

盐岩巴西劈裂破坏声发射时序特征

王伟超¹, 张五交², 刘希亮¹, 王利¹, 李回贵³

1. 河南理工大学土木工程学院, 焦作 454003
2. 中国平煤神马集团许昌首山焦化有限责任公司, 许昌 461700
3. 河南理工大学能源科学与工程学院, 焦作 454003

摘要 利用RMT-150B岩石力学多功能系统和声发射监测系统,对盐岩巴西劈裂破坏过程中的变形与强度特征和声发射特征进行试验研究。试验结果表明:盐岩巴西劈裂破坏在峰值前的变形特征也存在类似单轴抗压试验的压密阶段、弹性阶段、屈服阶段和破坏阶段;在压密和弹性阶段声发射事件较少,能量较小,进入塑性阶段后,声发射振铃计数迅速增加,能量增大;当荷载超过承载能力后,试件突然劈裂破坏,残余应力迅速消失。试验表明,可通过观察振铃计数、累计计数和能量判定试件破坏的前兆,为工程实践提供借鉴和参考。

关键词 盐岩;声发射;巴西劈裂;抗拉强度

中图分类号 TU45

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.25.009

Acoustic Emission Timing Features of Salt Rock Under Brazilian Splitting

WANG Weichao¹, ZHANG Wujiao², LIU Xiliang¹, WANG Li¹, LI Huigui³

1. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China
2. Xuchang Shoushan Coking Co., Ltd., China Pingmei Shenma Group, Xuchang 461700, China
3. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China

Abstract Brazilian split tests for salt rock were carried out with a servo-controlled test machine RMT-150B, and acoustic emission (AE) detections were conducted at the same time. The results indicate that the deformation characteristics before the peak load in Brazilian split tests are similar to those of uniaxial compression test which could be divided into four stages, namely compression, elasticity, yielding and failure stage. AE events in compression and elasticity stage are totally low in energy and accumulation number. Starting from the yield stage, AE events increase rapidly, and energy and accumulation number grow quickly. The specimens suddenly fracture when the load exceeds capacity, and the residual stress rapidly disappears. In this test, the sign for specimen failure could be judged through observing ringing counting, accumulation number and energy, so as to provide reference for engineering practice.

Keywords salt rock; acoustic emission; Brazilian split; tensile strength

能源储备是国家经济社会发展的重要物质基础,是国家能源安全的重要保障。而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,盐岩地下储库在运营过程中应力状态极为复杂,而储气(油)库

的稳定性至关重要,声发射作为监测岩石破坏状态手段之一。因此,研究盐岩受拉破坏过程中声发射特征对盐岩地下储库的安全运营具有重要工程意义。

近些年,国内外科研工作者在盐岩力学性能及声发射方

收稿日期:2014-06-05;修回日期:2014-07-23

基金项目:河南省高校深部矿井建设重点学科开放实验室开放基金(2013KF-04)

作者简介:王伟超,讲师,研究方向为岩土工程,电子信箱:376194856@qq.com

引用格式:王伟超,张五交,刘希亮,等.盐岩巴西劈裂破坏声发射时序特征[J].科技导报,2014,32(25):55-58.

面进行诸多试验研究^[1-3],取得很多科研成果。翟松韬等^[4]对喜马拉雅山盐岩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。陈结等^[5]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。姜德义等^[6]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。任松等^[7]对周期载荷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。

此外,还有学者对其他岩石的巴西劈裂过程和声发射特征监测分析研究。王莉等^[8]利用颗粒流 PFC 程序,根据矩张量理论模拟煤岩巴西劈裂的声发射试验,能够再现煤样破坏演化规律。研究发现,声发射事件比率随破裂强度变化近似呈极值分布;每次声发射事件所包含的微破裂数,随破裂强度的提高而增加,近似呈指数函数关系;声发射事件比率与微破裂数近似呈负指数函数关系。苏承东等^[9]对巴西劈裂疲劳破坏的砂岩的变形与强度特征进行试验研究,并且发现疲劳上限载荷(应力)比、抗拉疲劳强度与循环次数呈负相关,疲劳上限载荷(应力)比是影响岩石疲劳寿命主控因数。孟京京等^[10]模拟平台圆盘巴西劈裂试验,并分析不同中心角对岩石破坏过程及破坏模式的影响。付军辉等^[11]利用 RFPA2D 数值软件,模拟分析了煤样巴西劈裂试样的应力分布特征,同时,还进行了煤样的巴西劈裂试验,并对巴西劈裂全过程中的声发射特征进行了研究。

以上研究成果对于盐岩储库溶腔建造具有推动作用,但是,在盐岩储库建设中,当储库内压力较大时,将导致受张拉应力而开裂,引起储存介质的渗漏,因此,盐岩的抗拉强度是很关键的力学特性参数。同时,盐岩受拉应力损伤过程中的声发射特征仍然需要进一步研究。本研究对巴基斯坦深部盐岩巴西劈裂试验中的声发射进行监测,分析盐岩巴西劈裂过程中声发射特征参量(振铃计数、振铃累计计数、能量等)及其破坏特征,进而揭示盐岩在劈裂破坏条件下从微观损伤到宏观破坏的机制,以期工程实践提供参考和借鉴。

1 试验条件及方法

试验的主要目的是分析盐岩劈裂破坏过程与声发射相关参数的变化规律。试验设备为:中科院武汉岩土力学研究所研制的 RMT-150B 岩石力学试验系统,可实时记录载荷和位移,并可同步绘出应力-时间、载荷-位移曲线;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 40 dB,设置双向门限 100 mV,声发射采样速率为 3 MHz,整个试验过程采用连续存储。试验中保持加载过程和声发射监测摄像同步进行,所有试验均在室温条件下进行。试验装置如图 1 所示。

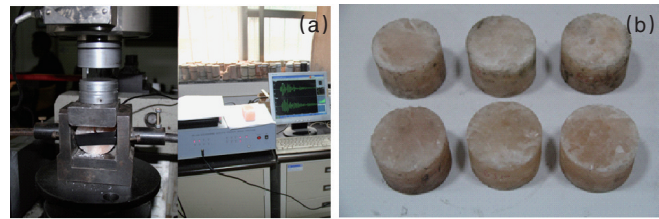


图 1 试验装置(a)及试件样品(b)

Fig. 1 Test equipment (a) and manufactured salt rock samples (b)

本试验所用试样取自巴基斯坦,为深部、结构致密、高纯度盐岩,其中可溶物质量分数在 95% 以上(可溶物主要为 NaCl, Na₂SO₄),盐岩试件为圆柱体,劈裂法试验的试样厚径比为 0.5~1.0,端面平行度为 ±0.02 mm,满足煤和岩石物理力学性质测定方法的要求,具体尺寸见表 1。

表 1 巴西劈裂试验结果

Table 1 Brazilian test results of rock salt

| 编号 | 尺寸/mm | 破坏 载荷/kN | 抗拉 强度/MPa |
|--------|-------------|-------------|--------------|
| BJ21-1 | 50.90×37.40 | 6.318 | 2.112 |
| BJ21-2 | 51.46×38.00 | 6.880 | 2.238 |
| BJ21-3 | 51.48×34.96 | 6.176 | 2.181 |
| BJ21-5 | 49.62×38.96 | 7.340 | 2.415 |
| BJ21-6 | 51.20×35.20 | 4.560 | 1.610 |

在试件加工过程中,采用正常取芯方法,但由于盐岩属软岩,易碎且易溶于水,取芯钻直径为 51 mm,通过干式锯磨法进行试样的切割。由于盐岩难于获取,且不易加工,本次试验选取 6 个试件,其中试件 BJ21-4 试验失败,其他试件具体尺寸及结果见表 1。加工完成的试件如图 2 所示。试验中使用 2 个传感器,用电胶把传感器分别固定在试件的 2 个端面中间位置,为保证传感器与试件的耦合效果,接触位置涂上专用耦合剂。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 2 盐岩巴西劈裂破坏结果

Fig. 2 Results of Brazilian splitting failure

采用常规劈裂试验方法,采用轴向力加载方式控制。加载至破坏同时保持监测声发射参数,研究破坏过程的声发射参数时序特征。

2 结果与分析

对盐岩进行巴西劈裂试验时,由于盐岩为软岩,变形较大,故采用平板加载,加载直至岩样破坏,试验数据及结果见表1,得到盐岩的平均抗拉强度为2.111 MPa。在巴西劈裂试验中,岩石抗拉强度的计算式为

$$\sigma_t = \frac{2F}{\pi Dt} \quad (1)$$

式中, σ_t 为抗拉强度,MPa; F 为破坏载荷,N; D 为试件直径,mm; t 为试件厚度,mm。

试验中,采用100 kN力传感器测量试件垂直径向力,50 mm传感器测量试件垂直径向压缩变形,2.5 mm传感器测量试件水平径向拉伸变形,加载模式为力控制模式,波形为斜坡式。得到的盐岩巴西劈裂试验结果与国内湖北应城、潜江和江苏金坛盐岩相比^[2,12],抗拉强度明显高于国内盐岩。

巴西劈裂试验中,试件的最终破坏形态如图2所示,可见盐岩巴西劈裂破坏主要沿加载直径劈裂破坏为2个半圆,且两加载端基本完整,即由局部应力集中导致的加载端部破坏效果并不明显,6个试件中,总体来说,试验效果较好。其中试件BJ21-4由于主观原因,试验失败,加载端破碎严重。

2.1 巴西劈裂力-变形特征分析

图3给出5个试样常规巴西劈裂力-变形曲线。从图3可以看出,盐岩常规劈裂试验峰值前的变形特征与单轴压缩的变形特征具有相似性,可以分为压密、弹性、屈服和破坏4个阶段。在加载初期的压密阶段,接触面积随着载荷增加而增大,曲线表现出上凹现象,而后随着载荷增加垂直变形与载荷呈线性关系,表现出材料弹性特征。随后,载荷与变形量曲线偏离线性关系,进入屈服阶段。一旦载荷达到极限载荷时突然破坏。试件BJ21-1曲线曲率由小逐渐变大,在峰值处时又变小,随即破坏,说明此试样在加载初期压密后,进入弹性变形阶段,然后进入塑性变形,峰值过后,试样立即产生劈裂破坏,残余强度很快消失。

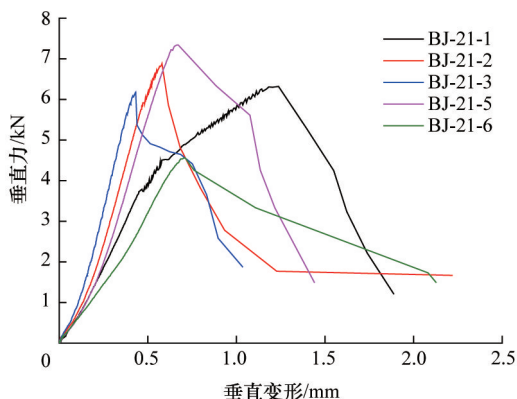


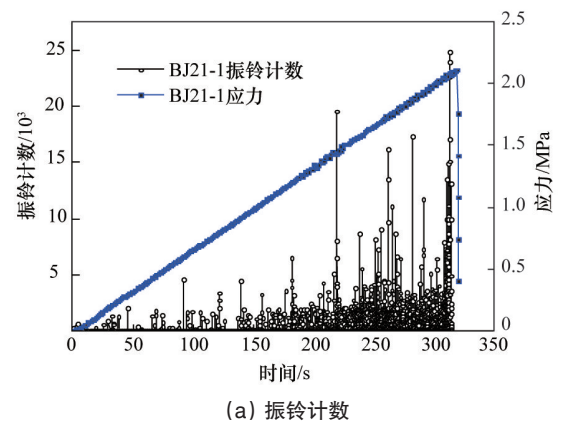
图3 盐岩巴西劈裂力-变形曲线

Fig. 3 Load-deformation curves of conventional Brazilian split test of salt rock

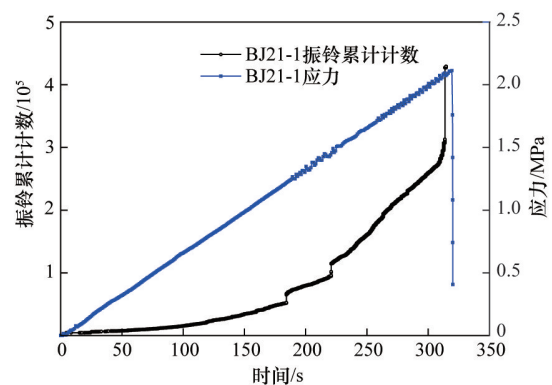
2.2 巴西劈裂声发射时序特征分析

通过试验系统自带快速傅里叶变换,并经滤波处理消除噪声,得到盐岩试件BJ21-1巴西劈裂破坏过程中的声发射监

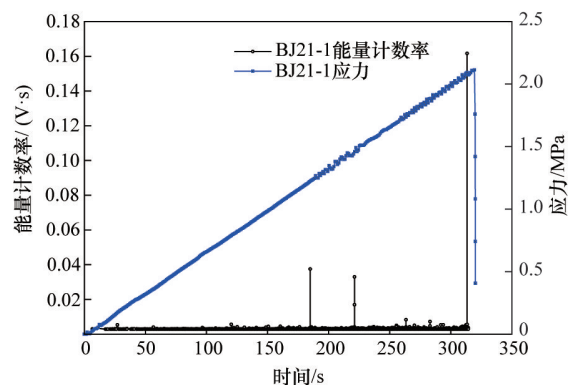
测结果(图4)。图4中,振铃计数为1个事件撞击传感器时,传感器所产生的振铃,其形成的超过阈值的电信号的每一次振荡波均计为1个振铃计数;累计计数为事件撞击传感器所产生的振铃计数按时间顺序的累加;能量计数为事件信号检测包络线下的面积,其值等于信号波幅值乘持续时间,可以反映事件的相对能量或强度,可分为能量计数率和能量总计数。从图4可看到巴西劈裂破坏过程中的声发射特征。



(a) 振铃计数



(b) 振铃累计计数



(c) 能量

图4 盐岩巴西劈裂试验事件监测结果

Fig. 4 Detection results of Brazilian split tests

1) 在加载初期有不同程度的声发射活动,声发射的振铃计数和能量都相对较少,可以理解为压密阶段,较小的微裂隙闭合。随后,在较低的拉应力状态,也不足以形成大的宏

观张拉裂纹,但微裂纹的产生也会产生能量较低的声发射事件。直到弹性阶段结束,无大的声发射事件发生,主要表现为初步损伤发展过程。

2) 继续增加应力进入塑性阶段,岩样逐步屈服失去承载能力^[13]。岩样内部微裂纹逐步快速发展、聚合,此阶段声发射事件比较活跃,产生大声发射事件,并伴随较大的能量产生,振铃计数、累计计数和能量大量增加。需要说明的是试件BJ21-1塑性阶段较长,应变较大,有一定的特殊性。

3) 一旦应力达到试件的极限承载能力进入破坏阶段,微裂纹发生贯通,导致宏观破坏面的形成,裂纹间的互相作用加剧,声发射活动异常活跃,随后,试件沿轴线产生劈裂破坏,声发射事件随应力的降低而迅速减少,而峰后的累计计数则基本保持不变。

3 结论

通过对盐岩试样进行巴西劈裂过程声发射试验表明:盐岩声发射事件产生与微裂纹萌生、扩展密切相关,在试样弹性阶段产生少量的声发射事件,振铃计数、累计计数和能量都处于较低水平;随着载荷的增加,微裂纹逐步聚集、成核,甚至贯通,声发射事件大量增加,临近峰值时,振铃累计计数迅速增大,振铃计数明显增大,能量处于较高水平,以此作为判断岩样破坏的前兆信息。

盐岩试件的巴西劈裂破坏过程存在类似抗压试验中的压密阶段、弹性变形阶段和塑性变形阶段。当载荷达到试样的峰值时,试样会发生突然劈裂破坏,残余强度很快消失,应力很快跌落。试件也会产生较小量的塑性变形,而塑性变形的大小与加载的速率有一定关系,还需进一步的研究。

实验结果对盐岩储库的建设有参考价值,对于运用声发射仪器监测岩土体工程的稳定性也具有一定的借鉴意义,对研究岩体工程稳定性的方法创新有一定参考价值。

参考文献(References)

[1] 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 Chunhe, Ma Hongling, Liu Jianfeng. Study of deformation of rock salt under cycling loading and unloading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3562-3568.

[2] 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(S1): 3104-3109.
Liu Jiang, Yang Chunhe, 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(S1): 3104-3109.

[3] 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(S2): 3709-3713.
Wu Wen, Yang Chunhe. Experimental study on salt rock under compression and damage model simulation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S2): 3709-3713.

[4] 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 Songtao, 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.

[5] 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 Deyi, Qiu Huaifu, et al. Study of acoustic emission character of salt rock soaked in brine[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(7): 1937-1942.

[6] 姜德义, 陈结, 任松, 等. 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 Deyi, Chen Jie, Ren Song, et al. 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, 31(2): 326-336.

[7] 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 Yueming, Jiang Deyi, 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.

[8] 王莉, 谭卓英, 周喻, 等. 煤样巴西劈裂试验中声发射特性的细观模拟[J]. 北京科技大学学报, 2014, 36(3): 3-10.
Wang Li, Tan Zhuoying, Zhou Yu, et al. Mesoscopic simulation of the acoustic emission characteristic of coal samples in Brazilian test[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2014, 36(3): 3-10.

[9] 苏承东, 张盛, 唐旭. 砂岩巴西劈裂疲劳破坏过程中变形与强度特征的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(1): 41-48.
Su Chengdong, Zhang Sheng, Tang Xu. Experimental research on deformation and strength characteristics in process of Brazilian split fatigue failure of sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(1): 41-48.

[10] 孟京京, 曹平, 张科, 等. 基于颗粒流的平台圆盘巴西劈裂和岩石抗拉强度[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2013, 44(6): 2449-2454.
Meng Jingjing, Cao Ping, Zhang Ke, et al. Brazil split test of flattened disk and rock tensile strength using particle flow code[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2013, 44(6): 2449-2454.

[11] 付军辉, 黄炳香, 刘长友, 等. 煤试样巴西劈裂的声发射特征研究[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(4): 25-28.
Fu Junhui, Huang Bingxiang, Liu Changyou, et al. Study on acoustic emission features of coal sample Brazilian splitting[J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(4): 25-28.

[12] 郭印同, 蔡振华. 潜江超深盐矿盐岩力学特性的试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2010, 30(2): 23-27.
Guo Yintong, Cai Zhenhua. Experimental studies on mechanical properties of salt rock of Qianjiang salt mine[J]. Mining R & D, 2010, 30(2): 23-27.

[13] 苏承东, 翟新献, 李宝富, 等. 砂岩单三轴压缩过程中声发射特征的试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(2): 225-230.
Su Chengdong, Zhai Xinxian, Li Baofu, et al. Experimental study of the characteristics of acoustic emission for sandstone specimens under uniaxial and triaxial compression tests[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(2): 225-230.

(责任编辑 赵业玲)