

彭相愿,高富强,原贵阳,等.煤应变型冲击破坏尺寸效应声发射特征试验研究[J].采矿与岩层控制工程学报,2023,5(3):033031.

PENG Xiangyan, GAO Fuqiang, YUAN Guiyang, et al. Experimental study on the size effect of acoustic emission characteristics of coal strainbursts[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2023, 5(3): 033031.

煤应变型冲击破坏尺寸效应声发射特征试验研究

彭相愿^{1,2},高富强^{1,2,3},原贵阳^{1,2,3},王焯辉^{1,2,4}

(1.煤炭科学研究总院 开采研究分院,北京 100013;2.中煤科工开采研究院有限公司,北京 100013;3.煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室,北京 100013;4.中国矿业大学 矿业工程学院,江苏 徐州 221116)

摘要:为探究煤冲击破坏过程中的尺寸效应现象,采用自主研发的煤岩冲击破坏试验装置对5种不同尺寸的方形试样开展单轴压缩试验,并重点监测其声发射特征。研究表明:煤的弹性模量随边长尺寸的增加而增加,抗压强度及峰值应变随尺寸的增加而减小,尺寸较大的试样,在整体冲击破坏发生前会有局部小型冲击破坏的发生;随着边长尺寸的增加,声发射总振铃计数增长速度加快,声发射信号大能量更多在临近破坏阶段,但尺寸增加到300 mm时,声发射能量尺寸效应不明显。大尺寸试样的声发射 b 值会因为局部冲击而产生突降;声发射定位信号反映了试样破坏方式,随着边长尺寸的变大,声发射定位信号愈加分散,试样破坏方式由剪切破坏为主转为张拉破坏为主。

关键词:冲击破坏;尺寸效应;裂隙扩展;声发射;单轴压缩

中图分类号:TD315

文献标志码:A

文章编号:2096-7187(2023)03-3031-13

Experimental study on the size effect of acoustic emission characteristics of coal strainbursts

PENG Xiangyuan^{1,2}, GAO Fuqiang^{1,2,3}, YUAN Guiyang^{1,2,3}, WANG Xuanhui^{1,2,4}

(1. Coal Mining Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 2. CCTEG Coal Mining Research Institute, Beijing 100013, China; 3. State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization, Beijing 100013, China; 4. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116)

Abstract: In order to investigate the phenomenon of scale effect in the bursting failure of coal measure, the bursting failure tests under uniaxial compression conditions were carried out on square coal samples with different sizes by using the house-developed test apparatus. The acoustic emission characteristics during the bursting failure of the coal samples were investigated. The study shows that as the sample size increases, the elastic modulus of coal increases and the compressive strength and peak strain decrease. For larger samples, ejections of small fragments from the skin of the sample trend to occur before the final catastrophic bursting failure. This phenomenon is unlikely to occur for small samples. As the sample size increases, the growth rate of acoustic emission events increases, and the number of AE events with large energy increases. This size effect trends to disappear when the sample size reaches 300 mm. The acoustic emission b -value of large size specimen produces sudden drop due to localized bursting failure. The distribution characteristics of the acoustic emission events reflects the damage mode of coal

收稿日期:2023-02-01

修回日期:2023-03-30

责任编辑:许书阁

基金项目:天地科技股份有限公司开采设计事业部科技创新基金资助项目(TDKC-2022-MS-01, TDKC-2022-QN-02)

作者简介:彭相愿(1997—),男,山西平遥人,硕士研究生,主要从事煤矿动力灾害及岩石力学等方面的研究工作。E-mail: pengxiangyuan56@163.com

通信作者:高富强(1981—),男,河南扶沟人,研究员,博士。E-mail: gaofuqiang@tdkcsj.com

sample. The distribution of acoustic emission events trends to become more dispersed as the coal sample becomes larger, and the damage mode of specimen is changed from shear damage to tensile damage.

Key words: coal burst; size effect; fracture extension; acoustic emission; uniaxial compression

广义上,尺寸效应指在一个现象中,讨论的对象不再服从几何相似律,从而室内小型试验结果不能简单地推广应用于工程原型^[1]。尺寸效应是准脆性材料普遍存在的一个现象,目前已有学者从不同角度进行了大量试验研究^[2-5]。在岩石力学领域,将相同加载条件下,几何相似的同一种岩石或岩体试件力学性质参数与试件尺寸存在函数关系的现象叫做岩体性质的尺寸效应。

诸多学者通过静载下各种岩石单轴压缩试验,分析岩石力学性质随尺寸的变化规律。如以变形参数为对象开展的研究有:王谦源^[6]等得出脆性岩体强度与变形模量均随尺度的增大而降低,并趋于一个稳定值,泊松比随尺度的增大而增大,也趋于一个稳定值的结论;李帅^[7]等通过不同高径比下的页岩单轴压缩试验,发现随岩样尺度的增大,弹性模量和泊松比也会增大,而峰值强度、峰值应变、残余应变、残余应力和破裂时间等会减小;鞠文君^[8]等总结冲击倾向性的尺寸效应后得出,随煤样尺寸的增加,冲击倾向性会增强。以尺寸效应机理为对象展开的研究有:尤明庆^[9]等认为岩石强度的尺寸效应根源在于其非均质性,岩样尺寸越大,岩样强度平均值越低,离散程度越低;杨圣奇^[10]等通过大理岩的单轴压缩试验研究,认为岩石尺寸效应是由于试样端部摩擦造成的;陈瑜^[11]等认为尺寸效应是材料非均质性和端面摩擦效应耦合的结果,试样力学性质的差异是因为加载过程中起主导作用的因素不同而造成的;文献[12-13]提出了尺寸效应的塑性剪切应变梯度模型,认为局部化才是尺寸效应的原因。基于上述机理分析,诸多适用于岩石尺寸效应的模型被提出:WEIBULL^[14]运用统计尺寸效应理论来描述尺寸效应现象,认为脆性破坏的发生是由于其内部某一微单元达到了结构破坏的强度阈值。但实际情况是岩石破坏通常从裂隙区发育,逐渐形成断裂区并造成宏观破坏;BAŽANT^[15-16]等通过考虑材料破坏整个过程中的裂隙演化,从应力分布及能量平衡角度提出了无裂纹及包含裂纹材料的尺寸效应模型;HU^[17]等同样基于应力重分布推导了材料边界效应和能量尺寸效应模型。此外,也

有学者^[18-19]基于经验模型提出了尺寸效应公式,并被广泛运用。

上述研究所得到的成果主要反映了在静态载荷下岩石尺度效应规律及机理,为静态载荷尺寸效应。目前对于岩石冲击破坏的尺度效应研究主要采取动载荷试验,大多采用霍普金森压杆(SHPB)装置。如洪亮^[20]通过相同长径比不同直径花岗岩、砂岩和石灰岩的SHPB冲击破碎试验,分析了岩石破碎能及耗散能密度及其分形特征;平琦^[21]等用分离式霍普金森压杆装置,对长度15~100 mm的石灰岩进行了冲击载荷作用试验,研究其高应变率下的岩石力学性质尺度效应;李地元^[22]等通过长径比为0.5~2.0的花岗岩进行水平冲击试验和单轴压缩试验,细化了岩石长径比对试样动态强度和破坏模式的影响范围;孙卓越^[23]等研究了动静载荷下煤动态变形模量的长径比效应,发现在塑性阶段,割线模量随长径比增加而增大。国外学者^[24-25]运用落锤试验和显式ABAQUS程序有限元分析法,分析了不同尺寸脆性材料随尺寸的变化规律。

综上所述可知,目前对岩石冲击破坏尺寸效应的研究较少,且大多采用SHPB进行试验,且目前尺寸效应研究多以长径比为自变量,边长尺寸相差不大。笔者通过自主研发的试验机实现煤岩静力作用下冲击破坏试验,对尺寸相差较大的煤岩冲击破坏尺寸效应做进一步研究。

1 试验原理及方案

1.1 试验原理

试验加载设备为煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室自主研制的煤岩冲击破坏试验装置,如图1所示,最大加载能力为6 000 kN,工作压力为25 MPa,静力油缸是静力加载的主要装置。该系统搭配有6套气囊式蓄能器,当试样破坏时导致弹簧油缸下端活塞杆伸出,使蓄能器压力相对增大而发生瞬间膨胀,挤压供给的液压油打入油缸底部,保证试验机加载压头与试样不分离而实现能量补充,完成煤冲击破坏的整个过程。另配有2套弹簧油缸满足不同尺寸试样的加载要求,大油缸直径

560 mm,小油缸直径160 mm。



图1 试验加载系统及储能装置

Fig. 1 Experimental loading system and energy storage device

试验采用的监测设备如图2所示,包括压力-位移监测系统、应变监测系统、高速相机、声发射监测系统。

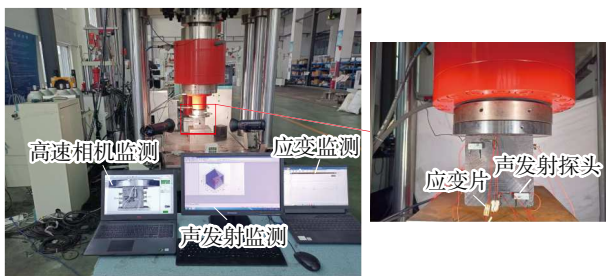


图2 试验监测设备

Fig. 2 Experimental monitoring equipment

笔者主要针对煤应变型冲击破坏进行研究。应变型冲击破坏可由局部矿井刚度理论^[26]解释,该理论认为煤柱上覆岩层的能量释放是导致冲击破坏发生的主要原因,当煤柱在破坏期间吸收的能量小于释放的能量会形成不稳定破坏即冲击破坏。试验台的储能结构满足应变型冲击破坏关键因素——能量的补充^[27],并且试验系统蓄能器克服了传统液压供油慢的问题,保证了加载压头在试样破坏后的及时跟进,可在储能的基础上进一步提高加载精度。

试样的单轴压缩试验是测量其变形破坏性质及应力-应变曲线的重要手段。笔者以长宽高比为1的不同尺寸方形试样进行试验,探讨尺寸效应对煤冲击破坏的影响并分析机理。整个试验过程采用力控加载,每组采用0.02 MPa/s的加压速度,根据每种尺寸试样加载面积计算加载速度,见表1。气囊的压力值设定为1.3 MPa,即当压力达到该设定值时气囊开始储能。

表1 不同尺寸试样的加载速度

Table 1 Loading speed of samples with different sizes

边长尺寸/mm	50	100	150	200	300
加载面积/m ²	0.002 5	0.01	0.022 5	0.04	0.09
加载速度/(N·s ⁻¹)	50	200	450	800	1 800

1.2 试验方案

(1) 试样选取

试样取自于某冲击倾向性矿井。根据岩石力学测试加工要求,用切割机制备长宽高比为1的方形试样,如图3所示,试样边长分别为50,100,150,200,300 mm,共5种,每种尺寸试样选取3组,且表面无明显裂隙。

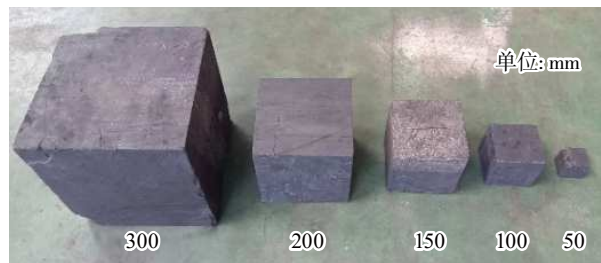


图3 不同尺寸的试样

Fig. 3 Coal samples with different sizes

(2) 试验步骤

① 首先调试试验台,确保试验台正常运转。考虑到边长尺寸及试验台控制精度的局限性,50,100 mm试样选用小弹簧油缸加载,其余3种尺寸试样选用大弹簧油缸加载。

② 分别用粗砂纸和细砂纸对试样表面进行打磨,确保其表面光滑。然后用酒精擦拭试样表面,确保表面干净。之后选取合适位置粘贴应变片,监测横向应变和纵向应变,由于试验机备有变形传感器装置,应变片监测纵向应变只做对照分析。在固定位置安装声发射探头,50,100 mm的试样安装2个声发射探头;150,200,300 mm的试样安装8个声发射探头,并在探头表面涂抹凡士林。

③ 连接监测设备,包括声发射仪器、高速相机、应变仪。试验开始后记录煤冲击破坏过程中的声发射能量、振铃计数、声发射定位信息、试样破坏方式、应力-应变曲线等数据。

2 试验数据分析

2.1 强度及变形特征

应力-应变曲线是材料或力学研究中基础并重

要的概念,它反映了材料受力及变形的过程,通过比较不同尺寸试样的应力-应变曲线可以直观地得到尺寸变化对其强度及应变特征的影响。图4给出了5种尺寸下试样的应力-应变曲线,每种尺寸选取3组进行分析。

对比5种尺寸试样的应力-应变曲线可知,在压密阶段,50,100 mm的试样较其余尺寸试样区别不明显。这是因为煤作为一种裂隙较为发育的岩石,其内部缺陷的数目以及缺陷的尺度是影响力学性质的重要因素。而试样的尺寸越小,其内部包含裂

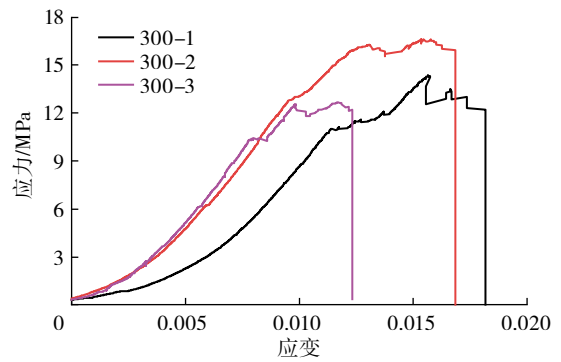
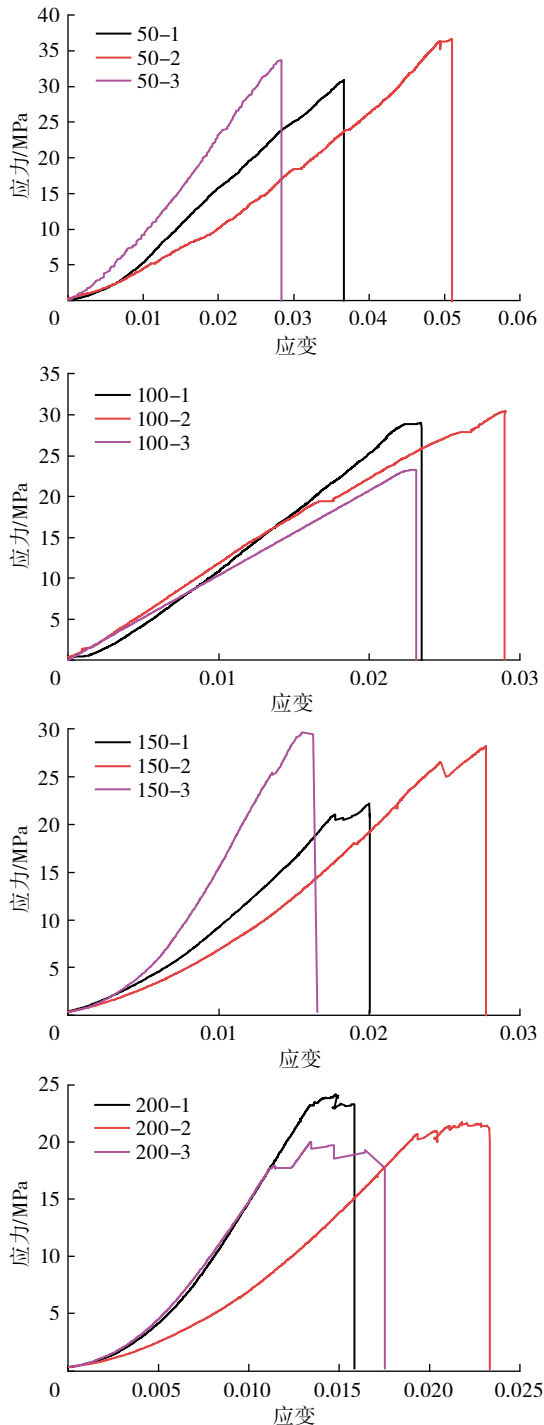


图4 不同尺寸试样的应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of coal samples of various sizes

隙的概率越小,故而在加载前期,受压缩闭合的原生裂隙数目较少,在应力-应变曲线上表现为压密阶段曲线上弯不明显。

在弹塑性稳定破坏阶段,各尺寸试样应力-应变曲线均呈近似直线上升的趋势,此阶段岩石内部裂隙由压缩闭合逐渐转变为受力扩展状态,且产生弹性变形的占比大于塑性变形。

在塑性非稳定破坏阶段,试样的破裂速度均加快。且尺寸越大的试样在此阶段变形量增长越大,非稳定破坏持续时间越长,非稳定破坏的剧烈程度也越强。这是因为相较于小尺寸试样,非均质特性对大尺寸试样影响更大,大尺寸试样弱面空隙更为复杂导致不同位置强度离散性较大,试样的破坏会从局部强度较低的位置起裂,是多个微观局部破坏到整体宏观破坏发展的过程。表现为临近冲击破坏前会有局部不断崩落或爆裂的现象发生。而此时试样内部主承载体还未完全破坏,所以测得试样强度不会降低。对应在应力-应变曲线上为试样峰值强度附近曲线出现波动,变形迅速增大。

峰后破坏阶段由于试样在冲击破坏发生后应力直接卸载降为0,故不在应力-应变曲线上体现。

2.2 力学变形指标

通过单轴压缩试验可以得到岩石变形指标,包括弹性模量、峰值应变等,也可以得到岩石的力学指标,包括抗压强度等。笔者对5种尺寸试样的峰值应变、抗压强度、割线模量及弹性模量随尺寸的变化规律进行对比分析,各指标均采用试验结果均值计算,图5为各指标随尺寸变化的拟合曲线。

弹性模量取曲线弹性阶段拟合计算,且保证拟合度在0.95以上。割线模量选取0.5倍抗压强度点计算,计算方式为该点的纵横坐标之比,即

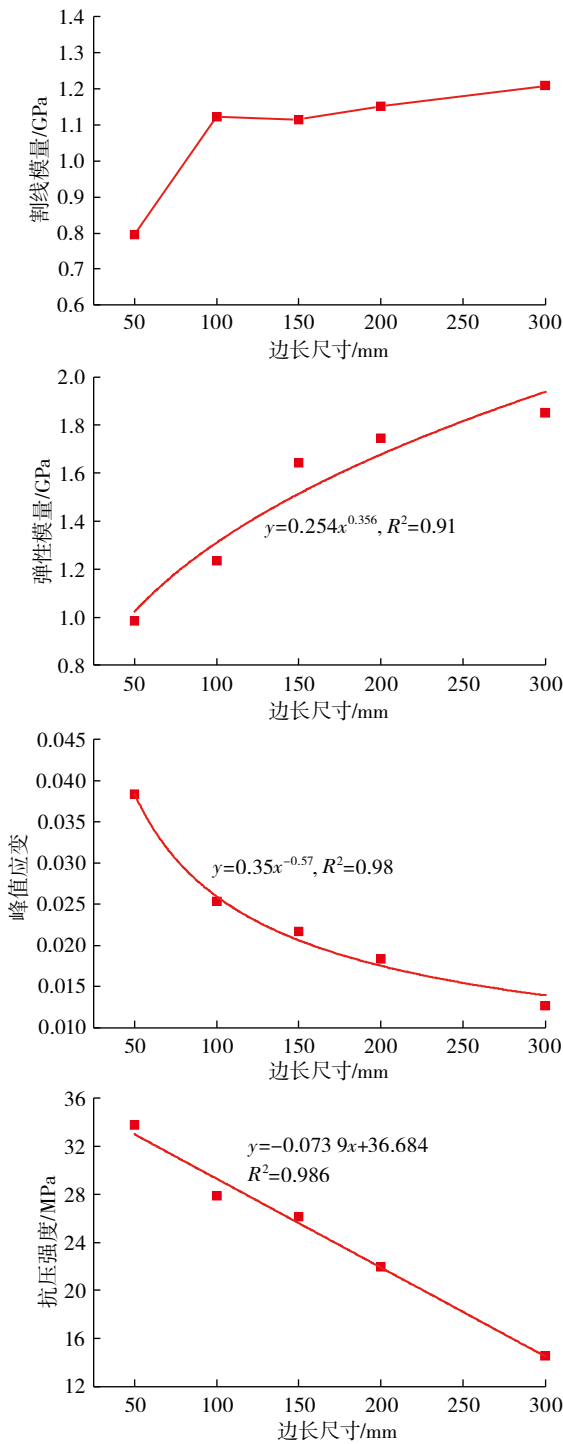


图5 各指标尺寸效应的拟合曲线

Fig. 5 Fitting curves of size effect in mechanical properties

$$E = \frac{\sigma_m}{\varepsilon_m}$$

式中, σ_m 为该点处应力; ε_m 为该点处应变。

由图5可知,随着边长尺寸的增加,弹性模量及割线模量整体呈上升趋势,而抗压强度和峰值应变呈下降趋势。抗压强度服从线性分布,峰值应变和弹性模量服从幂函数分布,理论模型为

$$y = ax^b$$

式中, x 为边长尺寸大小, mm; a , b 分别为材料参数。

抗压强度拟合公式为

$$y = -0.07x + 36.18, R^2 = 0.97$$

峰值应变拟合公式为

$$y = 0.35x^{-0.57}, R^2 = 0.98$$

弹性模量拟合公式为

$$y = 0.254x^{0.356}, R^2 = 0.91$$

结果显示,3者的拟合度均较高, R^2 均大于0.90。其中抗压强度和峰值应变拟合效果较好,当边长尺寸由50 mm增加到300 mm时,抗压强度由33.76 MPa降低为15.78 MPa,降幅为53.26%。峰值应变由0.038降低为0.012,降幅为68.42%。而弹性模量随着边长尺寸的增加会表现出一定离散性,但整体呈增加趋势,50 mm试样的弹性模量为0.98 GPa,300 mm试样的弹性模量为1.85 GPa,增幅为88.78%。而尺寸为100 mm及以上的试样割线模量变化不大,均值为1.15 GPa。需要说明的是:试验的拟合公式适用范围存在一定的局限,仅反映各指标随尺寸增大的整体性规律。实际上,当尺寸趋于无穷大时,抗压强度应趋于一个常数,表征煤体的强度。

目前学者认为岩石材料变形的尺寸效应是综合的平均效应^[28],并非简单认为岩样尺寸越小,裂隙越少,强度越高。对于岩石变形指标尺寸效应的机理可以从应力的非均匀性和材料的非均质性两方面解释。一方面,试样在进行加载时由于端面摩擦效应会在试样两端存在三维压应力区,随着边长尺寸的增加,导致试样中部会从三维应力状态(图6(a))转变为一维应力状态(图6(b)),处于单轴压缩时

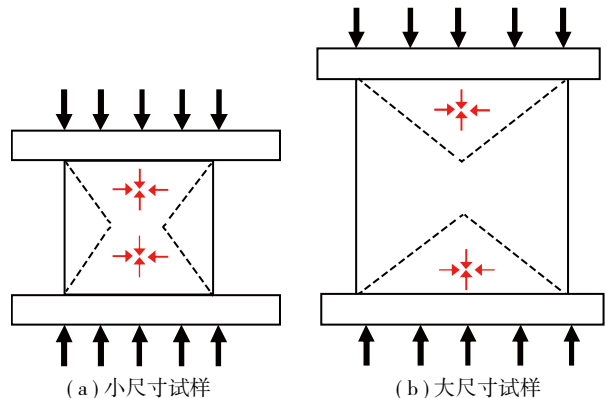


图6 端摩擦效应作用机制

Fig. 6 Mechanism of end friction effect

应力逐渐分布均匀,从而试样的强度降低、弹性模量增大,产生尺寸效应。另一方面,岩石内部裂隙缺陷也是一个重要因素。随着边长尺寸的增大,其内部出现裂隙的概率也会增加,从而使试样的强度、弹性模量降低。岩石变形指标的尺寸效应就是上述两种因素相互叠加影响的结果,对于强度指标两种因素都会导致其随尺寸增加而下降,对于弹性模量指标需要考虑两者谁起主导作用,当端面摩擦效应的影响大于非均质性的影响时,弹性模量随尺寸增大。

试验过程均采用方形试样,即各尺寸试样的长宽高比均为1,故宽高比的因素可以忽略。但随着边长尺寸的增大,试样与加载盘的接触面积变大,且受加工精度的影响,尺寸越大的试样其表面平整度越低,端面摩擦效应影响越大。在大尺寸试样中,端面摩擦效应对弹性模量的影响程度超过材料非均质性的影响程度,起主导作用,因此边长尺寸越大,弹性模量越大。小尺寸试样其内部更趋于三向应力状态且裂隙较少,因此其强度更高。

3 声发射特征分析

岩石在受载产生变形破坏时,其内部储存的能量会以波的形式在介质中传播,捕捉此过程中的声发射信号被广泛应用于岩石细观裂隙演化及破坏前兆信息分析。其中常见的声发射特征包括:振铃计数、声发射能量、声发射幅值等,岩石破坏过程中这些特征指标均存在良好的变化规律与之对应。其中振铃计数表示试验中声发射信号超过其设定阈值的次数,可一定程度反映声发射事件的强度和频度。声发射能量表示试验中从试样表面测得的传播衰减后的剩余弹性能量,而能量耗散也是岩石破坏过程中最本质的特征,故声发射能量反应了岩石破坏的剧烈程度。声发射幅值表示声发射信号波形中最大电压峰值,可用于波源类型及强度测定。

试验声发射设备采用PCI-2声发射系统,声发射信号门槛值为42 dB。通过将各尺寸试样所得声发射数据与应力数据结合分析,探究煤冲击破坏尺寸效应的声发射规律。

3.1 振铃计数及能量分析

选取各尺寸的代表试样,分别绘制声发射累计振铃计数及应力-时间曲线,声发射能量及应力-时间曲线,如图7,8所示。

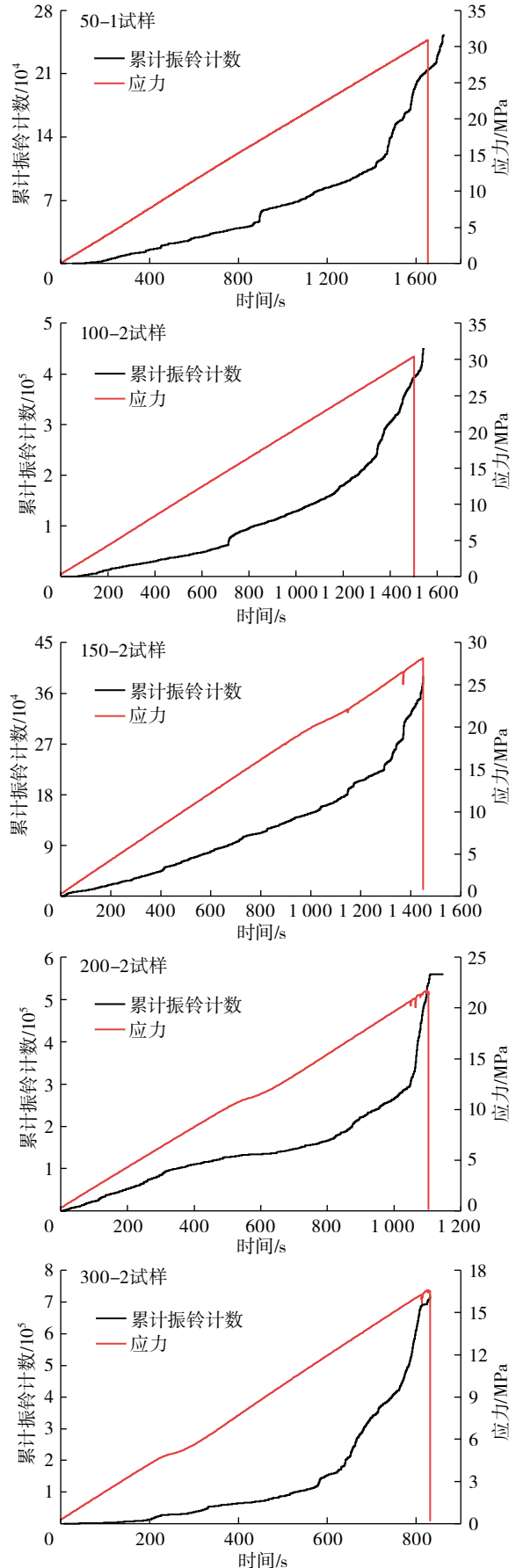


图7 声发射累计振铃计数随时间变化曲线

Fig. 7 Curves of acoustic emission cumulative ringing counts-time

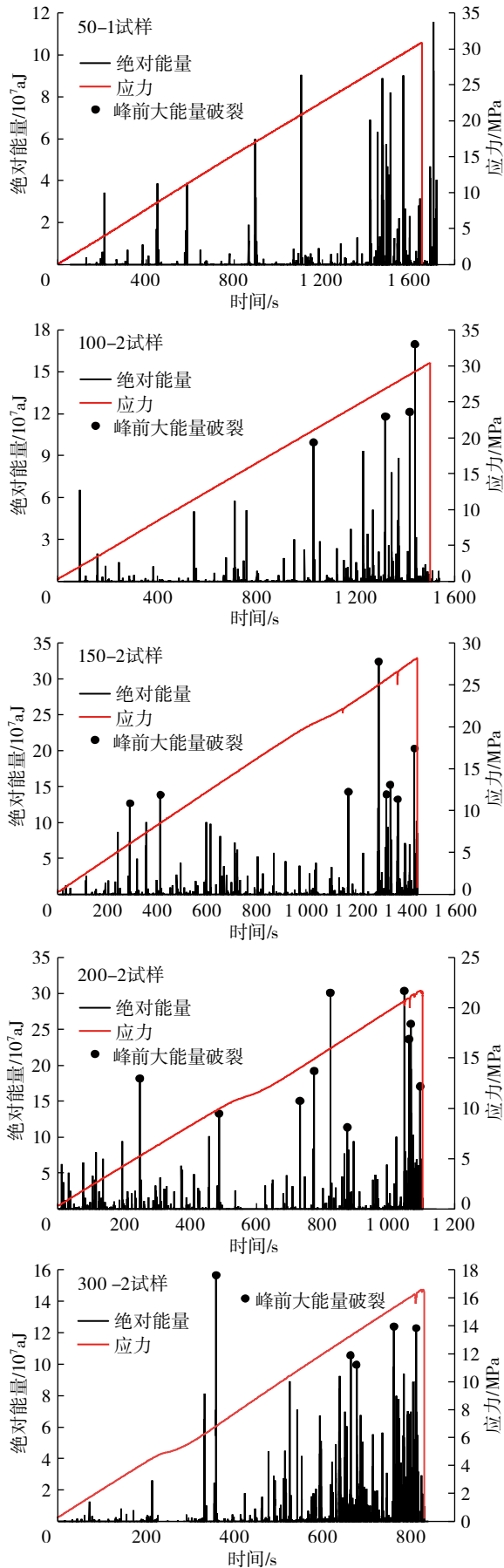


图8 声发射绝对能量随时间变化曲线

Fig. 8 Curves of acoustic emission energy with time

其中声发射能量为绝对能量,绝对能量指放大前传感器信号电压平方的时间积分,再除以 $10\text{ k}\Omega$ 阻抗,用(阿焦耳)aJ表示,因为绝对能量要求减去放大器带来的增益,所以其和物理学上的能量可以进行更为直观的比较, $1\text{ J}=1\times 10^{18}\text{ aJ}$ 。通过横向对比各尺寸试样声发射能量数值,笔者将绝对能量值大于 $1\times 10^8\text{ aJ}$ 的声发射事件定义为峰前大能量破裂。

由图7的各试样累计振铃计数及应力-时间曲线可知,其共同规律为在试样初始压密阶段,由于试样内部裂隙闭合及颗粒之间滑移会出现少量的声发射事件。当进入弹塑性稳定破坏阶段,累计振铃计数的增长都较为缓慢,因为此阶段试样主要发生可逆弹性变形,原始裂隙继续被压密并逐渐汇合形成大裂隙,此时以声发射小事件为主且频率不高。当进入非稳定破坏阶段,累计振铃计数会快速增加,这说明各尺寸试样在临近破坏时,其内部裂隙迅速扩展贯通,声发射信号快速发生直至试样破坏。

为进一步分析差异性,绘制各尺寸试样累计振铃计数随时间增长的变化曲线,如图9(a)所示。由图9(a)可知,随着边长尺寸的增大,振铃计数平缓增长时间与快速增长时间比值变小,即累计振铃计数会更快地进入快速增长阶段,且在快速增长阶段,200,300 mm的大尺寸试样的增长速度及增长幅度明显大于其余尺寸试样。这是因为相对于小尺寸试样而言,大尺寸试样破坏过程中分区局部破坏且破坏贯通时间更长,此阶段有较多的微裂隙扩展形成大裂隙,导致声发射事件更多。另外由于尺寸越大的试样强度越低,所以其达到整体性冲击失稳所用的时间更短,即会更早地发生大量声发射事件。

由图8的各试样绝对能量及应力-时间曲线可知,其共同规律为在试样加载压密阶段,绝对能量值不高,且声发射事件数较少,这与上文累计振铃计数较少相对应。此阶段试样经过压密,裂隙的闭合导致少部分弹性能释放并被探头接收。随着加载的进行,各尺寸试样进入绝对能量均较低且分布稀疏的阶段,经过压密的裂隙在此阶段产生弹性变形并发生扩展,弹性能聚集,故监测到的能量值较低且较少。当加载进行到非稳定破坏阶段,产生的小裂隙聚合贯通形成大裂隙,在试样内部产生滑动面导致试样破坏。储存的弹性能会在短时间得到

释放,探头监测到大量较高的绝对能量。

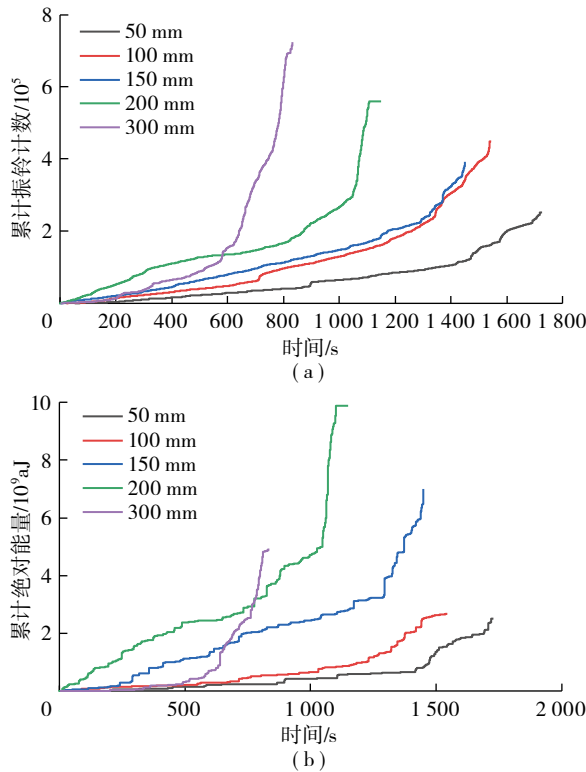


图9 各尺寸累计振铃计数及绝对能量随时间变化曲线
Fig. 9 Cumulative ringing counts and absolute energy versus time curves for each size

结合图8和图9(b)可知,不同尺寸累计声发射能量的差异性,50 mm的试样由于压密阶段不明显,故裂隙闭合导致的声发射信号不多且声发射能量较低。随着边长尺寸的增大,加载前期绝对能量值逐渐增加且信号频率增大,峰前大能量破裂信号随尺寸的增大而增多且能量值更高。而在临近破坏阶段,尺寸越大的试样高绝对能量值声发射信号分布更多。这是因为边长尺寸越大其包含裂隙的概率越高,对应压密阶段更为明显,加载前期较高声发射能量值高频聚集现象也更明显。另一方面,边长尺寸越大大局部冲击破坏现象越剧烈且次数越多,每一次的局部冲击都是小裂隙贯通形成大裂隙破坏的体现,这与声发射大事件高频率及高能量值相对应。

300 mm的试样表现出的规律与上述并不一致,其整体绝对能量值并不高,最终累计绝对能量值也较低,也并未监测到在加载前期由裂隙压密导致的声发射信号。由300 mm试样的振铃计数可知,这一现象并非由于接收声发射信号少而导致,根据实际破碎状态分析,300 mm试样冲击破坏过程中有更多

的块体崩落,最终形成的破碎小块也更多。这说明储存的弹性能多以造成块体飞溅的动能、形成内部新裂隙的表面能等形式损耗,而转化为弹性振动能以应力波的形式传播的较少。

综上所述,不同尺寸试样的声发射振铃计数和绝对能量整体规律相似,两者的累计值在临近冲击破坏时均会达到最大值,这可作为表征试样破坏发生的前兆信息。声发射特征也存在尺寸效应现象,尤其是以绝对能量更为明显,当边长尺寸达到300 mm时,其演化规律和其余尺寸试样得到的整体变化趋势存在较大离散性,更精确的尺寸效应范围边界值需进一步探究。

3.2 声发射**b**值分析

将声发射看作一种微震活动,声发射**b**值是源自地震学^[29]中地震震级和频度的G-R关系式

$$\lg N = a - bM$$

式中, M 为震级,声发射**b**值计算时用幅值 A_{dB} 除以20代表震级; N 为 ΔM 内的声发射次数; a 和**b**为常数。

笔者采用扫描法计算声发射**b**值,即以固定数目的声发射事件为步长,按时间顺序滑动计算**b**值随时间的变化规律。已有研究表明**b**值代表裂隙扩展尺度函数^[30]。**b**值的变化规律与试样内部的破坏形式密切相关,**b**值增大表示试样以小尺度裂隙扩展为主,**b**值减小表示试样以大尺度裂隙扩展为主,**b**值小幅度变化表示试样处于稳定破坏阶段,**b**值的突变表示试样发生失稳破坏。图10为5种尺寸下代表性试样声发射**b**值与应力随时间的变化曲线。

由图10可知,50, 100 mm的试样在加载前期**b**值处于小幅度变化阶段,说明此阶段其内部裂隙扩展方式稳定,声发射大事件和小事件比例基本保持不变。当达到峰值应力的65%左右时,**b**值波动频率变大且有下降趋势,说明试样内部大尺度破裂加剧,微裂隙贯通形成大裂隙数目增多。当达到峰值应力的90%左右时,**b**值发生突变,大幅度下降,在应力发生跌落时对应**b**值最低点,试样发生不稳定破坏。

150, 200 mm的试样在加载前期,声发射**b**值就表现出明显波动,说明此阶段试样内部声发射大事件和小事件交错发生。这与3.1节声发射能量分析一致,随边长尺寸的增大,前期大能量信号的事件越多对应着大尺度破裂越多。随着应力的增加,在

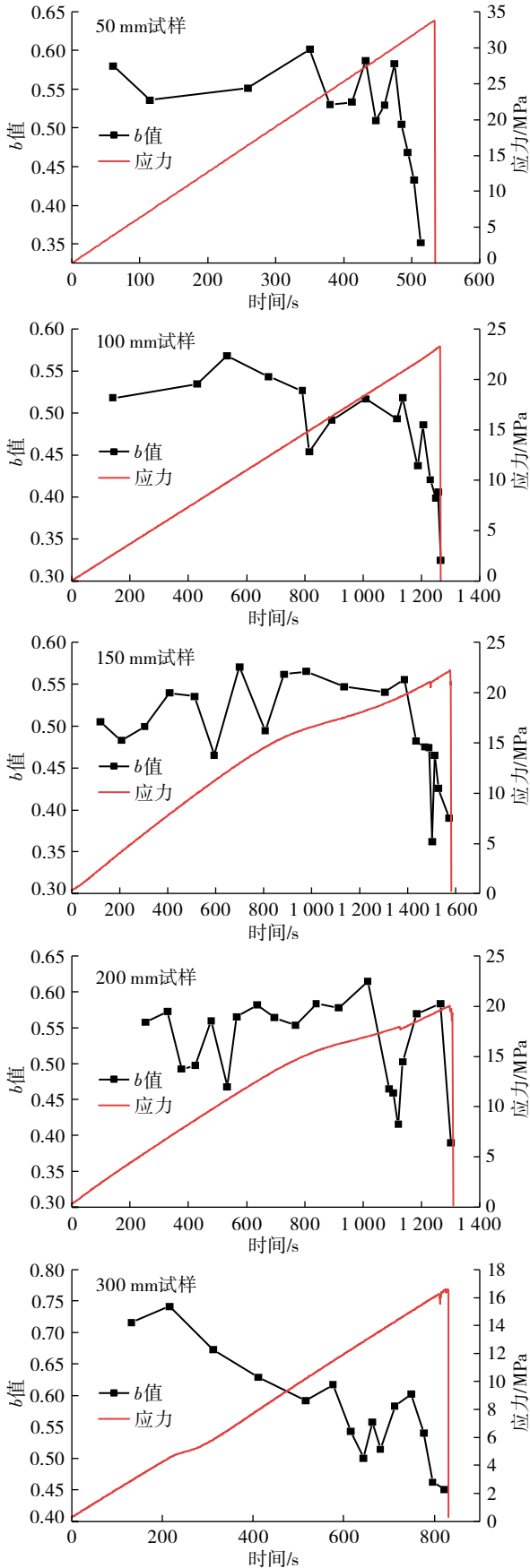


图10 各尺寸 b 值与应力随时间的变化曲线

Fig. 10 Changes of b value and stress with time for samples with different sizes

塑性稳定破坏阶段, b 值较大且变化较为稳定, 此时主要以小尺度破裂为主。当临近峰值应力时, 两者 b 值均迅速下降, 以大尺度破裂为主。值得注意的是200 mm的试样在达到峰值应力的88%左右时, b 值出现了一次大幅跌落。对比该试样应力-应变特征分析发现, 此时曲线进入峰前应力波动阶段, 表现为完全冲击破坏前的局部小型冲击破坏多次发生, 导致试样内部大尺度破裂会间歇出现, 这对应着 b 值的突降。

300 mm试样在加载开始阶段 b 值较大, 但随着应力增加 b 值表现出平稳降低趋势, 这是因为尺寸越大的试样, 其内部原生裂隙越多, 裂隙压密闭合导致声发射大事件持续发生。随着应力增加, 在达到峰值应力的70%左右时, b 值出现波动, 试样裂隙稳定扩展并伴随局部冲击破坏发生。在达到峰值应力的91%左右时, b 值出现大幅度下降, 表示试样发生失稳破坏。

综上所述, 试样声发射 b 值存在一定的尺寸效应, 主要表现为 b 值产生大幅波动的时间随尺寸有所变化。边长尺寸越大, 其发生大尺度破裂的时间越早, 产生越多声发射大事件, 对应 b 值更早地产生波动或者下降现象。另外, 由于200 mm或300 mm大尺寸试样在完全冲击破坏前会有局部冲击破坏的发生, 与 b 值变化曲线上存在突降得到印证, 这也证明了声发射 b 值作为煤冲击破坏前兆特征的可行性。

3.3 声发射时空演化特征

声发射定位是研究岩石内部裂隙萌生、扩展、发育的一种直观方法, 目前该技术已被广泛应用于混凝土、岩石等脆性材料失稳破坏机理的研究。笔者将150, 200, 300 mm的试样进行声发射定位分析。在每个试样四周共安置8个声发射探头, 定位探头安装位置如图11所示。

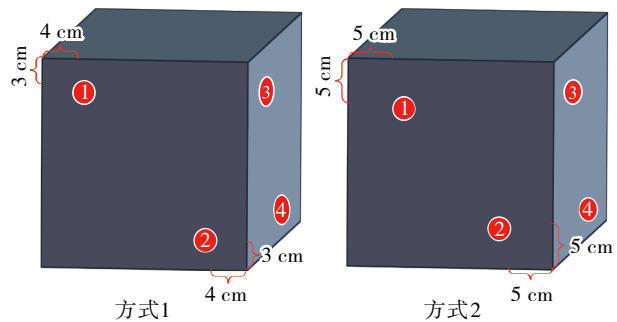


图11 声发射探头安装示意

Fig. 11 Schematic diagram of acoustic emission probe installation

其中150, 200 mm的试样采用方式1, 每个探头距侧边40 mm, 距顶底边30 mm。300 mm的试样采用方式2, 探头距侧边及顶底边均为50 mm。试验采用Geiger算法得出定位点坐标, 通过不同位点监测

到信号的时间差反算该信号位置。

图12为3种尺寸下代表试样声发射定位不同时段的变化规律, 其中 t_f 表示试样冲击破坏时刻, 按照时间增量 $\Delta t=0.2t_f$ 进行分段统计。

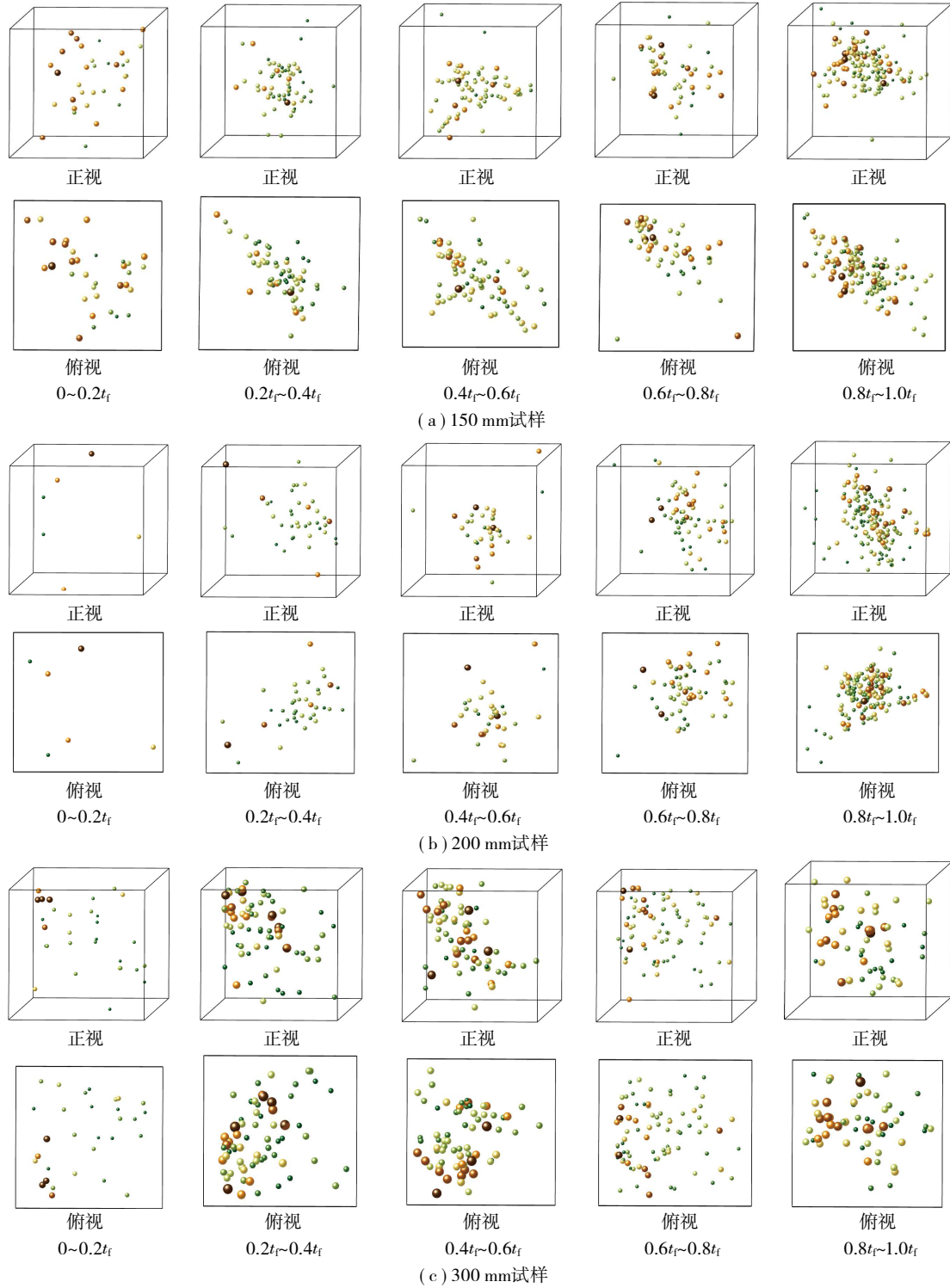


图12 不同时段声发射定位

Fig. 12 Acoustic emission location map in different periods

可知, 在初始加载阶段, 3者的声发射定位数均比较少, 随着加载进行而逐渐增多。由正视图与俯

视图相结合分析可知, 150, 200 mm的试样声发射定位整体上更加集中, 150 mm的试样定位主要分布在

斜向 45° 方向, 200 mm的试样定位主要成团分布在试样中部, 300 mm的试样定位分布则更为分散, 在空间内各部位均存在。定位主图球的颜色及体积表征声发射定位能量, 颜色越深体积越大代表声发射定位能量越高, 3种尺寸的试样在临近破坏阶段($0.8t_f-1.0t_f$)声发射大能量定位明显增多, 另外对于300 mm的试样, 其在加载中期($0.2t_f-0.4t_f$ 和 $0.4t_f-0.6t_f$)也出现较多大能量定位, 印证了其在整体破坏前会有局部的小型冲击破坏。

为更好探究3种尺寸试样破坏方式的差异, 结合高速相机拍摄记录(图13), 可知, 150, 200 mm的试样声发射定位点以中部集中向两尖端扩散, 呈剪切状。300 mm试样的声发射定位则表现为前右方局

部集中, 试样空间其余位置呈散漫分布状态。从试样最终破坏图可知, 150, 200 mm的试样以剪切破坏为主, 且150 mm的试样形成了贯通的剪切破裂面, 而200 mm的试样未形成。声发射定位结果也反映了这一点, 两尺寸试样均从中心开始, 沿破坏面向试样边缘扩展, 主破坏方向上分布着较多的声发射定位点。在试样边缘附近150 mm的试样较200 mm的试样存在更多的定位点, 也说明最终形成的剪切面存在差异。300 mm的试样最终破坏方式以张拉破坏为主, 伴随局部剪切破坏。声发射定位集中区域为试样发生局部冲击破坏位置, 整个试样空间定位散布表明试样的破坏由内部扩展直至试样表面, 且总声发射定位点较多表明试样破坏的更为剧烈。

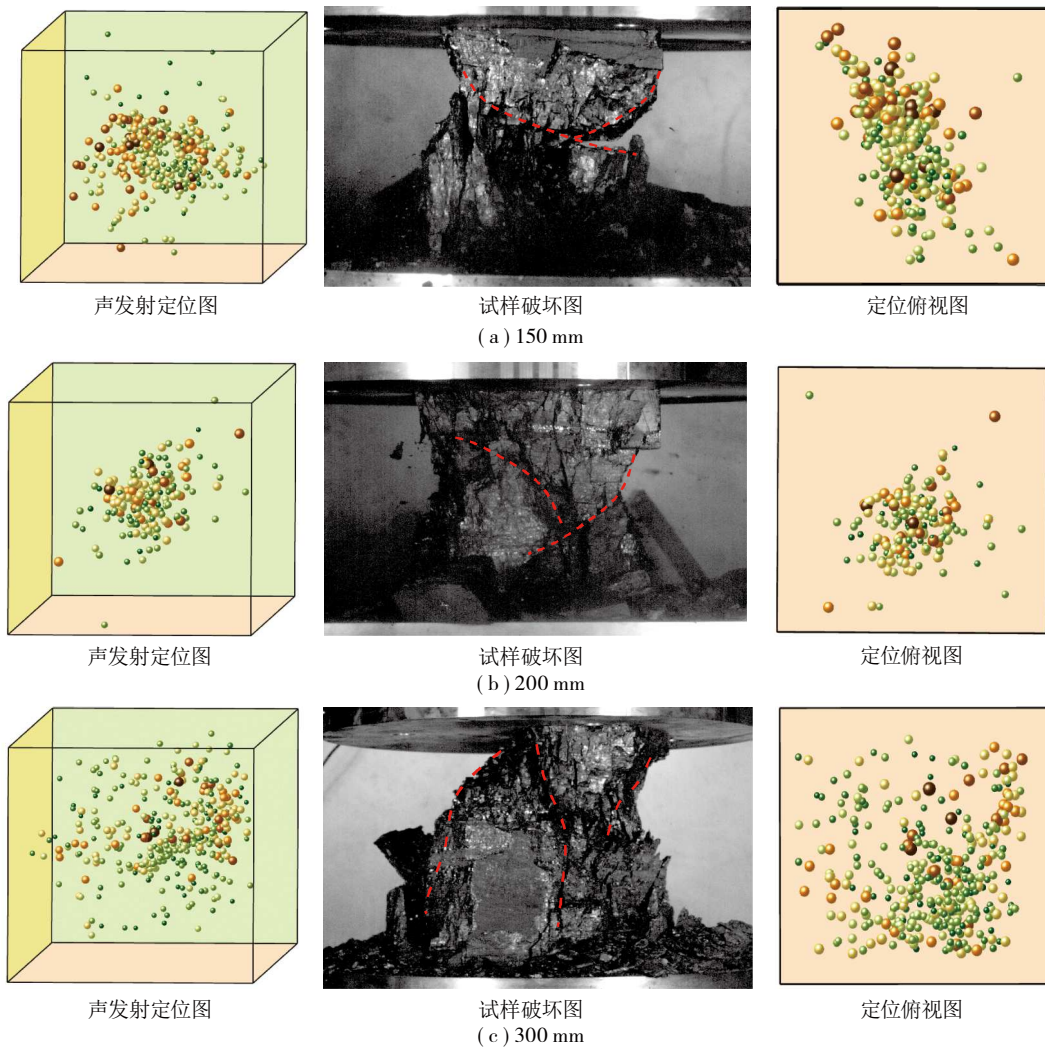


图13 声发射定位及试样破坏

Fig. 13 Distribution of acoustic emission events and failure patterns

综上所述, 3种尺寸的试样其声发射定位及破坏方式存在明显差异。150, 200 mm的试样破坏时, 首先从试样的中部集中产生声发射事件, 逐步向试

样表面延伸, 分布在剪切面上。当尺寸达到300 mm时, 试样破坏时以贯通整体的多条张拉裂隙为主, 此过程中声发射定位散布于整个试样内部, 而局部

小型冲击会造成声发射定位的集中。为进一步对声发射定位能量进行分析,定义大于50%能量定位为大能量定位,150,200 mm的试样大能量定位分别为31.26%和34.8%,而尺寸为300 mm的试样大能量定位为19.73%。这与前文声发射能量分析一致,300 mm的试样由于声发射信号在传递到探头的过程中衰减耗散占比较大,故监测到的能量值较低。边长尺寸的改变造成声发射定位结果的不同,其原因可归结为尺寸不同造成试样破坏模式及裂隙发育的改变,声发射三维定位作为研究岩石失稳破坏的有力工具,直接反映了裂隙发育扩展、汇集的过程,也能反映所产生的裂隙方位。通过声发射定位可知尺寸效应对煤冲击破坏的影响。

4 结 论

(1) 试样力学指标存在明显尺寸效应,随着尺寸的增大,应力-应变曲线会出现明显波动,弹性模量增大,抗压强度和峰值应变减小。

(2) 尺寸越大试样的声发射累计振铃计数更早进入快速增长阶段且增速更大,声发射能量也随着边长尺寸而增大,但达到300 mm时,能量更多以其他形式耗散而导致声发射能量较低。

(3) 声发射定位信号与试样最终破坏方式对应,150,200 mm的试样定位信号较300 mm的更为集中,随尺寸的增大破坏方式从以剪切破坏为主转变为以张拉破坏为主。

参考文献(References):

- [1] 白以龙. 工程结构损伤的两个重要科学问题—分布式损伤和尺度效应[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2002,30(11):11-14.
BAI Yilong. Two important scientific problems in engineering structures—distributed damages and scale effect[J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition),2002,30(11):11-14.
- [2] 李单林,刘广建,贾瑞锋,等. 单轴压缩试验端面摩擦效应及损伤演化规律研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报,2021,3(3):033014.
LI Shanlin, LIU Guangjian, JIA Rui Feng, et al. Study on friction effect and damage evolution of end face in uniaxial compression test[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2021, 3(3): 033014.
- [3] 梁正召,张永彬,唐世斌,等. 岩体尺寸效应及其特征参数计算[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(6):1157-1166.
LIANG Zhengzhao, ZHANG Yongbin, TANG Shibin, et al. Size effect of rock masses and associated representative element properties[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(6): 1157-1166.
- [4] 刘海涛,程晓辉. 粗粒土尺寸效应的离散元分析[J]. 岩土力学,2009,30(S1):287-292.
LIU Haitao, CHENG Xiaohui. Discrete element analysis for size effects of coarse-grained soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(S1): 287-292.
- [5] 孟庆彬,韩立军,浦海,等. 尺寸效应和应变速率对岩石力学特性影响的试验研究[J]. 中国矿业大学学报,2016,45(2):233-243.
MENG Qingbin, HAN Lijun, PU Hai, et al. Effect of the size and strain rate on the mechanical behavior of rock specimens[J]. Journal of China University of Mining Technology, 2016, 45(2): 233-243.
- [6] 王谦源,李晔. 分形节理岩体强度与变形尺度效应的试验研究[J]. 岩土力学,2008,29(5):1325-1328.
WANG Qianyuan, LI Ye. Experimental study of scale effect in strength and deformation of fractal-jointed rock masses[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(5): 1325-1328.
- [7] 李帅,陈军斌,王汉青,等. 鄂尔多斯盆地长7段页岩强度与变形尺度效应规律试验研究[J]. 煤炭学报,2020,45(12):4121-4131.
LI Shuai, CHEN Junbin, WANG Hanqing, et al. Experimental study on the scale effect of strength and deformation of chang 7 shale in Ordos basin[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(12): 4121-4131.
- [8] 鞠文君,卢志国,高富强,等. 煤岩冲击倾向性研究进展及综合定量评价指标探讨[J]. 岩石力学与工程学报,2021,40(9):1839-1856.
JU Wenjun, LU Zhiguo, GAO Fuqiang, et al. Research progress and comprehensive quantitative evaluation index of coal rock bursting liability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(9): 1839-1856.
- [9] 尤明庆,邹友峰. 关于岩石非均质性与强度尺度效应的讨论[J]. 岩石力学与工程学报,2000,19(3):391-395.
YOU Mingqing, ZOU Youfeng. Discussion on heterogeneity of rock material and size effect on specimen strength[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(3): 391-395.
- [10] 杨圣奇,苏承东,徐卫亚. 岩石材料尺寸效应的试验和理论研究[J]. 工程力学,2005,22(4):112-118.
YANG Shengqi, SU Chengdong, XU Weiya. Experimental and theoretical study of size effect of rock material[J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(4): 112-118.
- [11] 陈瑜,黄永恒,曹平,等. 不同高径比时软岩强度与变形尺度效应试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2010,41(3):1073-1078.
CHEN Yu, HUANG Yongheng, CAO Ping, et al. Size effect experimental study of strength and deformation in different height-to-diameter ratio soft rocks[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2010, 41(3): 1073-1078.
- [12] 王学滨,潘一山,宋维源. 岩石试件尺寸效应的塑性剪切应变梯度模型[J]. 岩土工程学报,2001,23(6):711-713.
WANG Xuebin, PAN Yishan, SONG Weiyuan. The model of plastic shear strain gradient on size effect in uniaxial compression of rock specimen[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(6): 711-713.

- [13] 潘一山,魏建明. 岩石材料应变软化尺寸效应的实验和理论研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(2): 215-218.
PAN Yishan, WEI Jianming. Experimental and theoretical study on size effect on strain softening of rock materials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(2): 215-218.
- [14] WEIBULL W. A statistical theory of the strength of materials[J]. Proceedings of the Royal Swedish Institute for Engineering Research, 1939, 153(1): 1-55.
- [15] BAŽANT ZP, OH BH. Crack band theory for fracture of concrete[J]. Material and Structures, 1983, 16(93): 155-177.
- [16] BAŽANT ZP. Size effect in blunt fracture: Concrete, rock metal[J]. Eng. Mech. (ASCE), 1984, 110(4): 518-535.
- [17] HU X, WITTMANN F. Size effect on toughness induced by crack close to free surface[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2000, 65(2): 209-221.
- [18] 刘宝琛, 张家生, 杜奇中, 等. 岩石抗压强度的尺寸效应[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(6): 611-614.
LIU Baochen, ZHANG Jiasheng, DU Qizhong, et al. A study of size effect for compressive strength of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(6): 611-614.
- [19] DARLINGTON WJ, RANJITH PG, CHOI SK. The effect of specimen size on strength and other properties in laboratory testing of rock and rocklike cementitious brittle materials[J]. Rock Mechanics Rock Engineering, 2011, 44(5): 513-529.
- [20] 洪亮. 冲击荷载下岩石强度及破碎能耗特征的尺度效应研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008.
HONG Liang. Size effect on strength and energy dissipation in fracture of rock under impact loads[D]. Changsha: Central South University, 2008.
- [21] 平琦, 张号, 苏海鹏. 不同长度石灰岩动态压缩力学性质试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(S2): 3891-3897.
PING Qi, ZHANG Hao, SU Haipeng. Study on dynamic compression mechanical properties of limestone with different lengths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(S2): 3891-3897.
- [22] 李地元, 肖鹏, 谢涛, 等. 动静态压缩下岩石试样的长径比效应研究[J]. 实验力学, 2018, 33(1): 93-100.
LI Diyuan, XIAO Peng, XIE Tao, et al. On the effect of length to diameter ratio of rock specimen subjected to dynamic and static compression[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2018, 33(1): 93-100.
- [23] 孙卓越, 吴拥政, 孙久政, 等. 三维动静加载下煤样动态变形模量长径比效应[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2022, 4(4): 043021.
SUN Zhuoyue, WU Yongzheng, SUN Jiuzheng, et al. Length-to-diameter ratio effect of dynamic deformation modulus of coal samples under three-dimensional dynamic and static loading[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2022, 4(4): 043021.
- [24] ELFAHAL M M, KRAUTHAMMER T. Comment on: Size effect for high-strength concrete cylinders subjected to axial impact[J]. International Journal of Impact Engineering, 2003, 28(9): 1001-1006.
- [25] ELFAHAL M M, KRAUTHAMMER T, OHNO T, et al. Size effect for normal strength concrete cylinders subjected to axial impact[J]. International Journal of Impact Engineering, 2004, 31(4): 461-481.
- [26] SHAN Renliang, HUANG Bo, ZHENG Yun, et al. Development of similar simulation test device for roadway support under vertical dynamic load[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(2): 294-302.
- [27] 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 Jincan, FAN Junqi, KONG Fuli, et al. Mechanism of ejective rockburst and model testing technology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(6): 1081-1089.
- [28] 山口梅太郎, 西松裕一. 岩石力学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1982: 104-105.
YAMAGUCHI Umetaro, NISHIMATSU Yuichi. Rock mechanics[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1982: 104-105.
- [29] 秦四清, 李造鼎. 岩石声发射事件在空间上的分形分布研究[J]. 应用声学, 1992, 11(4): 19-21.
QIN Siqing, LI Zaoding. Research on the fractal distribution of rock acoustic emission events in space[J]. Journal of Applied Acoustics, 1992, 11(4): 19-21.
- [30] 曾正文, 马瑾, 刘力强, 等. 岩石破裂扩展过程中的声发射 b 值动态特征及意义[J]. 地震地质, 1995, 17(1): 7-11.
ZENG Zhengwen, MA Jin, LIU Liqiang, et al. AE b -value dynamic features during rockmass fracturing and their significances[J]. Seismology and Geology, 1995, 17(1): 7-11.