单轴加载下砂岩声发射特征的试验分析。

李 博1,孙 强2,王思源1,蔺宗宗1

(1. 兰州大学 土木工程与力学学院,甘肃 兰州 730000;

2. 中国矿业大学 资源与地球科学学院,江苏 徐州 221116)

摘 要:声发射是岩石材料发生变形破坏时所伴随的一种普遍现象。在刚性试验机上,单轴受压条件下对砂岩破坏全过程进行了声发射试验,得到了砂岩破坏过程中的应力特征与时间、应变,声发射特征与时间、应变之间的关系曲线。通过对关系曲线的研究,着重探讨了声发射特征与应变之间的关系,并用拟合的方法得到了砂岩试样的近似破坏临界点,为0.9 x₀,对砂岩破坏的监测预报具有一定的理论指导作用。

关键词:砂岩;单轴加载;声发射;临界点

中图分类号: TU458 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2013)01-0114-05 DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2013.01.0114

Experimental Analysis of the Acoustic Emission Characteristics of Sandstone Specimens under Uniaxial Loading Tests

LI Bo¹, SUN Qiang², WANG Si-yuan¹, LIN Zong-zong¹

School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China;
 School of Resources and Earth science, China university of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: Acoustic emission (AE) is a ubiquitous phenomenon associated with deformation and failure of rock material. Experiments on AE characteristics of full-regime sandstone failure are conducted with a stiffness test machine under the condition of uniaxial compression. The relationships of stress characteristics with time-strain level and AE characteristics with time-strain level are obtained in the failure process of sandstone specimens. On the basis these results, the relationship of AE characteristic with strain level is discussed. The approximate critical point of the sandstone specimen is determined to be 0.9 through the curve fitting method. This study provides theoretical guidance to the monitoring and prediction of sandstone behavior.

Key words: Sandstone; Uniaxial loading; Acoustic emission; Critical point

0 引言

岩石声发射是指岩石类材料在受力发生破坏时,其内部裂纹产生、扩展和贯通并以应力波的形式释放能量的现象,是岩石材料破坏时伴随发生的一种现象,能够反映岩石内部应力状态变化,对研究岩石破坏过程和岩体稳定性的监测预报有着重要的意义。

在岩石峰值强度前存在着一个相对的声发射信

号的平静期,声发射平静期是岩石破坏的重要前兆, 因此应该引起研究者的足够重视。李庶林等^[1]认为 在应力水平超过其峰值强度的 85%~90%之后,大 多数岩石的等应力增量间隔时间出现明显增加,以 时间为自变量时的声发射事件数则明显减少,即出 现峰值前的声发射事件相对平静期;尹贤刚等^[2]认 为声发射平静期时间段的长度应该和岩石的破坏形 式有关,如果是脆性岩石,则平静期相对较短;李小

① 收稿日期:2012-08-10 作者简介:李 博(1986-)男(汉族),河南商丘人,硕士研究生,研究方向:岩土工程.E-mail:libocare@126.com

军等^[3]认为仅依靠声发射频率和强度参数并不能完整准确地反映岩石内部结构的变化,也不能实现对 岩石失稳破坏的预测预报,应进一步挖掘声发射信 号所包含的信息,并对比分析其它岩石状态参数的 变化规律。

Dai 等对岩石类材料损伤与声发射特性之间的 关系、对不同孔隙度的类岩石材料的声发射特性进 行了研究,认为其研究结果可用于对此类材料破坏 的实时监测和预报^[4];Ganne 等利用声发射技术对 岩石峰值前的脆性破坏进行了研究,给出了整个过 程中累积声发射能量的 4 个过程^[5]。

由于岩石受力条件下的变形破裂是一个复杂的 非线性演化过程,加之对岩石材料声发射破裂机理 认识的不足,使得人们在对岩体失稳的声发射监测 预报实际应用中缺乏可靠的判别依据和理论基础。 基于此,作者尝试对声发射数据进行统计分析,以期 得出能够反映砂岩破坏的定量解,提出合理的砂岩 破坏的前兆判据。

本文对砂岩试样进行单轴加载试验,通过对声 发射数据的分析,探讨了应力、声发射与时间、应变 的关系,并用 Boltzman 函数拟合声发射数与应变关 系曲线,得到砂岩破坏近似临界点,即为砂岩破坏的 近似定量判据,为砂岩破坏的监测预报提供一定的 理论参考依据。

1 试样及装置设备

所取试样来自西南某工程区砂岩。在北京科技 大学土木工程与环境学院实验室进行了岩石声发射 试验。试验装置是由岩石力学试验加载系统和沈阳 计算机技术研究设计院研制的 AE21C 声发射检测 系统两部分组成。试验过程中对试样在刚性试验机 上进行单轴加载试验,同时采集加载过程中的声发 射信号的信息。加载速率为 0.008 min(即每分钟 0.008 的应变量),用声发射仪记录声发射信号的时 间间隔为 0.2 s;声发射信号撞击时间 100 us,撞击 间隔时间为 300 us。

2 试验结果分析

岩石的全应力一应变曲线一般分为4个阶段 [6-7]。本文分为原生裂隙压缩闭合阶段(OA 段)、线 弹性变形至微破裂稳定发展阶段(AB 段)、非稳定 破裂发展阶段(BC 段),及峰后应力强度丧失和完 全破坏阶段。通过试验可得砂岩全应力一应变曲 线,如图1所示。



图1 砂岩全应力一应变曲线



2.1 应力与时间关系

峰前应力段,应力一时间曲线基本呈线性关系, 且斜率较大;因为砂岩是一种强度较大的脆性岩石, 屈服点(B点)后曲线开始偏离原线性曲线关系,但 仍基本呈线性变化关系,峰前应力段存在有尖点,整 体应力一时间曲线呈现为双折线形态。峰后应力 段,应力一时间曲线存在明显的应力降低趋势,强度 随时间急剧降低,仍有残余强度存在,其大小约为峰 值强度的 15%。

2.2 声发射特征与时间关系

在峰值强度的约75%之前,即屈服点前声发射数很少,随时间的增加而略有增多,在应力水平超过峰值强度的75%后,声发射事件数明显增多,并在峰值强度处声发射率有小的峰值强度出现。应力一时间关系曲线见图2。

经过分析后发现,声发射特征与时间关系曲线 存在着如下四个阶段,分别是砂岩试样的压密阶段, 弹性变形至微破裂稳定发展阶段,非稳定破裂发展 阶段,砂岩破坏阶段。这四个阶段也是声发射数不 断变化的阶段,即声发射数从少到多再到迅速增加 到破坏后的持续增加的阶段。

由振铃总计数、能量总计数与时间的关系曲线 可知(图 2(a)、(b)),刚开始加载时,振铃总计数和 能量总计数都较低,曲线斜率较小,说明声发射与时 间曲线在低应力水平时增长平缓;达到屈服点附近 曲线变陡,之后曲线呈阶梯状增长,具有明显的跳跃 性。

由图 2(c)、(d),在 DC 段峰值前声发射率有明 显降低趋势,该段是砂岩破坏前的平静期,可作为砂 岩破坏的前兆,但平静期相对较短。峰值强度后,声 发射率存在有急剧下降段,由于裂隙相互贯通,试样 结构发生破坏,因此声发射率达到最大,有峰值出









由振铃总计数、能量总计数与应变关系曲线可



知(图 3(a)、(b)),屈服点前随着应变的增加声发射 数增长缓慢,曲线斜率较小,但应变相对增加迅速, 此阶段发生在峰值强度约75%之前,既具有弹性变 形同时也具有塑性变形。在峰值强度 75%之后,声 发射活动开始加快发展,出现了在较小应变中发生 大量声发射活动的现象,仍具有明显的跳跃性。

由声发射率一应变曲线(图 3(c)、(d))可知,屈 服点至峰值点声发射活动相对稳定,这是岩石破坏 前能量积累的过程。岩石受力过程是吸收能量(转 化为弹性能)和耗散能量(释放弹性能转化为塑性势 能,裂纹表面能和其它形式的能)的动态过程^[8]。从 图中可以看到峰后声发射率出现峰值,这时岩石内 部裂纹扩展沟通达到阈值,声发射信号强度达到最 大。

分别对振铃总计数一应变曲线、能量总计数一 应变曲线用 Boltzman 函数进行回归分析,可得相关 系数分别为 0.991 56 和 0.990 27,可知用 Boltzman 函数拟合精度很高,因此本文尝试采用 Boltzman 函数进行曲线拟合。

Boltzman 函数为

 $y = A_2 + (A_1 - A_2) / \{ [1 + \exp(x - x_0) / dx] \}$ 式中 x 为应变; A_1, A_2, x_0, dx 均为回归参数,可通 过拟合得到。

对函数求两阶导数可得 $x = x_0$ 为拟合曲线拐 点。从图中可知拐点前已达到峰值点,峰值点应变 值大约为 0.9 x_0 ,0.9 x_0 可作为该岩石试样破坏的近 似临界点。

对所有岩样的试验数据的声发射数一应变曲线 利用 Boltzman 函数拟合,进行相关统计分析,如表 1。

тё П		岩样编号						
项目	S2-1-1	S4-6	S4-7	S5-4	S5-5	S6-2	S6-8	
试验所得峰值强度时的应变值 ε₀/%	0.440 032	0.349 888	0.406 664	0.634 488	0.418 968	0.836 016	0.421 656	
由 Boltzman 函数拟合振铃总计数一应变曲线所得相关系数	0.931 86	0.992 13	0.969 91	0.874 83	0.991 56	0.988 2	0.948 29	
由 Boltzman 函数拟合振铃总计数一应变曲线所得拐点 x01/%	6 0.462 76	0.423 35	0.396 4	0.687 5	0.477 4	0.859	0.544 8	
由 Boltzman 函数拟合能量总计数一应变曲线所得相关系数	0.925 88	0.987 95	0.983 09	0.882 4	0.990 27	0.983 18	0.957 87	
由 Boltzman 函数拟合能量总计数一应变曲线所得拐点 xo2/%	6 0.453 57	0.427 15	0.445 61	0.674 7	0.462 71	0.873 75	0.5323	
比值 ϵ_0 / x_{01}	0.951	0.826	1.026	0.923	0.880	0.973	0.774	
比值 ε ₀ /x ₀₂	0.970	0.819	0.913	0.940	0.905	0.957	0.792	

表	1 月] Boltzmai	ı函数	拟合声发射	数一应	变曲线颅	所得数据统	计
Table 1	Data	statistics (of AE	counts-strai	n curves	fitted b	y Boltzman	function

从表1中可以看出,由 Boltzman 函数拟合振铃 总计数一应变曲线及能量总计数一应变曲线所得相 关系数中,7组数据中只有1组数据为0.88左右, 其余6组均在0.93以上,说明拟合效果较好,因此 用 Boltzman 函数拟合是可以接受的。

表 1 所得比值中, ϵ_0/x_{01} 区间为 0.774~1.026, ϵ_0/x_{02} 区间为 0.792~0.970,说明通过砂岩单轴加 载试验所测得的峰值点时的应变值 ϵ_0 约为利用 Boltzman 函数拟合所得 x_0 的 0.8~1.0。对所得比值 ϵ_0/x_{01} 和 ϵ_0/x_{02} 进行统计分析可得表 2。

由表 2 可得比值均值为 0.9,由平均值的 95% 置信区间和方差、标准差可知取比值为 0.9 是合适 的,因此取 0.9*x*。为砂岩破坏的临界点,0.9*x*。可作 为岩体发生破坏的监测依据,但尚需工程实践的检 验。

表 2 比值 ε₀ / x₀₁ ε₀ / x₀₂ 的统计分析

Table 2 Statistical analysis on the ratio of ε_0 / x_{01} and ε_0 / x_{02}

比值	平均值	平均值的 95% 置信区间	方差	标准差
ϵ_0/x_{01}	0.907 57	(0.826 87,0.988 27)	0.007 61	0.087 26
ϵ_0/x_{02}	0.899 43	(0.836 06,0.962 79)	0.004 69	0.068 51

3 结论

岩石声发射活动是岩石内部应力状态变化的反映,声发射活动的产生是岩石内部裂隙不断产生、扩展和断裂的结果。通过对砂岩试样的单轴压缩声发射试验可得如下结论:

(1)在砂岩单轴加载试验中,随着应力水平的不 断增加,声发射特征与时间曲线关系中表现出不同 的阶段性特征,砂岩试样破裂的过程与声发射特征 的变化过程二者是相对应的。

(2)声发射特征与时间关系中,屈服点是一个重要的分界点,是声发射活动开始迅速变化的临界点。 在砂岩声发射试验中存在着声发射率显著下降的 DC段,是砂岩破坏前的平静期,可作为砂岩破坏的 前兆。

(3) 声发射特征与应变关系中,利用 Boltzman 函数对声发射数与应变关系曲线进行拟合,经过统 计分析,结果表明 0.9 可近似作为砂岩试样的临界 破坏点,即得到砂岩破坏的近似定量判据,对砂岩工 程稳定性的监测预报具有一定的理论指导作用和实 际使用价值,但尚需工程实践的检验。

[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.

LI Shu-lin, YIN Xian-gang, WANG Yong-jia, et al. Studies on acoustic emission characteristics of uniaxial compressive rock failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15): 2499-2503.

- [2] 尹贤刚,李庶林,唐海燕,等. 岩石破坏过程的声发射特征研究[J]. 矿业研究与开发, 2003, 23(3):9-11.
 YIN Xian-gang, LI Shu-lin, TANG Hai-yan, et al. Study on characteristics of acoustic emission in the process of rock fail-ure[J]. Ming. R. & D., 2003, 23(3):9-11.
- [3] 李小军,路广奇,李化敏.基于声发射事件 b 值变化规律的岩 石破坏前兆识别及其局限性[J].河南理工大学学报(自然科 学版),2010,29(5):663-666.

LI Xiao-jun, LU Guang-qi, LI Hua-min. Identification of the predictive information of rockrnass failure based on the law of *b*-value change of acoustic emission events and its deficiency [J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2010, 29(5); 663-666.

[4] DAI S T, LABUZ J F. Damage and failure analysis of brittle materials by acoustic emission[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1997, 9(4): 200-205.

- [5] GANNE P, VERVOORT A, WEVESS M. Quantification of pre-break brittle damage correlation between acoustic emission and observed micro-fracture[J]. Int. J. Rock Mech. & Min. Sci., 2007,44(5):720-729.
- [6] 刘传孝,刘福胜,蒋金泉,等.砂岩全应力一应变曲线二分段
 特征的 Lyapunov 定性分析[J].岩土力学,2008,29(7):
 1884-1888.

LIU Chuan-xiao, LIU Fu-sheng, JIANG Jin-quan, et al. Analysing staged features of complete stress-strain curves divided by dichotomy of sandstone qualitatively with Lyapunov theory [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008,29(7): 1884-1888.

[7] 刘佑荣, 唐辉明. 岩体力学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2009.

LIU You-rong, TANG Hui-ming. Rock Mechanics[M]. Wu Han;China University of Geosciences Press,2009.

[8] 张晖辉,刘峰,常福清. 岩石损伤破坏过程声发射试验及其能量特征分析[J]. 公路交通科技, 2011, 28(3):48-54.
 ZHANG Hui-hui, LIU Feng, CHANG Fu-qing. Experimental study of acoustic emission characteristics during rock failure process and energy properties [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28(3): 48-54.