文章编号:1672 - 058X(2011)05 - 0527 - 05

永川煤矿 T_3xj^4 砂岩声发射特性及 Felicity 效应研究

冯发维[1], 谢晓佳[1], 郭臣业[2], 姚伟静[3],
(1. 重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点试验室,重庆 400044;
2. 重庆能源投资集团科技有限责任公司,重庆 400060;3. 重庆市公安局 技术处,重庆 400030)

摘 要:在单轴和循环加载条件下对永川煤矿砂岩损伤破坏全过程的声发射特性进行了系统研究,结果表明:砂岩声发射类型与 MOGI-I 相似,应力应变全过程曲线对应的 Kaiser 点、屈服点及峰值点处声发射信号明显;随着循环加载水平的增加,不同轴向应力和轴向应变阶段对应的 Felicity 效应比值越来越小,反映了岩石损伤程度的增加。

关键词:声发射; Felicity 效应; 循环加载
中图分类号:TD713 **文献标志码:** A

岩石受力后产生应变,除将外力所作的功转化为弹性能等其他形式的能量之外,还将产生声发射现象(Acoustic Emission,简称 AE)[1]。Kaiser 效应是指在超过先前所施加的应力之前不出现可探测到的声发射信号[2,3],而 Felicity 效应被认为是反 Kaiser 效应,Felicity 效应是指重复载荷到达原先所知最大载荷前发生明显声发射的现象,是 Kaiser 效应失效程度的补充[4,5]。许多学者对不同岩石的 Kaiser 信号特征及其应用进行了大量研究,取得了很多成果[6-8]。Felicity 在研究复合材料的声发射性能时,首先发现声发射过程的不可逆程度与材料的损伤有关,即 Felicity 效应。纪洪广、刘建新等在研究混凝土、大理岩的声发射性能时[9,10],发现这些材料也存在 Felicity 效应。在实际工程中,岩石体的受力情况常表现为循环加载的破坏形式,如采煤工作面矿压表现出的周期性显现规律[11]。因此,进行循环加载破坏全过程的声发射特征研究,能够深刻揭示岩石破裂过程与声发射参数之间的关系,有助于进一步认识岩石的损伤破坏机理。

1 实验概述

试验系统由 MTS815 岩石力学加载系统、PAC PCI - 2 型声发射试验系统组成。试验所需岩样采自永川煤矿 - 350 m 水平至 - 600 m 水平延深工程掘进巷道的 $T_3 \times j^4$ 砂岩层,采用湿式法将所采集岩样加工成 Φ50 mm × 100 mm(力学指标、变形特征、声发射测试用)、Φ50 mm × 25 mm(劈裂实验用)的圆柱体试件,其加工精度满足国际岩石力学学会建议实验规范要求,加工成型后保持自然干燥状态。试验共采用 3 组试样,分别用于测试岩石基本力学指标、一般声发射特性和循环加载条件下的声发射试验。试验采用轴向位移控制,加载速度为 0.1 mm/min,PCI-2 声发射试验系统的门槛值设为 40 dB。

表 1 砂岩物理力学参数

颜色	矿物颗粒大小	密度/(g/cm³)	孔隙度/%	渗透率/$10^{-3}\mu m^2$	BET 比表面积/(m²/g)
麻灰色	中粒	2.48	5.53	0.004 42	230
f	σ_c(MPa)	σ_t(MPa)	E(GPa)	μ	σ_s(MPa)
1.2	62.6	5.83	17.8	0.204	47.2

收稿日期:2011 - 04 - 05;**修回日期:**2011 - 04 - 15.
作者简介:冯发维(1984 -),男,湖北恩施人,硕士研究生,从事矿山安全技术及工程研究.

按照“煤和岩石物理学性质试验规程(MT38-50 – 80)”的要求测试了 T_3xj^4 砂岩的基本物理力学参数,其部分物理参数见表 1,典型的应力应变曲线见图 1。表 1 和图 1 显示,T_3xj^4 砂岩比表面积较大、渗透率较低,且强度不高,T_3xj^4 砂岩应力应变曲线的 4 个阶段明显,弹性段较短、且陡峭,具有明显的屈服特征。

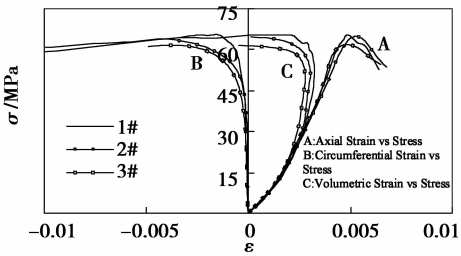
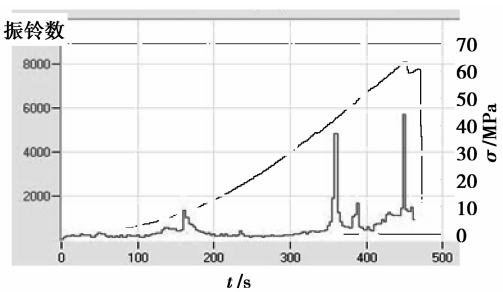


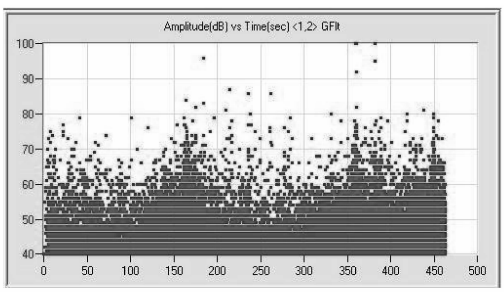
图 1 砂岩典型应力应变曲线

2 T_3xj^4 砂岩样受载全过程的声发射特性

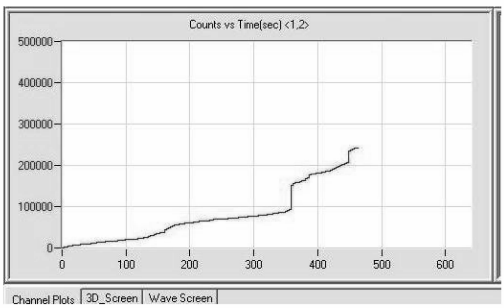
图 2 为 T_3xj^4 砂岩单轴压缩过程中的典型声发射特征图,图中显示应力应变曲线各个阶段的变形和声发射特征是不同的。在初始压密阶段其声发射特征为:撞击数少、能量低、振幅小。弹性阶段应力应变曲线近似于直线,体应变继续增大,试件体积继续减小,试件内部的微裂隙或节理面已被压密,产生的声发射信号很微弱,表现为撞击数很少、能量很低、振幅很小。应变硬化阶段岩石内部开始产生微裂隙,随加载载荷的增加,试件内部的裂隙扩展最终汇合贯通,使试件破坏,这个阶段产生的声发射信号非常强烈,表现为撞击数骤增、能量高、振幅大。应变软化阶段岩石还有一定的承载力,声发射信号会继续产生,表现为撞击数骤减、能量和振幅急剧减小。



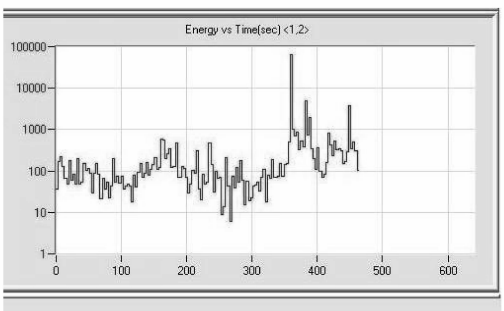
(a) AE振铃数、轴向力与时间曲线



(b) 振幅与时间曲线



(c) 累计振铃数与时间曲线



(d) 能量与时间曲线

图 2 T_3xj^4 砂岩单轴压缩的典型声发射特征

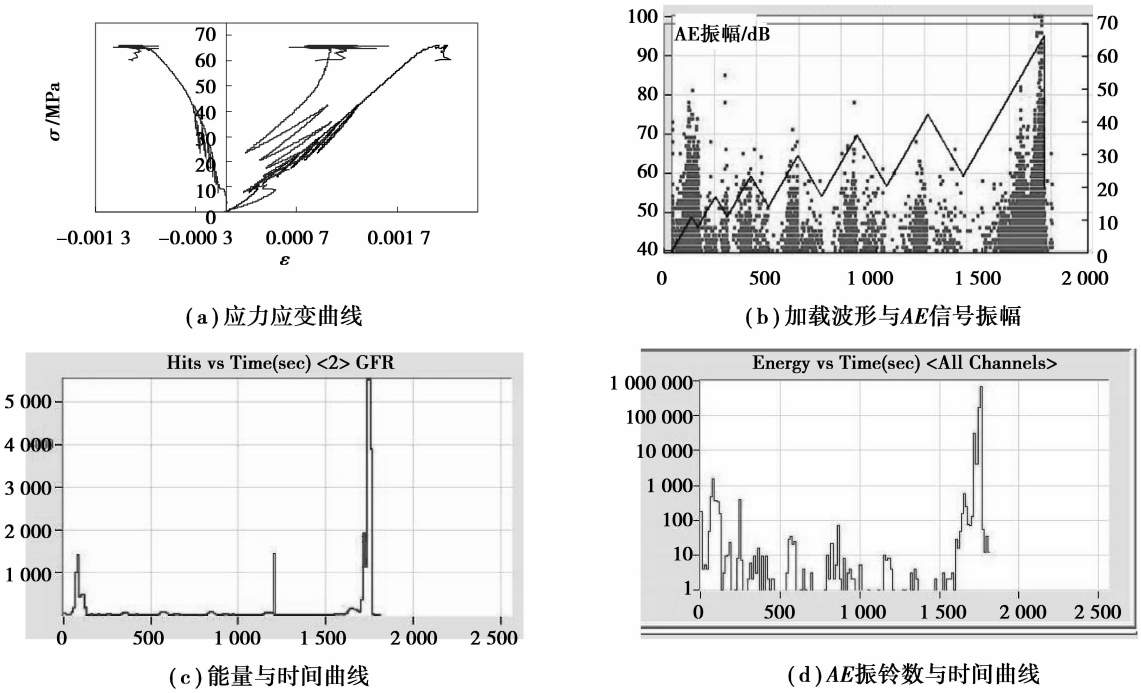
图 2-c 的试验结果显示 T_3xj^4 砂岩的声发射类型与 Boyce 提出的 MOGI-I 较为相似[12]。T_3xj^4 砂岩样破坏时(446 s)声发射振铃数峰值明显,该时刻岩样发生宏观破裂,此后岩样基本失去承载能力。振铃数-时间曲线的第一个峰值(159 s)表示砂岩破坏的 Kaiser 效应点,此时对应岩样受力为 9.98 MPa。在 359 s 时振铃数-时间曲线出现第 2 个峰值,该峰值对应在轴向应力应变曲线屈服点附近,表明岩石变形方式开始从以弹性为主向塑性为主转变[13]。第 2 个振铃数-时间曲线峰值对应强度为 43.8 MPa,与根据岩样应力应变曲线求得的屈服强度 47.2 MPa 相比小了 3.4 MPa,若将 47.2 MPa 作为真实值,则根据声发射求得的屈服点值的误差率为 7.2%。考虑到试验测试误差的存在,这里近似认为用上述两种方法求得屈服点强度都是正确的。

3 T_3xj^4 砂岩声发射的 Kaiser 和 Felicity 效应研究

3.1 砂岩循环加载的声发射 Kaiser 和 Felicity 效应

循环加载试验的加载波形为三角形波,循环加载方式为上限力增幅 12.5 kN,下限力增幅 7.5 kN,初始

最大加载强度为 15 kN,加载至试件破坏。图 3 为 T_3xj^4 砂岩样在循环加载作用下的典型声发射特征,图中显示:声发射信号振幅在循环加载的加载阶段明显增大,循环加载的初始阶段和砂岩破坏时振幅较大,中间阶段较小,循环加载的初始阶段振幅较大反应了岩石受载压密时裂纹和微裂隙的闭合,破坏时振幅较大反映了岩石裂隙和宏观裂纹的产生;循环加载时声发射活动的能量与时间曲线有 3 个明显的峰值,与图 2-a 的 3 个峰值具有对应性;循环加载时声发射活动振铃数与时间曲线断续相连,在初始加载时和破坏时存在明显的峰值。



(a)应力应变曲线　(b)加载波形与*AE*信号振幅

(c)能量与时间曲线　(d)*AE*振铃数与时间曲线

图 3　T_3xj^4 砂岩样典型循环加载应力应变曲线与声发射特征图

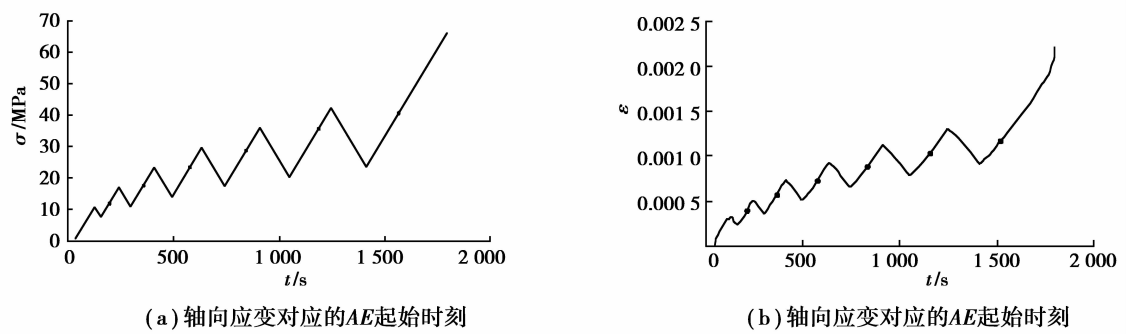
下面以图 3 所示循环加载条件下的应变曲线对应的声发射特征来研究 T_3xj^4 砂岩的 Felicity 效应。将 Kaiser 效应对荷载的记忆拓展到轴向应力和轴向应变,并认为卸载后再次加载时,*AE* 活动显著增多时刻对应岩样受载状态为 Felicity 效应点。Felicity 比值的定义:

$$FR_{\sigma} = \sigma_{AE}/\sigma_{\max} \tag{1}$$

式中:FR_{σ} 为轴向应力的 Felicity 比值,σ_{AE}、$\sigma_{\max}$分别为重复加载时的声发射起始轴向应力和上一次加载的最大轴向应力。若用应变表示,则:

$$FR_{\varepsilon 1} = \varepsilon 1_{AE}/\varepsilon 1_{\max} \tag{2}$$

式中:$FR_{\varepsilon 1}$为轴向应变的 Felicity 比值,$\varepsilon 1_{AE}$、$\varepsilon 1_{\max}$分别为重复加载时的声发射起始轴向应变和上一次加载的最大轴向应变。



(a)轴向应变对应的*AE*起始时刻　(b)轴向应变对应的*AE*起始时刻

图 4　T_3xj^4 砂岩差应力加载的 *AE* 起始时刻

表 2 T_3xj^4 砂岩差应力加载循环的 Felicity 比值及 AE 起始时刻

循环级	2	3	4	5	6	7
FR_σ	1.113	1.037	1.015	1.0	0.932	0.901
轴向应力/MPa	12.048 44	17.595 43	23.247 81	28.338 46	33.443 33	38.029 35
时刻/s	194.8	356.8	577.5	836.4	1187.7	1687.6
$FR_{\varepsilon 1}$	1.31	1.152	1.103	1.001	0.814	0.788
轴向应变	0.000 426	0.000 594	0.000 754	0.000 874	0.000 915	0.001 032
时刻/s	219.4	372.1	548.9	794.8	1 126.3	1 526.2

图 4 为 T_3xj^4 砂岩样循环加载时应力、应变对应的 AE 起始位置(参照图 2-b),图中显示,岩样 AE 活动在循环的加载阶段较卸载阶段多,且最大值出现在每个循环的加载段的中上部。由图 5 和表 2 可以看出,随着不同应力和应变阶段的增加,即砂岩损伤程度的变大,Felicity 比值越来越小;在第 2、3、4、5 个循环中,FR_σ 和 FR_ε 都大于 1,Kaiser 效应成立,而这两个阶段处于弹性变形阶段,即弹性变形阶段砂岩对轴向应力、轴向应变均有较好的记忆能力;在第 6、7 个循环中,FR_σ 和 $FR_{\varepsilon 1}$ 都小于 1,Felicity 效应成立。

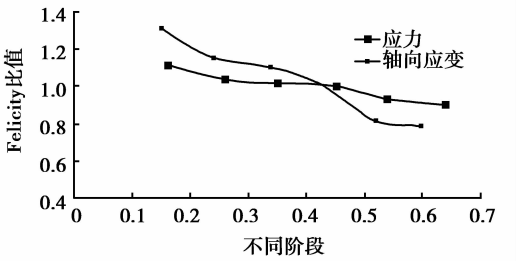


图 5 不同应力和应变阶段的 Felicity 比值

岩石的 Kaiser 效应有其局限性,超过了岩石的屈服点后岩石的 Kaiser 效应将不再成立,Felicity 效应是损伤加剧造成的。由于岩石疲劳破坏存在应力门槛值[14],低于应力门槛值的疲劳过程一般不会造成岩石破坏,且应力门槛值接近常规屈服值。所以,可近似认为只有出现了 Felicity 效应的岩石才会发生疲劳破坏。

3.2 砂岩 Felicity 比值的讨论

以上仅讨论了不同应力和应变阶段对应 Felicity 比值的变化情况,已有的研究表明[13],随着循环加载水平的增加,岩石的横向应变、体积应变、弹性模量、泊松比等力学参数对应的 Felicity 比值也相应地减小。Felicity 比值的减小,反映了岩石损伤程度的加剧。

4 单轴压缩影响 *AE* 信号接收质量因素的讨论

影响岩样声发射信号接收质量的因素较多[15],概括起来有端面减摩、门槛值、岩样均质性、声发射探头安装工艺。岩石端面摩擦会导致测试的数据失真,岩样试验时应在试样端面和压力机压盘之间涂减磨剂;门槛值的设定应兼顾 *AE* 信号的有效拾取和环境噪声的屏蔽,测试实验室环境噪声在 40 dB 以下,故将门槛值设置为 40 dB,所采集数据频率可达 10^6 次/s;岩石声发射试验中 *AE* 信号频率较高、波长较短,因而试样中微裂纹及晶粒大小等对波速有强烈的影响,在加载过程中试样内部裂纹数目及其分布等亦会发生明显变化,这同样会对波速产生不容忽视的影响;声发射信号接收探头应用黄油紧密地黏贴在试件上,否则会造成 *AE* 信号接收不完全或失真。

5 主要结论

T_3xj^4 砂岩强度较低,其应力应变全过程曲线具有屈服特征;T_3xj^4 砂岩声发射类型与 MOGI-I 相似,应力应变全过程曲线对应的 Kaiser 点、屈服点及峰值点处声发射信号明显;定义了轴向应力和轴向应变 Felicity 效应的比值,并得出随着循环加载水平的增加, Felicity 效应比值越来越小,反映了岩石损伤程度的增加。

参考文献:

[1] LAVROV A. The kaiser effect in rocks: principles and stress estimation techniques[J]. International Journal of rock mechanics & mining sciences,2003, 40:151-171

[2] LI C. E Nordlund Experimental verification of the Kaiser effect in rocks[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,1993,26(4):333-351

[3] 赵兴东,李元辉,袁瑞甫. 花岗岩 Kaiser 效应的实验验证与分析[J]. 东北大学学报(自然科学版),2007,28(2):254-257

[4] 杨明纬. 声发射检测[M]. 北京:机械工业出版社,2005

[5] PAPARGYRI S,COOKE R G,PAPARGYRI S A, et al. The acoustic behaviour of bricks in relation to their mechanical behaviour [J]. Construction and Building Materials,2001,15(7):361-369

[6] 谢强, 江小城, 余贤斌,等. 加载方向变化对细晶花岗岩凯塞效应的影响[J]. 煤炭学报,2010,35(10):1627-1632

[7] WANG H T,XIAN X F,YING G Z. A new method of determining geostresses by the acoustic emission Kaiser effect[J]. International Journal of Rock mechanics and Mining Sciences,2004,37:534-547

[8] 陈勉,张艳, 金衍,等. 加载速率对不同岩性岩石 Kaiser 效应影响的试验研究 . 岩石力学与工程学报,2009,28(增 1):2599-2604

[9] 刘建新. 岩石破裂声发射实验研究[D]. 中国地震局地球物理研究所,2002

[10] 纪洪广,李造鼎. 混凝土材料凯瑟效应和 Felicity 效应关系的实验研究[J]. 应用声学,1997,16(6):30-33

[11] 李楠,王恩元,赵恩来,等. 岩石循环加载和分级加载损伤破坏声发射实验研究[J]煤炭学报,2010,35(7):1099-1103

[12] BOYCE G M,MCCABE W M,KOEMER R M. Acoustic Emission Signatures of Various Rock Types in Unconfined Compression [C]. In:Drnevich V P,Gray R E,eds. Acoustic Emissions in Geotechnical Engineering Practice. ASTM STP, 1981,142-154

[13] 唐晓军. 循环载荷作用下岩石损伤演化规律研究[D]. 重庆:重庆大学,2008

[14] 葛修润,卢应发. 循环载荷作用下岩石疲劳破坏和不可逆变形问题的探讨[J]. 岩土工程学报,1992,14(3):56-60

[15] 郭臣业. 岩石和瓦斯突出机理及发生条件研究[D]. 重庆:重庆大学,2010

Study on Acoustic Emission Characteristics and Felicity Effect of T_3 xj^4 Sand Rock of Yongchuan Coal Mine

FENG Fa-wei [1], XIE Xiao-jia [1], GUO Chen-ye [2], YAO Wei-jing[3]

(1. Chongqing University Key Laboratory for Exploitation of Southwestern Resources and Environmental Disaster Control Engineering of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044;
2. Chongqing Energy Investment Group Science and Technology Co., Ltd, Chongqing 400060;
3. Technical Section, Chongqing Public Security Bureau, Chongqing 400030, China)

Abstract: Acoustic emission characteristics of damage and failure process of Yongchuan Coal Mine sand rock under uniaxial pressure and cyclic loading were studied, the results show that sand rock is similar to MOGI-I in acoustic emission characteristics, the acoustic emission signal was obvious in Kaiser point, yield point and peak point of the complete stress-strain process curve; The ratio of Felicity effect under different axial pressure and strain stage was smaller and smaller when the level of cyclic loading was higher and higher, which mean that the damage degree of the sand rock was higher and higher.

Key words: acoustic emission; Felicity Effect; cyclic loading

责任编辑:代小红
校　　对:田　静