

脆性不同岩石的声发射能量特征研究

马云朋 赵万春 陈艳秋

(东北石油大学石油工程学院,黑龙江大庆 163318)

【摘要】 为研究不同脆性岩石的声发射能量特征,利用4种脆性不同岩石进行常规单轴压缩试验,加载同时进行声发射信号检测,得到了应力-应变曲线和声发射能量曲线。结果表明,试样砂比越大,脆性越强;峰值之前,各试样应力-应变曲线形状相似,均无明显塑性变形段,最大的区别在于各曲线斜率不同,而声发射曲线可明显区别出塑性变形段,并且随着脆性增强,塑性段在变短;峰值处,声发射能量达到最大值,且最大值与试样脆性指数满足乘幂函数关系;峰后应力瞬间降落到底,声发射能量持续较短时间,随着脆性增强,声发射活动持续时间在缩短。

【关键词】 岩石脆性;声发射能量;单轴试验;声发射;脆性指数

【中图分类号】 TU 458

【文献标识码】 A

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2017.04.008

Study on Acoustic Emission Energy Characteristics of Rocks with Different Brittleness

Ma Yunpeng Zhao Wanchun Chen Yanqiu

(School of Petroleum Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, Heilongjiang, China)

【Abstract】 The conventional uniaxial test for four kinds of rocks with different brittleness is carried to obtain the acoustic emission energy characteristics of rocks with different brittleness. In the process of loading, the acoustic emission (AE) signal is detected by the acoustic emission detection system. Stress-strain curves and acoustic emission energy curves are gotten from this test. The results show that the brittleness of samples increase with the increasing of the sand ratio. The stress-strain curve shapes of the samples are similar and there are no obvious plastic stages before the peak value, while the acoustic emission curves have the obvious plastic stage and the plastic stage becomes shorter as the brittleness increases. The acoustic emission energy reaches the maximum value at the peak value and the maximum value follows a power function relationship with the brittleness index of the samples. After the peak, the stress decreases at a moment, but the acoustic emission energy will last for a short time and the duration of acoustic emission activity is shortened with the increasing of sample's brittleness.

【Key words】 rock brittleness; acoustic emission energy; uniaxial test; acoustic emission; brittleness index

0 引言

储层岩石是一种典型的具有非均匀性的脆性材料,脆性既是一种变形特性又是一种材料特性^[1]。声发射现象是岩石受载荷破裂时,岩石中所储能量的一部分会以弹性波(声波)的形式释放出来^[2]。

声发射是在岩石破坏过程中发生的一种伴生现象,其中蕴含着岩石内部损伤破坏的众多信息,从而使其成为研究岩石力学特性及损伤演化规律的重要手段^[3]。关于岩石破坏过程的声发射特征研究,国内外学者开展了大量的室内试验研究。Tham等^[4]采用多通道声发射系统监测研究了板状岩石试样在

拉伸时的声发射特性,并采用二维有限元软件对声发射进行了模拟分析;Nicsiar和C. D. Martin^[5]利用声发射技术探讨了确定岩石特征应力的方法;赵兴东等^[6]研究了花岗岩在单轴压缩条件下,随加载时间、应力变化及其声发射活动的特性,分析了试件内部微裂纹初始、扩展过程的空间演化模式;文圣勇^[7]和秦虎^[8]分别采用单轴压缩试验研究不同含水率红砂岩和煤岩的声发射特征,得出水对岩石的力学特性和声发射特征有较大影响;李庶林等^[9]前后分别研究了单轴压缩试验中应力-声发射事件数(率)-时间之间的关系,对岩石峰值前的声发射事件

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:51404073;51574088);中国博士后科学基金特别资助项目(编号:2016T90268);中国博士后科学基金项目(编号:2014M550180)资助

作者简介:马云朋,男,1991年生,汉族,河北石家庄人,在读硕士研究生。E-mail:1144627942@qq.com

出现的相对平静期现象进行了探讨以及对不同加载条件下岩石材料破裂过程的声发射特性进行了研究。

由以上研究可知,国内外学者已对岩石受力破坏过程中的声发射特征研究方面进行了大量的室内试验研究,并取得了许多成果。本文以单轴试验和声发射检测试验测定声发射参数与岩石应力-应变特性之间的关系。本文的研究成果对于深入认识岩石的脆性特征,提高水力压裂的改造效果具有重要的实际意义。

1 基于矿物组分的岩石脆性评价

压裂形成缝网的基础是岩石具有脆性,关于脆性的定义目前有 20 多种^[10-13],其中由矿物成分表征岩石脆性的评价方法—矿物组分法认为:泥页岩主要由石英、方解石和黏土组成,而石英是主要的脆性矿物,脆性指数计算公式如式(1)所示。

$$BRIT = \frac{V_{\text{石英}}}{V_{\text{石英}} + V_{\text{方解石}} + V_{\text{黏土}}} \times 100 \quad (1)$$

式中:V 为各种矿物的体积;BRIT 为岩石脆性指数。

根据矿物组分法,本文拟采用不同砂比的自制水泥砂石代表不同脆性的岩石,进行常规的单轴压缩试验,同时进行声发射信号监测,研究不同脆性岩石的声发射能量特征。

2 试验过程

为研究岩石脆性与声发射能量特征之间的关系,本文设计单轴试验和声发射试验研究不同脆性岩石破坏全过程的力学破坏特性以及声发射特征。

1)岩石试样制备:共设计 4 组试验,试样含砂比分别为 15.2%、22.5%、30.6%和 36.1%,试样尺寸为 50 mm×50 mm×50 mm(长×宽×高)。

2)试验装置:试验所需设备有加载系统和声发射检测系统(见图 1、图 2)。加载系统为 WSM-200kN 型号的微机控制岩石刚度试验机;声发射检测系统为美国物理声学公司生产的 PCI-2 声发射系统,可用通道为 8 个。

3)加载方案:单轴压缩加载,加载时为等载荷匀速加载,速率为 2 mm/min。声发射检测时,试样和声发射探头之间涂有凡士林,以此作为耦合剂来排净两者之间的空气,使用胶带将探头固定在试样上。为了减小端部效应和摩擦对声发射信号造成的干扰,在试样上下两端垫有橡胶片,并在其内侧涂有适量的凡士林,以此来最大限度的减少干扰信号。



图 1 加载系统

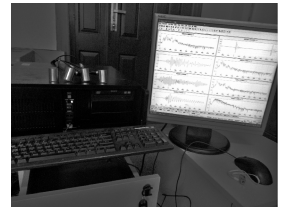


图 2 声发射检测系统

3 试验结果及分析

3.1 应力-应变曲线分析

试样的应力-应变曲线能够直接反映试样在加载过程中的应变特征。由单轴试验的数据结果绘制出各试样的应力-应变曲线,见图 3。

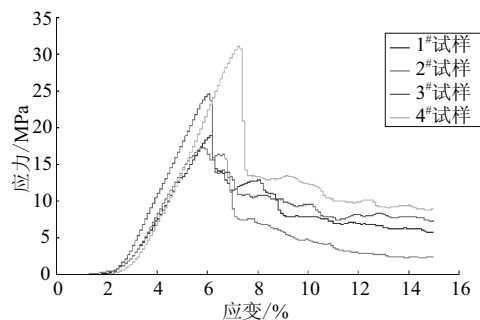


图 3 不同脆性岩石试样的全应力-应变关系曲线

由图 3 可知,脆性不同使得试样具有不同变形特征,且试样砂比增大,脆性增强。峰值前,应力-应变曲线基本相似,弹性变形段,曲线形状都接近直线,不同的是试样脆性越强,曲线的斜率增大,峰值前各曲线均未出现明显的塑性阶段;峰值后,应力瞬间跌落,且伴有爆裂声响,试样发生宏观破裂,且试样脆性越强,应变越大。

3.2 声发射能量特征分析

常用声发射参数有声发射计数(振铃计数)、能量、上升时间、脉冲持续时间、幅度分布、事件等^[14],本文选择用声发射能量。据声发射检测结果,得到不同脆性试样的时间-能量-应力关系曲线,见图 4。

由图 4 可知,试样在加载过程均有声发射信号产生,且声发射曲线和应力-应变曲线具有较好一致性。不同的是,试样脆性不同,其声发射活动存在一定的差别。总结声发射规律如下:

1)由声发射曲线和应力-应变曲线可知,尽管试样脆性不同,但试样声发射的主要活跃区集中在峰值应力前后较小区域内,且随着试样脆性增强,声发射活跃区域减小。峰值前,试样 1 和试样 2 的声发射在峰值附近有较强的声发射活动,而试样 3 和

样4的声发射活动较少,根据脆性关系可判断,试样

脆性越强,峰值之前塑性变形(屈服)段越短暂。

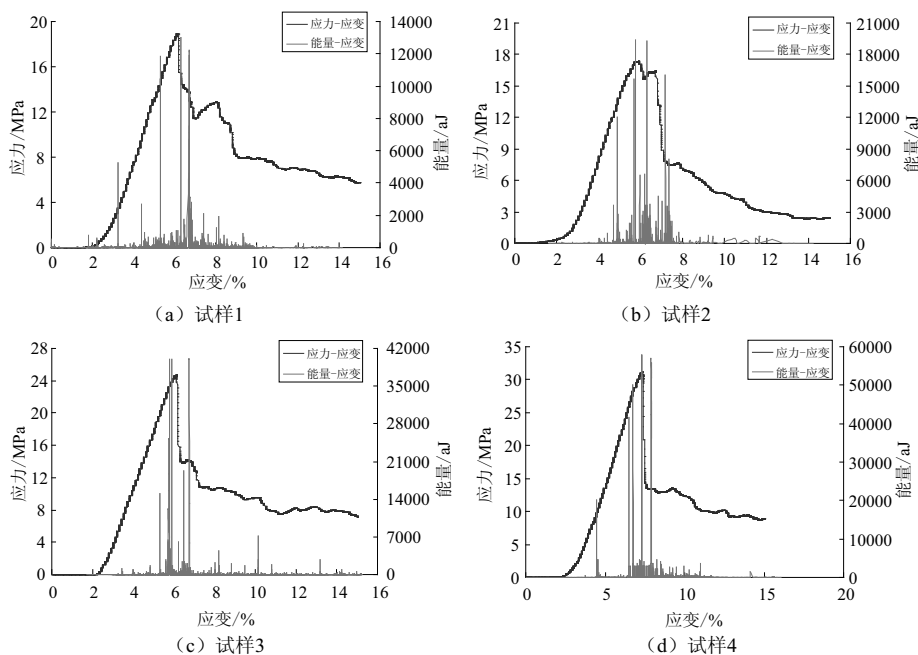


图4 不同脆性试样单轴压缩时间-能量-轴向应力关系曲线

2)加载初期,试样均有声发射信号产生,但能量较小,说明压密段声发射信号来自试样内部原有裂纹闭合;随着载荷增大,变形到线弹性阶段,此段前期声发射能量无明显变化,后期能量增加,说明试样内部原有裂纹重新张开或新产生裂纹;塑性变形阶段,裂纹开始扩展,声发射活动剧烈,能量大幅度增加,此特征可与弹性阶段明显区别开来,这个特点在应力-应变曲线上表现不明显。

3)应力达到峰值应力时,声发射能量陡增,此时进入到破坏阶段,产生宏观破裂。随着脆性增强,声发射能量最大值在增大;峰后应力瞬间降到底,且试样脆性增强时,跌落速度加快,声发射能量经过短暂的剧烈活动也突然降低,随着脆性增强,峰后声发射活动的持续时间在缩短。

此外,据矿物组分析法计算试样的脆性指数分别为0.15、0.22、0.306和0.361,各试样的声发射能量最大值分别为13032 aJ, 19355 aJ, 39958 aJ, 57786 aJ。为方便比较两者之间的关系,将其绘制在同一幅图中,见图5。

由图5可知,试样的脆性指数随着声发射能量最大值的增大而增大,并通过拟合关系发现,两者之间满足乘幂函数关系,如式(2)所示。

$$B=0.0008 \times N_{\max}^{0.5649} \quad (2)$$

式中: B 为试样的脆性指数; N_{\max} 为声发射能量最大值。

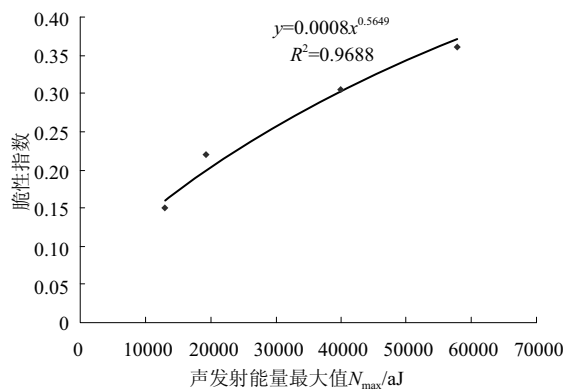


图5 声发射能量最大值与脆性指数关系

由式(2)可知,试样的脆性可由声发射能量最大值来表示,这为试样脆性的研究提供了新的研究思路。

4 结论

1)不同砂比的试样具有不同的脆性,脆性不同使得试样在整个单轴压缩过程中表现出了不同的变形特征。峰值之前,各试样都具有短暂压密阶段和相似的弹性变形阶段,不同的是弹性变形阶段曲线的斜率略有差别,应力-应变曲线无明显屈服阶段;峰值之后,试样脆性越强,试样变形越大,应力降落越快。

2)试样在整个变形过程中均有声发射信号产生,声发射活跃区域主要集中在峰值应力附近极小区域,

随着试样脆性增强,声发射活跃时间段在缩短;并且,试样脆性越强,峰值前的塑性变形(屈服)段越短。

3)试样在不同的变形阶段具有不同的声发射特征。压密阶段,只有少量声发射信号产生;弹性变形阶段,前期声发射能量无明显变化,后期声发射能量增加,说明此时原有裂纹重新开启或新产生裂纹;塑性(屈服)阶段,声发射能量大幅度增加,可明显区别出此阶段,且随着试样脆性增强,此阶段的持续时间会缩短;破坏阶段,声发射能量达到最大值,且随着试样脆性增强,能量最大值也在增大;峰值之后,随着试样脆性增强,声发射活动的持续时间在变短。

4)试样的脆性指数与声发射能量最大值满足一定的函数关系,这为试样脆性指数的计算提供了新的研究思路。

参 考 文 献

- [1] Andreev G E. Brittle Failure of Rock Materials: test Results and Constitutive Model[M]. Netherlands: A. A. Balkema Press, 1995.
- [2] 陈 颢. 声发射技术在岩石力学研究中的应用[J]. 地球物理学报, 1997, 20(4): 312-322.
- [3] 张 明, 李仲李, 杨 强, 等. 准脆性材料声发射的损伤模型及统计分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2493-2501.
- [4] Tham L G, Liu H, Tang C A, et al. On tension failure of 2-D rock specimens and associated acoustic emission[J]. Rock Mech Rock Engng, 2005, 38(1): 1-19.
- [5] Nicsiar M, Martin C D. Evaluation of methods for determining crack initiation compression tests on low-porosity rocks[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2012, 45(4): 471-479.
- [6] 赵兴东, 唐春安, 李元辉, 等. 花岗岩破裂全过程的声发射特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增2): 3673-3678.
- [7] 文圣勇, 韩立军, 宗义江, 等. 不同含水率红砂岩单轴压缩试验声发射特征研究[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(8): 46-52.
- [8] 秦 虎, 黄 滚, 王伟忠. 不同含水率煤岩受压变形破坏过程声发射特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1115-1120.
- [9] 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.
- [10] Morley A. Strength of Material[M]. London: Longman Green, 1944: 71-72.
- [11] Heteny M. Handbook of Experimental Stress Analysis[M]. New York: John Wiley, 1966: 23-25.
- [12] Ramsay J G. Folding and Fracturing of Rocks[M]. London: McGraw Hill, 1967: 44-47.
- [13] 李庆辉, 陈 勉, 金 衍, 等. 页岩脆性的室内评价方法及改进[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(8): 1680-1685.
- [14] 袁振明, 耿荣生. 声发射检测[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 1-4.

收稿日期: 2017-03-06

(上接第 166 页)

参 考 文 献

- [1] 屈耀辉, 武小鹏, 米维军, 等. 黄土区高速铁路挤密桩地基沉降控制效果研究[J]. 铁道工程学报, 2011(9): 30-35.
- [2] 中华人民共和国铁道部. TB 10106-2010 铁路工程地基处理技术规程[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2010.
- [3] 《地基处理手册》编写委员会. 地基处理手册(第三版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 835-853.
- [4] 肖广智. 不良、特殊地质条件隧道施工技术及其实例(三)[M]. 北京: 人民交通出版社, 2016: 68-72.
- [5] 屈耀辉, 武小鹏, 米维军, 等. 黄土区高铁柱锤冲扩桩地基沉降控制效果研究[J]. 铁道工程学报, 2012(1): 21-25.
- [6] 苏 谦, 李安洪, 丁兆锋, 等. 郑西客运专线深厚湿陷性黄土地基桩板结构设计分析[J]. 铁道建筑技术, 2007(2): 1-4.
- [7] 姚裕春, 李安洪, 罗照新, 等. 郑西客专湿陷性黄土地基处理技术研究[J]. 铁道工程学报, 2013(9): 15-19.
- [8] 何振宁. 铁路隧道疑难工程地质问题分析—以 30 多座典型隧道工程为例[J]. 隧道建设, 2016, 36(6): 636-665.
- [9] 王小强. 晋西北大厚度湿陷性黄土特征分析及处理措施—以山西保德某氧化铝厂场地为例[J]. 岩土工程技术, 2016, 30(1): 33-38.
- [10] 张 然. 浅埋式桩板结构在宝兰客运专线湿陷性黄土短路基中的应用研究[J]. 铁道标准设计, 2014, 58(6): 32-35.

收稿日期: 2017-05-04