

文章编号: 1007-2993(2024)03-0351-07

盐水干湿循环作用下红砂岩损伤 及蠕变声发射试验研究

马星辰 宋海波 安雪蕾 王臣博 汪新健
(山东省水利勘测设计院有限公司, 山东济南 250013)

【摘要】 为研究水化学溶液作用下红砂岩的损伤劣化机制, 在 Na_2SO_4 溶液和 NaOH 溶液两种盐溶液环境下进行了干湿循环试验和蠕变声发射试验。结果表明: 红砂岩的初始损伤随着干湿循环次数的增加而逐渐累积, 砂岩在酸性 Na_2SO_4 溶液中的损伤劣化程度大于在 NaOH 溶液中的损伤劣化程度; 随着干湿循环次数的增大, 砂岩的初始损伤越来越严重, 蠕变声发射信号逐渐从高频高幅值向低频低幅值转变, 声发射累计事件数逐渐减小; 相同干湿循环次数下, Na_2SO_4 溶液中砂岩的声发射累计事件数低于 NaOH 溶液中砂岩的声发射累计事件数; 声发射 b 值呈“降低—动态稳定—突降—增大”四个变化阶段, 突降出现在加速蠕变阶段前后, 可作为砂岩即将发生蠕变失稳破坏的前兆; 声发射 b 值随着干湿循环次数的增加而逐渐增大, 水化学损伤软化现象越严重, 蠕变过程中小尺度的破坏占比越大。

【关键词】 红砂岩; 化学溶液; 干湿循环; 蠕变; 声发射; 损伤; b 值

【中图分类号】 TU45

【文献标识码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2024.03.014

Sandstone Damage and Creep Acoustic Emission under Salt Water Dry-wet Cycle

Ma Xingchen Song Haibo An Xuelei Wang Chenbo Wang Xinjian

(Shandong Survey and Design Institute of Water Conservancy Co., Ltd., Jinan 250013, Shandong, China)

【Abstract】 To study the damage and deterioration mechanism of red sandstone under the action of aqueous chemical solution, a dry-wet cycle test and creep acoustic emission test were carried out in Na_2SO_4 solution and NaOH solution. The results showed that the damage of red sandstone gradually accumulates with the increase of dry-wet cycle times, and the damage deterioration degree of sandstone in acid Na_2SO_4 solution is greater than that in NaOH solution. With the increase of dry-wet cycles, the softening damage of sandstone is becoming increasingly severe, the creep acoustic emission signal gradually changes from "high frequency and high amplitude" to "low frequency and low amplitude", and the cumulative number of acoustic emission events gradually decreases. Under the same dry-wet cycle times, the cumulative number of acoustic emission events of sandstone in Na_2SO_4 solution is lower than that in NaOH solution. The acoustic emission b value shows four stages of "decrease - dynamic stability - sudden drop - increase". The sudden drop occurs before and after the accelerated creep stage, which can be used as a precursor of creep instability failure of sandstone. The b value of acoustic emission gradually increases with the increase of dry-wet cycles. The more serious the hydrochemical damage softening phenomenon is, the greater the proportion of small-scale damage in the creep process.

【Key words】 red sandstone; chemical solution; dry-wet cycle; creep; acoustic emission; damage; b value

0 引言

水化学溶液作用是一种复杂的物理和化学腐蚀损伤过程, 会导致岩石发生宏观力学性能的降低和微观结构劣化, 对工程边坡、井壁、巷道围岩的长期稳定性构成严重威胁, 研究不同水化学溶液作用下岩石的长期力学性质具有重要意义^[1]。

砂岩是地下工程中比较常见的岩石之一, 常规情况下具有较高的强度和抗渗性, 但是在开挖与支护过程中, 围岩经常处于干湿交替状态, 众多研究表明, 砂岩经过长时间的干湿循环之后, 会发生明显的软化现象, 从而导致围岩发生失稳破坏^[2-4]。此外, 地下水的赋存状态十分复杂, 含有 Na^+ 、 K^+ 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 OH^-

作者简介: 马星辰, 男, 1988 年生, 汉族, 河南周口人, 硕士, 高级工程师, 主要从事水文地质、工程地质及环境地质工作。E-mail: zeigd2408@163.com

通讯作者: 宋海波, 男, 1987 年生, 汉族, 山东滨州人, 汉族, 硕士, 高级工程师, 主要从事水文地质、工程地质及环境地质工作。E-mail: songhuns2@163.com

等多种离子,使得地下水经常处于酸性或者碱性状态,对砂岩会构成进一步的化学腐蚀损伤,加剧了砂岩力学性质的劣化^[5-10]。声发射(Acoustic Emission,简称AE)作为一种无损检测技术,可对材料在损伤劣化过程中因应力集中而突然释放瞬态弹性波的现象进行跟踪检测,反映了材料位错运动、裂纹萌生与扩展、断裂、无扩散相变、热胀冷缩等一系列变化,在石油化工工业、电力工业、材料试验、航天和航空工业、民用工程等各个领域得到了广泛应用。李达朗等^[11]对不同干湿循环次数下红砂岩进行了单轴压缩声发射试验,得到了声发射参数与砂岩变形和干湿次数的关系;宋朝阳等^[12-13]通过声发射试验,对干湿循环作用下弱胶结砂岩的变形破坏机理进行了解释;龚 函等^[14-15]则利用声发射技术探讨了红砂岩蠕变变形过程中的分形特征和 b 值特征,并提出利用 b 值对岩石蠕变破坏进行预测。

目前关于砂岩水化学腐蚀作用下力学性能的研究较多,利用声发射对砂岩也有一定研究,但结合声发射参数变化特征对砂岩在水化学溶液作用下的长期力学的研究还比较少见。因此,本研究开展了不同酸碱性盐溶液干湿循环作用下砂岩的损伤和蠕变声发试验,揭示水化学溶液作用下砂岩的蠕变破坏机理,为相关工程提供理论支撑。

1 试验概况

1.1 试验试样

试验所用砂岩取自某引水工程隧洞,埋深约 550 m,平均密度 2.31 g/cm^3 ,呈红褐色,砂岩颗粒均匀,以黏土矿物、钙质氧化物为主的基质式胶结,无层理和裂纹,表观完整性较好。对试样进行 XRD 测试,结果显示红砂岩的主要矿物组成情况为:石英 58.5%、长石 22%、方解石 9.3%、赤铁矿 6.7%、绿泥石 2%、其他 1.5%。将取回的试样进行钻芯、切割及打磨等加工工序,制成直径为 50 mm、高度为 100 mm 的标准圆柱形试件(见图 1)。

1.2 盐溶液配制

考虑到地下水中的主要离子成分为 Na^+ 、 K^+ 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 OH^- 等,选择 Na_2SO_4 和 NaOH 两种盐溶液作为主要研究对象,两种盐溶液的离子浓度均为 0.1 mol/L , $\text{pH}(\text{Na}_2\text{SO}_4)=3$, $\text{pH}(\text{NaOH})=12$ 。

1.3 试验方案

本次试验共设计 3 个试验组,分别为对照试验组(不进行干湿循环)、 Na_2SO_4 溶液试验组以及 NaOH 溶液试验组,干湿循环等级为 5 次、10 次和 20

次(见表 1)。1 次干湿循环的规则为:将处理好的试样放入配制好的盐溶液中自由吸水 24 h,再将试样从盐溶液中取出放入烘干箱中干燥 24 h,为尽量减小温度对试验结果的影响,干湿循环过程中烘干箱的温度设置为 55°C ,每 1 次干湿循环后均要对溶液的 pH 和浓度进行重新修正和调配,确保每次干湿循环盐溶液的 pH 和浓度均与初始设计情况相符。对达到干湿循环次数的试件进行密度、吸水率和声波测试,进行单轴压缩试验,得到对应的强度,以单轴抗压强度的 80% 作为蠕变加载应力,进行不同盐溶液干湿循环作用下砂岩蠕变声发射试验。



图 1 试验标准试件

表 1 干湿循环试验方案

试验组	pH	干湿循环/次
对照组		0
Na_2SO_4	3	5
		10
		20
NaOH	12	5
		10
		20

1.4 试验步骤

(1)砂岩现场取样,制作成标准圆柱形试验试件,并对每个试件的初始干密度、吸水率以及声波速度进行测试,将标准圆柱形试件放到烘干箱(温度 105°C)中干燥 24 h。

(2)配制好盐溶液,并将干燥处理好的砂岩试件放到盐溶液进行浸泡,按照上述干湿循环的试验过程进行处理。

(3)对达到干湿循环次数的试件进行密度、吸水率以及声波速度测试,将其放到微机控制电子万能试验机上进行单轴压缩试验,采用位移控制方式,位移加载速率为 0.005 mm/s ,每组试验 3 个。

(4)将试件用保鲜膜包裹并放置到 ZYSS2000 型

蠕变仪加载台上固定, 声发射采用 PCI-2 型, 声发射探头与试件表面用黄油涂抹, 以保证良好的耦合性, 声发射传感器谐振频率为 150 kHz, 前置放大增益和门槛值均设置为 40 dB。声发射参数设置好后, 取单轴压缩试验强度平均值的 80% 作为蠕变加载应力, 开始进行蠕变声发射试验, 试验过程示意图 2。

(5) 对试验数据进行整理和分析。

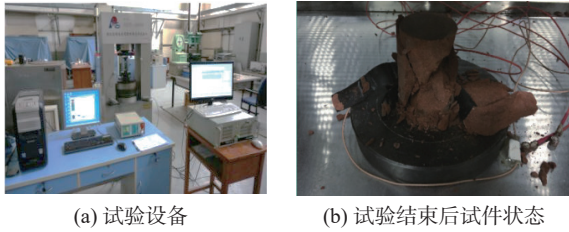


图 2 试验过程示意

2 物理力学性质损伤劣化

2.1 密度与吸水率

不同盐溶液干湿循环作用下砂岩的密度和吸水率随干湿循环次数的变化规律见图 3。从图 3 可知, 在同一盐溶液环境下, 随着干湿循环次数的增加, 砂岩的密度逐渐降低, 而吸水率逐渐升高, 表明盐溶液干湿循环对砂岩的初始损伤是逐渐累积的, 在干湿循环作用下, 砂岩中的可溶性胶结物逐渐发生溶解, 同时砂岩的矿物质会与 H^+ 、 OH^- 等发生化学反应, 生成的矿物离子会随着孔隙裂隙析出砂岩, 从而导致砂岩质量和密度降低, 而矿物离子析出留下的孔隙会由水分填充, 因而砂岩的吸水率会逐渐升高; 干湿循环下, 砂岩颗粒处于干燥压应力和膨胀拉应力的交替受力过程, 但颗粒间胶结力因矿物质溶解而逐渐降低, 当胶结力小于膨胀拉应力后, 砂岩就会产生裂纹, 这又会促进盐溶液与砂岩发生新一轮的化学反应, 从而造成砂岩内部的侵蚀更严重, 因此砂岩的初始损伤随干湿循环次数逐渐累积。

在相同干湿循环次数下, NaOH 溶液中的砂岩密度相对更大, 吸水率相对更低, 这说明砂岩在酸性环境下的损伤更严重, 这是因为酸性溶液中的 H^+ 会与砂岩中的绝大部分矿物质(如钾长石、钠长石、方解石会与之反应析出 K^+ 、 Al^{3+} 、 Na^+ 、 Ca^{2+}) 发生化学反应, 这种溶解反应可以自发进行, 而在碱性溶液中, 石英会与 OH^- 自发反应, 长石和方解石主要为胶结物, 而石英主要为骨料组成部分, 骨料的溶解对于砂岩黏聚力和内摩擦角的影响小于胶结物的影响, 因此, 在酸性溶液中的损伤更加严重。

2.2 纵向波速

不同盐溶液干湿循环作用下砂岩的纵向波速随

干湿循环次数的变化规律见图 4。从图中可以看到: 砂岩纵向波速随干湿循环次数的增加而逐渐降低, 这是因为在干湿循环和水-化学共同作用下, 砂岩的内部孔隙、裂隙不断萌生和发展, 导致砂岩试件的内部孔隙结构发生改变, 因而砂岩的纵向波速不断降低。相同干湿循环次数下, NaOH 溶液中砂岩的纵向波速下降幅度要小于在 Na_2SO_4 溶液中的下降速度, 这主要是因为, 在酸性溶液中, 溶解的主要是胶结物, 而在碱性溶液中溶解的主要是石英颗粒, 胶结物对砂岩孔隙结构的影响更大, 因而纵向波速下降更快。

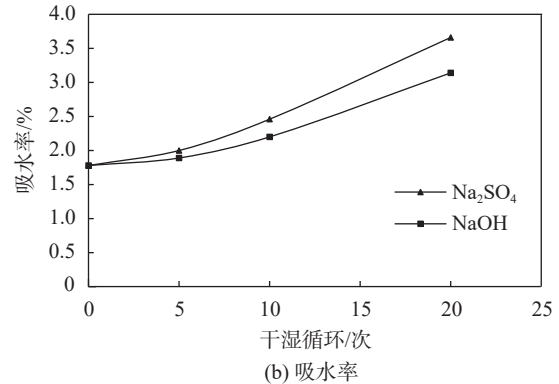
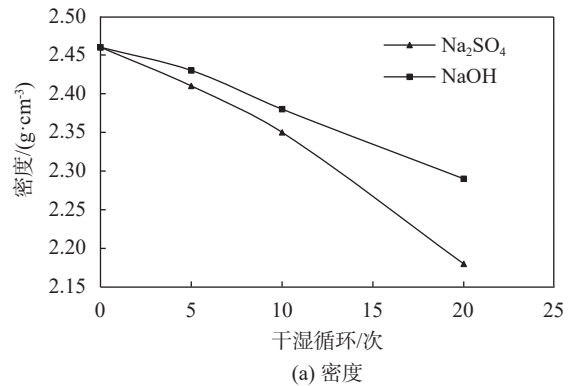


图 3 密度和吸水率随干湿循环次数变化规律

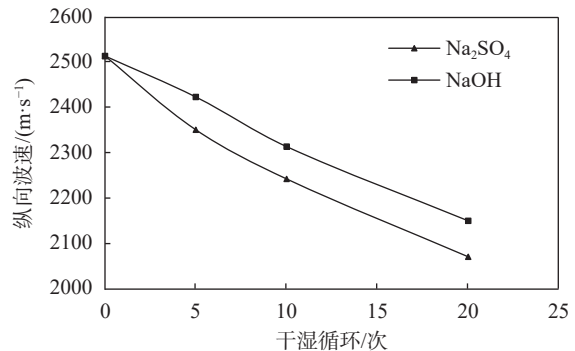


图 4 纵向波速随干湿循环次数变化规律

定义砂岩在盐溶液中干湿循环的损伤量^[16]为

$$D = 1 - V_n^2 / V_0^2 \quad (1)$$

式中: D 为损伤量; V_0 为砂岩初始纵波速度, m/s; V_n

为砂岩经过 n 次干湿循环后的纵波速度, m/s。利用(1)式计算得到的在 Na_2SO_4 溶液中经 5 次、10 次和 20 次干湿循环后的初始损伤值分别为 0.06, 0.107 和 0.176, 在 NaOH 溶液中经 5 次、10 次和 20 次干湿循环后的初始损伤值分别为 0.036, 0.079 和 0.144。

2.3 单轴压缩试验

试验得到的不同盐溶液干湿循环作用下砂岩的单轴压缩试验结果见图 5 和表 2。砂岩的单轴压缩应力-应变曲线大致可分为四个阶段: 初始压密阶段、弹性变形阶段、塑性变形阶段以及峰后残余变形阶段, 对照试验组砂岩应力-应变曲线在达到峰值应力后突降, 表现出较为明显的脆性破坏特征, 而经过盐溶液干湿循环之后, 砂岩的塑性变形能力逐渐增强, 从脆性破坏逐渐向延性破坏转变, 表明在干湿循环和水-化学共同作用下, 砂岩泥化情况逐渐严重, 出现了明显的软化现象, 软化情况越严重, 砂岩的蠕变变形越明显, 表现出更强的软化塑性变形特性, 峰后残余变形更明显。从表 1 中可知, 随着干湿循环次数的增加, 砂岩的强度和弹性模量均呈逐渐减小的变化趋势, 且相同干湿循环次数下 Na_2SO_4 溶液中的砂岩强度和弹性模量较 NaOH 溶液更小, 这主要是因为酸性溶液中胶结物的溶解对砂岩黏聚力和内摩擦角的影响更大。

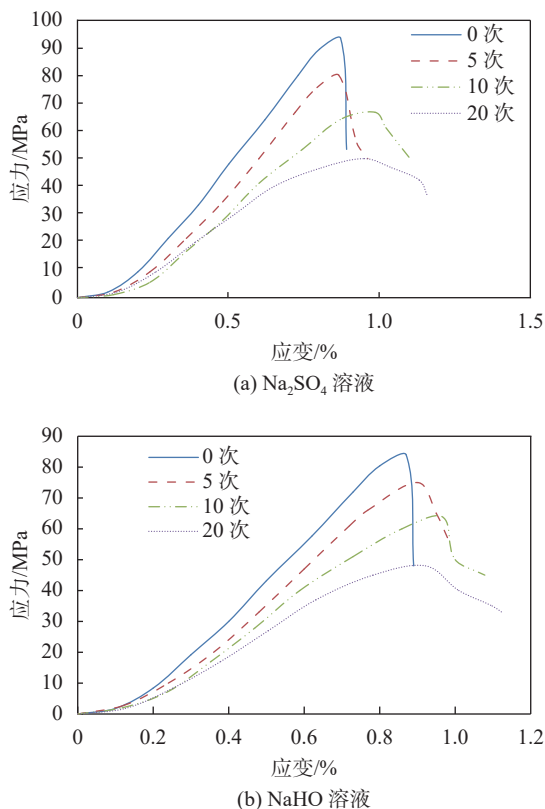


图 5 单轴压缩应力-应变曲线

表 2 单轴压缩试验结果

试验组	干湿循环/次	单轴抗压强度/MPa	弹性模量/GPa
对照组	0	84	12.1
	5	72	11.3
	10	60	8.8
Na_2SO_4	20	45	7.0
	5	75	11.4
	10	64	9.4
NaOH	20	48	7.6

3 蠕变声发射试验结果

3.1 蠕变声发射特征

试验得到的不同盐溶液干湿循环作用下砂岩蠕变声发射特征见图 6。从图 6 中可知, 在初始蠕变阶段, 由于砂岩内部存在大量原生或者次生的微孔隙、微裂隙, 在蠕变加载应力作用下, 会首先产生闭合现象, 导致骨料颗粒与颗粒之间会产生大量的摩擦信号, 因而声发射事件表现较为活跃; 在稳态蠕变阶段, 由于砂岩试件内部受力相对均衡, 裂缝处于不断产生和闭合之中, 因而声发射相对平静; 在加速蠕变阶段, 由于砂岩内部蠕变损伤达到阈值, 颗粒之间的胶结作用力不能维持自身结构的稳定。微裂纹逐渐发展并贯通, 导致试件发生失稳破坏, 在这一过程中声发射信号会随着蠕变速率的增大而逐渐活跃。

对比不同试验组的声发射特征可知, 在对照试验组下, 由于砂岩未经过盐溶液干湿循环, 保持着相对较为完整的内部结构, 砂岩的弹性模量较大, 在应力作用下, 需要积累更多的能量才能导致结构发生失效, 因而产生的瞬时弹性波较强, 声发射事件数较高, 特别是在蠕变加速阶段发生脆性断裂时, 砂岩瞬间断裂释放的声发射能量较大, 从整体上来讲, 对照试验组砂岩的蠕变声发射呈现高频高幅值的变化特征; 经盐溶液干湿循环作用后, 由于砂岩胶结物和骨料发生化学反应大量溶解于水, 同时砂岩发生了较为严重的泥化情况, 这些因素会导致砂岩出现明显的软化现象, 砂岩的弹性模量大大降低, 砂岩体微单位破坏所需积累的能量越小, 同时由于砂岩经盐溶液干湿循环后留下了较多的孔隙和裂隙, 这些孔隙裂隙很多已经贯通, 因而在蠕变初期, 除少量裂缝闭合之外, 已经存在的裂纹会继续扩展直至破坏, 砂岩初始蠕变阶段原生内部封闭应力自我调整过程就不太明显, 故而声发射表现出低频低幅值的变化特征; 相同盐溶液环境下, 干湿循环次数越多, 砂岩软化越严重, 声发射事件计数率越低, 相同干湿循环次数下, Na_2SO_4 溶液中的砂岩

的声发射事件计数率低于 NaOH 溶液中的砂岩的声发射事件计数率。

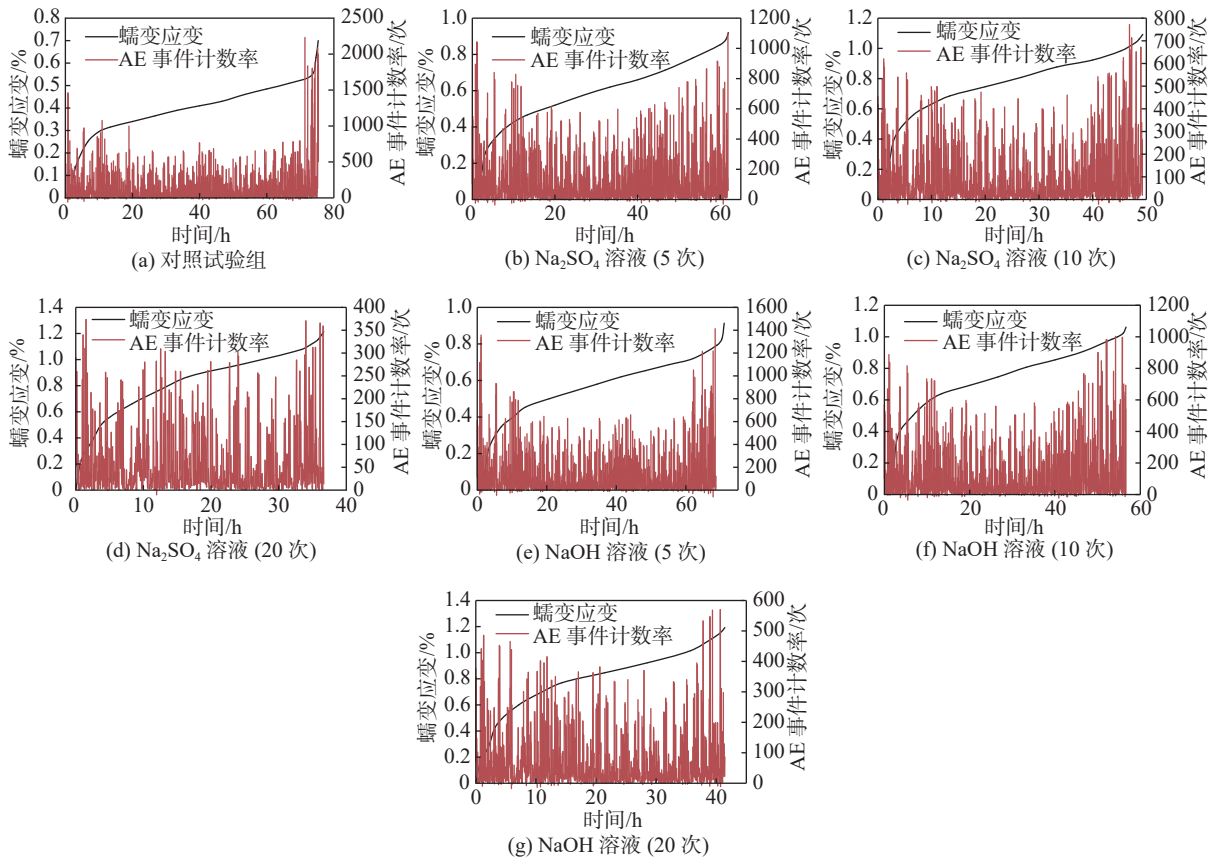


图 6 砂岩蠕变声发射特征

3.2 累计 AE 事件

试验得到的不同盐溶液干湿循环作用下砂岩累计 AE 事件数结果见图 7。从图中可知: 在初始和稳态蠕变阶段, 砂岩的蠕变声发射累计事件数近似呈直线上升, 在加速蠕变阶段声发射事件会有短暂的快速增长过程, 这表明利用声发射信号作为判别岩石是否进入加速蠕变阶段也是合理可行的; 相同盐溶液下, 随着干湿循环次数的增加, 声发射累计事件数逐渐降低, 相同干湿循环次数下, Na₂SO₄ 溶液中的砂岩的声发射事件累计计数低于 NaOH 溶液中的砂岩的声发射事件累计计数, 这再次说明盐溶液干湿循环对砂岩的损伤是逐渐累积的, 且 Na₂SO₄ 溶液对砂岩造成的初始损伤程度大于 NaOH 溶液。

3.3 声发射 b 值特征

由于声发射是岩石在破坏过程中应变能集中释放所监测到的声波信号, 因此, 可以将砂岩蠕变过程中的声发射认为是一种微地震活动, 并通过地震震级和声发射事件频率来计算声发射 b 值。根据 G-R 关系式

$$\text{Lg}N = a - bM \quad (2)$$

$$M = \text{lg}Q_i \quad (3)$$

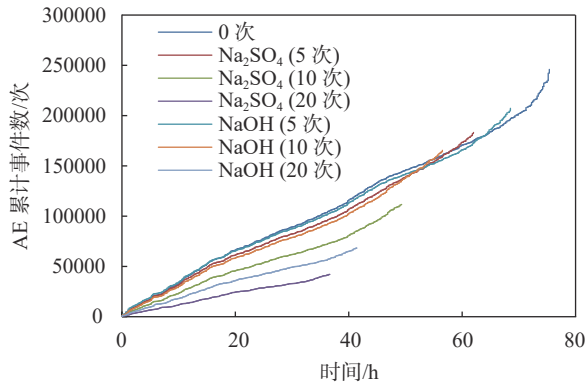
式中: N 为震级(声发射事件)次数; M 为震级; Q_i 为声发射能量值; a, b 为拟合常数。其中, b 值代表地震中相对震级分布的函数, 可以用来衡量地震活动水平, 反应了砂岩在蠕变过程中裂纹孕育、扩展和贯通的发展趋势, 即代表裂纹扩展尺度, b 值越大, 表示岩样主要以小尺度破坏为主。

将每隔 5 h 的声发射事件作为一个计算时间段, 统计该段时间内的声发射事件数和对应的能量值, 采用最小二乘法对不同蠕变试验组岩样的声发射 b 值进行计算, b 值统计计算式为:

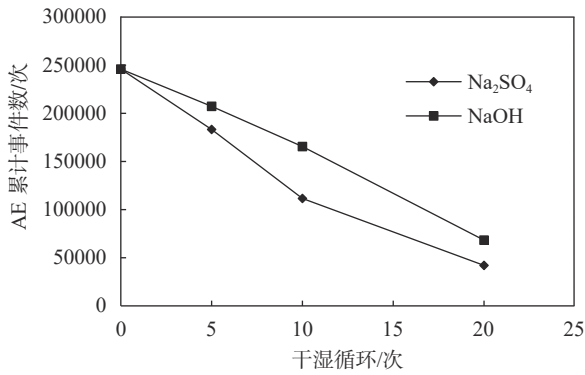
$$b = \frac{\sum M_i \sum \text{lg}N_i - \Delta m \sum M_i \sum \text{lg}N_i}{\Delta m \sum M_i^2 - (\sum M_i)^2} \quad (4)$$

式中: Δm 为震级分档间距, 本文取值为 0.5; M_i 为第 i 个分档的声发射事件数。

不同盐溶液干湿循环作用下砂岩蠕变声发射 b 值变化规律见图 8。从图中可知, 砂岩在蠕变过程中, 声发射 b 值一直处于动态波动变化状态; 在初始蠕变阶段, 主要为原生孔隙、裂隙的压密闭合过程, 砂岩颗粒之间会产生大量的摩擦信号, 因而声发射 b 值较大, 随着砂岩进入稳态蠕变, 内部裂纹处于缓慢



(a) AE 累计事件数曲线



(b) AE 累计事件数随干湿循环次数变化规律

图 7 累计 AE 事件

发展阶段,此时 b 值会处于相对比较平稳的发展过程,此时岩样以小尺度破坏为主,当砂岩进入加速蠕变阶段时,声发射 b 值会出现较大的下降过程,表明此时裂纹逐渐发展贯通,大尺寸裂纹数量大大增加,砂岩出现宏观破裂面,在加速蠕变后期,声发射 b 值会有较大幅度的上升,这主要是因为此时砂岩主裂纹已经发展贯通形成宏观破坏,此时声发射信号主要为次生裂纹扩展以及剪切面之间的滑动摩擦所导致,因而声发射 b 值在加速蠕变后期显著增大。由此可见,声发射 b 值出现大幅度突降现象预示着砂岩进入加速蠕变阶段,是砂岩即将发生失稳破坏的前兆。

对照试验组的声发射 b 值在稳态蠕变阶段主要集中在 0.38 ~ 0.42 附近变化, Na_2SO_4 溶液中干湿循环 5 次、10 次和 20 次后,声发射 b 值在稳态蠕变阶段的主要变化区间分别为: 0.41 ~ 0.44, 0.44 ~ 0.48, 0.49 ~ 0.52, NaOH 溶液中干湿循环 5 次、10 次和 20 次后,声发射 b 值在稳态蠕变阶段的主要变化区间分别为 0.4 ~ 0.44, 0.44 ~ 0.48, 0.48 ~ 0.51。由此可见,随着干湿循环次数的增加,砂岩蠕变破坏过程中的声发射 b 值逐渐增大,这是因为在干湿循环和盐溶液侵蚀的共同作用下,砂岩的软化现象逐渐严重,因而小尺度破坏的占比会逐渐增大。

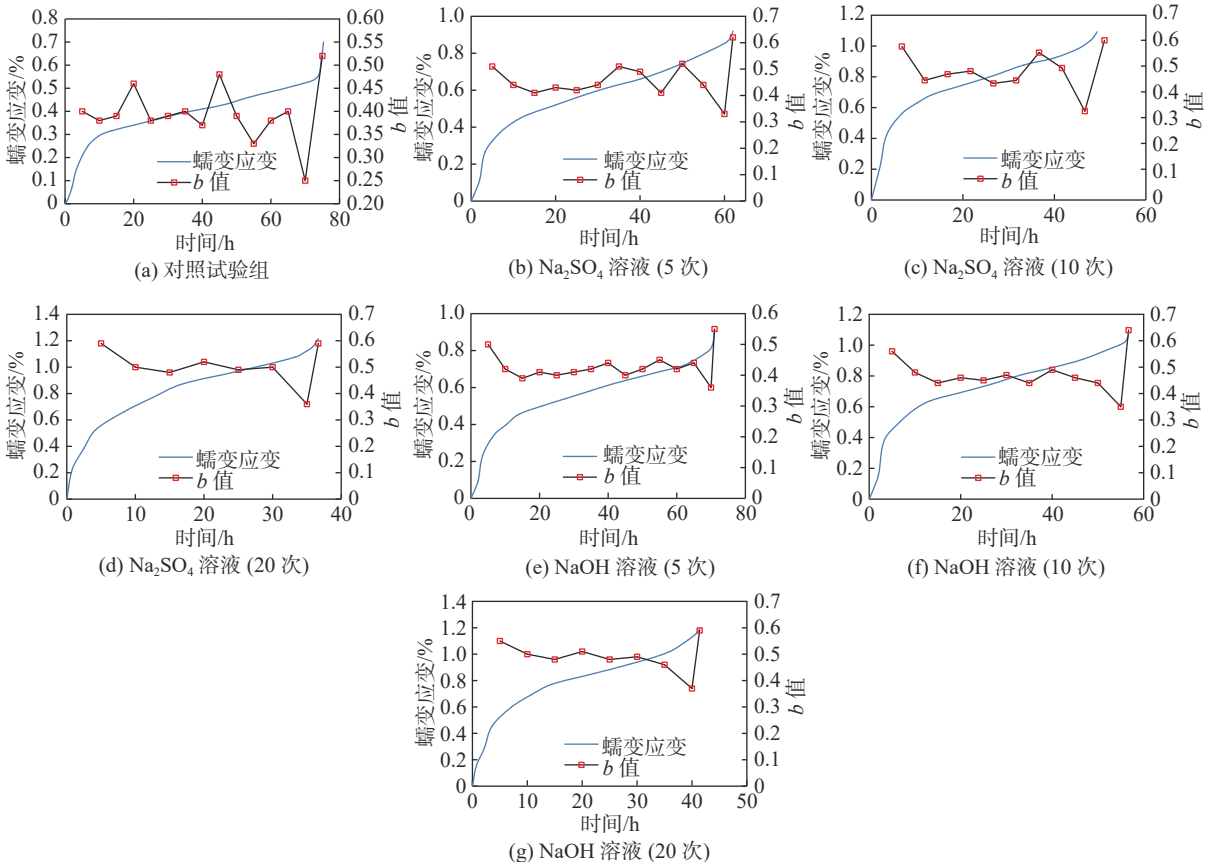


图 8 蠕变声发射 b 值计算结果

4 结论

(1)随着干湿循环次数的增加,砂岩的密度、纵向波速、强度和弹性模量逐渐减低,而吸水率逐渐升高,砂岩的初始损伤随干湿循环次数逐渐累积。

(2)在酸性溶液中, H^+ 主要与长石、方解石等胶结物反应,在碱性溶液中, OH^- 主要与石英等骨料组成成分发生化学反应,胶结物的反应与溶解对于砂岩黏聚力和内摩擦角的影响更大,因而在相同干湿循环次数下, Na_2SO_4 溶液中砂岩的损伤程度大于 $NaOH$ 溶液中砂岩的损伤程度。

(3)在初始和加速蠕变阶段,声发射信号相对活跃,在稳态蠕变阶段,声发射信号相对平静;随着干湿循环次数越多,砂岩的软化损伤逐渐严重,在蠕变过程中的声发射信号逐渐由高频高幅值向低频低幅值转变,声发射累计事件数逐渐降低。

(4)在盐溶液干湿循环作用下,会导致砂岩颗粒松动出现明显的软化现象,砂岩稳态蠕变阶段的声发射 b 值随着干湿循环次数的增加而逐渐增大,小尺度的破坏占比逐渐增加;声发射 b 值在加速蠕变前后出现突降现象,可作为砂岩即将发生蠕变失稳破坏的前兆。

参 考 文 献

- [1] PAN J L, CAI M F, LI P, et al. A damage constitutive model of rock-like materials containing a single crack under the action of chemical corrosion and uniaxial compression[J]. *Journal of Central South University*, 2022, 29(2): 486-498.
- [2] 刘 帅, 杨更社, 董西好. 干湿循环对红砂岩力学特性及损伤影响试验研究[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(4): 101-106.
- [3] 马芹永, 郁培阳, 袁 璞. 干湿循环对深部粉砂岩蠕变特性影响的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(3): 593-600.
- [4] 王来贵, 丁盛鹏, 安文博, 等. 不同溶液环境下砂岩干湿循环损伤特性试验研究[J]. *实验力学*, 2020, 35(3): 521-531.
- [5] 韩铁林, 师俊平, 陈蕴生. 化学腐蚀和干湿循环作用下砂岩 I 型断裂韧度及其强度参数相关性的研究[J]. *水利学报*, 2018, 49(10): 1265-1275.
- [6] 刘新荣, 袁 文, 傅 晏, 等. 化学溶液和干湿循环作用下砂岩抗剪强度劣化试验及化学热力学分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(12): 2534-2541.
- [7] 付建军, 董正东, 杨艳霜, 等. 不同水岩作用下砂岩的力学参数演化特征[J]. *沈阳工业大学学报*, 2020, 42(3): 350-354.
- [8] 陈绪新, 付厚利, 秦 哲, 等. 水化学作用及干湿循环对蚀变岩力学性质影响研究[J]. *矿业研究与开发*, 2017, 37(1): 98-102.
- [9] 孙治国, 鲁海涛. 水-岩化学腐蚀损伤作用下红砂岩蠕变特性试验研究[J]. *金属矿山*, 2021(4): 83-89.
- [10] 张峰瑞, 姜谔男, 江宗斌, 等. 化学腐蚀-冻融综合作用下岩石损伤蠕变特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2019, 40(10): 3879-3888.
- [11] 李达朗, 杨根兰, 鲁鲲鹏, 等. 干湿循环脆性红砂岩的孔隙及声发射特征研究[J]. *贵州大学学报(自然科学版)*, 2020, 37(2): 79-85.
- [12] 宋朝阳, 纪洪广, 刘志强, 等. 干湿循环作用下弱胶结岩石声发射特征试验研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2019, 36(4): 812-819.
- [13] 宋朝阳, 纪洪广, 蒋 华, 等. 干湿循环作用下弱胶结砂岩声发射特征及其微观劣化机理[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(S1): 96-103.
- [14] 龚 函, 李长洪, 赵 奎. 红砂岩短时蠕变声发射 b 值特征[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(S1): 85-92.
- [15] 龚 函, 赵 坤, 於鑫佳, 等. 红砂岩蠕变声发射分形特征[J]. *金属矿山*, 2021(4): 76-82.
- [16] 吴 春, 郭棋武, 洪 涛, 等. 基于超声检测的软岩单轴流变损伤试验[J]. *煤田地质与勘探*, 2017, 45(5): 105-111.

收稿日期: 2023-05-15