

文章编号: 1000-7598 (2012) 06-1613-07

周期荷载作用下盐岩声发射特征试验研究

任 松¹, 白月明¹, 姜德义¹, 杨春和^{1,2}, 陈 结¹

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044, 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘 要: 通过改变恒幅荷载条件下的上限应力、下限应力以及加载速率等试验条件, 基于声发射技术对盐岩疲劳损伤特征进行试验研究。试验发现, 盐岩声发射信号出现在加载阶段和卸载初期, 而砂岩声发射信号一般集中出现在上限应力处; 盐岩疲劳寿命对下限的依赖程度大于砂岩; 随着上限应力的增大, 盐岩声发射振铃数增多。加载速率的提高会加速盐岩的疲劳破坏。通过对比声发射振铃数累计曲线和应变累计曲线, 发现两者有很好的对应关系, 说明二者在反映盐岩疲劳损伤时具有一致性。最后对盐岩进行 3 级变幅荷载试验, 发现第 3 级声发射振铃数比相同上、下限应力的恒幅荷载条件下多, 说明变幅荷载造成的盐岩损伤比恒幅荷载条件下严重。

关 键 词: 盐岩; 疲劳损伤; 循环载荷; 声发射

中图分类号: TU 459+3

文献标识码: A

Experimental research on acoustic emission property of salt rock under cyclic loading

REN Song¹, BAI Yue-ming¹, JIANG De-yi¹, YANG Chun-he^{1,2}, CHEN Jie¹

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: The fatigue damage characteristic of salt rock is researched based on the acoustic emission (AE) technology by changing the upper limit stress, lower limit stress and loading rate. It is found that the AE count increases slowly with the stress increasing, but for sandstone, the AE count is intensive around the upper limit stress. The fatigue life of salt rock is more dependent on lower limit stress than sandstone. The higher the upper limit stress is, the more the AE count is, and the higher the loading rate is, the damage becomes much earlier. It is found that the AE cumulative curves are in keeping with strain curves which show that they can both show the fatigue damage process of salt rock. In the end, the constant amplitude load is instead by three-level variable amplitude load. The AE count becomes much more in the third level which shows that the variable amplitude load makes more serious fatigue damage in the salt rock than the constant amplitude load does.

Key words: salt rock; fatigue damage; cyclic load; acoustic emission

1 引 言

盐岩矿床经过水溶开采后形成的溶腔被世界各国公认为石油、天然气储备理想场所。对于我国西气东输工程, 储气库的建设是其重要的配套工程, 是实现长距离输气的重要保证。建设地下储气库可以解决由于季节气候变化引起的用气不均衡问题、输气管道的意外故障问题等。但盐岩地下储气库在运行过程中, 由于受到长期注、采气过程的影响, 腔内围岩受到周期荷载作用。盐岩在周期荷载作用下晶粒之间可产生不协调变形和应力集中, 从而导

致疲劳损伤。疲劳损伤在前期只是岩石内部微裂纹的衍生与发展, 宏观上表现不明显。因此, 需要借助声发射方法来对循环载荷作用下盐岩内部损伤情况进行研究。

国内外很多学者对岩石的疲劳损伤和声发射特性进行了研究。谢强等^[1]对细晶花岗岩的声发射特征进行了试验研究, 证明了经多次循环加卸载后, 荷载如果未超过先期最大应力, 声发射累计能量增加缓慢, 但声发射事件数却不一定减少。许江等^[2-4]对循环载荷作用下砂岩声发射规律开展了大量试验研究, 提出了砂岩疲劳损伤的 4 阶段模型。万志军

收稿日期: 2011-11-09

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)(No. 2009CB724606); 国家创新研究群体基金(No. 50921063); 国家自然科学基金资助项目(No. 51074198); 中央高校基本科研业务费(No. CDJZR10240017); 重庆市科委自然科学基金计划资助(No. 2010BB6044)。

第一作者简介: 任松, 男, 1975 年生, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程力学方面的教学和科研工作。E-mail: rs_rwx@cqu.edu.cn

等^[5]研究了岩石不同加载速率作用下的声发射规律特征,发现加载速率通过影响裂纹扩展来影响声发射率。李楠等^[6]通过循环加载和分级加载证明了岩石在弹性阶段后期和破坏阶段,岩石具有明显的 Felicity 效应。尹贤刚等^[7]对岩石破坏声发射平静期及其分形特征进行了试验研究,发现岩石声发射平静期是客观存在的,对于塑性变形阶段不明显的岩石不容易观察到,在其破坏峰值应力前,岩样不会出现应力增加缓慢而相对应应变增加较快的过程。徐速超等^[8]通过单轴循环加卸载试验对砂卡岩声发射特性进行了研究,证明了砂卡岩在卸载阶段仍然有大量声发射信号产生。曹树刚等^[9]对突出煤体变形声发射特性进行了研究,建议用声发射振铃事件比来作为声发射特征参数之一应用于工程实际。肖建清^[10]提出了应用倒 S 型曲线来预测岩石的疲劳损伤的理论。张茹等^[11]对单轴多级加载岩石破坏声发射特性进行了研究,得到了每级荷载稳压时 AE 事件率、能率明显降低,AE 事件数基本稳定或增加平缓,随着时间的延长和轴向荷载的增加,AE 事件率增加的结论。姜永东等^[12]对岩石应力-应变全过程的声发射及分形与混沌特征进行了试验研究,证明了岩石声发射事件数的演化过程可以用触发—生长—触发的链式生长模型来描述,微裂纹的演化可用 Logistic 方程来描述。赵克烈^[13]对地下盐岩储气库进行了研究,提出了储气库的安全性应该考虑盐岩疲劳损伤的命题。

上述研究成果对岩石的疲劳损伤和声发射特征研究具有重要的推进作用,但还需要进一步研究。盐岩属于软岩,具有塑性较强的特点,如何准确分析盐岩在循环荷载作用下的疲劳损伤特性需要进一步探讨。因此,本文应用声发射技术来探究盐岩的疲劳损伤特性,这对于盐岩地下储气库的安全运行具有实际意义。

2 试验条件及方法

2.1 试验设备及条件

试验装置主要由循环加、卸载系统和声发射系统组成,主要目的是研究盐岩在循环荷载作用下的声发射特征,进而探究盐岩的疲劳损伤特性。加、卸载试验机采用日本岛津 AG-I250KN 型精密电子万能材料试验机,具有加载方式多样、测试精度高、性能稳定等优点。声发射测试分析系统采用美国声学物理公司 PAC(physical acoustic corporation) 生产的 12 CHs 声发射测试分析系统。本试验中设定声发射测试分析系统的主放为 40 dB,门槛值为 45 dB,

传感器谐振频率为 20~400 kHz,采样频率为 1×10^6 次/s。为了减少盐岩对机器的腐蚀,在压头与机器之间采用保鲜膜进行保护。为了保证探头与试件紧密接触,在声发射探头与试件之间采用黄油进行耦合,并用橡皮筋将探头固定在试件相对的两个断面的中部,具体布置方式如图 1 所示。为了减少试件端部与压头之间的噪声影响,在端部抹少量黄油。

本试验所用盐岩试样均取自巴基斯坦喜马拉雅山区天然盐岩,埋深较大。其中 NaCl 含量很高,基本在 90%以上,另外还有少量的 K_2SO_3 和泥质成分。



图 1 加载试验机和探头布置

Fig.1 Loading test instrument and probe layout

2.2 试验方法设计

为尽可能降低因天然岩石试件个体差异引起的试验结果的离散性,选取一些含杂质成分基本相同和没有明显裂纹的试件。将其加工成 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的长方体试件,加工试件端面平整度控制在 $\pm 0.02 \text{ mm}$ 以内。加工完成的试件样品如图 2 所示。



图 2 加工完成的盐岩试件样品

Fig.2 Manufactured salt rock specimens

影响岩石疲劳破坏特征的因素很多,主要包括循环荷载的上限应力 $\sigma_{\max}$ 和下限应力 $\sigma_{\min}$, 应力幅值 $\frac{1}{2}(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})$, 平均应力 $\frac{1}{2}(\sigma_{\max} + \sigma_{\min})$ 和加载速率等^[14]。

为了探求不同试验条件下盐岩的声发射特性,将盐岩试件分成 8 组分别进行不同条件下的循环加卸载试验。

(1) 由于试验机的应变速率限制以及盐岩试件的塑性特征, 加载速率选择较小值: 1.8 kN/min, 进行大量的单轴静载荷试验, 从而确定盐岩的平均单轴抗压强度。

(2) 进行恒幅荷载条件下的声发射特性试验研究, 具体试验工况如下:

①选取不同上限 4~32、4~24 MPa, 相同加、卸载速率为 360 kN/min 的两组试件进行声发射特性对比研究。

②选取不同下限: 4~32、12~32 MPa, 相同加卸载速率为 360 kN/min 的两组试件进行声发射特性对比研究。

③选取相同应力幅值 4~24 MPa、不同加、卸载速率 360、180 kN/min 的两组试件进行声发射特性对比研究。

(3) 进行变幅加载试验研究: 加卸载速率为 360 kN/min, 先在弹性极限附近 16 MPa 处进行 100 个循环, 然后将上限提高到 24 MPa 加载 100 循环, 最后将上限提升为 32 MPa, 研究每个阶段的声发射特性。

3 试验结果及分析

盐岩试件在经过仔细筛选后抗压强度值较为接近, 很大程度地降低了试件的离散性。经过大量的单轴静载荷试验得到的盐岩平均抗压强度为 34.4 MPa。

3.1 不同上限循环荷载下盐岩的声发射特性对比

图 3 为盐岩单轴和循环荷载作用下的应力-应变曲线, 图 4 为不同上限声发射、应力-时间对应图。从图中可以看出, 在初次加载应力接近上限时, 加载速率受到试验机应变速率和峰值精度的控制, 实际加载速率明显变缓, 并没有达到预定的加载速率, 而是接近静载试验条件下的加载速率, 但在循环阶段加卸载速率是基本稳定的。

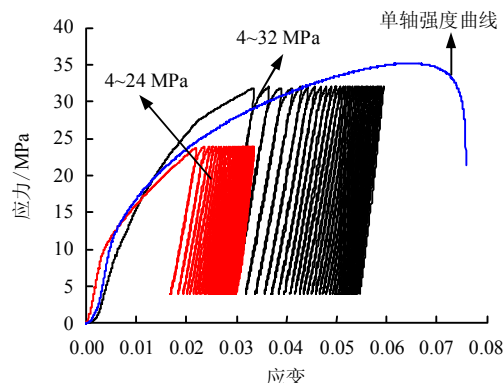
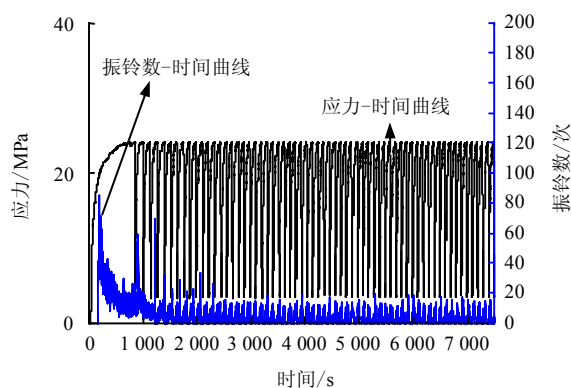
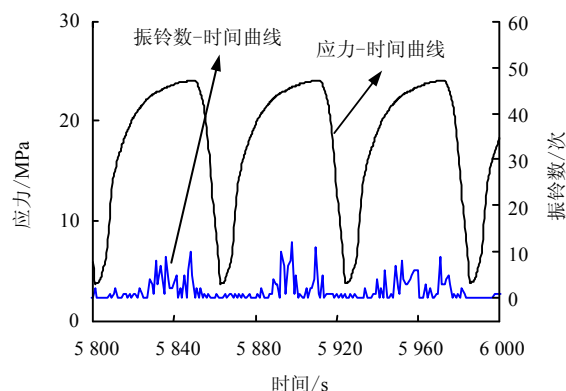


图 3 单轴试验曲线与不同上限循环试验曲线

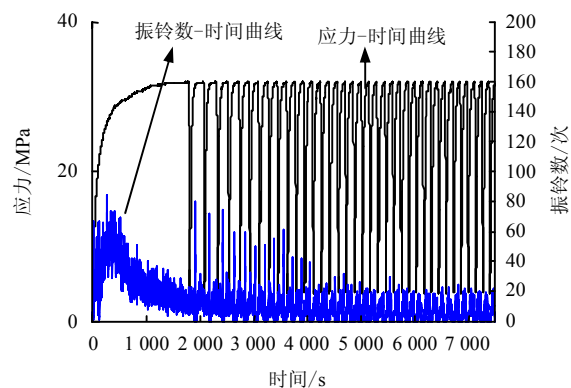
Fig.3 Uniaxial experiment curve and the different upper limit cyclic loading experiment curves



(a)



(b) 4~24 MPa 条件下盐岩的声发射特征图和局部放大图



(c) 4~32 MPa 条件下盐岩的声发射特征

图 4 不同上限应力声发射特征

Fig.4 The AE characteristics of different upper limit stresses

由图 4 可知, 声发射振铃数与循环荷载下的应力变化有较好的对应关系, 其声发射规律明显。声发射振铃数随着初次加载的应力增大而明显增多, 初次加载达到弹性极限时声发射振铃数达到最大值。这是由于在初次加载弹性阶段, 声发射信号主要来自于裂纹闭合产生的弹性波^[15]。裂纹闭合产生的弹性波的能量相对较小, 且盐岩本身结构致密, 初始微裂纹极少, 所以在弹性压缩阶段声发射振铃数较少, 随着加载应力到达弹性极限时, 盐岩内部

初始微裂纹基本闭合,开始产生新生微裂纹以及初始微裂纹由于应力集中开始扩展,产生不可恢复的塑性变形,这时产生的声发射振铃数突然增大。而在超过弹性极限阶段以后,由于加载应力上升速度变慢,内部微裂纹能量增加变慢,微裂纹的衍生与扩展逐渐趋于稳定,单位时间的声发射振铃数逐渐减少。与砂岩相比,盐岩在相同上限应力比条件下声发射信号较少,主要是由于盐岩内部材质较均匀,杂质和缺陷含量较少,所以每一循环产生的损伤较小。

从局部放大图中可以看到,每个应力循环都会产生声发射信号,并且随着应力增加声发射振铃数逐渐增大,在循环载荷的上限应力附近达到最大,并且在卸荷初期阶段仍然有声发射信号产生,但下降很快。这与砂岩声发射特性^[2]有很大差别,砂岩声发射信号主要集中在上限应力附近,低于上限应力处声发射信号极少。说明盐岩在循环加卸载期间损伤出现较早,并且不具有砂岩类岩石的应力记忆效应。产生这种现象的原因主要是盐岩很强的塑性特征。

由表1可知,随着上限应力的增大,每个循环产生的声发射振铃数增多,这是因为随着上限应力的增大,盐岩在每个循环产生较多的新裂纹,并且原有裂纹扩展加剧^[16]。

表1 不同上限应力下声发射振铃数

Table 1 AE counts under different upper limit stresses

上限应力/MPa	稳定期最大振铃数/次
32	24
24	18

3.2 不同下限循环载荷下盐岩的声发射特性对比

盐岩在不同下限循环载荷下的声发射特征如图6所示。结合表2可以看出,在下限应力改变时,盐岩在稳定区声发射振铃数基本不变。但盐岩在逐渐加载阶段和卸载初期都会产生声发射信号,且每个循环周期产生的声发射振铃总数与应力幅度有明显的正相关关系。随着下限应力的降低,应力幅值变大,每个循环产生的损伤增加。因此,盐岩疲劳寿命对下限的依赖程度会明显大于砂岩。

3.3 不同速率循环荷载下盐岩的声发射特性对比

盐岩在不同加载速率下的声发射特征如图7所示。结合表3可以看出,加载速率改变时,声发射振铃数基本不变,但声发射率却相差很大,加载速率越大,声发射率越大,盐岩在单位时间内产生的疲劳损伤越明显,这与砂岩声发射特征具有一致

性^[2]。由于循环载荷作用下盐岩内部晶粒间的裂纹处于持续张开与闭合的循环过程,加载速率增大时,内部裂纹还来不及完全闭合就又持续扩展,从而降低了裂纹扩展所需要的能量,裂纹扩展加速,声发射率明显提高。因此,加载速率的提高会加速盐岩的疲劳破坏。

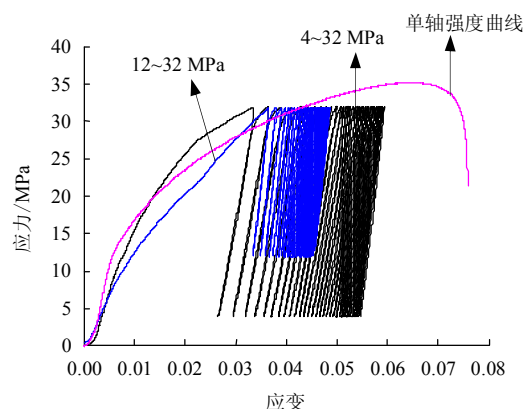
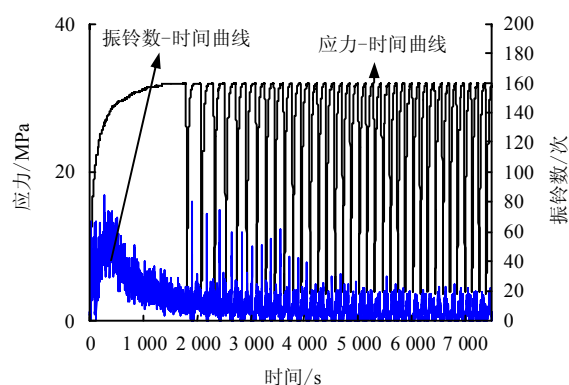
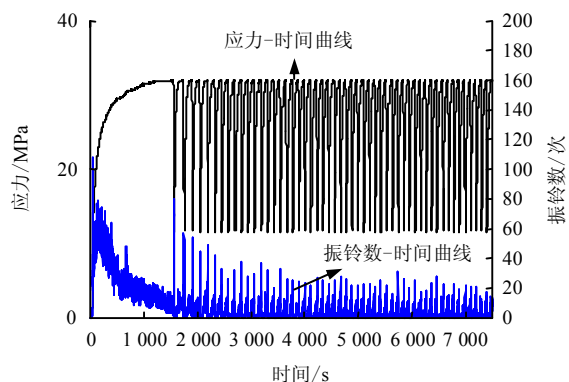


图5 单轴试验曲线与不同下限循环试验曲线

Fig.5 Uniaxial experiment curve and the different lower limit cycling loading experiment curves



(a) 4~32 MPa 条件下盐岩的声发射特征



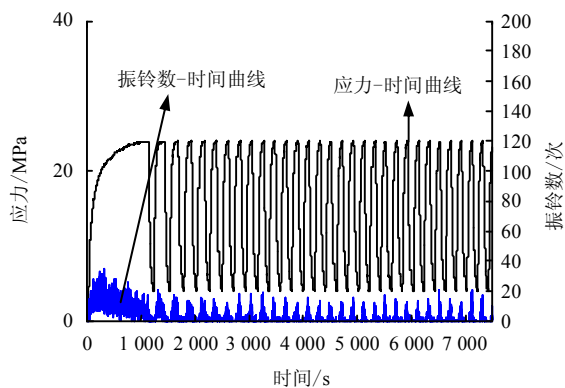
(b) 12~32 MPa 条件下盐岩的声发射特征

图6 不同下限应力声发射特征

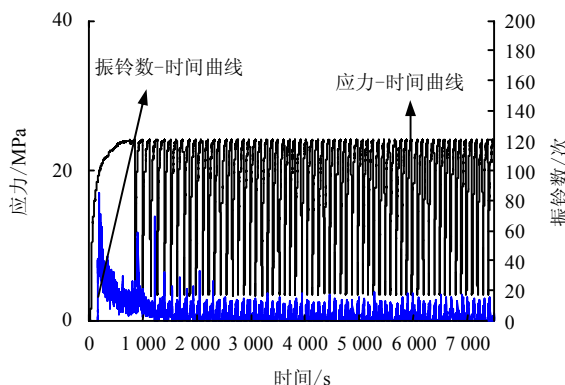
Fig.6 AE characteristics of different lower limit stresses

表 2 不同下限应力下声发射振铃数
Table 2 AE counts under different lower limit stresses

下限应力/MPa	稳定期最大振铃数/次
4	24
12	25



(a) 加载速率为 180 kN/min



(b) 加载速率为 360 kN/min

图 7 不同速率加卸载作用下声发射特征
Fig.7 AE characteristics of different loading rates

加载速率 (kN/min)	稳定期最大振铃数 /次	声发射率 /s ⁻¹
180	18	1.18
360	18	2.05

4 循环载荷下盐岩声发射特性与应变特性对比

岩石应变一般与岩石内部损伤存在一定的联系, 岩石的疲劳破坏是由于岩石达到了其应变疲劳极限所致^[14]。因此, 有必要研究盐岩在循环加卸载过程中应变特征与声发射特征的关联性。图 8 是一组盐岩试件在疲劳试验条件下的累计应变和累计声发射振铃数随时间变化的对比图。从图中可以看出, 盐岩的声发射累计曲线上包络线与盐岩应变累计曲

线具有很好的对应性。曲线第 1 阶段为减速损伤阶段, 应变率和声发射率增加逐渐变缓; 第 2 阶段为匀速损伤阶段, 盐岩应变率和声发射率趋于平稳。这是由于加载初期盐岩内部应力集中程度较大, 从而导致微裂纹的产生和扩展较快, 产生较大的塑性变形。随着循环次数的增加, 盐岩内部应力集中程度逐渐趋于稳定, 导致裂纹扩展缓慢。从图 8 可以看出, 声发射累计曲线与应变累计曲线有很好的对应关系, 说明在反映盐岩疲劳损伤时, 二者具有一致性。

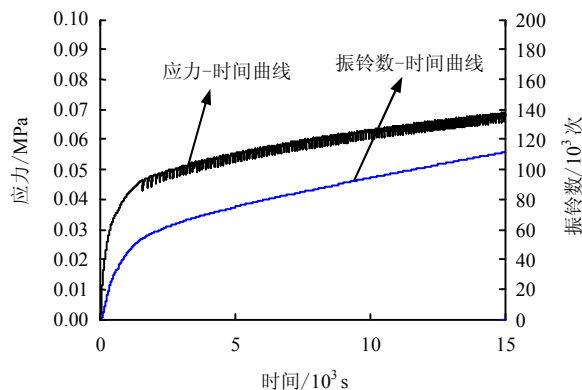


图 8 声发射累计曲线与应变累积曲线
Fig.8 AE cumulative curves and strain cumulative curves

5 基于声发射特征的分级加载试验研究

前两节研究了盐岩在恒幅荷载作用下的声发射振铃数特征, 为了更加充分地了解其内部损伤形式, 本节通过变幅荷载来对盐岩试件声发射特征进行试验研究。加卸载方式: 加卸载速率为 360 kN/min, 先在应力上限为 16 MPa 处进行 100 个循环, 然后将上限提高到 24 MPa 加载 100 循环, 最后将上限提升为 32 MPa 进行循环加卸载试验。分级加载试验盐岩声发射特性如图 9 所示, 本试验的主要目的是观察变幅荷载循环作用下盐岩的损伤情况, 从低应力的最后 10 个循环开始记录。各加载级别的声发射振铃数如表 4 所示, 从表可以看出, 在第 1 级加、卸载过程中, 盐岩在声发射稳定阶段基本没有声发射信号产生; 第 2 级加卸载过程中, 声发射水平明显增高, 并且稳定阶段声发射振铃数与恒幅荷载下声发射振铃数基本相同。这说明第 1 级循环加、卸载过程对盐岩试件造成的损伤有限。第 3 级加、卸载过程中, 盐岩的声发射平稳期振铃数比恒幅加卸载时增大了几倍, 这是由于第 2 级加载时造成的盐岩内部损伤量较大, 导致盐岩试件内部结构发生了

变化。

对比变幅荷载和恒幅荷载下盐岩声发射振铃数特征曲线可以看出,变幅荷载造成的盐岩疲劳损伤要大于恒幅荷载。在工程实际中盐岩常常受到变幅荷载甚至随机荷载的作用,因此,需要注意疲劳损伤造成的危害。

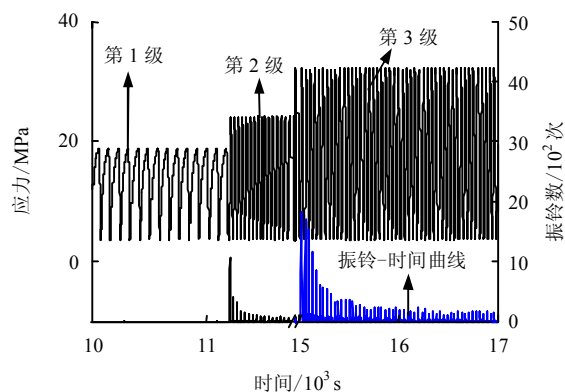


图9 分级循环加载声发射特征

Fig.9 AE characteristics under multi-stage cyclic loading

表4 变幅荷载下声发射振铃数

Table 4 AE counts under variable cyclic loads

加载级别	稳定期最大振铃数
第1级	2
第2级	20
第3级	180

6 结 论

(1) 盐岩在循环荷载作用下,声发射振铃数随着上限应力的增大而增加。并且在加载阶段和卸载初期会产生较明显的声发射现象,而砂岩声发射信号主要集中在应力峰值处,说明盐岩在循环加、卸载期间损伤出现较早,并且不具有砂岩类岩石的应力记忆效应。

(2) 在下限应力改变时盐岩声发射振铃数基本不变,但在逐渐加载和卸载时却会产生明显的声发射信号,每个循环周期产生的声发射振铃总数与应力幅度有明显的正相关关系。盐岩疲劳寿命对下限的依赖程度要明显大于砂岩。

(3) 加载速率改变时,声发射振铃数基本不变,但声发射率却相差很大,加载速率越大,声发射率越大,盐岩在单位时间内产生的疲劳损伤越明显,加载速率地提高会加速盐岩的疲劳破坏。

(4) 循环加卸载作用下盐岩声发射累计曲线与应变累计曲线有很好的对应关系,说明在反映盐岩疲劳损伤时,二者具有一致性。

(5) 变幅荷载作用下,盐岩试件受到突变应力的影响,内部结构会发生变化,导致盐岩试件产生的损伤比恒幅荷载条件下要大。

参 考 文 献

- [1] 谢强, CARLOS D da G, 余贤斌. 细晶花岗岩的声发射特征试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(5): 745—749.
XIE Qiang, CARLOS D da G, YU Xian-bin. Acoustic emission behaviors of aplite granite[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(5): 745—749.
- [2] 许江, 唐晓军, 李树春, 等. 周期性循环荷载作用下岩石声发射规律试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1241—1246.
XU Jiang, TANG Xiao-jun, LI Shu-chun, et al. Experimental research on acoustic emission rules of rock under cyclic loading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(5): 1241—1246.
- [3] 许江, 唐晓军, 李树春, 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.
XU Jiang, TANG Xiao-jun, LI Shu-chun, et al. Space-time evolution rules study of acoustic emission locations in rock under cyclic loading[J]. **Journal of Chongqing University(Natural Science Edition)** 2008, 31(6): 672—676.
- [4] 许江, 唐晓军, 姜永东, 等. 循环荷载作用时不同条件下砂岩的声发射特征实验研究[J]. 中国科技论文在线, 2008, 3(7): 511—516.
XU Jiang, TANG Xiao-jun, JIANG Yong-Dong, et al. Experimental research on the acoustic emission characteristic of sandstone under the different experimental conditions of cyclic loading[J]. **Sciencepaper Online**, 2008, 3(7): 511—516.
- [5] 万志军, 李学华, 刘长友, 等. 加载速率对岩石声发射活动的影响[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2001, 20(4): 469—471.
WAN Zhi-jun, LI Xue-hua, LIU Chang-you, et al. Influence of loading velocity on the rock's acoustic emission activity[J]. **Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition)**, 2001, 20(4): 469—471.
- [6] 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.
LI Nan, WANG En-yuan, ZHAO En-lai, et al. Experiment on acoustic emission of rock damage and fracture under cyclic loading and multi-stage loading[J]. **Journal of China Coal Society**, 2010, 35(7): 1099—1103.

- [7] 尹贤刚, 李庶林, 唐海燕, 等. 岩石破坏声发射平静期及其分形特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(z2): 3383—3390.
YIN Xian-gang, LI Shu-lin, TANG Hai-yan, et al. Study on quiet period and its fractal characteristics of rock failure acoustic emission[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(z2): 3383—3390.
- [8] 徐速超, 冯夏庭, 陈炳瑞. 矽卡岩单轴循环加卸载试验及声发射特性研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 2929—2934.
XU Su-chao, FENG Xia-ting, CHEN Bing-rui. Experimental study of skarn under uniaxial cyclic loading and unloading test and acoustic emission characteristics[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(10): 2929—2934.
- [9] 曹树刚, 刘延保, 张立强, 等. 突出煤体变形破坏声发射特征的综合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(z1): 2794—2799.
CAO Shu-gang, LIU Yan-bao, ZHANG Li-qiang, et al. Study on characteristics of acoustic emission in outburst coal[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(z1): 2794—2799.
- [10] 肖建清. 循环荷载作用下岩石疲劳特性的理论与实验研究[博士学位论文 D]. 长沙: 中南大学, 2009.
- [11] 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.
ZHANG Ru, XIE He-ping, LIU Jian-feng, et al. Experimental study on acoustic emission characteristics of rock failure under uniaxial multilevel loadings[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(12): 2584—2588.
- [12] 姜永东, 鲜学福, 尹光志, 等. 岩石应力应变全过程的声发射及分形与混沌特征[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2413—2418.
JIANG Yong-dong, XIAN Xue-fu, YIN Guang-zhi, et al. Acoustic emission, fractal and chaos characters in rock stress-strain procedure[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(8): 2413—2418.
- [13] 赵克烈. 注采气过程中地下盐岩储气库可用性研究[博士学位论文 D]. 武汉: 武汉岩土力学研究所, 2009.
- [14] SURESH S. 材料的疲劳[M]. 王中光译. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [15] 耿荣生, 沈功田, 刘时风, 等. 声发射信号处理和分析技术[J]. 无损检测, 2002, 24(1): 23—28.
GENG Rong-sheng, SHEN Gong-tian, LIU Shi-feng, et al. An overview on the development of acoustic emission signal processing and analysis technique[J]. **Nondestructive Testing**, 2002, 24(1): 23—28.
- [16] HAKAN A. Percolation model for dilatancy- induced permeability of the excavation damaged zone in rock salt[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2008, 46(2009): 716—724.