

DOI: 10.11779/CJGE2016S2052

# 岩盐三轴蠕变声发射特征研究

吴 池, 刘建锋\*, 周志威, 卓 越

(水利水电学院四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065)

**摘 要:** 利用四川大学 MTS815 电液伺服岩石试验系统和 PCI-2 声发射监测仪对岩盐进行蠕变加载试验, 根据试验数据分析了岩盐蠕变前两个阶段的声发射活动特征。试验结果表明, 三轴条件下, 声发射特征参数, 振铃计数率、能量均与蠕变速率成正比; 声发射特征参数累积变化曲线与蠕变曲线走势基本相同。围压不变的情况下, 较高的轴向应力能够加快试样的蠕变速率, 声发射活动也有所增强, 表现为 AE 定位点增多、振铃计数率和能量增大, 以及累积振铃计数和累积能量的增加。通过对声发射事件点进行还原, 为研究岩盐蠕变长期强度以及损伤演化提供了依据。利用 G-P 算法, 计算岩盐在蠕变各时间段的声发射分维值, 总结出呈上升-下降-波动的规律, 通过分形特征为研究岩盐内部破坏的稳定性提供依据。

**关键词:** 岩盐; 蠕变; 声发射; 长期强度; 损伤; 分形

**中图分类号:** TU41

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2016)S2-0318-06

**作者简介:** 吴 池(1992-), 男, 四川大学水电学院水利工程专业, 主要从事岩石力学方面的试验研究。E-mail: 353327892@qq.com。

## Creep acoustic emission of rock salt under triaxial compression

WU Chi, LIU Jian-feng, ZHOU Zhi-wei, ZHUO Yue

(State key Lab. of Hydraulic and Mountain River Engineer, College of Water Resource and Hydropower, Sichuan Univ., Chengdu 610065, China)

**Abstract:** To study and analyze the acoustic emission activity characteristics in the first and stable phases of salt creep, a series of triaxial creep compression tests are carried out using MTS815 flex test GT rock mechanics test system and PCI-2 acoustic emission (AE) monitoring system. The results show: under the triaxial condition, the characteristic parameters of AE such as ringing count rate and energy are proportional to the creep rate. The curve tendency of AE characteristic parameters and creep rate are basically the same. Under the constant confining pressure, the higher axial stress can accelerate the creep rate, and the AE activities also increase, which are characterized by the increase of AE incident points, ringing count rate, energy, cumulative ringing count and cumulative energy. At the same time, through the reduction of points of AE events point, it provides a basis for the study on the long-term time strength and creep damage evolution of salt rock. The creep fractal dimension values of AE of rock salt in various periods are calculated using the G-P algorithm. The laws of rise-fall-fluctuation are summarized. It may that provide the basis for studying the stability of the internal damage of rock salt

**Key words:** rock salt; creep; acoustic emission; long-term strength; damage; fractal

## 0 引 言

岩盐具有低孔隙率、低渗透性以及良好的密闭性等特性, 使之能够有效的防止地下水的渗入。此外, 它还具有良好的流变特性, 可以有效地隔离有害物质与放射性物质, 使得盐穴成为核燃料和化工废料的处理以及石油、天然气等战略能源储存的优良场所。基于岩盐的重要工业和军事应用背景, 近些年来, 许多国内外学者对盐岩在单轴、三轴压缩条件下的蠕变特性进行了大量的研究, 取得了丰富的成果。

Munson<sup>[1]</sup>提出了能够反映盐岩稳态蠕变的本构模

型; Chan等<sup>[2-3]</sup>在位错理论的基础上, 建立了可以反映盐岩时效性、塑性流动与损伤演化过程的多机制耦合模型; Yang等<sup>[4-5]</sup>在大量实验的基础上考察了不同围压和偏应力对盐岩蠕变特性的影响等等; Alkana等<sup>[6]</sup>通过三轴加载条件下盐岩累计声发射信号事件的变化规律, 得到盐岩膨胀临界值, 并提出此值主要与应力加

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (51120145001, 51374148); 四川省科技计划项目 (2015JY0111)

**收稿日期:** 2016-05-19

**\*通讯作者** (E-mail: liujf@scu.edu.cn)

载率和孔隙压力有关。在国内, 高小平等<sup>[7]</sup>、周志威等<sup>[8]</sup>、邱贤德等<sup>[9]</sup>通过不同类型的试验, 也对盐岩蠕变的特性和机理进行了大量的研究。上述各学者大多集中于盐岩蠕变的应力-应变关系、蠕变特征、影响因素等研究, 而关于盐岩三轴蠕变声发射特征的研究却很少。本文通过对某地岩盐三轴蠕变试验, 同时利用声发射技术监测其内部变化过程, 通过对声发射特征参数的分析, 对岩盐蠕变过程中声发射特征规律和岩盐蠕变内部损伤演化规律进行探讨, 为盐岩能源储气库的建立与长期运营提供一定的理论依据。

## 1 试验制备及试验方案

### 1.1 实验制备

试样取自某地盐矿, 并根据岩石力学标准, 采用干式车床打磨法, 将之加工成 $\Phi 75 \times h 150$  mm的圆柱型标准试样, 测得其密度为 $2.170 \text{ g/cm}^3$ 。由于试样成分主要为NaCl, 不溶物含量低于1%, 故在实验前于其表面裹以保鲜膜, 以防潮解。试样分为两组, 第一组2块, 第二组5块。第一组用作常规力学试验, 取2块试样短期强度平均值, 作为蠕变试验加载方案制定依据; 第二组用来进行蠕变声发射试验, 编号为RY1、RY2、RY3、RY4、RY5。

试验仪器采用MTS815电液伺服岩石试验系统, 主要由加载系统、计算机控制系统、位移监控系统构成。声发射系统则采用Sensor-highway 2声发射监测仪, 可实时采集声发射信号、AE特征提取、波形处理及相关分析。本次声发射仪共使用8个探头, 在三轴室上下表面各放置4个探头, 并在探头表面涂有凡士林, 以保证传感器与三轴室的耦合效果。为保持试验在常温下进行, 试验室内布置有空调对室内温度进行控制, 并将室温稳定控制在 $20^\circ\text{C}$ 左右。

### 1.2 试验方案

岩盐在较大荷载条件下会表现出大变形特征, 使内部结构变得致密, 本次试验为防止前期加载对更高应力等级条件下的试验结果造成影响, 故不采用分级加载方案, 而是仅对每块样进行稳定围压和轴压的单级加载。

本次蠕变试验, 先进行围压加载, 加载速率 $3 \text{ MPa/min}$ , 围压达到 $10 \text{ MPa}$ 后停止加载。之后轴向加载则采用应力控制, 加载速率为 $15 \text{ kN/min}$ , 加载完成后换为位移控制, 此后保持围压和轴压不变。试验加载条件为: 5块试样围压均为 $10 \text{ MPa}$ , 各试样轴向偏应力分别为短期强度的40%, 50%, 60%, 70%, 80%。由于本次试验在MTS815电液伺服岩石试验系统进行, 若长时间保持荷载的动态稳定, 则会造成试验消耗过大, 故选择每个试样加载时长为 $10 \text{ h}$ , 而岩盐在

荷载不是很大的情况下, 稳态蠕变时间一般会持续很长时间, 因此本次试验各试样均没有观察到加速蠕变阶段。

## 2 试验结果分析

### 2.1 岩盐蠕变试验结果

从图1可以看出, 在试验时长 $10 \text{ h}$ 内, 岩盐只经历了瞬时加载阶段、衰减阶段和稳态蠕变阶段。蠕变初期, 随着应力增加, 岩盐轴向变形较为明显, 此后应变速率逐渐衰减, 约 $2 \text{ h}$ 后趋于稳定, 由于加载速度较慢, 持续时间较长, 且纯岩盐变形能力较强, 故此阶段应变量较大, 约占总应变量的60%; 稳态蠕变阶段持续时间较长, 约为 $8 \text{ h}$ , 该阶段应变量缓慢上升, 蠕变速率较慢且较为稳定。

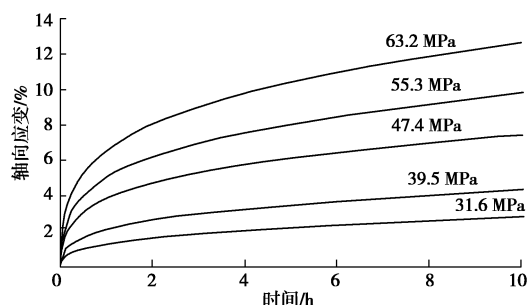


图1 应变-时间曲线

Fig. 1 Strain-time curves

稳态蠕变率是蠕变速率快慢的表征, 由图2和表1可知, 随着轴向荷载的增加, 各级的稳态蠕变阶段的蠕变速率和蠕变量都随之增加。因为岩盐在荷载作用下, 随着内部缺陷的闭合和扩展, 会同时产生硬化与恢复作用, 而岩盐蠕变过程为硬化和恢复作用相互抵消的过程, 应力的增加不仅加快了岩盐的硬化速率, 同时也促进了恢复作用的产生。说明在围压一定情况下, 岩盐蠕变速率由轴向应力主导, 且应力越大, 应变率越快。

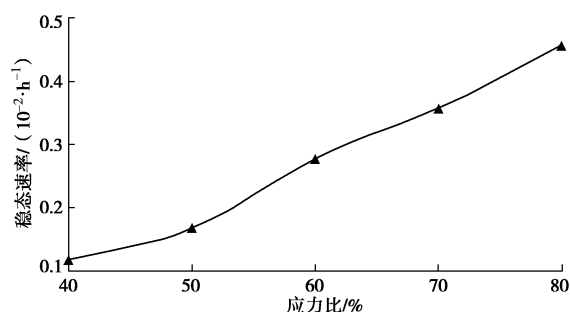


图2 稳态蠕变率-偏应力关系曲线

Fig. 2 Steady state creep rate-deviatoric stress curve

### 2.2 岩盐发射试验结果

声发射是材料在荷载作用下发生变形或破坏, 其内部能量快速释放而产生的一种瞬时冲击波的现象。它是一种测试岩石在应力作用下的变形行为的强有力方

法。声发射参数包括基本参数和特征参数。基本参数能够通过监测设备直接获得，如时域、频域参数；特征参数则是以基本参数为基础，并通过数学方法所提取出的反应材料状态变化的数据信息，例如：振铃计数、能量、振铃计数率、能量率等。

表 1 各级蠕变情况表

Fig. 1 Creeps at various levels

试样编号	应力/MPa	历时/h	蠕变量/%	蠕变速率/h <sup>-1</sup>
RY1	31.6	10	2.80	0.0012
RY2	39.5	10	4.37	0.0017
RY3	47.4	10	7.52	0.0028
RY4	55.3	10	9.79	0.0036
RY5	63.2	10	12.82	0.0046

本次试验在利用声发射监测仪对试验全过程进行长期的同步监测和数据采集后，得到了大量的声发射参数，由于数据量过大，本文仅对振铃计数和能量两个参数进行处理，并结合声发射时空分布特征图，以此来反映岩盐蠕变过程中的声发射特征。

(1) 振铃计数特征

从图3可以看出，每一级加载初期，即瞬态蠕变阶段，振铃计数率快速增大。随着岩盐内部晶体之间的错位和裂隙的闭合，岩盐处于压密阶段，振铃计数率逐渐降低并趋于平稳。进入稳态阶段，声发射活动保持在长期稳定状态，应变速率保持在一个常数值，蠕变速率与计数率成正比。对比各应力水平下振铃计数率-时间关系曲线，发现随着轴向应力的增大，声发射振铃计数曲线变得愈发密集，且峰值也有所增大，从40%到80%应力，试样对应峰值分别为465，631，858，993，1146（单位均为次/s）。主要因为偏应力的增大加速了岩盐内部裂隙、空洞以及界面的闭合，促进了新裂纹的产生与扩展，使得声发射频率增加，振铃计数率增大。

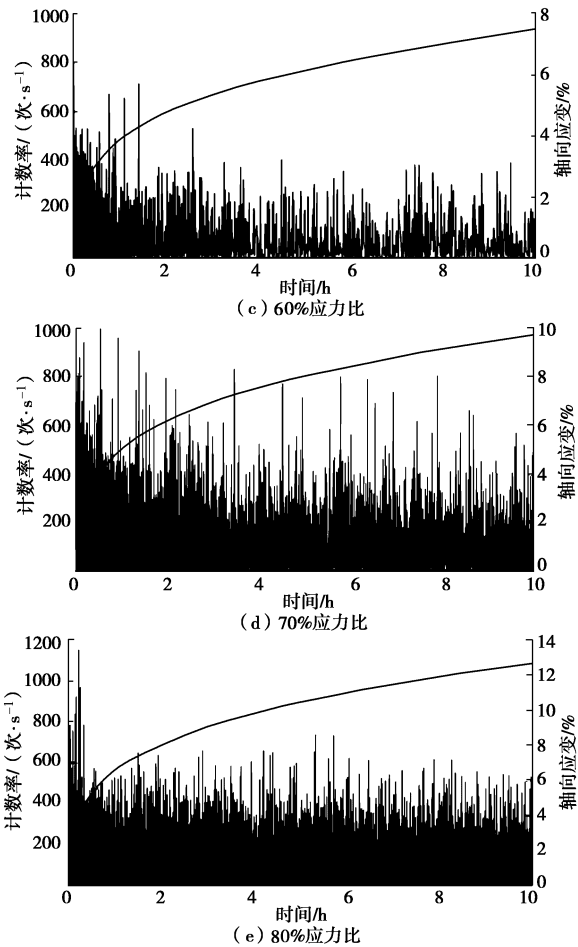
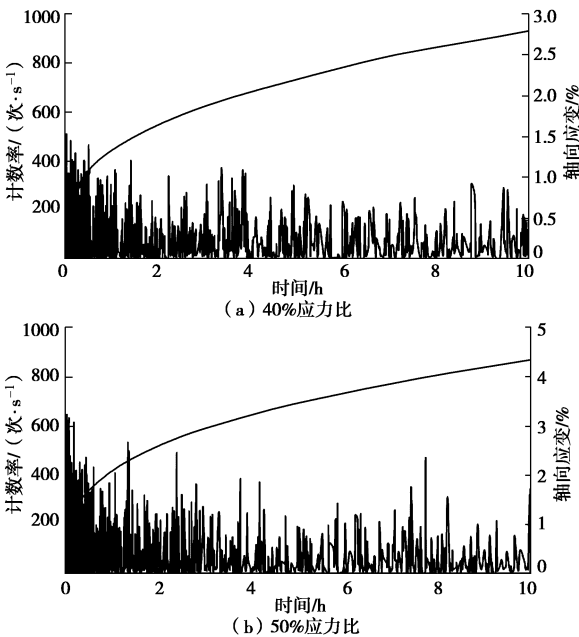


图 3 振铃计数率-时间-轴向应变关系曲线

Fig. 3 Ringing count rate-time-axial strain curves

对振铃计数进行累加，得到累计振铃计数-时间曲线。对比图1和图4可看出，蠕变曲线与累计计数曲线走势基本保持一致，应变增加越快，累计振铃计数增长也越快，这表明振铃计数率大小与岩盐蠕变速率有着直接的联系，且两者为正比关系。此外，从图4可以看到，随着轴向应力水平的增大，振铃计数总量也随之增大，分别为0.131，0.246，0.323，1.334，2.563（单位均为10<sup>5</sup>次），80%应力水平下声发射累计计数约为40%应力的20倍。这是因为较大的轴向应力能够促进岩盐内部微裂纹的萌发和扩展，并造成岩盐内部晶体滑移加剧，促使结构面错位运动发展加快，从而令振铃计数的总量增加<sup>[10-12]</sup>。

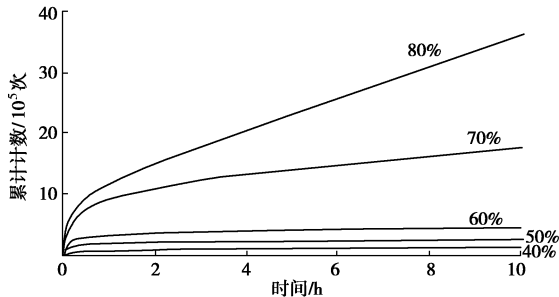


图 4 累计振铃计数-时间关系曲线

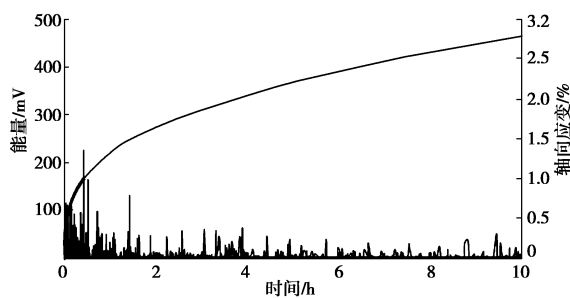
Fig. 4 Total ringing count-time curves

## (2) 能量特征

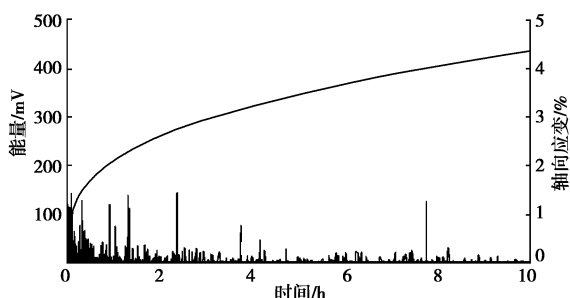
岩盐的蠕变过程本身就是应变能的积累与释放的过程, 而声发射能量参数能够反映岩盐蠕变不同阶段的应变能变化规律, 对该参数进行分析与探讨, 可得知岩盐内部的变形特征。

从图5可以看出, 在应力施加后, 岩盐被快速压密, 硬化作用明显, 此时原生裂隙被压密和新生裂纹开始萌发, 部分应变能释放, 能量出现小段峰值。随着岩盐恢复作用的增大, 硬化作用逐渐被岩盐恢复作用所抵消, 两者处于平衡状态, 能量随之降低后保持平稳, 应变能开始处于一个积累的过程, 中间仍能间断看到能量率比较高的现象, 说明该阶段仍伴有少量裂纹的产生。本次试验未能看到应变能再次释放, 能量再次增加的现象, 岩盐蠕变能量变化的现象同时反映岩盐内部的破坏是呈周期性的, 是一个能量释放与聚积的更替过程。

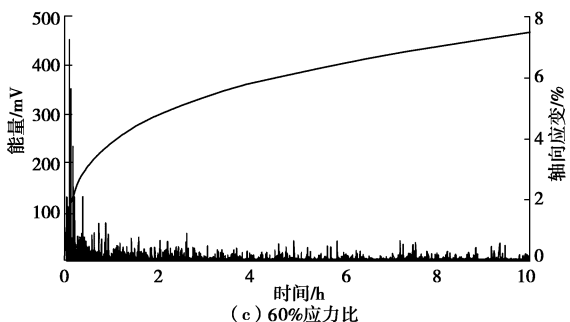
从图6可以看出, 不同应力水平下, 累积能量-时间曲线走势基本与轴向应变-时间曲线基本相同。随着轴向应力的增大, 累积能量增长率也随之增大。这说明能量曲线与振铃计数曲线有类似的特征。



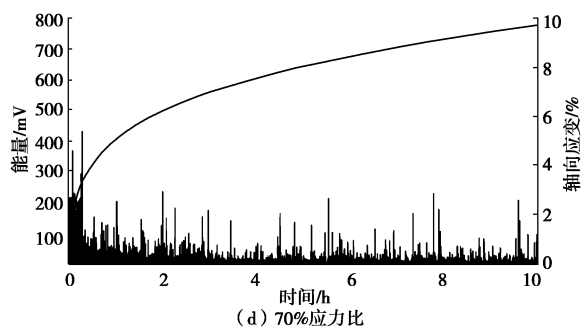
(a) 40%应力比



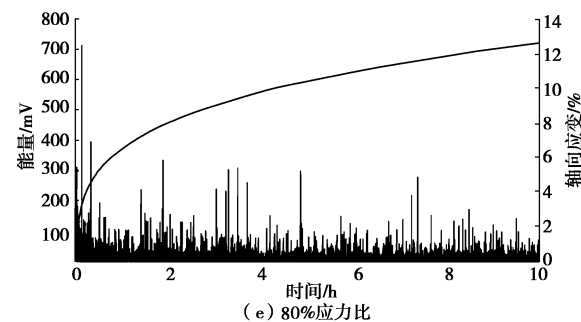
(b) 50%应力比



(c) 60%应力比



(d) 70%应力比



(e) 80%应力比

图5 能量-时间-轴向应变关系曲线

Fig. 5 Energy-time-axial strain curve

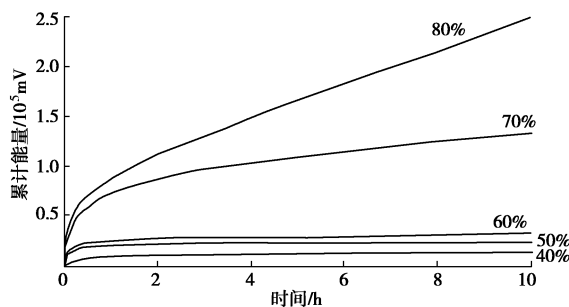


图6 累积能量-时间关系曲线

Fig. 6 Total energy-time curves

## (3) 声发射时空分布特征

本试验中, 除了对声发射的特征参数进行监测和采集外, 还对各时间点的岩盐内部损伤破坏部位进行了空间定位, 并以此对岩盐破坏过程中的损伤演化过程进行还原。根据各时段内事件发生的数量和部位, 可以较为准确的模拟出损伤演化的特征。

为了对蠕变各个阶段的声发射情况进行连续观察, 本文采用时段定位法, 对该试验各阶段的AE定位分别进行还原。从图4和图6能看出前0.5 h声发射累计参数增长率很大, 故以试验前0.5 h和后9.5 h划分时段, 对AE定位点进行还原, 得到声发射还原图, 见图7。

可以看到, 不同应力水平下, AE定位点还原后的特征有所不同。从整体上看, 由于每一级的应力等级都在增加, AE定位点总数目也随之增加, 说明声发射活跃程度与应力大小是有直接联系的, 这与上文结论一致。

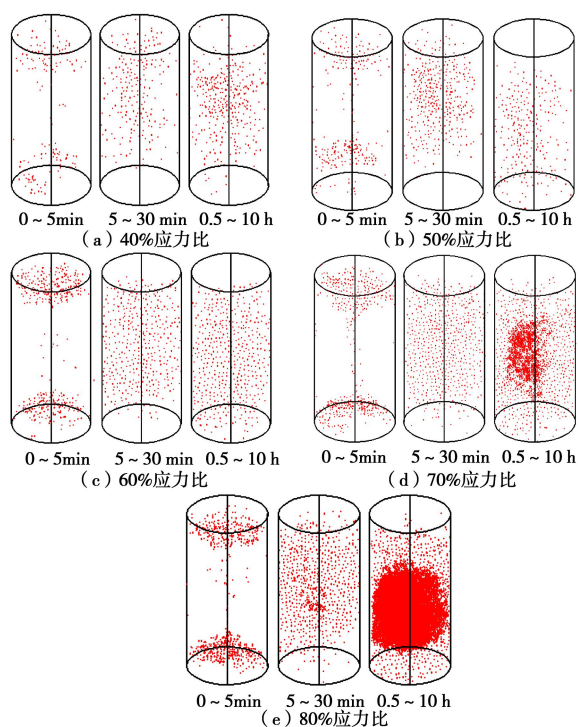


图7 声发射时空分布特征图

Fig. 7 Time-space distribution of AE

从时间分布上来看,加载后短期内AE定位点都增加的较快,之后增长速度减慢。其中RY1、RY2和RY3由于应力较低,AE定位点较少,瞬态时期0.5 h内的定位点数量分别为827, 1821, 3031, 稳态时期9.5 h内的定位点数量分别为785, 1020, 2281, AE定位点主要产生于前期。然而,对于RY4和RY5,瞬态0.5 h内定位点分别为6822, 9691, 稳态9.5 h内分别为11779, 38022, AE定位点主要产生在后期。这说明在60%~70%应力比之间,存在某个临界应力,当超过该应力时,AE定位点便开始向后期聚积。从图8可以看出,声发射累计计数和累计能量在应力比超过60%后,其累计计数开始上升,由此可以确定该临界应力为60%应力比,即47.4 MPa。这是因为在瞬态蠕变时期,AE定位点主要是岩石的天然损伤,即内部原生裂隙扩展引起的,随着岩盐被压密,岩盐的原生裂隙闭合,新生裂隙开始萌发和发展,岩盐进入稳态蠕变时期,该时期的AE定位点主要由新裂隙扩展引起,当轴向应力超过该应力后,稳态蠕变时期新生裂隙产生较快<sup>[11-12]</sup>,故表现为后期AE定位点的增多以及累计计数和累计能量增大。此外该临界应力是否与岩盐长期强度之间有着某种联系,还有待后期研究。

从空间分布上看,前期AE事件点主要分布于试件两端,这是主要是受试件端部约束的影响,之后AE定位点向中部靠拢,说明了试件从中部开始出现微观裂纹,这是一个损伤发展的过程。

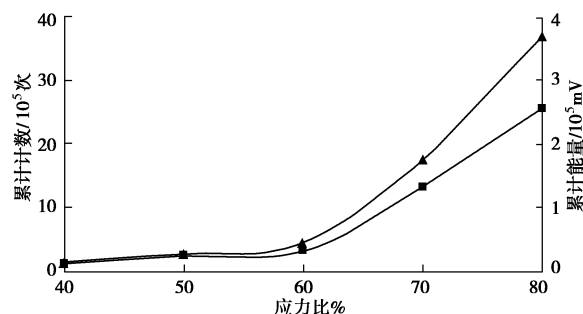


图8 累计计数-偏应力-累计能量曲线

Fig. 8 Total count-deviatoric stress-total energy curves

#### (4) 声发射分形特征

岩盐的蠕变过程是一个损伤不断积累和发展的过程,谢和平通过大量试验数据,总结出损伤发展过程确实是一个分形且具有很好的统计自相似性,而声发射本就是材料在荷载作用下变形破坏所产生的一种现象,自然也具有分形特征。试验表明,在荷载作用下,岩石变形破坏过程中产生的声发射序列在时间域和空间域上都具有明显分形特征。本文以Grassberger和Procaccia提出的G-P算法为基础,利用计算机编程,计算出各试样在不同应力条件下各时段的时间域分形维数,见图9。

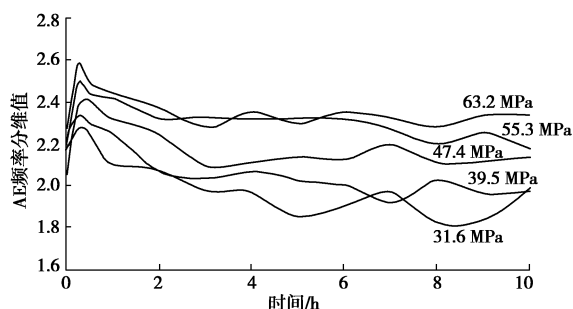


图9 不同应力条件下 AE 事件率分维值

Fig. 9 Fractal dimension values of AE events rate under different stresses

分析图9中的AE事件率分维变化曲线,各应力条件下声发射分维值都是呈上升-下降-波动的趋势,对应着各时期岩盐内部破坏的规律。试验初期,分形维数上升,表明岩盐内部被压密并伴有少量裂纹不均匀的产生,为内部损伤发展无序性的表现;分维值的下降,意味着岩盐内部裂纹开始均匀出现,损伤由微观无序向着宏观破坏的有序发展<sup>[13]</sup>;此后分维值在长时间内保持动态稳定,该阶段损伤发展缓慢且均匀。对照声发射能量变化趋势,在蠕变初始阶段,岩盐裂纹开始萌发和发展,能量快速释放,随着岩盐被压密,裂纹发展变得缓慢,能量降低并维持在较低的水平,验证了岩盐蠕变损伤发展过程不仅是一个降维过程的同时,也是一个能量耗散的过程<sup>[14]</sup>。

对比不同应力条件的声发射分维值大小可看到,随着应力的增大,分维值基本呈增大趋势,对应的分维峰值分别为2.273, 2.298, 2.412, 2.447, 2.497, 均

在2到3之间, 表明应力增大使得声发射时空分布的复杂程度有所提高, 损伤向着愈不规律的方向发展。

### 3 结 论

(1) 三轴压缩条件下, 岩盐蠕变速率与声发射计数率、能量均成正比, 其蠕变曲线与声发射累计计数和累计能量曲线趋势相同。

(2) 围压一定, 增大轴向偏应力, 不仅能够加快蠕变速率, 还能增加AE试件点出现的数量, 振铃计数和能量的峰值也会有所增大, 表现为振铃计数率-时间曲线和能量-时间曲线愈发密集、累计振铃计数率和累计能量率增大以及振铃计数总数和能量总数增大。

(3) 应力低于临界应力47.4 MPa时, 稳态蠕变时期损伤演化较慢, AE事件点相对瞬态时期较少; 应力高于47.4 MPa时, 稳态时期损伤演化会加快, 表现为AE定位点相对瞬态蠕变时期较多。该临界应力值对于研究岩盐长期强度也具有一定的参考意义。

(4) 在整个试验中, 各试样AE事件率分维值均呈上升一下降一波动的趋势。随着应力增加, 声发射分维值也随之增大。从声发射的角度验证了岩盐蠕变损伤发展过程是一个分维值降低和能量耗散的过程。

### 参考文献:

- [1] MUNSON D E. Constitutive model of creep in rock salt applied to underground room closure[J]. Int J of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, **34**(2): 233 - 247.
- [2] CHAN K S, MUNSON D E, BODNER S R, et al. Cleavage and creep fracture of rock salt[J]. Acta Materialia, 1996, **44**(9): 3553 - 3565.
- [3] CHAN K S, BODNER S R, FOSSUM A F, et al. A damage mechanics treatment of creep failure in rock salt [J]. Int J of Damage Mechanics, 1997, **6**(2): 121 - 152.
- [4] YANG C H, DAEMEN J J K, YIN J H. Experimental investigation of creep behavior of salt rock[J]. Int J of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, **36**(2): 233 - 242.
- [5] 杨春和, 白世伟, 吴益民. 应力水平及加载路径对盐岩时效的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, **19**(3): 270 - 275.(YANG Chun-he, BAI Shi-wei, WU Yi-min. Stress level and loading path effect on time dependent proper ties of salt rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, **19**(3): 270 - 275. (in Chinese))
- [6] ALKANA H, CINARB Y, PUSCH G. Rock salt dilatancy boundary from combined acoustic emission and triaxial compression tests[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006, **43**(1): 108 - 119.
- [7] 高小平, 杨春和, 吴 文, 等. 盐岩蠕变特性温度效应的试

- 验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(12): 2054 - 2059. (GAO Xiao-ping, YANG Chun-he, WU Wen, et al. Experimental studies of temperature dependent properties of creep of rock salt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(12): 2054 - 2059. (in Chinese))
- [8] 周志威, 刘建锋, 吴 斐, 等. 层状岩穴储库中岩盐和泥岩蠕变特性试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2016, **48**(增刊 1): 100 - 106. (ZHOU Zhi-wei, LIU Jian-feng, WU Fei, et al. Experimental study on creep propertie of salt rock and mudstone from bedded salt rock gas storage[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2016, **48**(S1): 100 - 106. (in Chinese))
- [9] 邱贤德, 庄乾城. 盐岩流变特性的研究[J]. 重庆大学学报, 1995, **18**(4): 96 - 103. (QIU Xian-de, ZHUANG Qian-cheng. Research on the rheology behaviour of rock solt[J]. Journal of Chongqing University, 1995, **18**(4): 96 - 103. (in Chinese))
- [10] 刘建锋, 边 宇, 郑得文, 等. 三轴应力状态下岩盐强度分析探讨[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))
- [11] 杨春和, 陈 锋. 盐岩蠕变损伤关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, **21**(11): 1602 - 1604.(YANG Chun-he, CHEN Feng. Investigation on creep damage constitutive theory of salt rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, **21**(11): 1602 - 1604.(in Chinese)).
- [12] 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 De-yi, 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. (in Chinese))
- [13] 熊雪强. 分级循环加卸载砂岩蠕变声发射特性研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2012: 51 - 58. (XIONG Xue-qiang. Study of creep acoustic emission characteristics of sand rock under step-cyclic loading and unloading[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2012: 51 - 58. (in Chinese))
- [14] 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. (in Chinese))