

岩块钻孔卸压模拟试验研究及卸压机理

刘金州¹, 王平^{1,2,3*}, 江永志¹, 魏明星¹, 喻迪¹, 吴欢¹

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201;

3. 湖南科技大学 南方煤矿瓦斯与顶板灾害预防控制安全生产重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 针对孤岛工作面产生的高应力集聚问题, 采用室内试验、理论分析等方法, 对受侧向约束作用的试件进行钻孔卸压, 通过改变孔径、孔深、孔间距这3个因素, 研究试件钻孔卸压效果的变化规律。结果表明: 卸压效果受孔径、孔间距、孔深的影响均较为明显, 随着钻孔直径和深度的增加, 钻孔间距的减少, 试件单轴抗压强度呈下降趋势; 试件加载过程中声发射的 b 值呈上下波动态势, 岩样裂隙的发展比煤样的裂隙发展更为稳定; 岩石临近破坏, 振铃计数突增, 能量累计数迅速上升, b 值有所下降, 可作为岩石破坏前兆信息, 能在一定程度上预测冲击地压的发生; 钻孔卸压降低了煤岩体内能量的储存, 使得冲击地压发生的概率降低。

关键词: 侧向约束; 冲击地压; 钻孔卸压; 声发射

中图分类号: TD322

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2024)04-0007-11

On Pressure Relief Simulation Test and Mechanism of Rock Block Drilling

LIU Jinzhou¹, WANG Ping^{1,2,3*}, JIANG Yongzhi¹, WEI Mingxing¹, YU Di¹, WU Huan¹

(1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Coal Mine Safety Technology, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

3. Key Laboratory of Coal Mine Gas and Roof Disaster Prevention and Control in Southern China,

Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: In order to solve the problem of high stress concentration caused by isolated island working face, laboratory experiments and theoretical analysis are used to drill and relieve the pressure of specimens subjected to lateral constraints. By changing the three factors of aperture, hole depth and hole spacing, the variation rule of drilling and relieving pressure of specimens is studied. Results show that the pressure relief effect is significantly affected by the aperture, hole spacing and hole depth. With the increase of the diameter, depth and hole spacing, the uniaxial compressive strength value of the specimen shows a decreasing trend, that is, the pressure relief effect is positively correlated with the aperture, hole spacing and hole depth. The AE b value fluctuates up and down during the loading process, and the fracture development of rock sample is more stable than that of coal sample. When the rock is about to fail, the ringing count increases abruptly, the cumulative energy count increases rapidly, and the b value decreases, which can be used as the precursor information of rock failure, and can predict the occurrence of rock burst to a certain extent. Borehole pressure relief reduces the energy storage in coal and rock mass, which reduces the probability of rock burst.

Keywords: lateral constraint; rock burst; drilling pressure relief; acoustic emission

收稿日期: 2023-10-10

基金项目: 国家自然科学基金面上项目资助(52174110); 湖南省教育厅重点项目资助(21A0313); 煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室一般项目资助(JYBSYS2021203); 湖南省自然科学基金青年项目资助(2020JJ5186)

* 通信作者, E-mail: 674053967@qq.com

煤是我国主要的化石能源,在国民经济发展中起着不可或缺的重要作用.近年来,随着煤炭需求的不断扩大,浅部煤炭资源逐渐枯竭,我国即将进入深部开采阶段^[1-2].然而深部开采所遇到的灾害愈加复杂、多变,且深部地应力大,地质条件复杂,更易诱发冲击地压灾害^[3],该灾害具有危害性、突发性、复杂性、诱发性的特点,严重危害工作人员和机械设备的安全^[4].

当前,我国对防治冲击地压的主要方法有区域防范法、主动解危法和加强支护法^[5],其中主动解危法中的钻孔卸压已有许多学者进行大量研究.贾传洋等^[6]通过室内试验和数值试验相结合的方法研究孔径、孔深、孔间距对卸压效果的影响,并阐明了钻孔周围裂纹扩展的形式;刘冬桥等^[7]通过室内试验模拟钻孔卸压对岩爆灾害的防治作用,重点采用声发射等技术研究钻孔数量对岩爆的影响;袁红辉等^[8]对单个不同孔径的试块进行数值模拟研究,探究深部巷道钻孔卸压对不同孔径围岩的整体力学性能的影响;马斌文等^[9]对钻孔卸压防治冲击地压机理进行理论分析,推导钻孔周围卸压区的边界方程,探讨影响钻孔卸压的各种因素;焦建康等^[10]对动载冲击地压巷道围岩冲击破坏特征、破坏机理以及控制技术进行了研究;易恩兵等^[11]利用数值模拟软件FLAC^{3D}分析大直径钻孔卸压在软及硬煤体中的应力分布情况;王猛等^[12]运用FLAC^{3D}二次开发,系统研究卸压钻孔长度、直径、间排距等关键参数,提出关键参数的确定方法并进行了现场实证;王爱文等^[13]通过4种钻孔布置方式,分析试样的宏观破坏特征和冲击倾向性的变化规律,研究破碎颗粒新增表面积与能量耗散的相关性;陈涛等^[14]采用数值模拟研究卸压钻孔孔径、孔深、孔间距和孔布置形式对卸压效果的影响;LI等^[15]通过单轴压缩试验,对比分析同径钻孔和变径钻孔的卸压效果.

虽然众多学者对钻孔卸压已经有了比较系统深入的研究,并取得了大量成果,然而,对侧向压板约束的钻孔卸压研究较为少见.因此,本文基于前人研究成果,研究钻孔卸压参数(钻孔直径、钻孔深度、钻孔间距)在施加上部载荷和侧向压板约束条件下对围岩力学特性的影响.通过室内试验分析不同参数条件下试样的强度以及声发射能量累计数、振铃计数等变化规律,为钻孔卸压参数研究提供一定的理论依据.

1 钻孔卸压试验

1.1 试验方案设计

卸压效果受泄压钻孔孔径、孔间距、孔深的影响均较为明显,本试验研究施加上部载荷和侧向压板约束条件下,各钻孔参数对围岩力学特性的影响,具体方案如表1所示.

表1 试验方案设计

序号	试验方案	试验参数/mm
1	不同钻孔直径(孔深 120 mm)	10, 15, 20, 25, 30
2	不同钻孔深度(孔径 10 mm)	30, 60, 90, 120, 150
3	不同钻孔间距(孔深 120 mm, 孔径 10 mm)	10, 20, 30, 40, 50

1.2 试样制备

试验试样采用相似材料制作,岩石试样钻孔试样15组(每组3个),完整试件3个,煤炭试样4组共8个,共计56个;采用水、细沙和水泥的质量比为1.10:5.01:1.67和水、水泥、煤粉的质量比为1.20:2.67:3.40做成,试样尺寸为150 mm×150 mm×150 mm,水泥标号为32.5,在常温保湿条件下养护28 d.试件如图1所示.

1.3 试验装置及加载方式

钻孔卸压试验系统采用岩石力学加载系统(RMT-150c)进行单轴加载试验(图2),且搭配声发射监测系统(图3),最大地利用了伺服系统的能力,对试块进行加载.



图1 岩块、煤岩试件



图2 岩石力学加载系统

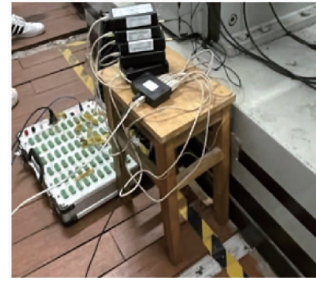


图3 声发射监测系统

进行加载试验时,试块会产生端部效应.需将养护好的试块去除表面的灰尘和设备上铁板所吸附的杂质,在试块和所需接触的铁板之间添加润滑剂,使其减少不必要的摩擦力;随后用固体胶将应变片贴在未约束面的前后方,再将声发射探头用胶带同样固定在未约束面的前后方;对处理好的试块用2块铁板和螺栓将其固定在试块的两侧,如图4所示.为了每次固定都是同一预紧状态,减少人为误差,螺栓的固定用预应力扳手,其预紧力设置为4 kN.根据深部巷道的应力特点,将RMT-150c的参数设置成:行程终点为10 mm,行程极限为10 mm,力极限为800 kN,行程速率为0.005 mm/s.模拟煤岩在地下所受应力情况:先进行施压,设置压应力为450 kN,即20 MPa,到达该值立马停止施压;后进行钻孔,用可旋转移动的钻机使用不同直径的钻头在不同参数条件下进行钻孔(图5),不能将钻孔贯穿试件,会导致破坏试件,影响其承载能力,控制钻孔深度为120 mm,完成后再进行施压,直至试块破坏.



图4 试块加载



图5 可旋转移动钻机和钻头

2 结果分析

2.1 不同参数条件下的试块强度分析

2.1.1 岩样强度分析

图6为岩样在不同孔径条件下试块的单轴压缩试验的应力-应变曲线.从图6中可知,试块的曲线变化为峰前呈缓慢上升趋势,除完整试件外,峰前下降阶段是蠕变-钻孔卸压所致,待钻孔完成后继续加载,试块会达到自身所能承受的最大峰值,峰值过后呈缓慢下降趋势.由孔径峰值强度曲线(图7)可知,完整试件峰值强度为33.22 MPa,随着试块钻孔孔径的增大,不同孔径峰值强度逐渐降低,分别为27.38,27.15,25.08,26.10,24.31 MPa,与完整试件相比,降低了17.6%,18.3%,24.5%,21.4%,26.8%.由此说明,试块钻孔孔径增大,峰值强度随之不断降低,卸压效果显著增强.

图8为岩样在不同孔间距条件下试块单轴压缩试验的应力-应变曲线,其曲线变化与不同孔径曲线变化趋势完全相反.由孔间距峰值强度曲线(图9)可知:完整试件峰值强度为33.22 MPa,随着试块钻孔孔间距增大,不同孔间距试块的峰值强度呈上升趋势,与完整试件相比,分别降低到25.01,25.50,28.42,28.97,30.32 MPa,即降低24.7%,23.2%,14.4%,12.8%,8.7%.由此说明,随着钻孔间距的逐步减小,其峰值强度会相应地出现降低的趋势,同时,这一变化伴随着卸压效果的显著增强.

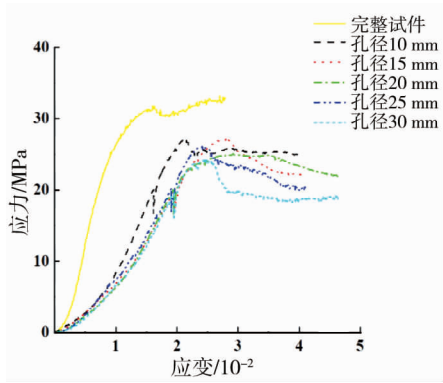


图6 不同孔径试块应力-应变曲线

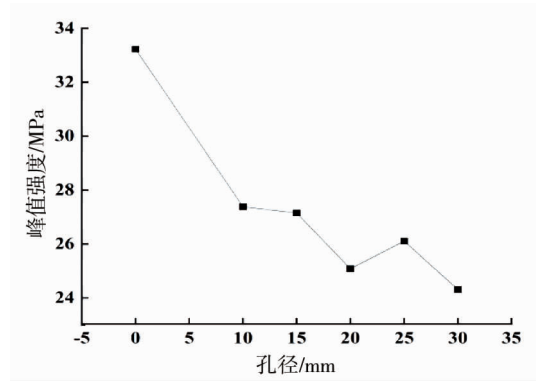


图7 孔径峰值强度曲线

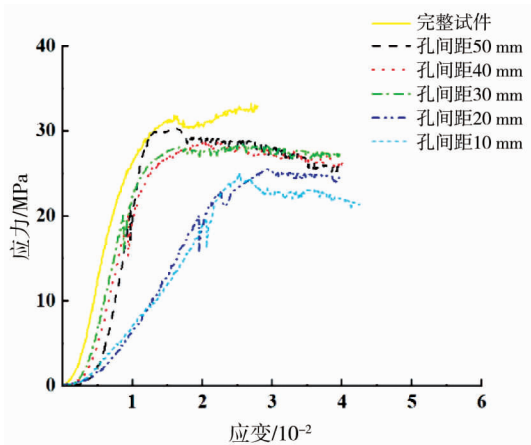


图8 不同孔间距试块应力-应变曲线

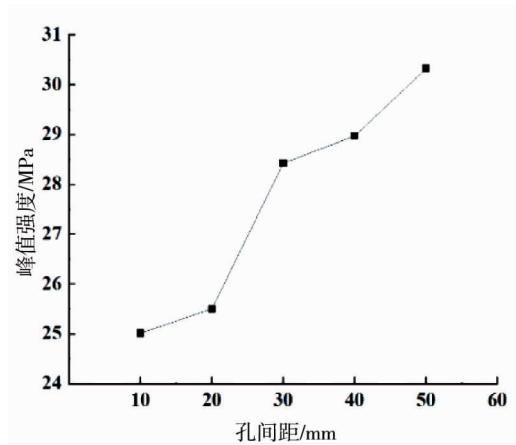


图9 孔间距峰值强度曲线

图10为岩样在不同孔深条件下试块单轴压缩试验的应力-应变曲线,该曲线变化与不同孔径曲线的变化相同.如孔深峰值强度曲线(图11)所示,完整试件峰值强度为33.22 MPa,随着试块钻孔孔深的增大,不同孔深峰值强度逐渐下降,与完整试件相比,分别降低到32.73,31.01,29.96,27.38,25.14 MPa,即降低1.5%,6.7%,9.8%,17.6%,24.3%.由此说明,试块钻孔孔深增大,峰值强度随之不断降低,卸压效果显著增强.

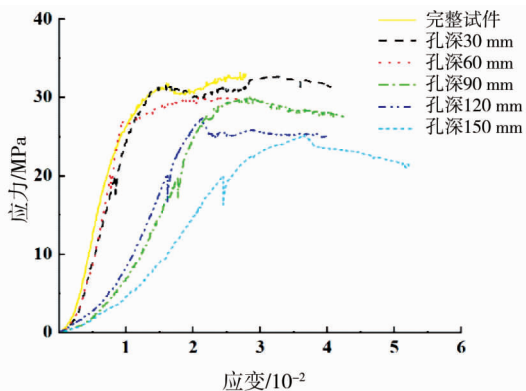


图10 不同孔深试块应力-应变曲线

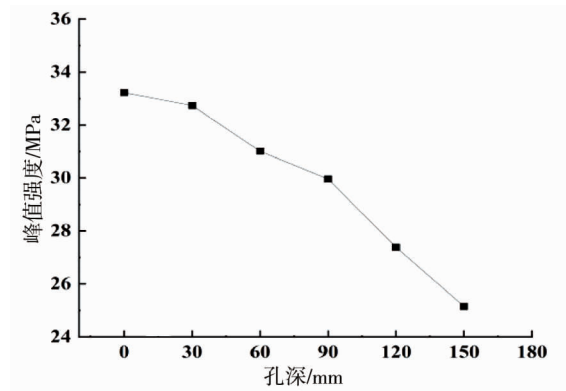


图11 孔深峰值强度曲线

2.1.2 煤样强度分析

图12为煤样在不同孔径条件下试块单轴压缩试验的应力-应变曲线,该曲线变化与岩样不同孔径曲线变化趋势相同.如孔径峰值强度曲线(图13)所示,完整试件峰值强度为8.36 MPa,随着试块钻孔孔径的增大,不同孔径峰值强度与完整试件峰值强度相比总体表现为下降趋势(不同孔径大小为10,15,20 mm),分别降低到7.45,6.61,6.07 MPa,即降低10.9%,20.9%,27.4%.由此说明,随着试块钻孔孔径的增

大,峰值强度不断降低,卸压效果显著增强.

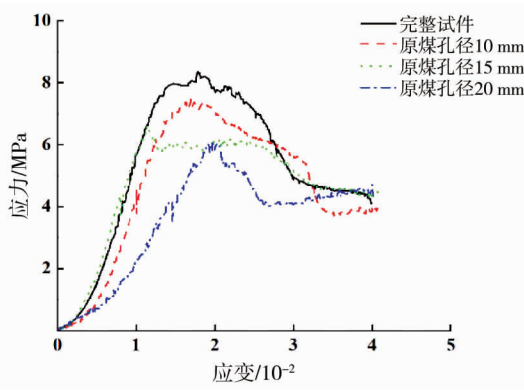


图 12 不同孔径试块应力-应变曲线

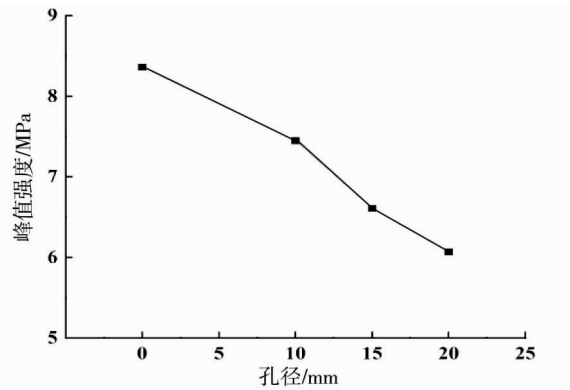


图 13 孔径峰值强度曲线

2.1.3 岩样-煤样强度对比分析

图 14 为岩样-煤样不同孔径条件下试块的单轴压缩试验应力-应变曲线.从图 14 中可知,岩样的应力强度远远大于煤样的应力强度,说明岩样比煤样的承载力更高.不同岩性峰值强度曲线如图 15 所示,因物质结构的不同,其承载能力也不同,2 条曲线的峰值强度相差较大,但两者的峰值强度随着试块钻孔孔径的增大,总体都表现为下降趋势.由此说明,随着试块钻孔孔径增大,峰值强度不断降低,卸压效果显著增强.

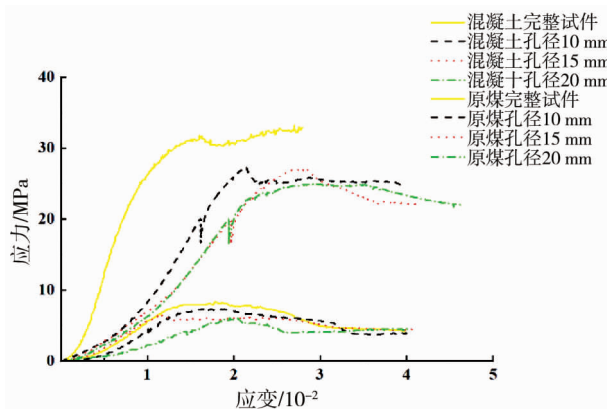


图 14 不同孔径试块应力-应变曲线

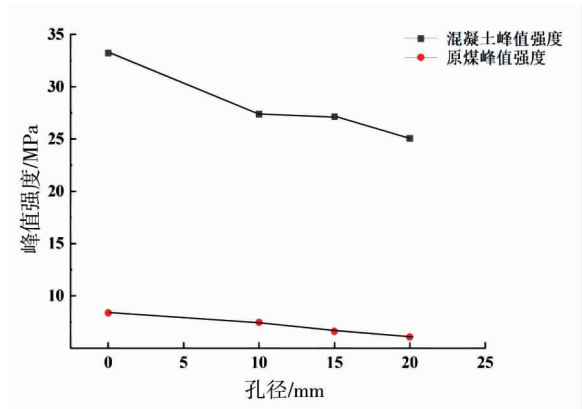


图 15 不同岩性峰值强度曲线

2.2 声发射分析

岩石在外荷载作用下其内部受力变形,使裂纹扩展和破裂等破坏过程中所释放的能量以波的形式传播,这种现象称之为声发射^[16].声发射中一个重要的参数 b 值,概念来自地震学的研究,根据 1941 年 B. Gutenberg 和 C. F. Richter 提出的地震震级与频率的关系式,分析不同钻孔参数条件下煤、岩体的变形破坏特征^[17].计算 G-R 关系式中岩石的声发射重要参数 b 值时,震级由振幅替代^[18]:

$$\lg N = a - b \left(\frac{A_{\text{dB}}}{20} \right). \tag{1}$$

式中: A_{dB} 为以分贝为单位表示的声发射事件的最大振幅,且 $A_{\text{dB}} = 20 \lg A_{\text{max}}$, A_{max} 为以微伏为单位表示的声发射事件的最大振幅值; N 为震级次数; a 为一个经验常数.

试验的声发射监测系统前置增益为 50 dB,采样频率为 10 MHz,门槛值为 45 dB,从声发射的事件数统计来看,不同胶结材料之间总事件数相差较大,因此在选择取样事件数时,根据试件本身的总事件数选取样本,样本窗口选取样本总数的 1/10~1/14. b 值计算方法一般有 2 种:最小二乘法和最大似然法,而最大似然法 b 值分布区域聚集,峰值更高也更加接近于 1,比最小二乘法的误差更小、更稳定.根据式(1)将最大似然法的岩石声发射 b 值公式修正为^[19]

$$b = (20lg\bar{A}) / (\bar{A} - A_{\min}) \quad (2)$$

式中: \bar{A} 为平均幅值; A_{\min} 为最小幅值。

2.2.1 岩样不同钻孔直径声发射参数和 b 值分析

图 16 为岩样在不同钻孔直径下声发射的振铃计数、 b 值、能量累计数和应力-应变随时间变化的曲线。依据收集的声发射参数结果,声发射可分为 3 个变化过程:初期加载阶段、蠕变-卸压阶段、峰后破坏阶段。初期加载阶段:相对于完整试件,在试件的初期加载阶段,振铃计数展现出显著的变化率,而能量累积曲线则呈现平缓上升趋势,这揭示了岩样内部空隙及裂隙逐渐闭合,颗粒间紧密压实的过程,此过程中,能量的释放速度较为缓慢,且剧烈程度相对较低;随着振铃计数进一步提高,新的裂隙开始出现和扩展;在此过程中 b 值整体表现为下降,说明大事件比例增加,以大尺度为主的微裂隙增加。蠕变-卸压阶段:该阶段的振铃计数较低; b 值上下小幅波动,大小事件所占比例相互交替,裂隙渐进式扩展; b 值在达到峰值应力前均有下降趋势,是岩样临近破裂,体内储存能量释放的现象。峰后破坏阶段:振铃计数在峰值前后有较高值突显,裂隙发展贯通,未受约束的两面出现大片脱落;能量累计数快速增加上升,能量释放速度加快,且剧烈程度变大; b 值发生急剧上升,说明小事件比例增加,以小尺度微裂隙为主。

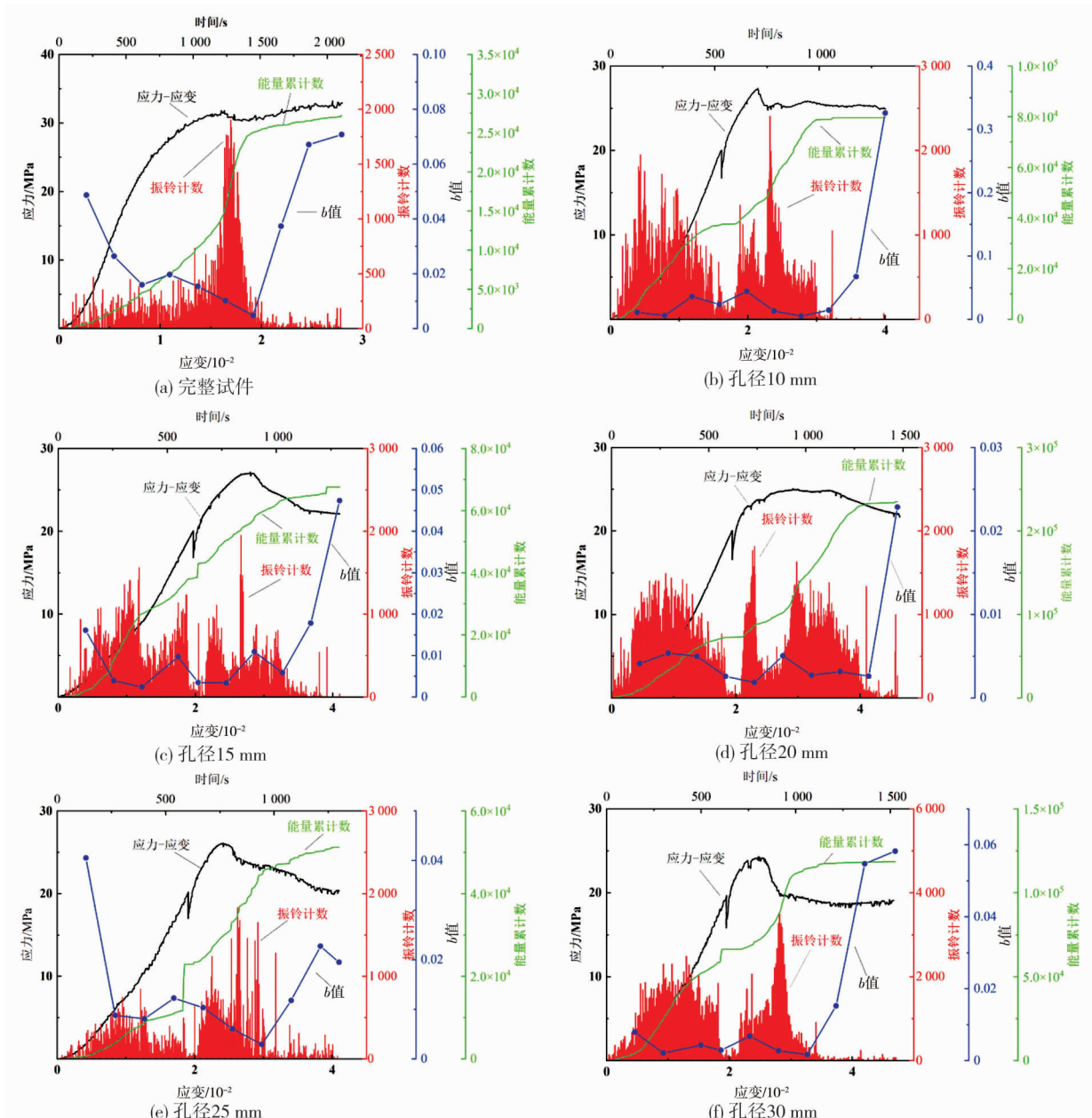


图 16 岩样在不同钻孔直径下声发射的振铃计数、 b 值、能量累计数和应力-应变关系

图 17 为岩样在不同钻孔间距条件下声发射的振铃计数、 b 值、能量累计数和应力-应变随时间变化的曲线,声发射可分为 3 个变化过程:初期加载阶段、蠕变-卸压阶段、峰后破坏阶段。初期加载阶段:随着应力-应变曲线的缓慢上升,振铃计数处于较低的变化状态,能量累计数曲线随着应力的增加缓慢上升,揭示了岩样内部孔隙和微裂隙逐渐闭合,颗粒之间压密过程在进行,内部应力重新分布过程需要时间,因此能量释放速度较慢且剧烈程度小,弹性能量积蓄;随着应力的进一步增加,振铃计数有些许增长,新的裂隙开始产生和扩展; b 值整体表现为下降,此过程说明大事件比例增加,以大尺度为主的微裂隙增加。蠕变-卸压阶段:能量累计数进一步增加, b 值持续向下变化,大尺度微裂隙持续发展增加。峰后破坏阶段:振铃计数在峰值前后有较高值突显,裂隙发展贯通,未受约束的两面出现大片脱落;能量累计数快速增加,能量释放加快,剧烈程度增加;此过程中 b 值发生急剧上升,说明小事件比例增加,以小尺度微裂隙为主。

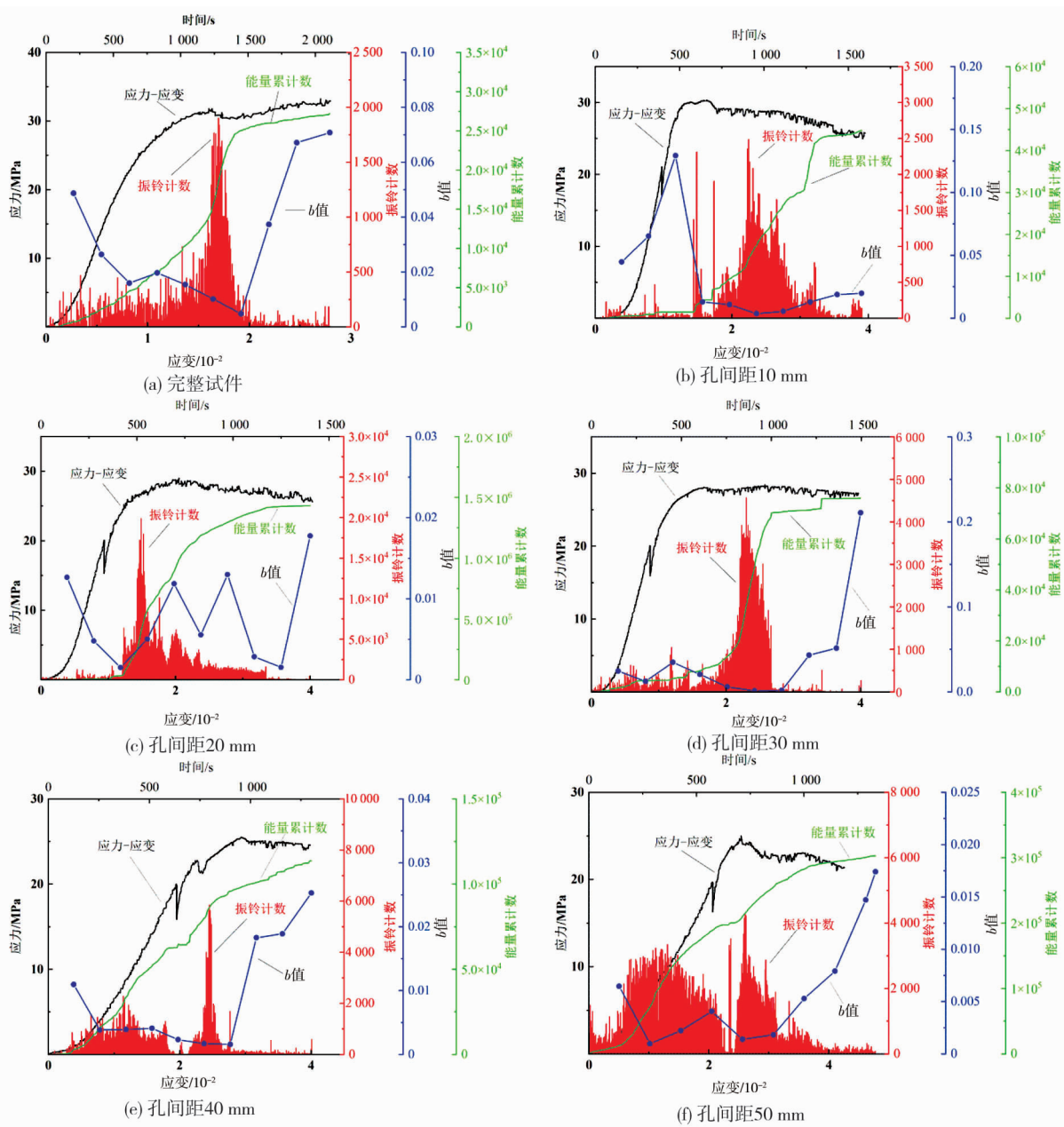


图 17 岩样在不同钻孔间距下声发射的能量累计数、幅值、 b 值和应力-应变关系

图 18 为岩样在不同钻孔深度条件下声发射的振铃计数、 b 值、能量累计数和应力-应变随时间的变化曲线。收集的声发射参数结果表明,声发射变化过程可分为 3 个变化过程:初期加载阶段、蠕变-卸压阶段、峰后破坏阶段。初期加载阶段:相对于完整试件,其他试件随着孔深的增加,初期加载阶段的振铃计数有较

高的变化,能量累计数曲线缓慢上升,揭示了岩样内部空隙及裂隙逐渐闭合,颗粒间紧密压实的过程,此过程中,能量的释放速度较为缓慢,且剧烈程度相对较低;随着振铃计数持续增加,新的裂隙开始出现和扩展;此过程 b 值的整体表现为下降,说明大事件比例增加,以大尺度为主的微裂隙增加.蠕变-卸压阶段:能量累计数继续增加, b 值持续向下变化,大尺度微裂隙持续发展增加.峰后破坏阶段:在应力峰值过后,裂纹完全扩展,试件破坏程度高,承载能力低下,呈失稳破坏特征;这一阶段,振铃计数逐渐趋于稳定,能量累计数也逐渐趋于平缓;此过程中 b 值发生急剧上升,说明小事件比例增加,以小尺度微裂隙为主.

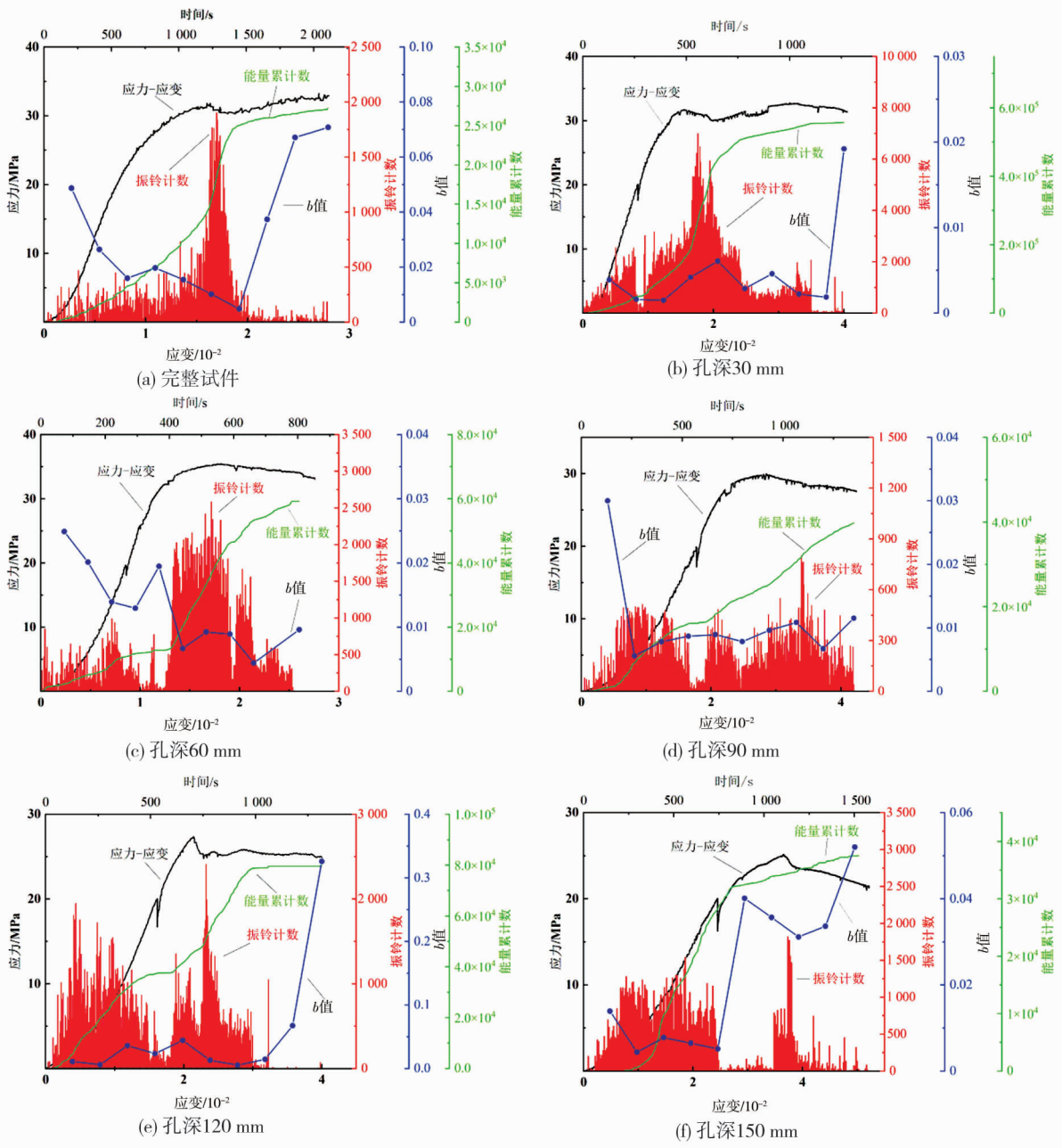


图 18 岩样在不同钻孔深度下声发射的能量累计数、幅值、 b 值和应力-应变关系

2.2.2 煤样不同钻孔直径声发射参数和 b 值分析

图 19 为煤样在不同钻孔直径条件下声发射的振铃计数、 b 值、能量累计数和应力-应变随时间的变化曲线.根据变化曲线,声发射可分为 3 个变化过程:初期加载阶段、蠕变-卸压阶段、峰后破坏阶段.初期加载阶段:随着应力-应变曲线缓慢上升,相对于煤样完整试件,振铃计数保持较低的水平变化状态,能量累计数曲线缓慢上升,说明煤样内部孔隙、裂隙闭合与颗粒之间压密,能量释放速度缓慢且剧烈程度小; b 值

的整体表现为下降,此过程说明大事件比例增加,以大尺度为主的微裂隙增加.蠕变-卸压阶段:能量累计数持续上升, b 值连续向下变化,大尺度微裂隙持续发展增加, b 值在达到峰值应力前均有下降趋势,是煤样临近破裂,体内储存能量释放的现象.峰后破坏阶段:振铃计数有较高值突显,裂隙发展贯通,未受约束的两面出现大片脱落; b 值表现为上下波动渐进式上升,裂隙扩展不稳定发展,这是因为煤承载能力低,应力重分布反复变化.

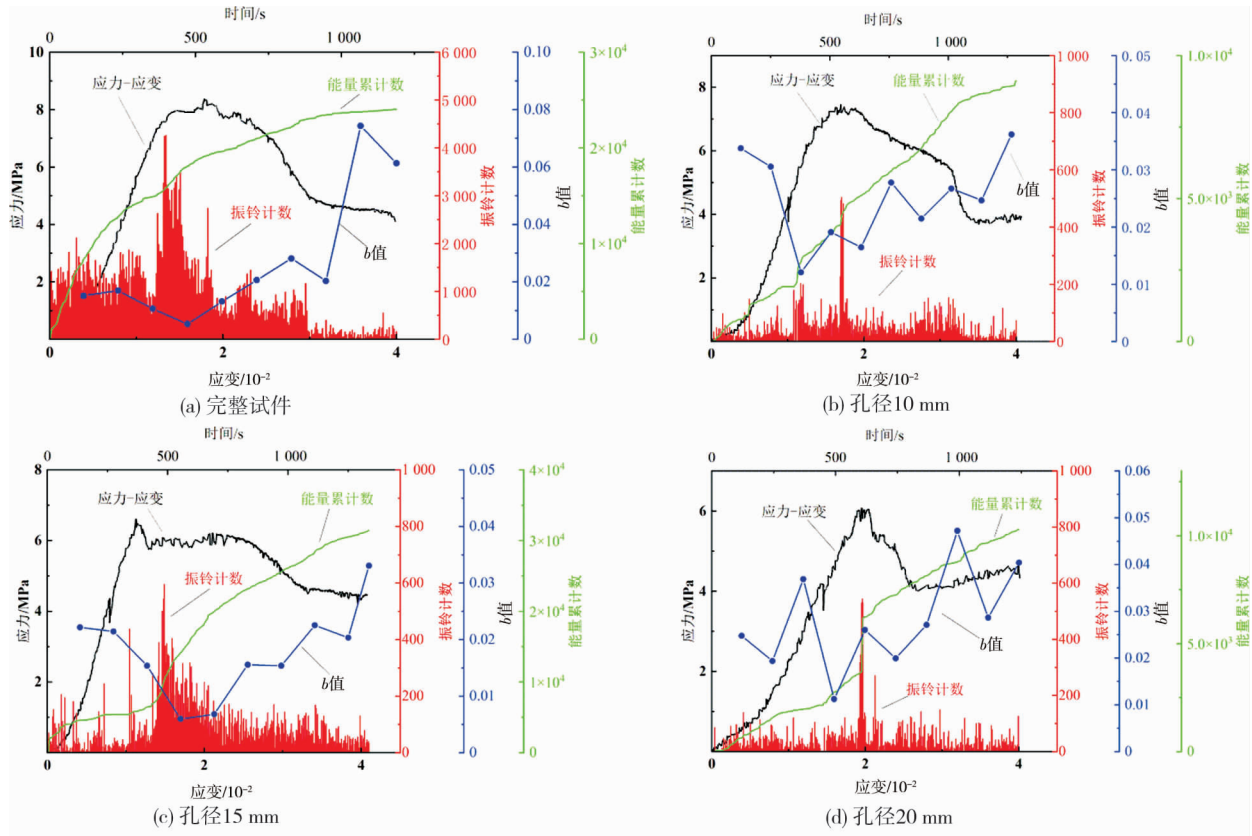


图 19 煤样不同钻孔直径声发射的能量累计数、幅值、 b 值和应力-应变关系

3 钻孔卸压机理分析

孤岛工作面顶板具有冲击倾向性,且周围采空区面积较大,由于深部开采,其煤岩的自重应力大,构造残余应力复杂,孤岛工作面煤岩体内累积的弹性应变能高,这些原岩应力是冲击地压最基本的因素,而这些原岩应力所聚集的弹性能是诱发冲击地压的基础.

在单轴压缩状态下,全应力-应变曲线分为 2 部分,左半部分是积累应变能,右半部分是消耗应变能.其单位体积内应变能计算:

$$U = \int_0^E \sigma_1 d\varepsilon_1 + \int_E^A \sigma_2 d\varepsilon_2 + \int_A^B \sigma_3 d\varepsilon_3 + \int_B^C \sigma_4 d\varepsilon_4; \tag{3}$$

$$U_1 = \int_0^E \sigma_1 d\varepsilon_1 - \int_E^A \sigma_2 d\varepsilon_2; \tag{4}$$

$$U_2 = \int_0^E \sigma_1 d\varepsilon_1 - \int_E^A \sigma_2 d\varepsilon_2 - \int_A^B \sigma_3 d\varepsilon_3 - \int_B^C \sigma_4 d\varepsilon_4. \tag{5}$$

式中:0 为原点; A 为消耗应变点; B 为全应变点; C 残余应变点; D 为峰值强度点; E 为峰值强度应变点; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$ 为不同应变区间内的应力函数; $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$ 为对应每个区间的应变变量; U 为主应力在主应变方向上做的总功,由《岩石力学与工程》^[20]可知,在图 20 中表示为全应力-应变曲线下的面积; U_1 为

岩石破坏后剩余的能量; U_2 为岩石累积能量完全消耗.

煤岩体内聚集应变能,易发生冲击地压灾害,钻孔卸压是有效改变该集中区域的围岩力学特性的措施,让可能发生高应力冲击破坏的煤岩从不稳定破坏变为稳定破坏.本质是人为打孔的方式破坏原始高应力巷道局部承载力,钻孔使煤岩体破裂,产生比孔径更大的破裂区,其破裂区相互贯通,内部应力重新分布,使巷道周围高应力向深部转移,从而达到卸压效果.由图 20 可知: U_1 越小,越容易发生冲击地压; U_2 越大,越不容易发生冲击地压;越靠近 D 释放能量越大.

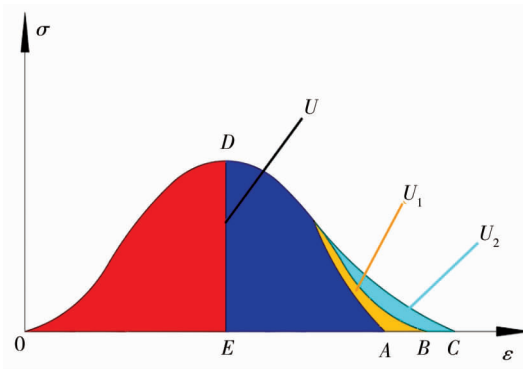


图 20 全应力-应变曲线能量示意图

图 21 为钻孔卸压典型试样能量曲线, S_1 点之前为钻孔前能量曲线, $S_1 \sim S_2$ 为钻孔后能量曲线, $S_2 \sim S_3$ 为峰值前能量曲线.相对于全应力-应变曲线左部分峰前的能量,钻孔卸压典型试样峰前能量曲线由于钻孔卸压,其试样大量裂隙扩展贯通,消耗能量,从而降低了煤岩体内能量的储存,即钻孔后有小幅能量的下降,面积有所减少即积累应变能有所降低,使得冲击地压发生的概率降低.

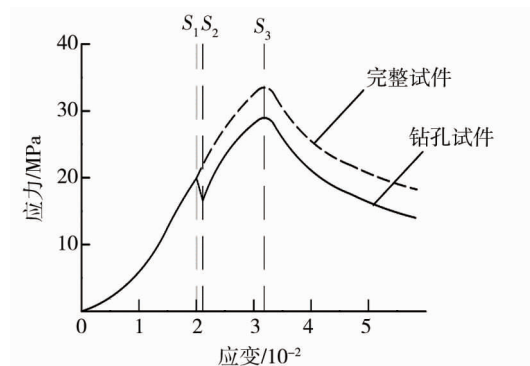


图 21 钻孔卸压典型试样能量曲线

4 结论

1) 岩样卸压效果受孔径、孔间距和孔深影响,卸压效果与钻孔直径和深度呈正相关,与钻孔间距呈负相关;煤样随着孔径的增大,卸压效果与岩样一样显著,但承载能力远低于岩样.

2) 煤样侧向约束单轴压缩破坏在不同钻孔直径条件下, b 值整个过程出现上升-下降的现象,整体表现为上下波动渐进式上升,是裂隙发展不稳定表现.

3) 岩样与煤样在临近破裂时,声发射 b 值在达到峰值应力前均有下降趋势,此规律可作为岩石破坏的前兆信息,能有效预测冲击地压的发生.

4) 由于钻孔卸压,试样裂隙扩展贯通消耗能量,降低煤岩体内能量的储存,钻孔试样曲线小幅下降,即积累应变能有所降低,使得冲击地压发生的概率降低.

参考文献:

- [1] 何满潮.深部的概念体系及工程评价指标[J].岩石力学与工程学报,2005,24(16):2854-2858.
- [2] 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.
- [3] 齐庆新,毛德兵,康立军,等.我国冲击地压现状与研究进展[C]//煤炭科学研究总院北京开采研究所建所50周年论文集.天地科技股份有限公司开采所事业部煤炭科学研究总院北京开采研究,2007:14.
- [4] 姜耀东,赵毅鑫.我国煤矿冲击地压的研究现状:机制、预警与控制[J].岩石力学与工程学报,2015,34(11):2188-2204.
- [5] 潘俊锋,毛德兵,蓝航,等.我国煤矿冲击地压防治技术研究现状及展望[J].煤炭科学技术,2013,41(6):21-25.
- [6] 贾传洋,蒋宇静,张学朋,等.大直径钻孔卸压机理室内及数值试验研究[J].岩土工程学报,2017,39(6):1115-1122.
- [7] 刘冬桥,刘赫赫,王炆,等.钻孔卸压防治岩爆实验及破坏特征研究[J].岩石力学与工程学报,2023,42(1):100-114.
- [8] 袁红辉,季相栋,杜泽文,等.深部巷道钻孔卸压围岩力学性能研究[J].煤炭技术,2022,41(3):39-43.
- [9] 马斌文,邓志刚,赵善坤,等.钻孔卸压防治冲击地压机理及影响因素分析[J].煤炭科学技术,2020,48(5):35-40.
- [10] 焦建康,鞠文君,吴拥政,等.动载冲击地压巷道围岩稳定性多层次控制技术[J].煤炭科学技术,2019,47(12):10-17.
- [11] 易恩兵,牟宗龙,窦林名,等.软及硬煤层钻孔卸压效果对比分析研究[J].煤炭科学技术,2011,39(6):1-5.
- [12] 王猛,王襄禹,肖同强.深部巷道钻孔卸压机理及关键参数确定方法与应用[J].煤炭学报,2017,42(5):1138-1145.
- [13] 王爱文,高乾书,潘一山,等.预制钻孔煤样冲击倾向性及能量耗散规律[J].煤炭学报,2021,46(3):959-972.
- [14] 陈涛,阮学云,王襄禹,等.钻孔卸压防治冲击地压影响因素分析[J].煤炭技术,2023,42(1):119-123.
- [15] LI Y Y, GUO R W, ZHANG S C, et al. Experimental study on pressure relief mechanism of variable-diameter borehole and energy evolution characteristics of the surrounding rock[J]. Energies, 2022, 15(18): 6596.
- [16] 王春来,石峰.不同硬岩破裂失稳声发射及 b 值动态特征实验研究[J].中国矿业,2018,27(7):130-134.
- [17] 宋朝阳,纪洪广,刘志强,等.干湿循环作用下弱胶结岩石声发射特征试验研究[J].采矿与安全工程学报,2019,36(4):812-819.
- [18] 刘希灵,潘梦成,李夕兵,等.动静加载条件下花岗岩声发射 b 值特征的研究[J].岩石力学与工程学报,2017,36(增刊1):3148-3155.
- [19] 董陇军,张凌云.岩石破坏声发射 b 值的误差分析[J].长江科学院院报,2020,37(8):75-81.
- [20] 蔡美峰.岩石力学与工程[M].北京:科学出版社,2002.