

不同应力水平下红砂岩短时蠕变声发射特征

龚 函¹, 李长洪¹, 赵 奎²

(1. 北京科技大学 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 江西理工大学 资源与环境工程学院, 江西 赣州 341000)

摘 要: 为认识岩石蠕变过程中的声发射特征,进行了短时蠕变声发射试验,研究了红砂岩在不同应力水平下的声发射特征. 试验结果表明:在减速蠕变至等速蠕变过程中,声发射事件率与能率随时间的增大而减小,并且减小的幅度随着应力水平的增大而减小;当加载应力约为峰值应力的40%~60%时,声发射振幅随时间的增大而减小;当加载应力约为峰值应力的70%~80%时,声发射振幅保持相对稳定. 在加速蠕变阶段,声发射振幅发生跃迁的频率显著增大,而声发射事件率与能率在加速蠕变的中后期开始增大. 因此,可根据不同应力水平下的声发射特征,对红砂岩不同蠕变阶段进行辨别.

关 键 词: 红砂岩;分级加卸载;应力水平;短时蠕变;声发射

中图分类号: TD 315⁺.1

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2015)09-1347-06

Acoustic Emission Characteristics During Short-Time Creep Process of Red Sandstone Under Different Stress Level

GONG Cong¹, LI Chang-hong¹, ZHAO Kui²

(1. Key Laboratory of the Ministry of Education of China for High-Efficient Mining and Safety of Metal Mines, University of Science & Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. School of Resources & Environment Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China. Corresponding author: LI Chang-hong, E-mail: lch@ustb.edu.cn)

Abstract: The characteristics of acoustic emission (AE) of the red sandstone during short-time creep were studied under different stress level. The results show that the AE event ratios and energy ratios decrease with time increase during the period from decelerated creep to steady creep, and the corresponding reductions in amplitude decrease with the increasing stress level. The AE amplitude decreases and keeps relatively stable when the stress is about 40%~60% and 70%~80% of peak stress, respectively. The AE amplitude transition frequency increases obviously during the accelerated creep stage, and its event ratio and energy ratio begin to increase in the mid-late stage of accelerated creep. Therefore, the creep stage of red sandstone can be distinguished by the AE characteristics.

Key words: red sandstone; step loading and unloading; stress level; short-time creep; acoustic emission

流变特征是岩石材料的固有力学属性. 不仅软岩具有明显的流变特征,甚至坚硬的岩石如大理岩、花岗岩等也具有流变特征^[1-2]. 而在岩石流变效应中对岩石蠕变的研究最具重要性和工程实用价值. 室内试验结果表明:岩石蠕变特征受多方面因素的影响,即使是同一种岩石,在不同的环境

条件下,其蠕变性质也存在显著的差异. 文献[3-4]的研究表明:有效应力与应力差的一个微小变化,都可能引起整个蠕变历时或蠕变应变速率的巨大变化;文献[5-6]讨论了温度、水对花岗岩与砂岩蠕变性质的影响;文献[7]建立了泥岩弹性模量、内摩擦角、内聚力与时间的函数关

收稿日期: 2013-12-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51064010); 江西省科技厅科技支撑计划项目(20121122040027).

作者简介: 龚 函(1985-),男,江西南昌人,北京科技大学博士研究生;李长洪(1962-),男,安徽宿州人,北京科技大学教授,博士生导师;赵 奎(1969-),男,安徽六安人,江西理工大学教授.

系. 岩石在外界荷载作用下, 其变形及力学参数所表现出的时效特征, 其实质是岩石内部初始缺陷与新生裂纹不断演化的结果^[8-9]. 流变模型的建立是岩石流变研究的重要内容之一. 通过流变模型可形象地描述岩石的流变行为. 文献[10]建立了包含全部 4 种基本流变力学模型的统一流变模型, 并介绍了流变力学模型的辨识方法.

声发射监测作为无损监测的一种, 目前已得到了广泛的应用. 大量的室内试验讨论了不同岩石在破坏过程中的声发射特征^[11-12]. 文献[13]通过声发射定位技术, 得到花岗岩损伤破坏过程微破裂空间分布特征. 文献[14]研究发现花岗岩、大理岩、砂岩在临近破坏时, 声发射分形维数与声发射 b 值会快速下降至最低点. 然而, 关于岩石蠕变过程中声发射特征鲜有报道. 正如文献[15]所指出的: 声发射的产生与岩石的蠕变损伤有关, 但缺乏建立二者之间的量化关系, 如何更好地利用声发射信号对蠕变破坏行为进行分析研究, 采用声发射对岩石蠕变破坏进行监测和预报, 是当务之急.

本文对红砂岩进行了分级加卸载条件下短时蠕变声发射试验, 分析了各级加载过程中岩样的蠕变特征, 研究了在不同应力水平下岩样在减速蠕变、等速蠕变、加速蠕变三个阶段的声发射特征参数的变化特征.

1 试验条件与方案

1.1 试验系统

试验系统由中国科学院武汉岩土力学研究所研制的 RMT-150C 岩石力学试验系统、北京声华兴业科技有限公司研制的 SAEU2S 数字声发射系统和北戴河电气自动化研究所研制的 BZ2005C 静态应变仪组成. 其中 RMT-150C 岩石力学试验系统最大荷载为 1 000 kN, 机架刚度 5×10^6 N/mm. BZ2005C 静态应变仪灵敏度系数为 2.0, 量程为 $\pm 19\,999 \mu\epsilon$, 最小采样间隔 20 s.

1.2 试验方案

本次试验方式采用分级加卸载, 加载压力分别为 60, 80, 100, 120, 140 kN. 其中, 第一级荷载与第五级荷载分别约为试样单轴压缩条件下破坏荷载的 40% 与 90%. 试验中, 加载速率与卸载速率均为 $0.2 \text{ kN} \cdot \text{s}^{-1}$. 前期试验调试结果表明: 在前四级加载过程中, 减速蠕变阶段持续的时间约为 1 h. 在第五级加载过程中, 岩样通常在 2~3 h 内进入加速蠕变阶段, 并最终发生蠕变破坏. 因此,

拟定当荷载到达各级加载设定值后, 稳定压力的时间控制在 2~3 h. 试验中, 声发射采样长度设置为 2 048 Byte, 采样频率 1 000 kHz, 门槛值为 43 dB. 本次试验共制备 20 个标准试件. 岩样平均密度为 $2\,427 \text{ kg/m}^3$, 割线弹性模量 10.048 GPa, 泊松比为 0.288. 试验结果表明, 在单轴抗压试验中, 岩样表现为拉张破坏. 在短时蠕变试验中, 岩样表现为 X 剪切破坏. 岩样破坏形式见图 1.

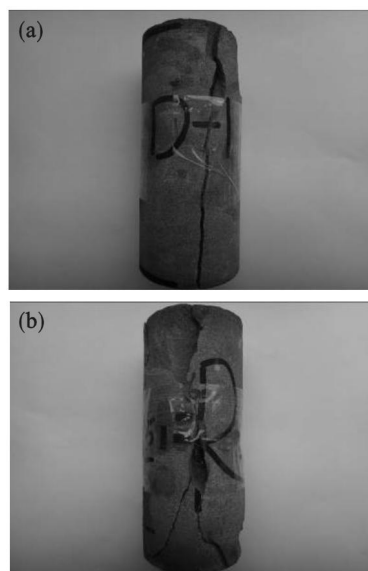


图 1 岩样破坏形式

Fig. 1 The failure modes of specimens

(a)—单轴压缩试验; (b)—短时蠕变试验.

2 结果分析

2.1 不同应力水平下蠕变特征

本文取试件在压缩状态下的应变值为正, 在拉伸状态下的应变值为负. 试件体积应变由轴向应变、横向应变计算得到:

$$\epsilon_v = \epsilon_z + 2\epsilon_h. \quad (1)$$

式中: ϵ_v 为体积应变; ϵ_z 为轴向应变; ϵ_h 为横向应变.

通常根据岩样应变速率的变化特征, 可将蠕变定性分为减速蠕变(I)、等速蠕变(II)与加速蠕变(III)三个阶段. 本文以横向应变速率与轴向应变速率同时分别稳定在某一数值时, 所对应的时间段定义为等速蠕变阶段. 等速蠕变阶段之前定义为减速蠕变, 等速蠕变阶段之后定义为加速蠕变. 图 2 显示在前四级加载中, 减速蠕变阶段所产生的应变占整个蠕变值的绝大部分. 在低应力水平, 横向应变不明显, 试件主要以轴向蠕变为主, 见图 2a~图 2b. 随着应力水平的提高, 轴向应变与横向应变越趋于明显, 并横向应变的增速更大, 以致试件在蠕变破坏时, 横向应变数值绝对值

大于轴向应变,见图2e。

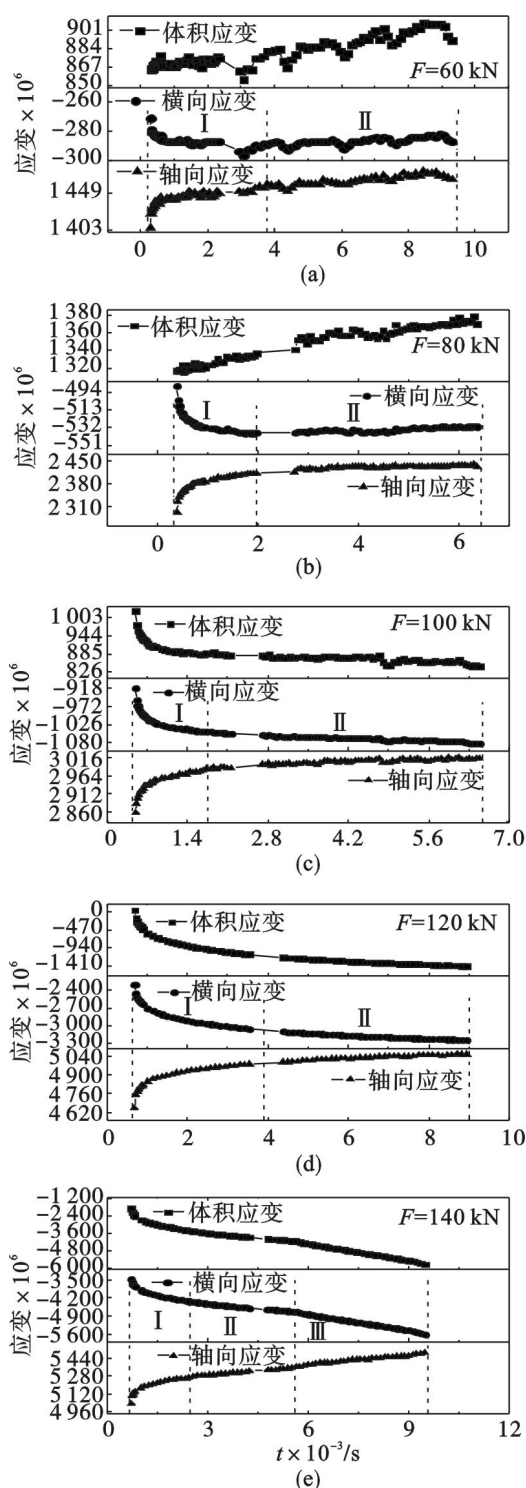


图2 7#试件蠕变曲线

Fig. 2 The creep curves of 7# specimen

- (a) —第一级加载; (b) —第二级加载;
(c) —第三级加载; (d) —第四级加载;
(e) —第五级加载。

在加载应力为 60 kN 与 80 kN 时,试件体积应变随着加载时间的增大而增大,试件体积受到压缩.在加载应力为 100 kN 时,试件体积应变随加载时间的增大而减小,但其数值为正.说明此时

试件被压缩的体积有所释放,但整个试件体积仍处于压缩的状态,此时所对应的应力区间约为其强度的 70% ~ 80%. 随着应力水平的进一步提高,体积应变随加载时间的增长而持续减小,体积应变数值为负,试件体积增大,见图 2d ~ 图 2e。

2.2 减(等)速蠕变声发射特征

图3~图4显示在相同应力水平下,声发射事件率与能率在减速蠕变至等速蠕变过程中,随着加载时间的增大而减小,并且在减速蠕变阶段

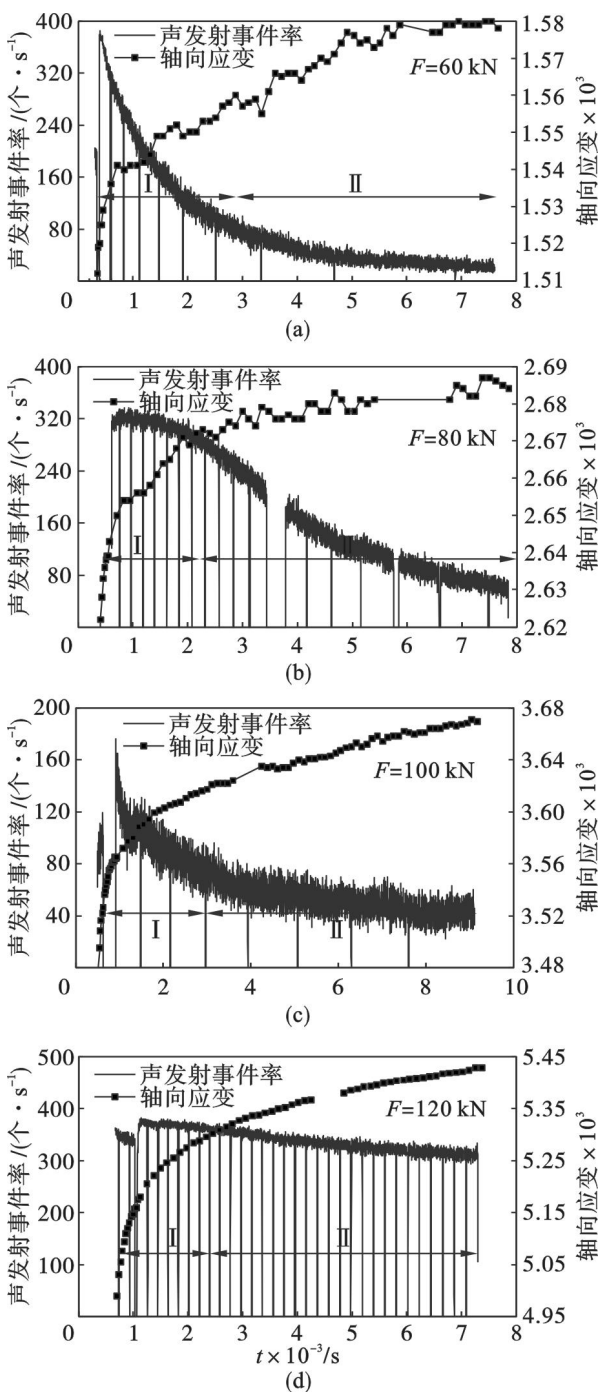


图3 11#试件减(等)速蠕变声发射事件率曲线

Fig. 3 The AE event ratio curves of 11# specimen during decelerating and steady creep process

- (a) —第一级加载; (b) —第二级加载;
(c) —第三级加载; (d) —第四级加载。

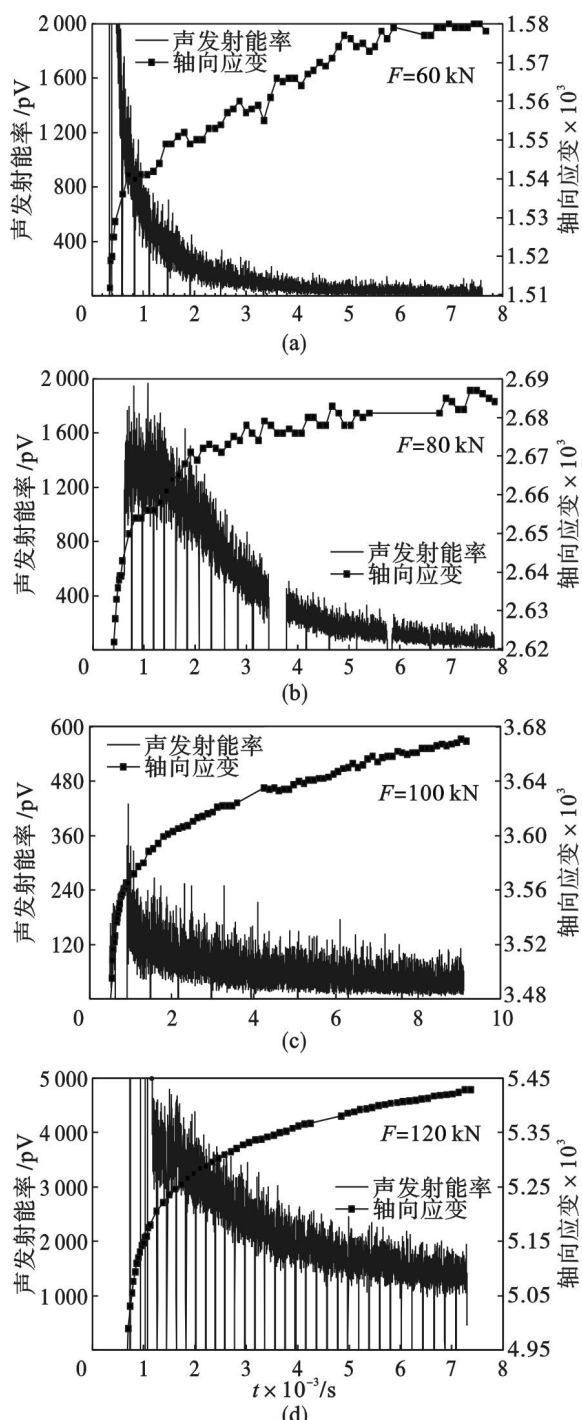


图 4 11#试件减(等)速蠕变声发射能率曲线

Fig. 4 The AE energy ratio curves of 11# specimen during decelerating and steady creep process

(a)—第一级加载; (b)—第二级加载;
(c)—第三级加载; (d)—第四级加载.

两者减小的速率大于等速蠕变阶段,见图 3a 与图 4a.

在不同应力水平下,声发射事件率与能率在数值大小与下降幅度上具有一定的差异.当加载压力为 60 kN 与 80 kN 时,声发射事件率与能率在减速蠕变阶段数值较大,而后两者数值快速大幅度的下降.图 3b 与图 4b 显示,声发射事件率由约 320 个/s 下降到 80 个/s 左右,声发射能率由近似 1 600 pV 下降至不足 200 pV.当加载压力为

100 kN 时,声发射事件率由最大 180 个/s 下降至 60 个/s,降幅约为 120 个/s,相应的能率由 360 pV 下降至不足 120 pV,见图 3c 与图 4c.当加载压力为 120 kN 时,声发射事件率与能率均值都有大幅度的增大.声发射事件率由 380 个/s 减小至 320 个/s,降幅约为 60 个/s.对应的能率由 4 800 pV 减小为 1 800 pV 左右,见图 3d 与图 4d.

图 5 显示在加载压力为 60 kN 与 80 kN 时,

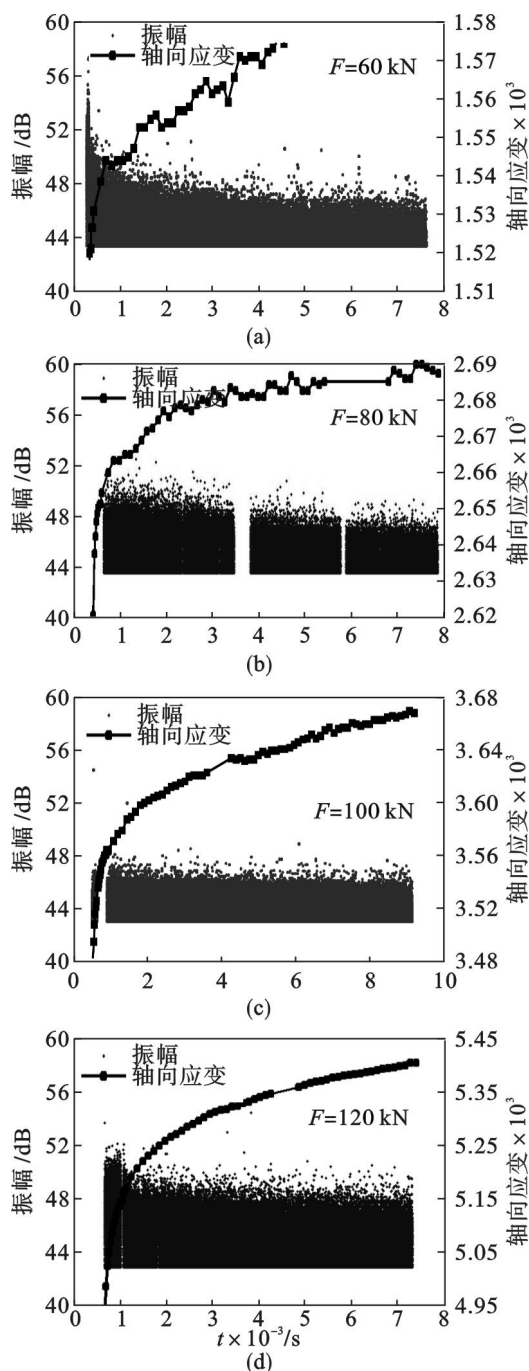


图 5 11#试件减(等)速蠕变声发射振幅曲线

Fig. 5 The AE amplitude curves of 11# specimen during decelerating and steady creep process

(a)—第一级加载; (b)—第二级加载;
(c)—第三级加载; (d)—第四级加载.

声发射振幅随时间的增长呈现减小的趋势,两次加载过程中振幅平均值分别为 43.71 dB 与 43.78 dB. 当加载压力为 100 kN 时,声发射振幅数值相对平稳,其平均值约为 43.59 dB. 当加载压力为 120 kN 时,声发射振幅数值在减速蠕变过程中数值相对较大. 而后,其数值表现的相对稳定,整个过程其平均值为 44.09 dB.

以上表明在低应力水平下,声发射事件率、能率、振幅数值在减速蠕变阶段较大,并且其数值在减速蠕变至等速蠕变整个过程中随着时间的增长而减小. 其中,声发射事件率与能率降低的幅度较大. 说明在此过程中,岩样内部大量的原始缺陷被压密,并且主要发生在减速蠕变阶段. 当加载压力为 100 kN 时,声发射事件率、能率数值及下降的幅度较小,声发射振幅相对平稳,说明此时微裂纹处于孕育状态之中. 当加载压力为 120 kN 时,声发射事件率、能率、振幅数值较前三次加载有不同

程度的增大,微裂纹进入平稳发展的状态中.

2.3 加速蠕变声发射特征

图 6~图 8 显示在加载压力为 140 kN 条件下,各试件蠕变破坏耗时不尽相同. 7[#]试件耗时约 3 h, 10[#]试件耗时不足 2 h, 12[#]试件耗时更小约 10 min. 声发射事件率与能率在加速蠕变的中后期均有显著增大. 7[#]试件在蠕变破坏前 200 s 内,声发射事件率由 140 个/s 增大为 220 个/s 左右;相应的能率由 360 pV 增大为 800 pV 左右,见图 6a 与图 6b.

对声发射振幅而言,其数值在整个加速蠕变阶段,出现大幅度跃迁的频率增大. 7[#], 12[#]试件在蠕变破坏前 1 000 s 和 100 s 声发射振幅就出现了大幅度跃迁的现象,见图 7c 与图 8c. 对比其在等速蠕变阶段的特征,可将声发射振幅数值由平稳发展向大幅度跃迁过渡,作为岩样进入加速蠕变阶段的标志.

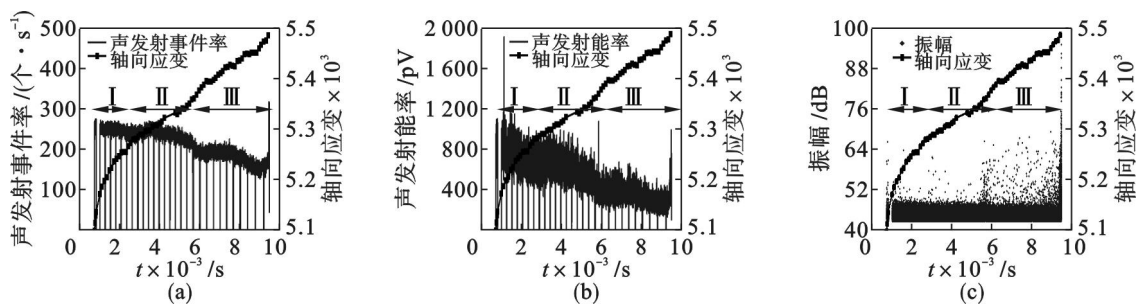


图 6 7[#]试件声发射事件率-能率-振幅曲线

Fig. 6 The AE event ratio-AE energy ratio-amplitude curves of 7[#] specimen

(a)—事件率; (b)—能率; (c)—振幅.

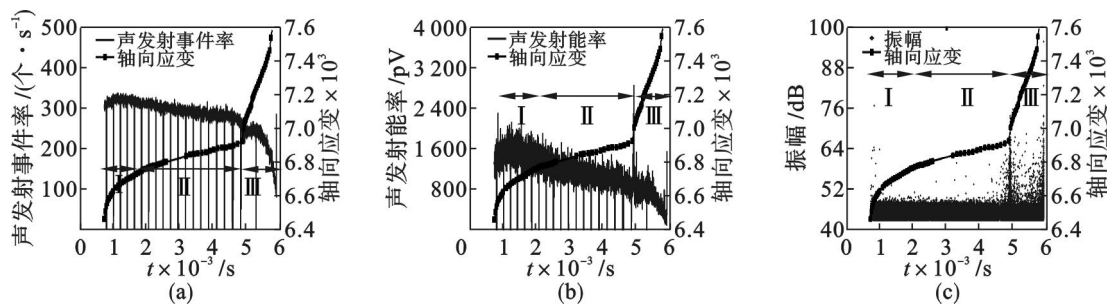


图 7 11[#]试件声发射事件率-能率-振幅曲线

Fig. 7 The AE event ratio-AE energy ratio-amplitude curves of 11[#] specimen

(a)—事件率; (b)—能率; (c)—振幅.

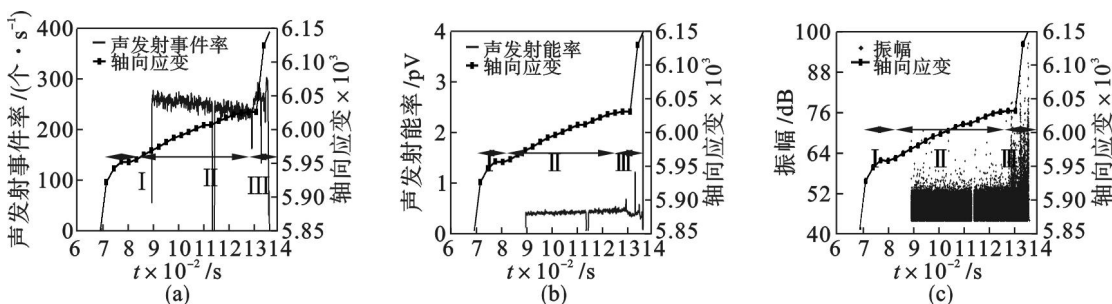


图 8 12[#]试件声发射事件率-能率-振幅曲线

Fig. 8 The AE event ratio-AE energy ratio-amplitude curves of 12[#] specimen

(a)—事件率; (b)—能率; (c)—振幅.

3 结 论

1) 试件在减速蠕变与等速蠕变过程中,声发射事件率与能率随时间的增大而减小,并且它们的大小及下降的幅度与应力水平有关。

2) 在低应力水平,试件体积受到压缩。在减速蠕变阶段,声发射事件率与能率相对较大,但它们的数值随蠕变时间的增大而大幅度的减小。在此过程中声发射振幅随时间的增大而减小。

3) 当加载压力为试件破坏压力 70% ~ 80% 时,试件被压缩的体积有所释放。在减速蠕变与等速蠕变过程中,声发射事件率、能率及下降的幅度相对较小,但声发射振幅相对平稳。

4) 当加载压力为试件破坏压力 90% 时,试件体积开始增大。在减速蠕变与等速蠕变阶段,声发射事件率与能率较大,但它们下降的幅度较小。而声发射振幅在等速蠕变阶段其基本稳定。在加速蠕变阶段,声发射振幅发生跃迁的频率明显增大。同时,声发射事件率与能率在此过程的中后期开始增大。

参考文献:

- [1] Gasc-Barbier M, Chanchole S, Bérest P. Creep behavior of brecciated clayey rock[J]. *Applied Clay Science*, 2004, 26(1/2/3/4): 449 - 458.
- [2] Heap M J, Baud P, Meredith P G, et al. Brittle creep in basalt and its application to time-dependent volcano deformation[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 307(1/2): 71 - 82.
- [3] Brantut N, Heap M J, Meredith P G, et al. Time-dependent cracking and brittle creep in crustal rocks: a review[J]. *Journal of Structural Geology*, 2013, 25: 17 - 43.
- [4] Fujii Y, Kiyama T, Ishijima Y, et al. Circumferential strain behavior during creep tests of brittle rocks[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1999, 36(3): 323 - 337.
- [5] Kranz R L, Harris W J, Carter N L. Static fatigue of granite at 200°C[J]. *Geophysical Research Letters*, 1982, 9(1): 1 - 4.
- [6] Baud P, Zhu W L, Wong T F. Failure mode and weakening effect of water on sandstone[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105(B7): 16371 - 16389.
- [7] 刘保国, 崔少东. 泥岩蠕变损伤试验研究[J]. 岩石力学与

工程学报, 2010, 29(10): 2127 - 2133.

- (Liu Bao-guo, Cui Shao-dong. Experimental study of creep damage of mudstone[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(10): 2127 - 2133.)
- [8] Heap M J, Baud P, Meredith P G, et al. Brittle creep in basalt and its application to time-dependent volcano deformation[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 307(1/2): 71 - 82.
- [9] 陈文玲, 赵法锁, 弓虎军. 三轴蠕变试验中云母石英片岩蠕变参数的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(sup 1): 2810 - 2816.
(Chen Wen-ling, Zhao Fa-suo, Gong Hu-jun. Study of creep parameters of mica-quartzose schist during triaxial creep test[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(sup 1): 2810 - 2816.)
- [10] 夏才初, 王晓东, 许崇帮, 等. 用统一流变力学模型理论辨识流变模型的方法和实例[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1594 - 1600.
(Xia Cai-chu, Wang Xiao-dong, Xu Chong-bang, et al. Method to identify rheological models by unified rheological model theory and case study[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(8): 1594 - 1600.)
- [11] Chmel A, Shcherbakov I. A comparative acoustic emission study of compression and impact fracture in granite[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2013, 64(4): 56 - 59.
- [12] Xie H P, Liu J F, Ju Y, et al. Fractal property of spatial distribution of acoustic emissions during the failure process of bedded rock salt[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2011, 48(8): 1344 - 1351.
- [13] Lei X L, Kusunose K, Satoh T, et al. The hierarchical rupture process of a fault: an experimental study[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2003, 137(1/2/3/4): 213 - 228.
- [14] 李元辉, 刘建坡, 赵兴东, 等. 岩石破裂过程中的声发射 b 值及分形特征研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(9): 2559 - 2563.
(Li Yuan-hui, Liu Jian-po, Zhao Xing-dong, et al. Study on b -value and fractal dimension of acoustic emission during rock failure process[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(9): 2559 - 2563.)
- [15] 孙钧. 岩石流变力学及其工程应用研究的若干进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 1081 - 1106.
(Sun Jun. Rock rheological mechanics and its advance in engineering applications[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(6): 1081 - 1106.)