

煤样加载过程声发射响应特征试验研究

贾 炳¹,倪小明^{1,2},苏承东¹

(1. 河南理工大学 能源科学与工程学院 河南 焦作 454000;

2. 河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室——省部共建国家重点实验室培育基地 河南 焦作 454000)

摘 要:为了探究不同裂隙发育程度、分布非均匀程度的煤样在加载过程中声发射响应规律,利用RMT-150B岩石力学伺服试验系统和声发射监测系统对寺河矿不同裂隙发育程度、分布非均匀程度的煤样进行原始渗透率和加载过程中声发射参数测试。结果表明:裂隙分布较均匀的煤样加载时,声发射能量在塑性变形阶段前期或弹性变形阶段后期快速增至最大值,后略有减小并维持在一定水平;裂隙分布非均匀性强且裂隙发育的煤样加载时,声发射能量在弹性变形初期就达较高值,后逐渐增加至最大值,随后稳定在一定值。试验结果对采煤过程中煤岩变形规律具有较好的预测作用。

关键词:岩石力学;渗透率;声发射;加载过程

中图分类号:TD353

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2014)07-0033-04

Experimental Study on Response Features of Acoustic Emission to Coal Samples During Loading Process

JIA Bing¹, NI Xiao-ming^{1,2}, SU Cheng-dong¹

(1. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000;

2. State Key Laboratory Cultivation Base for Gas Geology and Gas Control, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000)

Abstract: In order to research the response rule of acoustic emission about coal and rock with different fissures and heterogeneity in the loading process, original permeability and acoustic emission parameters in the loading process about the coal samples with different fissures and heterogeneity in Sihe Coal Mine were tested by the RMT-150B rock mechanics test system and acoustic emission system. The results showed that acoustic emission energy increased quickly to maximum in the late stage of plastic deformation or in the early stage of elastic deformation when the fractures of coal samples were uniform, then the energy decreased slightly and maintained at a level. Acoustic emission energy was high at the beginning of the elastic deformation, then the energy increased to the maximum, finally the energy maintained at a certain value when the fractures of coal samples were non-uniform and developed. The experimental results had a good prediction on the deformation of coal and rock in the process of coal mining.

Key words: rock mechanics; permeability; acoustic emission; loading process

0 引 言

监测煤岩应力加载过程产生的声波能量,既可以了解煤样加载过程中孔裂隙的形成演化,又可以了解孔裂隙形成时的能量变化,是研究煤岩加载过程变形破坏特征的一种重要方法。以往很多学者在这方面进行了大量的试验研究。文献[1-7]对应力加载过程煤岩样不同破坏阶段的声发射变化规律

进行了研究,发现在岩样屈服前声发射事件较少,屈服阶段声发射事件逐渐趋于活跃,峰值后破坏阶段仍会产生部分能量较强的声发射事件。文献[8-10]进行了不同围压下煤岩的三轴压缩声发射定位试验,研究煤岩破裂过程中声发射时序特征、能量释放与空间演化规律,发现声发射的时空定位演化较好地对应了破裂事件的从单一到复杂、从无序到有序的演化过程。文献[11-12]对应力加载过程中

收稿日期:2014-02-15;责任编辑:曾康生 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2014.07.009

基金项目:河南省科技重点攻关资助项目(112102310362)

作者简介:贾 炳(1990-),男,河南泌阳人,硕士研究生。通信作者:倪小明,副教授, Tel:13598539437, E-mail:nxm1979@126.com

引用格式:贾 炳,倪小明,苏承东.煤样加载过程声发射响应特征试验研究[J].煤炭科学技术,2014,42(7):33-36.

JIA Bing, NI Xiao-ming, SU Cheng-dong. Experimental Study on Response Features of Acoustic Emission to Coal Samples During Loading Process [J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(7): 33-36.

的变形特征及声发射特征进行了研究,研究结果表明加载速率与声发射事件具有较好的对应性。文献[13-14]对循环加卸载过程声发射参数进行记录、分析,得出加卸载过程岩石力学参数及声发射变化规律。但是对于不同裂隙发育程度、裂隙分布非均匀性强弱不等的煤样加载过程声发射特征研究相对较少。笔者在划分裂隙发育程度和裂隙分布非均匀强弱的基础上,对不同煤样进行加载时的声发射参数进行对比,研究了不同煤样在加载过程中声发射响应规律,以期对不同裂隙发育煤岩变形破坏特征研究提供理论指导。

1 煤样加载测试试验方案

1.2 样品制备及试验系统

试验所用煤样采自寺河矿,按照试验要求制成直径 50 mm、高 50 mm 的圆柱形,在 RMT-150B 型岩石力学伺服试验机上进行加载过程声发射测试试验。该试验系统主要包括主控计算机、数字控制器、手动控制器、液压控制器、液压作动器、三轴压力源、液压源等岩石力学加载试验系统,以及声发射信号采集处理卡、前置放大器、传感器、采集分析软件等声发射监测系统。岩石力学加载试验系统主要是进行围压控制、应力加载,而声发射监测系统主要是对声发射参数进行监测、记录。

1.2 试验过程

通过煤样进行声波时差、原始渗透性测定,对煤样裂隙发育程度、裂隙分布的非均匀性强弱进行划分。在此基础上,记录加载过程中的声发射参数,分析不同裂隙发育程度、不同非均匀性煤样在不同变形阶段声发射变化规律,得出不同裂隙发育程度、不同非均匀性煤样加载过程中声发射响应规律。

试验过程:首先,将样品放入试验缸,根据试验方案设置加载参数。然后,设置围压速率为 0.5

MPa/s,加载到 8 MPa。最后,保持围压不变以位移控制模式 0.005 mm/s 施加轴向载荷直到煤样破坏,并对加载过程中的声发射参数进行监测、记录。

2 煤样加载过程中声发射响应试验测试

针对不同裂隙发育程度、分布非均匀性煤样进行加载过程声发射响应规律研究,首先需对煤样裂隙发育程度及裂隙分布的非均匀性强弱进行分类。

2.1 煤样裂隙发育程度及分布非均匀性分类

煤样裂隙发育、裂隙分布的非均匀性强弱的测试方法有很多种,如:煤样表面裂隙条数密度法、表面裂缝面积所占比例法、分形维数法、SEM 法、CT 扫描等。这些方法有的从煤的表面裂隙方面进行研究,有的从内部裂隙方面进行研究。煤样不同方向、不同部位裂隙发育程度不同,测试出的声波时差也不同,其差异性的大小在一定程度上反映了裂隙分布的非均匀性强弱,渗透率又是裂隙发育程度的综合反映,笔者在借鉴上述部分研究方法的基础上结合声波时差和渗透率测试,对煤样裂隙发育程度及裂隙分布的非均匀性强弱进行了分类。

1) 声波时差测定。一般情况下,声音在空气中传播速度小于在煤样中传播速度。基于此,通过测定声波在煤样中传播速度,对煤样内部孔裂隙发育情况进行判断。测试方法:①在制作的煤样顶部绘制“十”字符号,并延伸至侧面,在煤样顶面及依据煤样的高度,等间距地在煤样侧面上部、中部、下部测定点进行编号、标记。②调试仪器,在煤样声波发射点以及接收点涂抹黄油,做好测试前准备工作。③固定煤样、声发射探头及接收探头。④调整波形,对测试结果进行记录,依次对其他测试点进行测试。⑤测试结束后用酒精对煤样抹黄油处进行擦拭晾干,以免影响后续试验测试。依据此方法对不同煤样进行声波时差测试, A_1 — A_6 煤样测试结果见表 1。

表 1 A_1 — A_6 煤样不同位置声波时差测试结果

序号	侧面声波时差 / ($\mu\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$)						顶底面声波时差 / ($\mu\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$)					
	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
1	682.6	625.2	535.6	632.2	602.3	538.1	601.5	630.8	540.6	635.8	604.9	537.3
2	599.1	626.1	545.2	636.1	605.2	559.2	601.2	632.1	550.2	605.1	602.1	538.1
3	677.4	628.1	526.2	633.3	607.2	534.2	600.5	627.1	531.2	632.3	605.2	539.2
4	605.2	627.4	550.2	635.5	602.4	560.2	589.2	635.5	546.2	637.1	610.2	587.1
5	684.3	629.2	543.2	634.4	599.4	531.2	680.4	642.2	539.2	666.1	630.1	537.4
6	608.4	626.4	545.5	637.8	610.2	559.1	—	—	—	—	—	—

2) 煤样原始渗透性测定。假设气体在煤样中的流动符合达西定律,通过测试气体注入煤样前后的压力以及流量,根据式(1)可计算煤样渗透率 K 。

$$K = 2p_0 Q \mu L / [A(p_1^2 - p_2^2)] \quad (1)$$

其中: p_0 为大气压力, MPa; Q 为通过横截面的气体总流量, cm^3/s ; μ 为气体黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; L 为样品长度, mm; A 为样品截面积, cm^2 ; p_1 为进口压力, MPa; p_2 为出口压力, MPa。通过代入数值可计算出煤样原始的渗透率, 计算结果见表 2。

表 2 煤样原始渗透率测试计算结果

样品号	样品高度/mm	样品直径/mm	原始渗透率/ μm^2
A ₁	50.90	49.36	2.73
A ₂	50.88	49.42	2.14
A ₃	52.08	49.42	0.63
A ₄	51.30	49.52	1.61
A ₅	50.56	49.42	1.48
A ₆	51.48	49.40	0.58

3) 煤样裂隙发育非均匀性分类。煤样不同部位声波时差的差异性在一定程度上反映出煤样裂隙

发育的非均匀性强弱, 原始渗透性的大小是煤样内部裂隙发育的宽度、长度、密度及连通性的综合反映, 声波时差变异系数越大, 非均匀性越强。根据测试结果将变异系数大于 6% 的煤样称为非均匀性强, 反之称为非均匀性较弱。基于此, 将 A₂、A₃、A₅ 划分为非均匀性弱煤样, A₁、A₄、A₆ 划分为非均匀性强煤样。原始渗透性越好, 表示孔裂隙越发育, 从原始渗透性测定结果可以得出: A₁、A₂ 煤样裂隙相对发育, A₄、A₅ 煤样裂隙较发育, A₃、A₆ 煤样裂隙不发育。鉴于篇幅, 选取 A₁ 煤样代表裂隙发育、非均匀性强煤样; A₅ 代表裂隙较发育、非均匀性弱煤样; A₃ 代表裂隙不发育、非均匀性弱煤样进行分析。

2.2 煤样加载过程中声发射测试结果

煤样受力加载过程中, 不同规模裂缝在闭合、扩展、生成的过程中产生不同幅度、频率的声波, 通过声发射监测器对该声波信号进行记录, 根据测试参数分析了加载过程中声发射的响应规律。有代表性的煤样声发射能量-时间及加载过程应力-时间测试结果如图 1 所示。

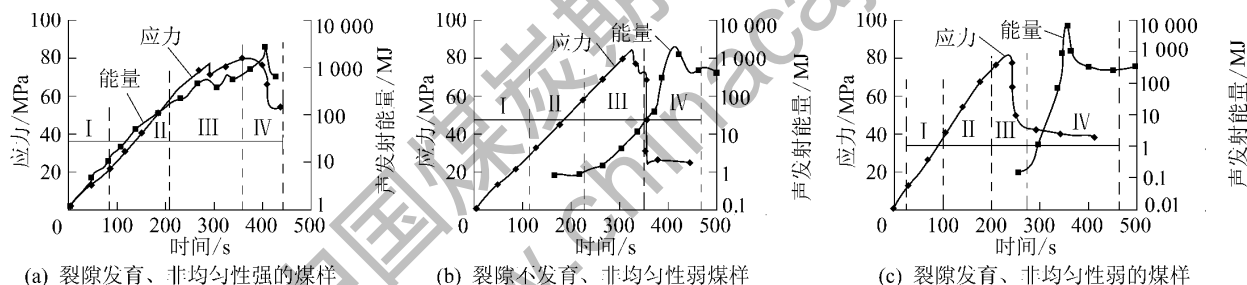


图 1 煤样声发射能量-时间-应力测试结果

根据加载过程中煤样应力-应变关系, 可将应力-应变曲线划分为 4 个阶段: 压密阶段 I、弹性变形阶段 II、屈服变形阶段 III、破坏阶段 IV。从图 1 可看出: 裂隙发育、非均匀性强的煤样声发射能量在弹性变形阶段前期达较高值, 随后增加速度开始变缓, 在峰值处突变性不明显; 裂隙不发育、非均匀性弱的煤样声发射能量在弹性变形阶段后期开始快速增加; 裂隙发育、非均匀性弱的煤样声发射能量在塑性变形阶段前期开始产生, 且快速升至最大值; 非均匀性弱的煤样的声发射能量在峰值处有突变性。

3 不同裂隙煤样加载过程声发射响应规律

3.1 非均匀性弱煤样加载过程声发射特征

裂隙分布非均匀性弱, 是指煤样内部裂隙分布比较均匀。不管是裂隙发育还是不发育的煤样, 在加载过程中均不会因为孔裂隙的存在, 出现严重的

应力集中现象。加载过程中不同变形阶段, 煤样声发射特征如下:

1) 压密阶段 I: 加载初始, 对于裂隙不发育和发育的煤样, 都几乎无声发射事件发生, 声发射能量均无明显变化, 该阶段主要是煤样颗粒间裂隙的闭合阶段, 几乎没有煤样破坏发生; 但是, 在压密阶段的后期, 裂隙不发育煤样的声发射能量开始表现出较大的变化, 开始有孔裂隙生成。

2) 弹性变形阶段 II: 裂隙不发育煤样, 声发射能量近呈线性增加; 裂隙发育煤样, 声发射能量依然较少, 增加幅度相对较缓慢。该阶段主要以煤样颗粒内部的裂隙闭合为主, 发生破坏区域较少。

3) 屈服变形阶段 III: 裂隙不发育的煤样, 声发射能量增加的速度逐渐加快; 裂隙发育的煤样, 声发射能量开始呈指数快速增加, 裂缝开始大量生成。在该阶段裂缝开始大量生成、贯通, 所以有大量的声

发射能量。

4) 破坏阶段Ⅳ: 裂隙不发育的煤样, 破坏时声发射的能量仍然在升高, 升高到一定值后, 陡然下降后趋于平稳, 与煤样变形相比, 具有滞后性。裂隙发育的煤样, 破坏时声发射能量快速上升, 上升到一定值后陡然下降到一稳定值, 与应力-时间曲线相比, 具有一定的滞后性。完全破坏后, 不论裂隙发育与否, 声发射能量均维持在一个定值附近。煤样发生破坏以后颗粒之间的接触面积变大, 应力集中消除, 整体趋于稳定变形。

对于非均匀性弱的煤样进行加载时, 在加载前期声发射能量较少, 加载一段时间后声发射能量开始快速增加至最大值。并且, 煤样越发育, 前期加载时间越长。该类煤样声发射整体变化规律相同, 只是随着发育程度的增加, 前期加载时间增加。

3.2 分布非均匀性强的煤样加载过程声发射特征

由于煤样内部裂隙分布的非均匀性强, 导致加载过程应力分布不均, 显现出不同的声发射特征, 各变形阶段声发射变化规律如下:

1) 压密阶段Ⅰ: 由于加载应力相对较小, 不论裂隙发育与否都几乎没有声发射事件产生, 声发射能量几乎为零, 并且煤样越发育, 该阶段持续时间越长。在该阶段后期裂隙不发育煤样声发射能量有开始产生的趋势。在一些应力集中严重的区域, 开始出现破坏、变形。

2) 弹性变形阶段Ⅱ: 煤样在弹性变形阶段前期声发射能量快速上升, 并且煤样越发育, 产生的声发射能量越高。主要是由于裂隙发育程度增加, 降低煤样强度, 在较低的应力下, 应力集中区域就开始发生破坏。

3) 屈服变形阶段Ⅲ: 该阶段前期裂隙声发射能量和弹性变形阶段一样, 继续上升, 上升速度几乎没有变化。

4) 破坏阶段Ⅳ: 煤样声发射能量至最大值后, 略有降低, 在峰值时突变性不明显。残余强度后阶段, 煤样声发射能量稍有降低以后维持在一稳定水平。由于应力集中现象, 整个加载过程中一直有声发射产生, 煤样不断发生区域破坏, 能量释放, 不会出现能量的大量积累, 所以峰值处突变性不明显。

对于非均匀性强煤样进行加载时, 在加载前期由于孔裂隙分布非均匀性强, 导致加载时部分区域出现应力集中现象。在加载前期就开始有声发射能量, 并且随着加载进行, 声发射能量逐渐增加, 整个

过程不会出现大的能量突变现象, 整体以局部的声发射产生为主。

4 结 论

1) 通过渗透率、声波时差测试, 对煤样裂隙发育程度以及非均匀性强弱进行了分类, 根据测试结果, 反映了该分类方法的合理性。

2) 在加载过程中, 非均匀性强的煤样, 由于应力集中严重, 其声发射的产生以局部区域产生为主; 非均匀性弱的煤样, 应力分布相对均匀, 其声发射的产生以整体产生为主。

参考文献:

- [1] 李庶林, 尹贤刚, 王泳嘉, 等. 单轴受压岩石破坏全过程声发射特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(15): 2499 - 2503.
- [2] 张晖辉, 尹祥础, 梁乃刚, 等. 模拟引潮力作用下岩石破坏前兆的试验研究: 加卸载响应比(LURR)理论和能量加速释放(AER)[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3172 - 3179.
- [3] 张 茹, 谢和平, 刘建锋, 等. 单轴多级加载岩石破坏声发射特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2584 - 2588.
- [4] 李庶林, 唐海燕. 不同加载条件下岩石材料破裂过程的声发射特性研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(1): 147 - 152.
- [5] 陈宇龙, 魏作安, 许 江, 等. 单轴压缩条件下岩石声发射特性的实验研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(2): 237 - 240.
- [6] 薛云亮, 李庶林, 林 峰, 等. 类岩石材料声发射参数与应力和应变耦合本构关系[J]. 北京科技大学学报, 2011, 33(6): 664 - 670.
- [7] 苏承东, 翟新献, 李宝富, 等. 砂岩单三轴压缩过程中声发射特征的试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(2): 225 - 230.
- [8] 许 江, 唐晓军, 李春树, 等. 循环荷载作用下岩石声发射时空演化规律[J]. 重庆大学学报, 2008, 31(6): 672 - 676.
- [9] MOGI K. Experimental Rock Mechanics [M]. London: Taylor and Francis, 2007.
- [10] 左建平, 裴建良, 刘建锋, 等. 煤岩体破裂过程中声发射行为及时空演化机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(8): 1564 - 1570.
- [11] ZENG Lian-bo. Impact of Rock Anisotropy on Fracture Development [J]. Progress in Natural Science, 2008, 18: 1403 - 1408.
- [12] 付小敏. 典型岩石单轴压缩变形及声发射特性试验研究[J]. 成都理工大学学报, 2005, 32(1): 17 - 21.
- [13] 周家文, 杨兴国, 符文熹, 等. 脆性岩石单轴循环加卸载试验及断裂损伤力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(6): 1172 - 1183.
- [14] 纪洪广, 侯昭飞, 张 磊, 等. 载荷岩石材料在加载、卸荷扰动作用下声发射特性[J]. 北京科技大学学报, 2011, 33(1): 1 - 5.