散元模拟了煤岩体内部局部卸载扰动诱发其裂纹扩展过程,直观呈现了应变型冲击矿压/岩爆的潜在发生机理,其与断层滑移诱发冲击矿压机理类似,但在尺度和形成机制上有所差异。不过,上述类型的研究还是聚焦于冲击矿压/岩爆发生条件和影响因素方面,对煤岩受静载过程中震动事件、裂纹演化及宏观冲击显现之间的关联性研究不足。综上,本文通过试验和模拟相结合研究煤岩静载脆性破坏裂纹演化及应力降过程,旨在揭示准静态加载过程中震动事件演化规律及其对细观裂纹扩展贯通模式和诱发宏观冲击显现现象的影响。

1 试验材料及方法

为研究煤体受压震动事件及裂纹演化规律,设计了脆性煤样加载及监测试验,模拟现场煤体在高静载下的冲击显现过程。试验设备由MTS-C64.106压力

加载系统、PCI-2多通道声发射(Acoustic Emission, AE)监测系统和佳能TD数字照相采集系统3部分组成^[5],如图2所示。3者同步配合使用,实现煤样从细观裂纹演化到宏观破断及碎屑弹射的实时AE信号及试样图像采集。试验加载前,使用热熔胶将8个MICRO-80s声发射探头粘贴在煤样侧表面,用于采集煤样加载过程中的AE信号,探头位置如图2所示,上下距加载端面15mm各对称布置4个声发射探头,利用前置放大器将每个AE探头与AE采集器相连,设置电脑上的AE控制系统参数实现AE信号的实时采集。声发射系统的采样阈值设为40dB,前置放大器采用40dB放大倍数,声发射采样频率为2MHz。试验加载方式采用轴向位移加载,加载速率设为3 $\mu\text{m/s}$,试验过程中通过MTS-C64.106压力机自带的监测系统实时采集煤样压力、位移等数据,采样频率设为20Hz。另外,佳能TD数字照相采集系统的图像采集频率为100Hz。

本次试验所用煤样采自陕西省彬长矿区胡家河煤矿4号煤层,该煤层鉴定结果为强冲击倾向性^[5]。圆柱形煤样尺寸为50mm \times 100mm(直径 \times 高度),从加工的煤样中选取完整性好的样品进行试验,共计开展16组煤样单轴压缩试验。从试验结果判断,总体上AE信号及定位结果能够反映煤样压缩过程中的裂纹演化及冲击显现过程。另外,佳能TD数字照相采集系统有效捕捉到了煤样动态破坏过程。再者,通过对AE系统采集的信号后处理分析,可以有效判识煤样在受压破断过程中的裂纹类型。AE时域信号的上升时间与最大幅值的比值定为RA,计铃数与持续时间的比值定为平均频率AF,根据某一时间段内RA-AF在直角坐标系下的数据分布,以OHTSU^[18]给定的AF/RA=0.1作为划分依据确定煤样在该时间段内产生的拉伸裂纹和剪切裂纹。

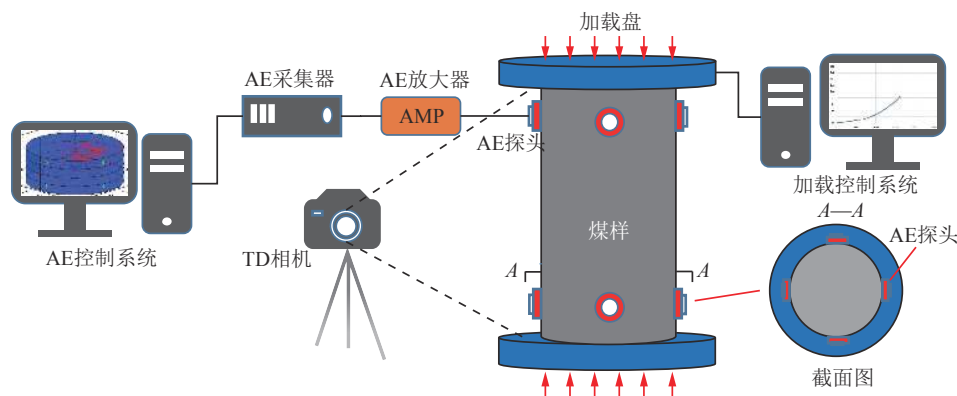


图2 试验加载及监测方法示意

Fig.2 Loading and monitoring methods in the experiment

2 试验结果及对比分析

2.1 裂纹扩展及应力降

图3列举了试验中出现的2种典型应力降过程,即峰前应力降和峰后应力降。一般加载情况下,对于脆性完整煤岩,其峰后阶段性应力降不明显,多为单一的下陷过程,其应力降过程的卸载曲线斜率主要受煤岩自身性质影响,另外加载系统刚度与岩石自身刚度比值也是关键因素之一^[19]。对于刚性不足的试验机,煤岩样积聚的弹性应变能易瞬间释放,呈现动力破坏行为,伴随有碎屑弹射飞出及较大声响,与现场冲击矿压显现特征相似。由于煤中含有原生裂隙,另外其刚度与试验机加载系统刚度比值较小,在峰后能够呈现出阶段性应力降过程。如图3(a)所示,峰后发生应力降的瞬间,煤样内部裂纹短时迅速扩展且以拉伸破裂为主,声发射绝对能量 E_{ae} 显著增大,应力降幅度与声发射绝对能量存在正相关关系。短时应力降反映了煤样局部非稳态破坏及能量释放,但由于煤样整体仍具有承载能力,发生应力降后试样又处于稳态的加载及能量积聚过程,应力缓慢上升。另外,由于煤样局部损伤破坏后其全局有效刚度降低,如图4中1号试样结果所示,该应力上升曲线有效弹性模量 E

小于煤样初始弹性模量,且随着应力降次数增多,煤样有效弹性模量逐渐减小,即为损伤累积的宏观反映;相反,煤样卸载模量 λ 随应力降次数增多总体上逐渐增大,且随着增幅加大,最终煤样发生瞬时剧烈的冲击矿压显现。

图3(b)为峰前发生明显应力降的试验结果。其与峰后应力降存在相似特征,在应力降过程中声发射能量 E_{ae} 和数量 N_c 均有明显上升,但相较于峰后应力降裂纹演化趋势,峰前应力降过程中裂纹数量增长幅度更趋平缓;另外, E 和 λ 随应力降次数演化规律与峰后应力降工况也有差异。实际上,每一个细观裂纹的萌生和扩展都对应着一次应力降过程^[1,5],但在宏观显现上可以忽略,本文仅统计应力-时间曲线上显著的应力降事件,因为这些宏观呈现的事件能够用于探究多裂纹的相互作用及诱发冲击现象的机理。图4中2号煤样即图3(b)工况的 E 和 λ 统计结果,其表明峰前应力降工况的 E 存在明显的波动特征,这可能与图1(b)中所示峰前不同阶段裂纹演化规律差异和脆性煤样内部原生裂纹分布有关;卸载模量 λ 随应力降次数总体呈逐渐增大趋势,但相较于1号煤样其增幅明显偏小,表明试样弹性能释放速率较低,峰前应力降诱发冲击显现的可能性较小。但这不代表2号煤样最

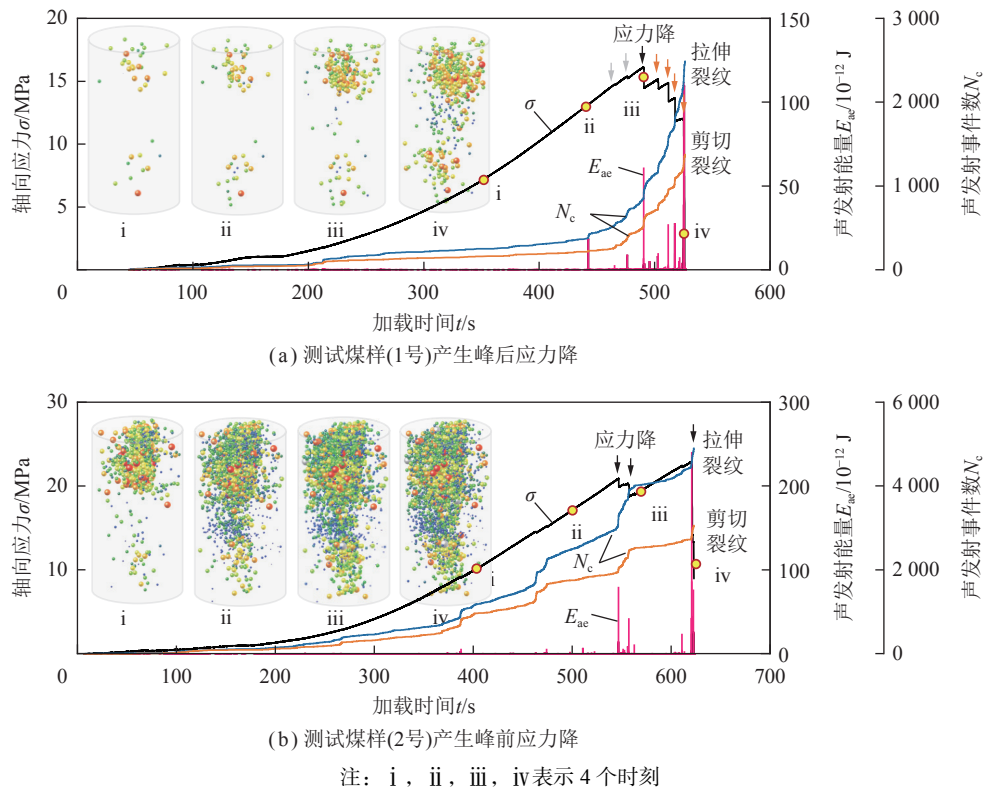


图3 峰前和峰后发生应力降的两组煤样应力及声发射演化规律

Fig.3 Stress and acoustic emission evolution of the two groups of tested coal specimen where pre-peak and post-peak stress drop events initiate, respectively

终冲击显现烈度小于1号煤样,是否产生动力破坏与煤样能量释放大小及释放速率都密切相关^[1]。2组试样末次应力降,即试样最终发生剧烈动力破坏的时间段卸载刚度都非常大,分别达到了850.6 GPa和552.3 GPa。笔者主要关注应力降事件及其与煤体宏观冲击显现的关系,因此将16组煤样的应力降事件进行整体分析,获取共性特征及裂纹演化规律。

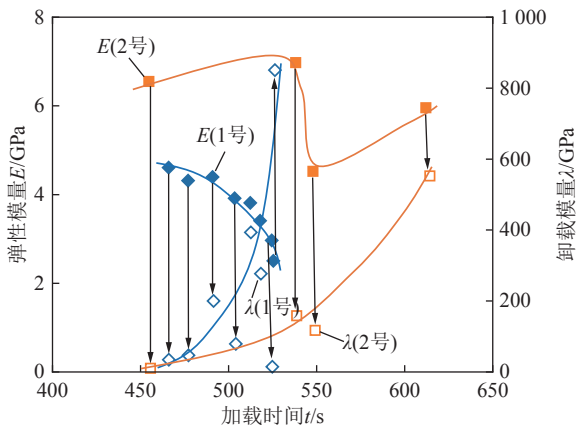


图4 2组煤样不同时刻应力降事件的峰前和峰后模量演化规律

Fig.4 Pre-peak and post-peak Modulus of the two groups of coal specimen at various stress drop moments

2.2 震动事件和冲击显现局部化

基于AE信号定位实现了破裂过程的三维可视化,图3中分别呈现了2组煤样4个时刻AE事件分布规律。由图3可知,脆性煤样压缩过程中的破坏呈现局部化特征,2种工况中煤样上部 and 下部均出现不同程度的声发射事件积聚现象,且随着进一步加载,声发射事件积聚范围逐渐扩大,表明煤样破坏由局部逐渐向其周边扩张。另外,破坏向外扩张过程中,与图1中展示的煤岩加载裂纹演化规律类似,即开始萌生能量较低的微裂纹,随着裂纹扩展贯通滑移激发高能量震动事件诱发局部动力破坏,形成应力降,这种局部化破坏促使其周边裂纹进一步扩展,形成新的大能量震动事件及应力降,最终从局部到全局,裂纹逐步贯通形成试样整体的动力破坏现象。再者,观察AE信号特征可以发现,在煤样发生应力降过程中大能量的AE事件数显著增多,在试样最终破坏过程中尤为明显,这些大能量震动事件对局部煤体受载稳定性有扰动作用,即为冲击矿压中的动静载叠加诱冲理论概念^[3]。

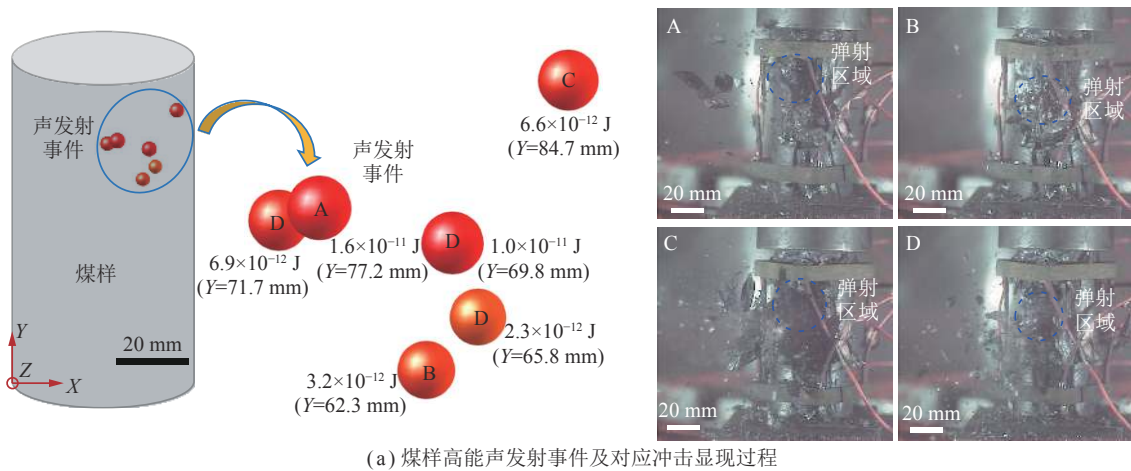
以图3(a)中煤样加载失效为例,对峰后多次应力降过程中声发射事件的时序演化特征分析。从采集的信号特征可知,每次发生冲击显现前,都伴有相对高能声发射事件。图5(a)左图列出了峰后应力降发生前高能声发射事件的位置及能量值,其分别对应右

图中煤样A~D四次冲击显现过程。图5(a)左图中诱发多次冲击显现的大能量声发射事件存在局部积聚的特征,与右图中4次冲击显现的情况基本吻合,主要在煤样靠上局部区域,其层位上微小差异可能有两方面原因:①煤样表面冲击显现与其内部大能量声发射事件并非完全在同一水平位置;②声发射事件定位误差导致。前人现场煤巷变形观测表明,在时序上煤体震动、应力变化到宏观变形破断链式发生,存在一定的时间差^[20]。这一规律同样适用于具有冲击显现特征的煤样(体):煤样(体)局部破坏激发大能量震动事件后,诱发煤样(体)局部裂纹迅速扩展贯通并导致煤样(体)呈现应力降现象,裂纹扩展耗散部分应变能,剩余能量主要以动能形式释放,在局部发生冲击显现后,煤体在外载持续作用下(例如采煤超前应力),能量积聚并再次引发前一次冲击显现发生区域附近局部破坏激发大能量震动事件,再次诱发冲击显现及应力降现象,经历多次局部冲击显现后最终煤样(体)达到承载极限而引发剧烈的煤岩冲击灾害。

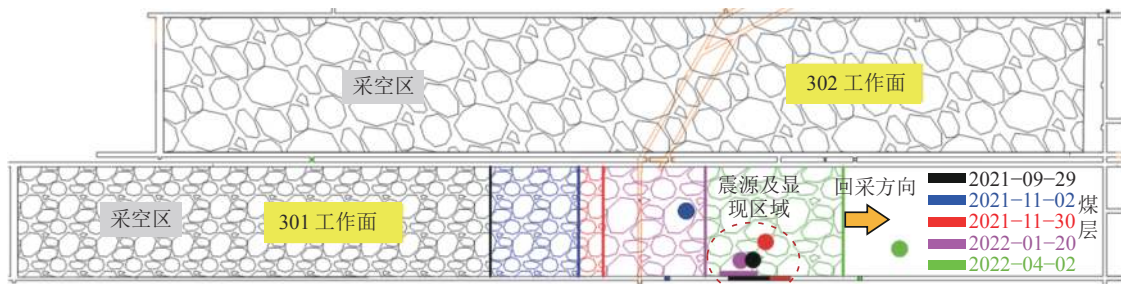
在深部煤矿开采过程中也呈现相似特征。如图5(b)所示,受超前采动应力和高地应力共同作用,某矿301工作面开采过程中从2021年9月至2022年4月引发5次前方实体煤及近煤层顶底板内发生强矿震事件,诱发实体煤巷道顶煤垮落及锚杆失效等形式的矿震显现,强矿震事件具体信息见表1。图5(b)中呈现了这5次强矿震事件的位置及巷道强矿震显现范围。由图5(b)可知,引发巷道大范围强矿震显现的3次强矿震事件每次相隔近2个月(2021-09-29, 2021-11-30, 2022-01-20),超前工作面距离不等,但其呈现局部积聚特征,表1中震源标高信息也表明3次矿震震源在空间上接近,这和本文试验中观察到的现象类似。试验和现场结果均表明煤体局部破坏激发大能量震动事件后,在外载持续作用下能量再次积聚,引发该震源区域附近局部劣化,再次激发大能量震动事件,从试验现象(图5(a)右图)和现场结果(图5(b)和表1)可推测,这种局部多次强震动引发的冲击显现相较于其他区域单次震动影响更为强烈。

2.3 应力降过程能量释放规律

脆性煤或岩石在每次受载应力降过程中都存在弹性应变能释放,从微观滑移裂纹演化角度分析,该能量主要转化为裂纹扩展的表面能、裂纹滑移做功和碎屑的动能^[21-22]。如图3和图4所示,发生一次短时应力降后,由于煤样产生内部损伤,导致其有效弹性模量减小,而峰后卸载模量增大,可以根据煤样压缩应力降前后 σ - ε 演化过程粗略估计释放的弹性应变能 U_e 。



(a) 煤样高能声发射事件及对应冲击显现过程



(b) 煤矿现场多次强矿震显现结果

图 5 煤样及现场局部多次大能量震动事件及冲击显现现象

Fig.5 Local high-energy seismicity events in a coal specimen and coal-mining field as well as its coal burst behavior

表 1 某矿多次强矿震震源信息及诱发巷道强矿压显现现象

Table 1 Source informatoin of the strong mining tremors and their induced roadway failure phenomena

日期	震源能量/ 10^5 J	震源超前工作面/m	巷道显现超前工作面/m	震源标高/m	煤层底板标高/m	震源层位	显现范围/m	强矿压显现形式
2021-09-29	4.67	320	320	+69	+64	煤层	55	冒顶(2 m), 锚杆和锚索脱落、崩断
2021-11-02	3.58	147	116	+99	+62	顶板	6	冒顶, 部分锚杆及锚索断裂
2021-11-30	5.50	220	222	+71	+64	煤层	30	冒顶(0.6~0.9 m), 部分锚杆及锚索断裂
2022-01-20	2.00	60	20、130	+61	+62	底板	50	支柱倾倒, 顶板鼓包网兜
2022-04-02	4.64	75	20	+66	+62	煤层	5	冒顶(2 m), 帮鼓, 部分锚杆及锚索断裂

U_e 计算方法可简化如图 6 所示。一次短时应力降前后试样有效弹性模量分别为 E_a 和 E_b , 应力降过程的卸载模量为 λ_a , 应力降前后对应的试样应力及应变值分别为 $(\sigma_a, \varepsilon_a)$ 和 $(\sigma_b, \varepsilon_b)$ 。另外, 依据文献 [23-24] 假设应力降过程中弹性模量近似为应力降前的弹性模量 E_a , 由图 4 和文献 [24] 试验结果可知相邻卸载过

程有效弹性模量差异较小, 该假设合理。

应力降事件发生前后, 试样储存的弹性应变能 U_{e_a} 、 U_{e_b} 可分别表示为

$$U_{e_a} = \frac{\sigma_a^2}{2E_a}, U_{e_b} = \frac{\sigma_b^2}{2E_a} \quad (1)$$

该应力降过程中, 试样受载应变由 ε_a 增大到 ε_b ,

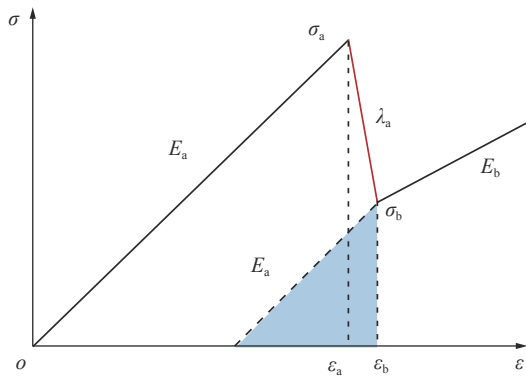


图 6 应力降过程释放能量计算示意

Fig.6 Schematic diagram of the released energy calculation during a stress drop event

吸收的能量 U_{ab} 为

$$U_{ab} = \frac{(\sigma_a + \sigma_b)(\varepsilon_b - \varepsilon_a)}{2} \quad (2)$$

由此, 应力降过程释放的弹性应变能 U_e 按下式

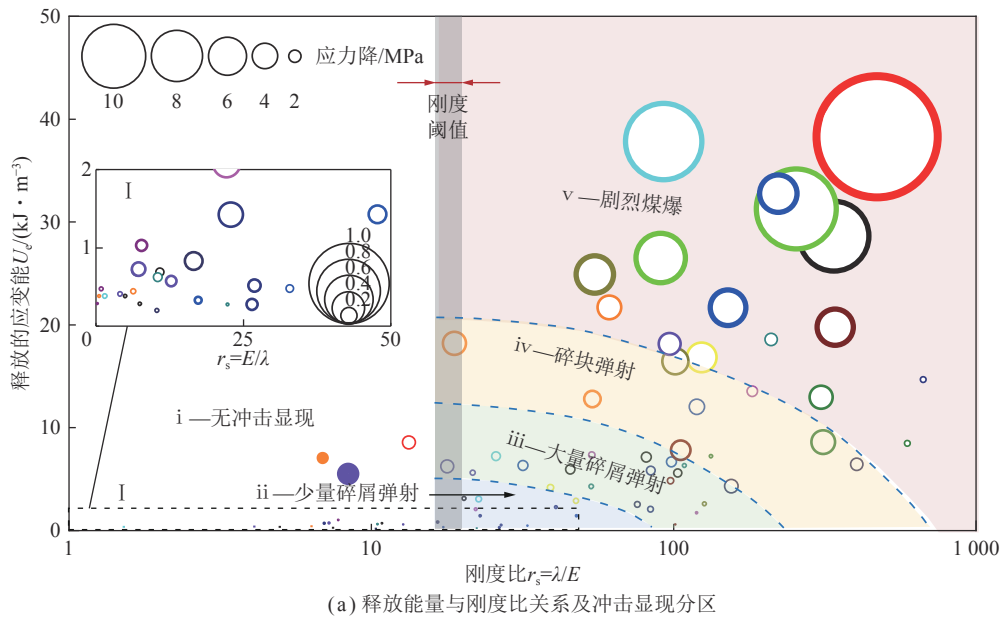
计算:

$$U_e = U_{ab} + U_{e_a} - U_{e_b} \quad (3)$$

而应力降过程中, 卸载模量 $\lambda_a = (\sigma_a - \sigma_b)/(\varepsilon_b - \varepsilon_a)$, 将其代入式 (2) 并联立式 (1)~(3), 最终 U_e 可近似表示为

$$U_e = \frac{\sigma_a^2 - \sigma_b^2}{2E_a} \left(1 + \frac{E_a}{\lambda_a} \right) \quad (4)$$

利用式 (4) 可以计算出试验中 16 组煤样不同时刻应力降所释放的能量; 将峰后卸载模量与峰前有效弹性模量比值定义为刚度比 $r_s = \lambda_a/E_a$ 。图 7(a) 气泡图展示了 r_s 与 U_e 的关系, 图 7(a) 中气泡尺寸反映了应力降大小, 颜色区分不同试样结果。由图 7(a) 可知, 随着刚度比的增大, 总体上煤样应力降过程释放的能量有上升的趋势, 表明两者呈正相关性; 另外, 从图 7(a) 中应力降气泡大小可知, 应力降程度越高, 煤样应力降前后的刚度比和释放的能量也相应越大。



(a) 释放能量与刚度比关系及冲击显现分区



(b) 各分区煤样典型破坏图

图 7 煤样应力降过程释放能量与刚度比关系及各分区煤样典型破坏

Fig.7 Relationship between released energy and stiffness ratio during a stress drop event and typical failure patterns of coal

曹安业、蔡武等^[6,25]分析得出煤层是否发生冲击矿压显现与顶底板岩层和煤层的刚度比值相关。采动超前应力作用下, 处于应力降阶段的煤层, 当其产生法向应变增量 $\Delta\varepsilon_c$ 时, 由于岩层的强度普遍高于煤层,

顶底板岩层仍处于峰前弹性加载阶段, 假设其弹性模量为 E_r , 由于顶板-煤层-底板系统的应力加载连续并假设顶底板岩性相同, 对应的顶底板岩层中产生的应变增量 $\Delta\varepsilon_r = (\lambda_a/E_r)\Delta\varepsilon_c$, 由此整个顶板-煤层-底板系

统的总应变增量 $\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon_c + 2\Delta\varepsilon_r$, 则煤层应变增量与系统整体应变增量的比值 r 为

$$r = \frac{\Delta\varepsilon_c}{\Delta\varepsilon} = \frac{1}{1 + 2\lambda_a/E_r} \quad (5)$$

当式 (5) 中分母 $1 + 2\lambda_a/E_r$ 趋近于 0 时, 施加微小的应力增量将导致煤体产生急剧的应变增量, 表明煤体发生了瞬间的动力失稳, 即冲击启动时刻。随着动力失稳过程趋缓, 煤体应力降卸载过程逐渐结束, 顶板-煤层-底板系统逐渐达到新的平衡状态, 进入下一阶段的加卸载及冲击显现过程^[6-7], 由此可以获得冲击显现发生的临界刚度条件为 $\lambda_a = E_r/2$ 。图 2 中煤样上下加载盘刚度约为 200 GPa, 每组煤样初始弹性模量有所差异, 平均弹性模量约为 5.5 GPa, 由此可知煤样应力降过程中发生冲击显现的临界刚度比 r_{sc} 约为 18.2。

通过佳能 TD 数字照相采集系统捕捉到的煤样破坏现象可有效验证上述结论。在此需要说明, 由于相机存储空间有限, 一般是观察到试样有明显表面破坏时才开始手动触发相机, 因此多数试样捕捉到的冲击显现过程不全, 一些主要集中在试样加载末段。由采集到的煤样破坏过程可知, 刚度阈值 r_{sc} 可以较好地判定煤体是否发生冲击显现现象。当刚度比小于刚度阈值时, 应力降过程中煤样局部会有轻微的碎屑弹射但不明显, 整体卸载过程比较平缓, 试样破坏呈准静态形式; 而超过刚度阈值的应力降过程, 由于试样卸载刚度和释放能量大小不一, 煤样动力显现存在较大的差异。图 7(a) 中根据煤样加载应力降过程破坏程度和形式的差异, 通过释放能量和刚度比关系将煤样破坏粗略划分为 5 个区间, 其中释放能量体现某次应力降过程能量水平, 刚度比体现应力降过程的卸载速率, 均具有代表性, 但该分区明显受煤体性质和加载速率等因素影响, 因此区间阈值不具有普适性, 在此不作讨论, 该分区目的是从现象差异角度划定刚度比和释放能量相关的煤岩冲击显现类型。当刚度比小于临界刚度比时 ($r_s < r_{sc}$), 试样呈准静态破坏, 如图 7(b)-i 所示; 当刚度比达到临界刚度比后, 根据捕捉到的试样动力显现特征 (例如图 5(a)), 将图 7(a) 的刚度比和释放能量关系图划分为少量碎屑弹射、大量碎屑弹射、碎块弹射和剧烈煤爆等 4 个区间, 其对应的典型煤样动力破坏过程分别如图 7(b)-ii~v 所示。

3 非稳态裂纹扩展及冲击显现特征

3.1 裂纹动态扩展及煤体破坏形态

图 8 列出了 2 组煤样多次应力降及局部动力显现的典型破裂面演化特征。观察碎屑弹射飞出后呈

现的煤样新鲜表面特征可知, 加载过程中煤样内部产生了新的裂纹和破裂面, 表面光亮的破裂面主要是拉伸破裂扩展贯通形成, 这与图 3 中拉伸裂纹占主导结果一致。另外, 这些破裂面呈现局部演化规律, 在压缩过程中, 脆性煤体局部产生破裂及冲击显现, 宏观上表现为一次应力降过程。如上节所述, 在每次应力降和冲击显现之前, 都不同程度产生较大能量的声发射或微震事件。而裂纹将继续围绕产生冲击显现现象的局部向周边扩展, 裂纹非稳定扩展贯通激发大能量震动事件, 引起煤样局部再失稳。如图 8 所示, 经历多次应力降及冲击显现后, 煤体新的破裂面上呈现纵横交错的宏观裂纹及裂纹间光亮的新鲜破裂面, 再持续加载后, 最终煤样失稳崩解, 引发动力灾害。

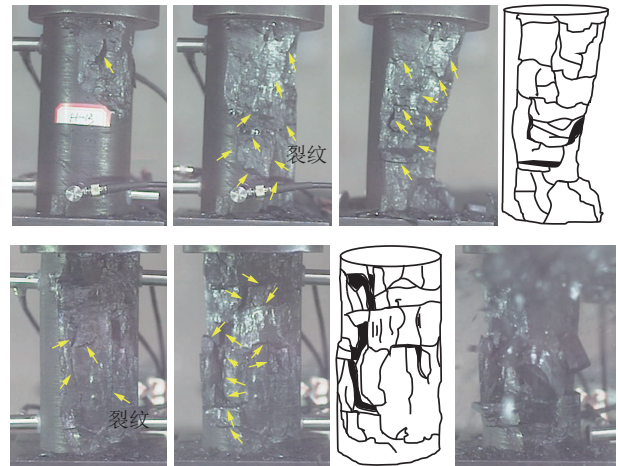


图 8 两组煤样多次局部冲击显现后典型破裂面特征

Fig.8 Fracture surface profiles of two groups of coal specimen after several rounds of rock burst events

煤样单轴压缩试验中, 其在发生局部煤屑弹射等冲击显现之前, 不同程度地伴有以下现象:

(1) AE 采集信号表明, 每次显著的应力降及冲击显现前, 都伴有相对高能声发射事件。

(2) 通过相机采集的连续照片可知, 某些煤样在发生碎屑弹射现象之前, 个别声发射探头因煤样中大量震动而脱落, 这也表明碎屑弹射飞出之前裂纹扩展过程中产生大能量震动事件。

(3) 发生一次碎屑弹射事件 (应力降事件) 之前, 煤样内局部产生新鲜破裂面 (图 8), 光亮破裂面表明裂纹扩展的速度较高且扩展路径较为明确, 这些裂纹以拉伸形式为主。

(4) 光亮破裂面周边宏观裂纹从破裂方向上判定是翼型拉伸裂纹扩展贯通形成的拉伸和局部剪切带, 这与静态压缩过程中裂纹扩展及贯通规律一致。

(5) 煤体局部形成的优势破裂面对最终煤体的完全失稳冲击起到控制作用, 在经历多次局部应力降和

裂纹扩展后, 能量持续输入前提下, 煤体最终会沿着前期局部破坏区域形成大范围的碎屑冲击弹射, 最终彻底失稳 (图 8)。

为呈现煤样受载时局部卸载震动诱发裂纹非稳态扩展及冲击显现过程, 利用二维块体离散元软件 UDEC6.0 开展模拟研究。如图 9(a) 所示, 二维煤样尺寸为 50 mm×100 mm(宽度×高度), 其被尺寸为 1.5 mm 左右的三角形块体切割成离散结构, 压缩过程中, 拉伸或剪切裂纹将沿着这些三角形边界萌生并扩展, 每个三角形块体的受力和变形由其内部有限差分三角形网格控制, 网格尺寸为 1 mm。而上下加载盘直接被有限差分网格离散化, 网格尺寸与煤样内一致, 具体计算原理见文献 [26]。每一个三角形单元赋予线弹性模型, 块体间接触变形由法向和切向刚度控制, 拉伸过程假设为弹脆性破坏, 残余强度为 0, 剪切过程采用库伦滑移残余强度准则模拟, 煤样、上下盘及其接触界面的模拟参数见表 2。

煤样加载过程分为静态和动态加载。约束下盘 Y 方向位移, 在上盘上表面施加 0.05 m/s 的静态加载速度, 在下盘布置应力监测线 (图 9(a))。当静态加载应力达到峰值应力 70% 时, 如图 9(b) 所示, 将模型瑞利阻尼系数设为 0, 进而开启试样非稳态扩展模块, 同

表 2 数值模拟参数

Table 2 Parameters for numerical simulation

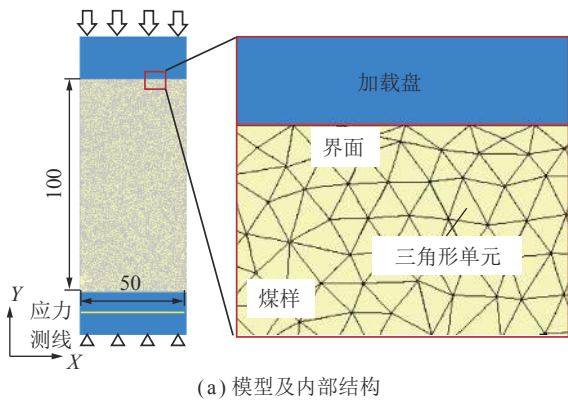
参数	煤样	加载盘	界面
密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 400	7 800	—
弹性模量 E/GPa	6	200	—
泊松比 μ	0.25	0.30	—
法向刚度 $k_n/(\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1})$	7.20×10^4	—	2.69×10^6
剪切刚度 $k_s/(\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1})$	2.88×10^4	—	1.08×10^6
黏聚力 c_i/MPa	12/0*	—	2
内摩擦角 $\psi_i/(\text{°})$	35/30*	—	10
抗拉强度 σ_{ti}/MPa	2/0*	—	0.1

注: *峰值/残余值。

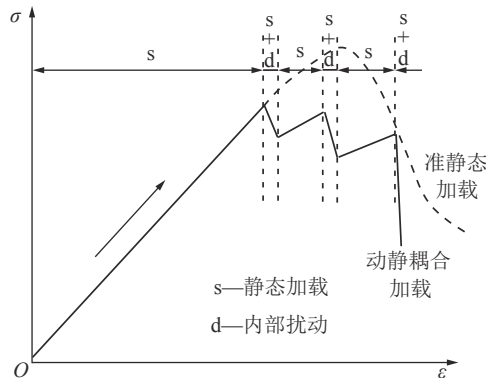
时参考文献 [17] 的方法, 对煤样左上方 ($X=17 \text{ mm}$, $Y=70 \text{ mm}$) 局部 3 mm×3 mm 区域弱化参数, 模拟煤样局部瞬时卸载引起的动力扰动行为。

本模拟中静态加载和动态卸载耦合。由于煤样内部扰动使其产生明显的失稳破坏, 因此表现出一定的应力降, 在 UDEC 离散元模拟方法中, 通过局部阻尼系数控制系统的稳定性, 进而实现煤样的准静态加载, 而当需要模拟短时应力降呈现的裂纹动态扩展过程时, 使用默认的局部阻尼系数不再合适, 这时候需要开启动力计算模块, 即使用瑞利阻尼。考虑到煤样的波速和尺寸, 在瑞利阻尼开启 20 μs 后, 再次开启局部阻尼, 煤样恢复稳定加载状态, 即为试验中某次应力降之后的准静态加载过程。如图 9(b) 所示, 模拟中循环上述动静态加卸载过程, 研究煤样动态失稳与准静态失稳的差异及裂纹演化规律。

图 10 展示了煤样在动静耦合压缩过程中的应力降及煤体动力显现过程。在图 10(a) 中临近 (i) 时刻对煤样左上方局部微小范围卸载, 模拟裂纹扩展引发的局部大能量震动事件, 卸载后震源附近裂纹快速扩展且以剪切裂纹为主, 同时激发应力波从震源区域向外传播 (图 10(c)-i)。如上所述, 瑞利阻尼开启 20 μs 后, 再次开启局部阻尼, 煤样恢复稳定加载状态。相较于图 3 中静态加载过程中煤样应力呈上升趋势, 模拟中有上升也有下降, 这与煤体形成的承载结构及裂纹演化过程有直接关系, 在试验中也存在静载过程应力下降的事例。当再次开启瑞利阻尼, 煤样再次进入动态失稳阶段, 当力波传播至试样表面反射后形成拉伸波, 导致试样近边界附近拉伸裂纹急剧扩展贯通, 形成小尺寸碎屑 (图 10(b)-ii), 从图 10(c)-ii 的碎屑速度图也可看出, 该区域碎屑速度为 1~9 m/s 不等。重复图 9(b) 中动静组合加载模式, 煤样经历多次应力降过程, 每次应力降伴随着裂纹的快速高密度扩展和碎



(a) 模型及内部结构



(b) 加载模式

图 9 数值模拟方法

Fig.9 Numerical simulation method

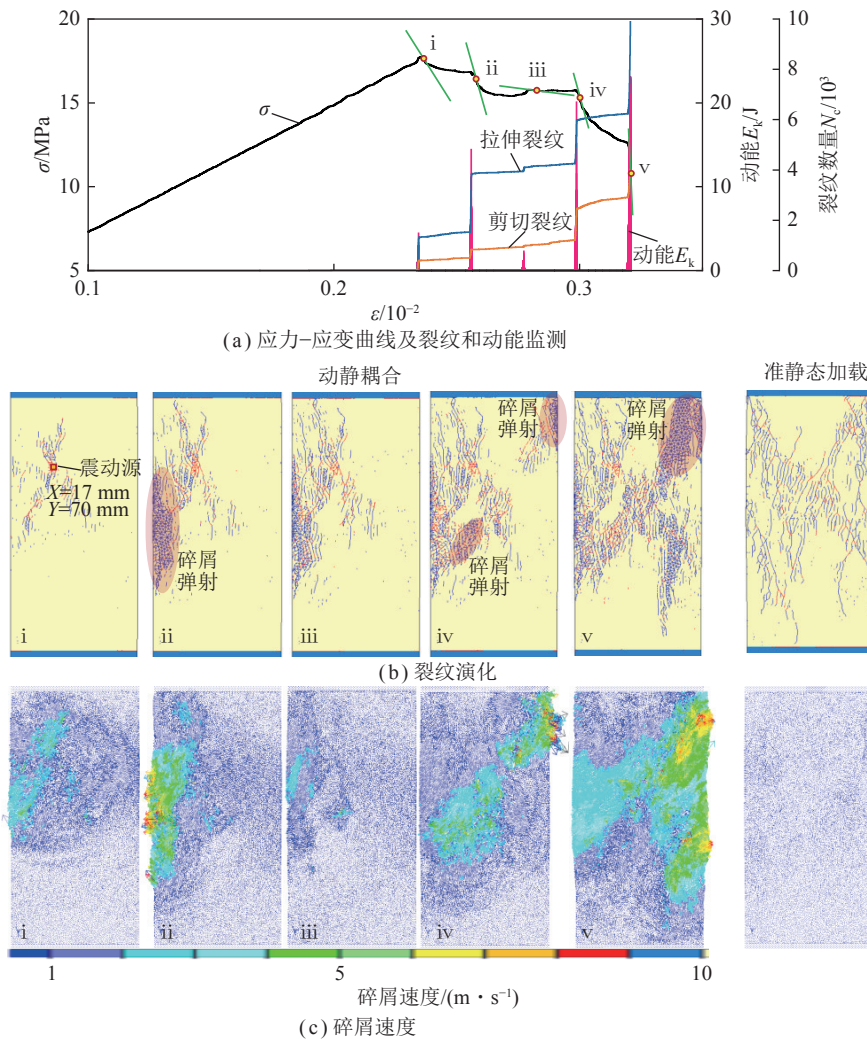


图 10 煤样压缩过程裂纹演化及冲击显现过程

Fig.10 Crack evolution and coal burst behavior of a coal specimen under compression

屑弹射现象。

图 10(a) 中附上了动静加载过程裂纹及煤体动能随应变演化结果。另外标记点处绿色线条斜率即应力降过程的卸载刚度, 结合图 10(b) 和图 10(c) 可知, 卸载刚度越小, 应力降过程中裂纹扩展程度越低, 碎屑动能越小 (例如图 10(c)-iii 时刻), 动力显现前以拉伸裂纹急剧扩展为主, 图 3 中利用声发射信号判识的拉伸和剪切裂纹演化试验结果也表明, 应力降过程中拉伸裂纹占主导, 与模拟结果规律一致; 卸载刚度越大, 裂纹动态扩展及动力显现范围越大, 表明煤体冲击显现越剧烈。

煤体冲击显现过程与静载过程的裂纹演化存在显著差异。对比图 10(b) 和图 10(c) 中动静组合加载与静态加载试样破坏结果可知, 冲击显现过程中, 裂纹局部扩展且裂纹密度较高, 形成的碎屑携带有动能弹射飞出; 静态加载过程中, 其峰后卸载速率较慢, 试样中形成的翼型拉伸裂纹扩展过程中贯通, 从而形成

宏观拉伸或剪切裂纹面(带), 试样破坏形成的小尺寸碎屑较少, 主要以宏观断裂面为主, 与图 7(b)-i 展示的煤样破坏特征相似。另外, 动静组合加载过程中碎屑弹射区呈现由局部积聚到宏观成片的规律, 其与煤体内部局部裂纹急剧快速扩展形成的动载扰动有密切关系, 破断特征与图 8 中展示的碎屑多次弹射后碎裂煤体相似, 即形成一些贯通的断裂面(翼型拉伸裂纹贯通形成的剪切面和拉伸面), 以及断裂面间碎屑弹射飞出后显露的拉伸裂纹主导的新鲜光亮破裂面等。

图 11 示意了煤体加载过程中准静态应力降和瞬时应力降的细观裂纹演化及宏观破坏特征差异性。根据细观裂纹扩展理论^[22,27-28], 脆性煤体内存在随机分布的细观裂纹, 在围压作用下, 这些细观裂纹的裂尖将萌生翼型拉伸裂纹, 拉伸裂纹以进一步产生剪切或拉伸裂纹的形式贯通, 最终形成宏观的破裂面和碎屑。如图 11 所示, 单次准静态应力降过程中, 裂纹萌生到贯通及形成最终的宏观断裂面都是准静态破坏

过程; 而一次瞬时应力降过程中, 翼型裂纹萌生后局部瞬间贯通形成剪切面, 该过程就对应着试验和现场中的大能量声发射或者微震事件 (图 5); 剪切面滑移过程中动载在自由面反射引起自由面附近急剧产生大量的拉伸裂纹, 瞬时应力降过程中能量快速释放, 一部分能量转化为裂纹扩展的表面能和初始裂纹摩擦耗能, 其余能量转化为裂纹贯通形成的碎屑的动能^[21-22], 碎屑弹射飞出引发动力灾害。

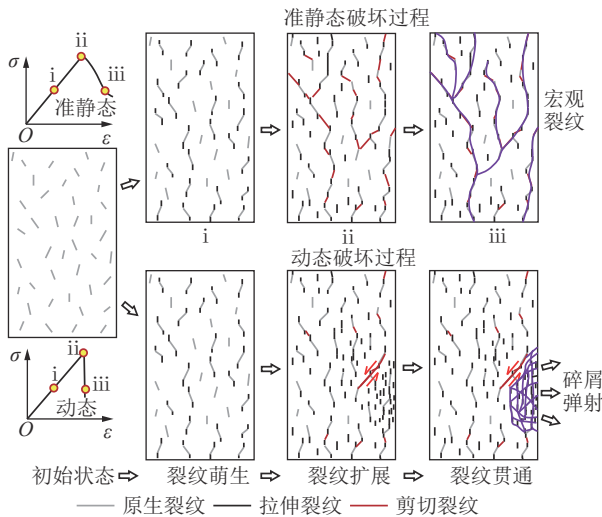


图 11 准静态和动态破坏过程煤样裂纹演化及破坏特征

Fig.11 Crack evolution and failure pattern of a coal specimen under quasi-static and dynamic stress drop, respectively

对比可知, 准静态应力降和瞬时应力降煤体破坏存在两方面的差异: ① 裂纹扩展诱发机制。准静态应力降过程主要是翼型裂纹的萌生扩展贯通形成宏观破裂面的耗能过程, 其应力降过程中煤体裂纹扩展相对稳定; 而瞬时应力降煤体裂纹扩展是从稳态到局部非稳态的转变过程, 裂纹扩展贯通形成局部大能量事件, 其剪切滑移引发的震动易诱发煤体边界附近裂纹

的非稳态扩展贯通, 宏观上表现为产生携带一定动能的碎屑弹射飞出及煤体的瞬间应力降。② 裂纹扩展模式及范围。准静态应力降煤体裂纹扩展符合传统的峰前裂纹演化规律 (图 1(b)), 其峰后卸载过程中裂纹进一步扩展贯通形成宏观断裂面, 总体上翼型裂纹萌生及扩展过程中以拉伸为主, 在峰值前后裂纹贯通过程中拉伸和剪切裂纹均有显著上升, 最终拉伸裂纹数量总体上较高于剪切裂纹; 而瞬时应力降过程中裂纹初始演化与准静态相似, 但在应力降发生之前, 局部裂纹快速贯通形成剪切面, 其滑移激发的应力波在自由面反射引发局部拉伸裂纹的急剧快速扩展, 一旦煤体局部失稳, 在煤体进一步受载及弹性能积聚下, 裂纹再次经历动态扩展及贯通过程, 形成某个邻近局部的再次碎屑弹射及应力降, 最终经历多次应力降后, 煤体承载能力达到极限, 其积聚的弹性能瞬间释放引起煤体的全局动态失稳。从模拟 (图 10) 和试验 (图 8) 中破裂面特征可知, 瞬时应力降过程中以拉伸裂纹为主, 剪切裂纹主要是在形成贯通面过程中产生。

3.2 冲击显现发生规律

3.2.1 震动事件、应力降及冲击显现时序性

煤体冲击显现在时序上存在前兆规律。由图 3、图 5 和图 8 的试验和现场监测结果可知, 局部煤体失稳之前伴有不同能量级的声发射和微震事件, 尤其是大能量事件, 其是煤体动态失稳及冲击显现的主要诱因。图 12 汇总了本文试验、模拟及文献 [20] 现场实测的煤体震动事件、应力降及宏观变形结果。由图 12 可以看出, 3 者在时间上并非同时发生, 存在一定的时序性。SHEN 等^[20] 依据现场实测结果将巷道顶板失效过程分为早期和后期两阶段 (图 12(c)), 早期阶段的主要现象是高震动、低应力变化及低位移, 后期主要以低震动、高应力及位移变化等相反特征为主。本文

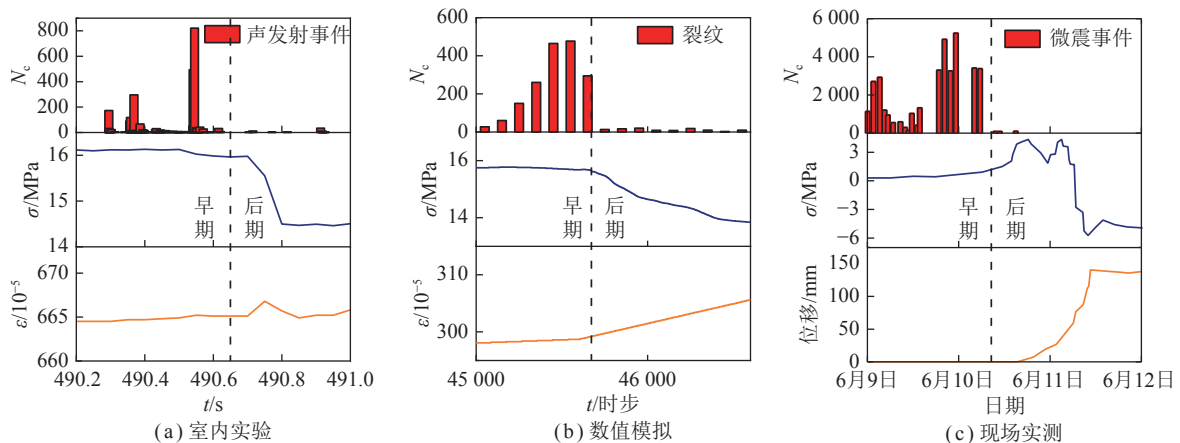


图 12 煤体震动事件、应力降及宏观变形的时序分布特征

Fig.12 Temporal distribution features among seismicity, stress drop and macro deformation

的煤体冲击显现试验和模拟也呈现相似规律,只是存在尺度导致的时间跨度上的差异。如上文所述,较为强烈的震动事件和裂纹扩展易诱发煤体局部应力降及宏观变形,而动力破坏过程中产生的高能震动事件易诱发局部区域的裂纹动态扩展及震动能量的增加,如图 11 所示,相较于准静态破坏过程,煤体冲击显现等动态过程的危害更大。

细观到宏观现象的时序变化为现场冲击预警提供可能。局部煤体的失效及动力显现经历裂纹的萌生、扩展及贯通过程,即震动事件的发生过程,此过程可借助现场微震及实验室声发射监测系统及时捕捉。由图 12 结果可知,裂纹从萌生到扩展过程其应力降并不明显,而是在裂纹大量贯通并形成宏观破坏后,应力降和位移增长才有效呈现。早期和后期两阶段的时间差给煤体冲击预警提供可能,即有效揭示煤体冲击显现过程中细观裂纹孕育演化过程,并对该过程产生的震动事件及能量实时监测分析,同时对宏观应力降及巷道围岩位移量实时监测,从多尺度上实现煤体冲击显现的监测预警,预防动力灾害的发生。

3.2.2 煤屑弹射刚度比相关性

煤体冲击显现烈度与其应力降过程的卸载刚度与峰前刚度比值 r_s 关系密切。试验结果(图 7)和模拟结果(图 10)总体表明刚度比越大,煤体冲击显现程度越高,造成的危害越大。2.3 节阐明了 r_s 的物理意义,即反映了煤层顶底板与煤层刚度比值对煤层冲击危险性影响。图 13 展示了某一煤样受载多次应力降前后的破坏过程。依据 2.3 节计算方法,该试样初始临界刚度比 r_{sc} 为 16.8。图 13 中,当 $r_s(\lambda/E) = 16.6$ 时,煤样应力降过程中没有明显的动力显现,仅产生由于其内部裂纹扩展激发的微小震动引起表面局部碎屑掉落;当 $r_s = 75.9$ 或 155.3 时,煤样局部产生大量碎屑弹射飞出现象,而同一工况中碎屑的尺寸及速度存在差异,这与文献 [29] 岩爆试验结果相似;当 $r_s = 403.9$ 时,煤体的冲击显现烈度明显高于其他时刻,多尺度碎屑弹射飞出,煤体发生大范围的剧烈破坏,即为煤矿现场中强烈的冲击矿压动力致灾过程。

碎屑弹射速度及动能亦呈现刚度比相关性。对 16 组煤样中有显著应力降及冲击显现且被相机有效捕捉到的时刻的碎屑速度及尺寸分析,单次冲击显现中选取 2~3 个碎屑跟踪分析,每个碎屑形状近似为球形。图 14 为本文所有试样在不同刚度比情况下碎屑弹射速度及动能统计结果,误差棒表示同一碎屑不同飞行时刻速度和动能的方差,图 14 中符号的尺寸对应了无量纲化碎屑尺寸 r_p ,即 $r_p = d_d/d_c$,其中 d_d 和 d_c 分别为碎屑直径和煤样直径。由图 14(a)可知,同

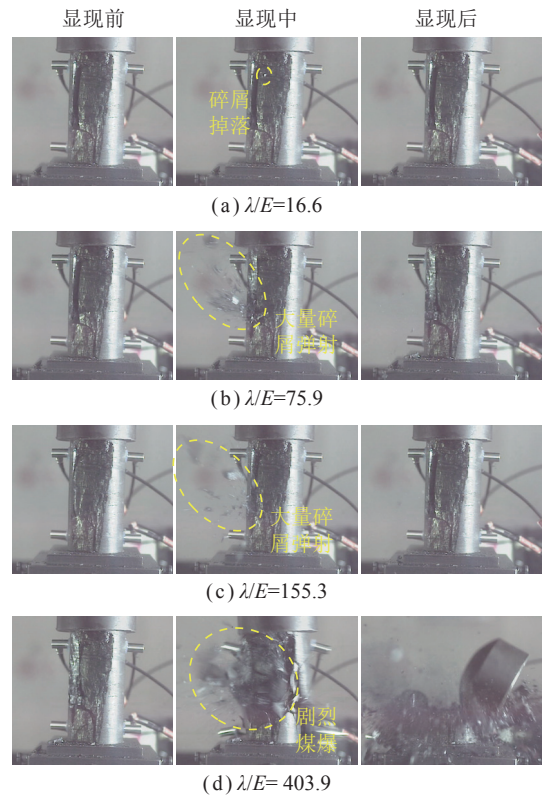


图 13 煤样受压产生应力降前后破坏

Fig.13 Failure processes of a coal specimen at four stress drop moments in different stiffness ratios

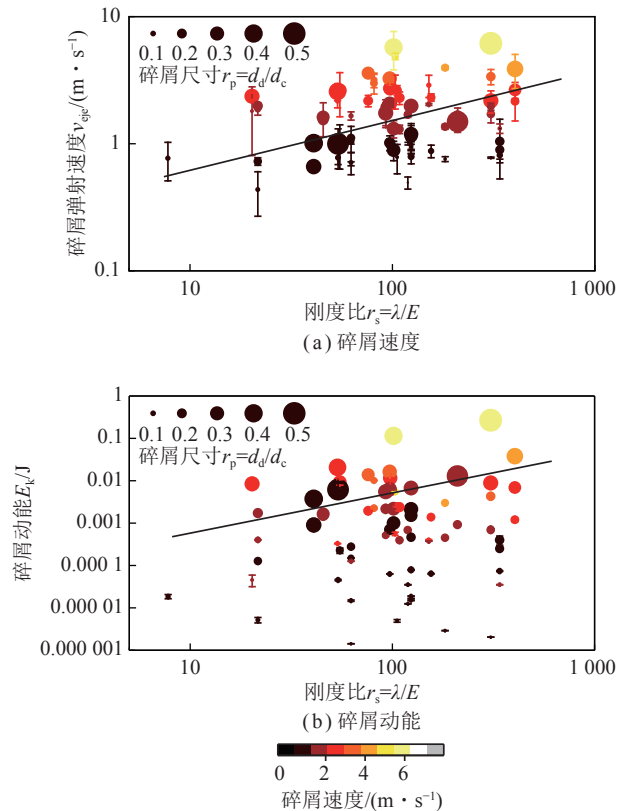


图 14 碎屑弹射速度及动能随刚度比变化规律

Fig.14 Correlation of debris ejection velocity and kinetic energy with stiffness ratio, respectively

一刚度比 r_s 时,碎屑的尺寸和速度分布均存在较大的跨度,表明冲击显现前细观裂纹呈多尺度扩展贯通过程,导致最终形成的碎屑在尺寸上有所差异,但碎屑速度与碎屑尺寸间没有发现明显的相关性,不过总体上微小碎屑的速度相对较小。整体上,碎屑弹射速度随着刚度比增大有一定的上升趋势,另外随着刚度比增大,碎屑能达到的最大速度也相应增大。图 14(b) 碎屑动能随刚度比演化规律与速度演化规律相似,当刚度比达到较高水平时(本文煤样为 $r_s > 40$),较高动能的大块碎屑在不同刚度比应力降过程中都会产生,不过数量上与应力降过程能量释放有关;根据图 7(a) 的 U_c-r_s 关系可推测,刚度比越大,应力降事件的大块碎屑数量越多,从现场危害角度考虑,这些较高动能的大块碎屑更易对设备及人员造成损害,如果通过煤岩改性实现应力降过程中较小刚度比的煤体损伤破坏,对减缓甚至抑制煤岩动力灾害的发生能起到关键作用。

4 结 论

(1) 大能量震动事件呈现局部化特征。实验室煤样声发射试验和现场冲击显现微震监测结果均表明大能量震动事件局部积聚并向周边扩展,其形成的扰动诱发煤体局部细观裂纹快速扩展贯通及结构动态失稳,引发煤体宏观应力降及冲击显现现象。

(2) 冲击显现烈度与应力降前后刚度比 r_s 及释放能量正相关。本文煤样应力降过程中发生冲击显现的临界刚度比 r_{sc} 约为 18.2,当 $r_s < r_{sc}$ 时无冲击显现,而当 $r_s \geq r_{sc}$ 时,随着刚度比和释放能量增大相继呈现少量碎屑弹射、大量碎屑弹射、碎块弹射和剧烈煤爆 4 种冲击显现现象。

(3) 煤体瞬时应力降过程裂纹演化规律与常规准静态受载过程在裂纹扩展诱发机制和裂纹扩展模式及范围方面均有显著差异。瞬时应力降中局部裂纹剪切滑移引发的大能量震动事件诱发其临自由面细观拉伸裂纹快速扩展贯通并形成碎屑弹射飞出,导致局部宏观的冲击显现,瞬时应力降过程中以拉伸裂纹动态扩展为主,剪切裂纹主要是在形成贯通面过程中产生。

(4) 冲击显现中碎屑弹射速度及动能与煤体应力降前后刚度比相关。碎屑弹射速度及动能随刚度比增大有一定的上升趋势,另外碎屑极限速度也相应增大,且存在较高动能大块碎屑产生的临界刚度比,本文煤样的阈值为 $r_s > 40$,而大块碎屑数量与应力降过程能量释放有关。

参考文献(References):

- [1] 窦林名. 冲击矿压防治技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社有限责任公司, 2020.
- [2] 潘俊锋. 冲击地压的冲击启动机理及其应用[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2016.
PAN Junfeng. Impact start-up mechanism and application of ground pressure impact[D]. Beijing: General Academy of Coal Science, 2016.
- [3] 窦林名, 何江, 曹安业, 等. 煤矿冲击矿压动静载叠加原理及其防治[J]. 煤炭学报, 2015, 40(7): 1469-1476.
DOU Linming, HE Jiang, CAO Anye, et al. Principle of pressure-dynamic static load superposition and its prevention and control in coal mine impact mine[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(7): 1469-1476.
- [4] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2803-2813.
HE Manchao, XIE Heping, PENG Suping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2803-2813.
- [5] 韩泽鹏. 煤矿冲击矿压前兆信息识别及预警模型研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
HAN Zepeng. Research on precursor information identification and early warning model of coal mine impact pressure[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [6] 蔡武, 窦林名, 王桂峰, 等. 煤层采掘活动引起断层活化的力学机制及其诱冲机理[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(6): 1193-1202.
CAI Wu, DOU Linming, WANG Guifeng, et al. Mechanical mechanism and trapping mechanism of fault activation caused by coal seam mining activities[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2019, 36(6): 1193-1202.
- [7] CAI W, DOU L M, SI G Y, et al. Fault-induced coal burst mechanism under mining-induced static and dynamic stresses[J]. Engineering, 2021, 7(5): 687-700.
- [8] 姜耀东, 潘一山, 姜福兴, 等. 我国煤炭开采中的冲击地压机理和防治[J]. 煤炭学报, 2014, 39(2): 205-213.
JIANG Yaodong, PAN Yishan, JIANG Fuxing, et al. Mechanism and prevention of impact pressure in coal mining in China[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 205-213.
- [9] GAO F, KANG H, YANG L. An experimental investigation into the strainburst process under quasi-static loading[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53(12): 5617-5629.
- [10] SU G, FENG X, WANG J, et al. Experimental study of remotely triggered rockburst induced by a tunnel axial dynamic disturbance under true-triaxial conditions[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, 50(8): 2207-2226.
- [11] HU L, JU M, ZHAO P, et al. Deformation characteristics and novel strain criteria of strainbursts induced by low frequency cyclic disturbance[J]. Deep Underground Science and Engineering, 2023, 2: 52-60.
- [12] 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): 1729-1739.
HE Manchao, LIU Dongqiao, GONG Weili, et al. Development and test of impact rock burst test system[J]. Chinese Journal of Rock

- Mechanics and Engineering*, 2014, 33(9): 1729–1739.
- [13] GAO F, YANG L. Experimental and numerical investigation on the role of energy transition in strainbursts[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, 54(9): 5057–5070.
- [14] 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*, 2021, 54(9): 5057–5070.
SU Guoshao, JIANG Jianqing, FENG Xiating, et al. Experimental study on rockburst ejection failure process[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 54(9): 5057–5070.
- [15] 何满潮, 赵菲, 杜帅, 等. 不同卸载速率下岩爆破坏特征试验分析[J]. *岩土力学*, 2014, 35(10): 2737–2747, 2793.
HE Manchao, ZHAO Fei, DU Shuai, et al. Experimental analysis of rockburst failure characteristics under different unloading rates[J]. *Geomechanics*, 2014, 35(10): 2737–2747, 2793.
- [16] GAO F, KANG H, LI J. Numerical simulation of fault-slip rockbursts using the distinct element method[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2021, 110: 103805.
- [17] GAO F Q, KAISER P K, STEAD D, et al. Numerical simulation of strainbursts using a novel initiation method[J]. *Computers and Geotechnics*, 2019, 106: 117–127.
- [18] OHTSU M, ISODA T, TOMODA Y. Acoustic emission techniques standardized for concrete structures[J]. *Journal of Acoustic Emission*, 2007, 25: 21–32.
- [19] CAI M, HOU P Y, ZHANG X W, 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*, 2021, 147: 104921.
- [20] SHEN B, KING A, GUO H. Displacement, stress and seismicity in roadway roofs during mining-induced failure[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008, 45(5): 672–688.
- [21] 卢文波. 深部岩体开挖瞬态卸荷机制与效应[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [22] RAVICHANDRAN G, SUBHASH G. A micromechanical model for high strain rate behavior of ceramics[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1995, 32(17-18): 2627–2646.
- [23] 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(17): 3003–3010.
XIE Heping, JU Yang, LI Liyun. Rock strength and overall failure criterion based on the principle of energy dissipation and release[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005(17): 3003–3010.
- [24] 黄达, 黄润秋, 张永兴. 粗晶大理岩单轴压缩力学特性的静态加载速率效应及能量机制试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(2): 245–255.
HUANG Da, HUANG Runqiu, ZHANG Yongxing. Experimental study on static loading rate effect and energy mechanism of uniaxial compression mechanical characteristics of coarse-grained marble[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(2): 245–255.
- [25] 曹安业. 采动煤岩冲击破裂的震动效应及其应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2009.
CAO Anye. Seismic effect and application of impact rupture of mined coal rock [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2009.
- [26] KAZERANI T, ZHAO J. Micromechanical parameters in bonded particle method for modelling of brittle material failure[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2010, 34(18): 1877–1895.
- [27] NEMAT - NASSER, HORII S H. Compression - induced non-planar crack extension with application to splitting, exfoliation, and rockburst[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1982, 87(B8): 6805–6821.
- [28] ASHBY M, SAMMIS C. The damage mechanics of brittle solids in compression[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 1990, 133: 489–521.
- [29] SU G S, ZHAI S B, JIANG J Q, et al. Influence of radial stress gradient on strainbursts: An experimental study[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2017, 50: 2659–2676.