

文章编号:1001-4888(2015)03-0348-07

不同应力路径下盐岩破坏声发射时序特征研究^{*}

王伟超^{1,2}, 刘希亮¹, 张五交³, 王利¹

(1. 河南理工大学 土木工程学院, 河南焦作 454003; 2. 河南省高等学校 深部矿井建设重点学科开放实验室, 河南焦作 454003;
3. 中国平煤神马集团 许昌首山焦化有限责任公司, 河南许昌 461700)

摘要: 利用 RMT-150B 岩石力学多功能系统和声发射监测系统, 对不同应力路径下的盐岩破坏过程进行试验研究。在试验结果基础上, 分析了盐岩常规单轴加载、分级加卸载和多级加载过程中的声发射时序特征和变形特征。试验表明: 盐岩常规单轴加载变形表现明显的阶段性特征, 声发射信号阶段性特征也比较明显; 分级加卸载试验中, 存在比较明显的记忆效应, 在低应力水平有较明显的声发射 Kaiser 效应, 而在 70% 峰值应力卸载再加载时, 则出现 Felicity 效应; 多级加载试验表明, 在低应力水平稳压对盐岩造成的损伤不大, 很少有新生裂纹; 而在高应力水平稳压时, 会有大量由新生微裂纹和裂纹扩展产生的声发射事件。

关键词: 岩石力学; 盐岩; 声发射; 加卸载

中图分类号: TU45

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-14-233

0 引言

能源储备是国民经济和社会发展的重要物质基础, 是国家能源安全的重要保障。盐岩由于具有良好的密封性、低渗透率, 成为能源战略地下储气(油)库的理想介质。然而, 盐岩地下储库在不同注采压力下, 处于不同的应力状态, 从细观角度掌握盐岩在不同应力路径下的损伤及破坏过程事关储库的安全和稳定运行, 因此, 研究盐岩在不同应力路径下的声发射破坏过程具有重大的工程意义。

近些年, 国内外科研工作者^[1-7]在盐岩力学性能、蠕变本构模型及声发射方面进行了诸多试验研究, 取得不少科研成果。翟松韬^[8]等对喜马拉雅山盐岩进行研究, 开展不同温度下单轴压缩试验, 获取温度、应力耦合作用下的盐岩的力学特征和破坏形态, 并深入分析了温度对盐岩破坏规律的影响。刘建锋^[9]等对三轴应力状态下盐岩强度进行研究, 对比分析了工程应变和对数应变的适用条件, 研究了盐岩大变形特性及对不同围压条件下的轴向应力修正。陈结^[10]等利用声发射技术研究不同温度卤水作用后的盐岩单轴压缩破坏过程, 发现受卤水浸泡后盐岩的声发射累计计数随卤水温度的升高而略有增加。刘伟^[11]等从细观和宏观两方面对盐岩地下储库界面的变形与破损特性进行研究, 建立了基于复合岩体理论的层状盐岩交接界面的应力表达式, 分析认为硬夹层对盐岩具有约束锚固作用, 且层状交界面处易产生应力集中, 诱发储库围岩裂纹扩展。姜德义^[12]等利用声发射技术对不同加载应变率下的盐岩损伤演化特征及声发射特征进行研究, 并且建立基于声发射累计振铃计数的损伤演化方程。任松^[13]等对周期荷载作用下盐岩的声发射特征进行试验研究, 发现声发射振铃数累计曲线和应变累计曲线有很好的对应关系。

^{*} 收稿日期: 2014-11-12; 修回日期: 2014-12-30

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目资助计划(15A410004); 河南省高校深部矿井建设重点学科开放实验室开放基金(2014KF-06)资助

通讯作者: 王伟超(1979—), 男, 在读博士, 讲师。主要从事岩石力学研究。

以上研究成果对于盐岩储库溶腔的建造具有借鉴意义,但是盐岩储库在注采压力下因损伤而产生声发射究竟有哪些深层次的规律,仍然需要进一步研究。本文利用声发射技术通过对巴基斯坦深部盐岩进行不同应力路径下的单轴试验,研究了在常规单轴加载条件下、分级加卸载条件下和多级加载条件下盐岩的力学特征参量、声发射特征参量(振铃计数、撞击数、能量等)的时序特征,通过分析盐岩不同路径下变形及破坏特征与声发射特征之间的内在规律,以期工程实践提供参考和借鉴。

1 试验条件及方法

1.1 试验条件

试验的主要目的是分析不同加载路径下的单轴压缩盐岩破坏规律与声发射相关参数的变化规律。试验设备为:中科院武汉岩土所研制的 RMT-150B 岩石力学试验系统,可实时记录荷载和变形;北京某科技公司生产的 DS2 系列全信息声发射信号分析仪,可实时监测、显示声发射事件振铃计数、能量等参数,并进行存储回放。本次试验前置放大器固定增益为 40dB,设置双向门限 100mV,声发射采样速率为 10MHz,传感器中心频率 150kHz,整个试验过程采用连续存储。将传感器直接固定在试件中部,试验中保持加载过程和声发射监测及摄像同步,所有试验均在室温条件下进行。试验装置如图 1 所示。

本文试验所用试样取自巴基斯坦,为深部、结构致密、高纯度盐岩,其中可溶物含量为 95% 以上(可溶物主要为 NaCl, Na₂SO₄),试样为 50mm×50mm×100mm 的长方体。由于盐岩属软岩,易碎且遇水易溶解,因此,盐岩试样通过干式锯磨法进行标准试样的切割,试样加工精度满足国际岩石力学学会实验室与现场试验标准化委员会制定的《岩石力学试验规程》要求。本次试验试件具体尺寸见表 1。为保证传感器与试件的耦合效果,接触位置涂抹专用耦合剂,并用电胶把传感器固定在试件侧面。为消除压头对声发射事件的影响,在试样和压头之间应采用橡胶材料进行简单隔离。



图 1 试验装置

Fig. 1 Test equipment

表 1 不同加载路径下试验结果

Tab. 1 Experimental results under different loadings

编号	尺寸(mm)	加载方式	峰值应变(%)	极限强度(MPa)
BJ1-3	50.4×50.8×99.7	常规单轴	0.058	35.29
BJ1-4	50.0×49.9×98.6	常规单轴	0.058	36.32
BJ2-1	50.3×48.7×99.8	分级加卸载	0.061	40.54
BJ2-2	50.4×49.4×100.6	分级加卸载	0.072	43.55
BJ2-3	50.3×50.0×100.0	分级加卸载	0.055	41.23
BJ2-4	50.0×50.2×102.1	分级加卸载	0.043	34.32
BJ3-1	50.1×50.0×100.0	多级加载	0.040	36.67
BJ3-2	49.5×50.1×100.0	多级加载	0.034	33.99
BJ3-3	50.4×51.1×99.52	多级加载	0.054	46.33

1.2 试验方案设计

为保证试件岩性的稳定可靠,降低其离散性,选择颜色一致、含杂质成分相近、无明显裂纹的盐岩块进行加工,尽量实现同一岩块加工试件分为一组。加工完成的试件上、下两端面平行度控制在±0.03mm以内,以减小端部效应,加工完成的试件如图 2 所示。

为更好地模拟工程实际,将试验设计为:分级加卸载试验和多级加载试验。具体试验方案为:

(1) 常规单轴加载试验。试件安装后,采用轴向位移加载方式控制,将加载速率控制在 0.01mm/s,



图 2 试件样品图

Fig. 2 Manufactured salt samples

加载至破坏;同时保持监测声发射参数,研究破坏过程声发射参数的时序特征。

(2) 分级加卸载试验。试件安装后,采用力控制,加载速率为 0.5 kN/s ,加载至 70% 峰值应力(垂直力 69.76 kN ,根据常规单轴加载试验确定,下同),再以相同的卸载速率卸载至 0 kN 后,重新加载采用位移控制至破坏;保持同时监测声发射参数,研究破坏过程声发射参数的时序特征。本组其它试件分别增加 50% 峰值应力和 30% 峰值应力水平进行卸载和再加载,同时监测试件的声发射活动情况。

(3) 多级加载试验。试件安装后,采用力控制,加载速率为 0.5 kN/s ,加载至 30% 峰值应力后(根据常规单轴加载试验确定,下同),停止加载一分钟,继续加载至 50% 峰值应力再停止加载一分钟,然后,继续加载至 70% 峰值应力再停止加载一分钟,最后,继续加载直到破坏;保持同时监测声发射参数,研究破坏过程声发射参数的时序特征。

2 试验结果与分析

2.1 常规单轴加载试验

为获取本次试验盐岩的基本物理力学性能参数,在室温条件下,进行常规单轴加载试验,由于试件不易获取,且常规单轴加载试验的重复性较好(见图 3),因此,常规单轴加载试验只进行两个试件,获得巴基斯坦盐岩极限强度平均值为 35.81 MPa 。下文主要对盐岩在试验过程中的应力—声发射参数—时间及破坏特征进行分析。

由于篇幅所限,本文仅用图 4 给出 BJ1-3 试件单轴压缩变形破坏过程中的声发射特征检测结果,从图中可以看出,盐岩单轴压缩与其它岩石较为类似,呈现压密、弹性变形、塑性变形和破坏四个阶段,其声发射有以下阶段性特征:

(1) 压密阶段(OA 段),声发射振铃计数都较小,内部的原始裂纹开始闭合,闭合过程中产生的声发射能量值相对较低,此时,应力应变曲线稍呈现上凹形状。

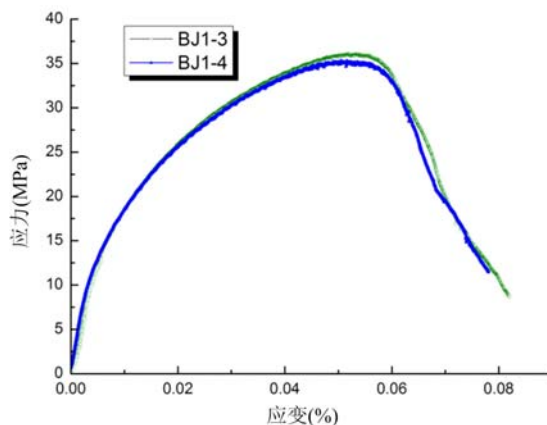


图 3 常规单轴加载应力应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of specimens under uniaxial compression loading

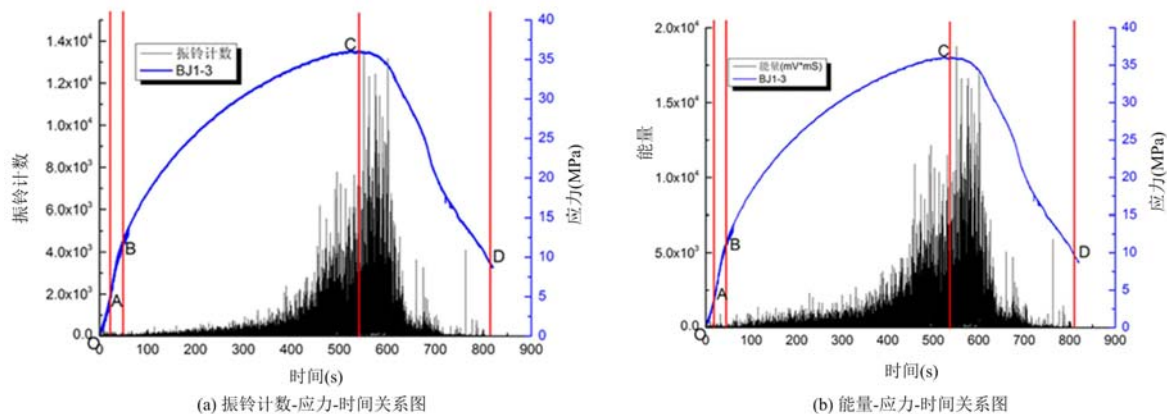


图 4 盐岩常规单轴压缩过程声发射特征结果

Fig. 4 AE results of salt rock in uniaxial compression process

(2) 弹性变形阶段(AB 段),声发射活动依然很少,该阶段所施加的荷载没有使岩样形成新的微裂

纹,盐岩晶粒相互压挤,只有少量的晶粒错动,振铃计数和能量值都较低,曲线呈现直线形。

(3) 塑性变形阶段(BC段),声发射活动稳步增大,内部裂纹稳定扩展,随着应力的增大,在接近峰值应力时,声发射活动迅速增多,微裂纹快速增加,聚集形成主裂纹,振铃计数和能量值指数增加,曲线呈抛物线形。

(4) 破坏阶段(CD段),声发射活动并没有随应力的下降而迅速减小,而在峰后仍然较多,振铃计数和能量值都处于较高阶段,表明内部大量裂纹产生并形成贯通裂纹,承载力迅速下降,最终试件失稳破坏。

2.2 分级加卸载试验

根据常规单轴加载试验获得的力学性能指标,确定本试验分级加卸载的应力水平,试验得到分级加卸载应力应变曲线如图5所示,图6为盐岩分级加卸载应力—时间—振铃计数监测结果图。从图6可以看出以下规律:

(1) 未出现明显的硬化现象。试件 BJ2-1、2、3 分别经过一、二、三次分级加卸载试验,峰值应力并未线性增加,试件 BJ2-4 经过三次分级加卸载试验后,峰值应力反而有所降低,说明盐岩在单轴多级加卸载条件下不会出现应变硬化现象。

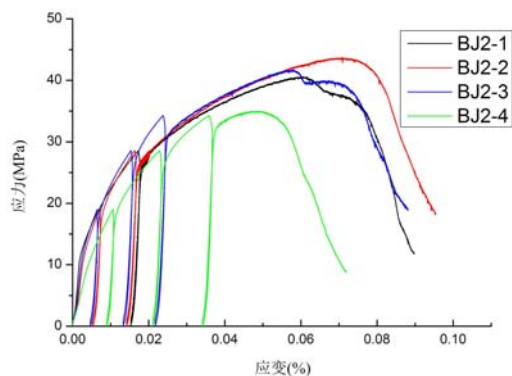
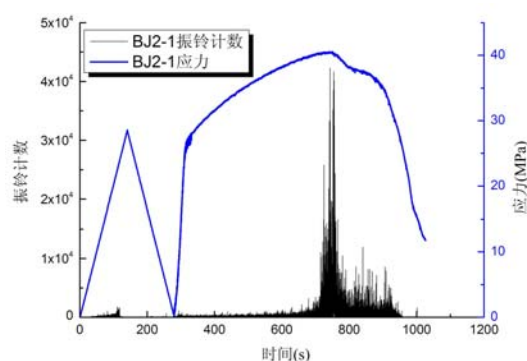
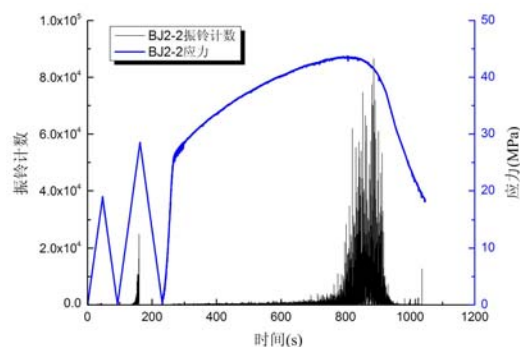


图5 分级加卸载试验应力应变曲线

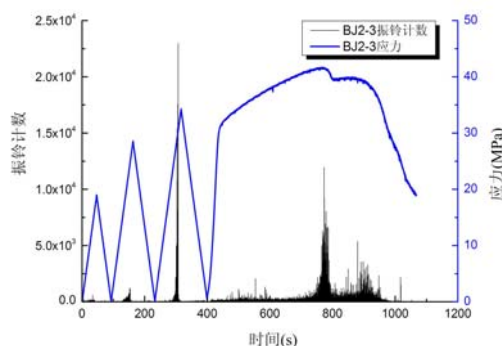
Fig. 5 Stress-strain curves of specimens under multilevel loading-unloading



(a) BJ2-1振铃计数-应力-时间关系图



(b) BJ2-2振铃计数-应力-时间关系图



(c) BJ2-3振铃计数-应力-时间关系图

图6 盐岩分级加卸载试验声发射特征结果

Fig. 6 AE results of salt rock under multilevel loading-unloading

(2) 明显的记忆效应。在低应力水平(峰值应力50%以下)分级加卸载过程中,都出现较明显的声发射 Kaiser 效应,即重复加载应力在未达到前一次最大加载应力之前,声发射振铃计数明显很少,或明显低于前一次产生振铃数。当在70%峰值应力卸载再加载时,出现 Felicity 效应,即在很低的应力水平就会出现声发射事件。

(3) 卸载过程很少出现声发射现象。在峰值应力前的卸载过程中,声发射活动很少,表明卸载过程中有很少的新生裂纹产生。这与灰岩和白云岩的卸载过程出现的声发射现象有所不同^[14]。

(4) 在峰值应力后,出现大量的声发射事件,振铃计数较多,与常规单轴加载结果相似。这也与

灰岩和白云岩的峰后声发射现象相同^[14]。

2.3 多级加载试验

根据常规单轴加载试验结果确定多级加载的荷载水平,试验得到多级加载应力应变曲线(图 7)。图 8 是盐岩 BJ3-1 多级加载应力—时间—振铃计数、撞击数监测结果图。从试验结果发现以下规律:

(1) 加载过程中,在低荷载稳压时,产生的应变较小,随着荷载水平的升高,稳压阶段盐岩的应变明显增加。盐岩达到峰值强度后,卸载过程中,随着应力的减少,仍有较大的应变,峰后的应变软化现象明显。表明峰值强度过后,试件裂纹扩展、贯通,形成宏观裂隙,结构碎裂,残余强度低,如图 7 所示。

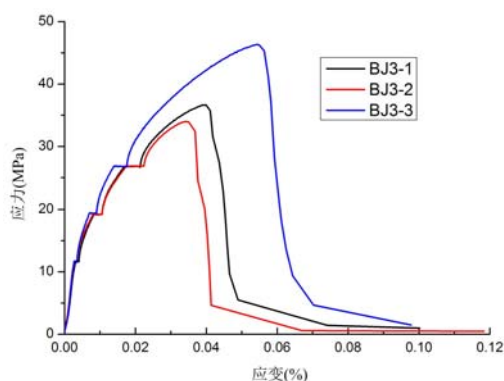
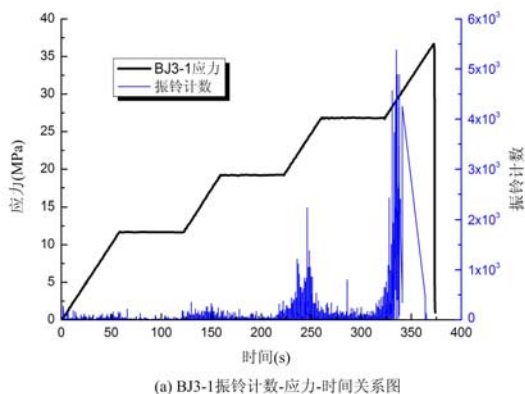
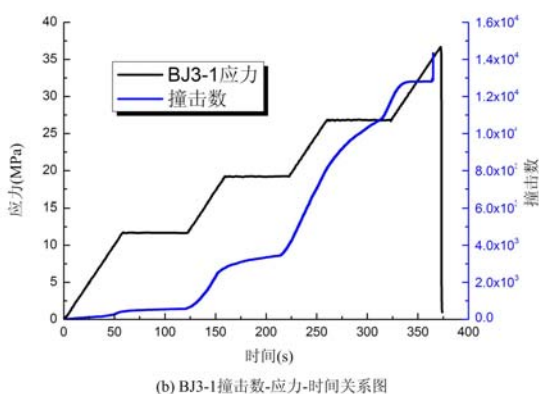


图 7 多级加载应力应变曲线
Fig. 7 Stress-strain curves of specimens under multi-level loading

展,稳压阶段亦有微裂纹成核、扩展产生的大量声发射事件。随着荷载增大,在达到峰值强度前,振铃计数和能量急剧增加,撞击数也快速增加达到峰值。这些阶段性特征与花岗岩破坏全过程声发射特征有类似之处^[15]。需要指出的是在临近峰值强度时,由于采用力加载速度较快,产生大量声发射信号而形成连续波,造成声发射参数提取不全。



(a) BJ3-1 振铃计数-应力-时间关系图



(b) BJ3-1 撞击数-应力-时间关系图

图 8 盐岩多级加载过程声发射特征结果

Fig. 8 AE results of salt rock under multi-level loading

3 结论

(1) 单轴常规试验表明,盐岩单轴常规加载表现明显的阶段性特征,声发射信号阶段性特征比较明显。

(2) 在分级加卸载试验中,存在比较明显的记忆效应。在低应力水平有较明显的声发射 Kaiser 效应,而在 70% 峰值应力卸载再加载时,则出现 Felicity 效应,即在很低的应力水平就会出现声发射事件。

(3) 盐岩多级加载试验表明,稳压在低应力水平对盐岩造成的损伤不大,很少有新生裂纹;而在高应力水平稳压时,会有大量由新生微裂纹和裂纹扩展产生的声发射事件。

(4) 多级加载过程中,在低荷载稳压时,产生的应变较小,随着荷载水平的升高,稳压阶段盐岩的应变明显增加。

(5) 在不同的加载路径下,盐岩峰值强度后,产生宏观裂纹的破坏过程中都会有大量的声发射事件。

致谢: 在本试验研究过程中得到苏承东教授的支持、帮助和指导,在此表示感谢!

参考文献:

- [1] 孙中秋,谢凌志,刘建锋等. 基于逾渗模型的盐岩损伤与破坏研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(2):441—448 (SUN Zhong-qiu, XIE Ling-zhi, LIU Jian-feng, et al. Study of salt rock damage and failure based on percolation model [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(2):441—448 (in Chinese))
- [2] 王军保,刘新荣,郭建强等. 盐岩蠕变特性及其非线性本构模型[J]. 煤炭学报, 2014, 39(3):445—451 (WANG Jun-bao, LIU Xin-rong, GUO Jian-qiang, et al. Creep properties of salt rock and its nonlinear constitutive model [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(3):445—451 (in Chinese))
- [3] 杨晓琴,梁卫国,于艳梅等. 溶浸作用下难溶盐岩力学特性弱化及细观机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(1):134—143 (YANG Xiao-qin, LIANG Wei-guo, YU Yan-mei, et al. Mechanical property weakening and the meso-mechanism of hard dissolved salt rock soaked in brine [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(1):134—143 (in Chinese))
- [4] 牛传凯,谭羽非,宋传亮. 盐穴战略储油库注采运行方案的优化分析[J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(3):y1—y7 (NIU Chuan-kai, TAN Yu-fei, SONG Chuan-liang. Optimization of injection-production operation scheme for strategic setroleum storage in salt cavern [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(3):y1—y7 (in Chinese))
- [5] 杨春和,马洪岭,刘建锋. 循环加、卸载下盐岩变形特性试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(12):3562—3568 (YANG Chun-he, MA Hong-ling, LIU Jian-feng. Study of deformation of rock salt under cycling loading and unloading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12):3562—3568 (in Chinese))
- [6] 刘江,杨春和,吴文等. 盐岩短期强度和变形特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(z1):3104—3109 (LIU Jiang, YANG Chun-he, WU Wen, et al. Experiment study on short-term strength and deformation properties of rock salts [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(z1):3104—3109 (in Chinese))
- [7] 吴文,杨春和. 盐岩的压缩试验研究与损伤模型模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(z2):3709—3713 (WU Wen, YANG Chun-he. Experimental study on salt rock under compression and damage model simulation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(z2):3709—3713 (in Chinese))
- [8] 翟松韬,吴刚,张渊等. 单轴压缩下高温盐岩的力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(1):105—111 (ZHAI Song-tao, WU Gang, ZHANG Yuan, et al. Mechanical characteristics of salt rock subjected to uniaxial compression and high temperature [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(1):105—111 (in Chinese))
- [9] 刘建锋,边宇,郑得文等. 三轴应力状态下盐岩强度分析探讨[J]. 岩土力学, 2014, 35(4):919—925 (LIU Jian-feng, BIAN Yu, ZHENG De-wen, et al. Discussion on strength analysis of salt rock under triaxial compressive stress [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(4):919—925 (in Chinese))
- [10] 陈结,姜德义,邱华富等. 卤水浸泡后盐岩声发射特征试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(7):1937—1942 (CHEN Jie, JIANG De-yi, QIU Hua-fu, et al. Study of acoustic emission character of salt rock soaked in brine [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(7):1937—1942 (in Chinese))
- [11] 刘伟,李银平,霍永胜等. 盐岩地下储库围岩界面变形与破损特性分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(6):1621—1628 (LIU Wei, LI Yin-ping, HUO Yong-sheng, et al. Analysis of deformation and fracture characteristics of wall rock interface of underground storage caverns in salt rock formation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(6):1621—1628 (in Chinese))
- [12] 姜德义,陈结,任松. 盐岩单轴应变率效应与声发射特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(2):326—336 (JIANG De-yi, CEHN Jie, REN Song. Experimental study of strain rate effect and acoustic emission characteristics of salt rock under uniaxial compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,

- 2012, 32(2):326—336(in Chinese))
- [13] 任松, 白月明, 姜德义 等. 周期荷载作用下盐岩声发射特征试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(6):1613—1618, 1639(REN Song, BAI Yue-ming, JIANG De-yi, et al. Experimental research on acoustic emission property of salt rock under cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(6):1613—1618, 1639(in Chinese))
- [14] 李庶林, 唐海燕. 不同加载条件下岩石材料破裂过程的声发射特性研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(1):147—152(LI Shu-lin, TANG Hai-yan. Acoustic emission characteristics in failure process of rock under different uniaxial compressive loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(1):147—152(in Chinese))
- [15] 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(in Chinese))

Study of Acoustic Emission Timing Features of Salt Rock Subjected to Different Stress Path Loadings

WANG Wei-chao^{1,2}, LIU Xi-liang¹, ZHANG Wu-jiao³, WANG Li¹

(1. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China;

2. Henan Colleges and Universities Deep Mine Construction Key Discipline Open Laboratory, Jiaozuo 454000, Henan, China;

3. China Pingmei Shenma Group Xuchang Shoushan Coking Co., LTD, Xuchang 461700, Henan, China)

Abstract: Damage process of salt rock subjected to different stress path loadings was experimentally investigated by using RMT-150B rock mechanics multi-function systems and acoustic emission monitoring system. Based on experimental results, acoustic emission timing characteristics and deformation features of salt rock subjected to conventional uniaxial loading, step loading-unloading and multi-stage loading respectively were analyzed. Experiments indicate that acoustic emission signal and deformation of salt rock under conventional uniaxial loading present obvious stage characteristics. In step loading-unloading experiment, memory effect is obvious. At lower level stress, Kaiser effect of acoustic emission is obvious; When at 70% peak stress level reloading after unloading, Felicity effect of acoustic emission occurs. Multi-stage loading experiments show that at lower level stress, stable load causes only small damage of salt rock, there are few new cracks. But at higher level stress, stable load causes acoustic emission due to large amount of newly produced cracks and crack propagation.

Keywords: rock mechanics; salt rock; acoustic emission; loading-unloading