

多孔弱胶结粉砂岩疲劳强度确定方法及疲劳破坏先兆

梁明纯^{1,2}, 苗胜军^{1,2}, 蔡美峰^{1,2}, 黄正均^{1,2}, 王 辉^{1,2}

(1. 北京科技大学 城市地下空间工程北京市重点实验室, 北京 100083; 2. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083)

摘要: 为了研究多孔弱胶结粉砂岩的疲劳力学特性, 通过单轴阶梯加卸载试验建立了一种新的特征应力定量计算方法, 然后开展上限荷载位于不同应力区间的单轴等幅循环加卸载试验, 研究粉砂岩的疲劳强度确定方法和疲劳破坏先兆。新建特征应力定量计算方法将岩石的体应变分离为以岩石骨架为主的固相结构线弹性体应变、以裂纹为主的气相结构非线性弹性体应变及不可逆的塑性体应变, 并提出气相非线性弹性体应变最大点、塑性体应变最大点、塑性体应变由正转负点、总体应变由正转负点分别对应粉砂岩的闭合应力、启裂应力、损伤应力和绝对扩容应力。该方法具备科学合理的物理意义, 并解决了特征应力划分受主观因素影响的难题。由新建方法获得的损伤应力和绝对扩容应力可以分别视为单轴循环荷载下发生高周和低周疲劳破坏的临界上限应力。当上限应力低于损伤应力时, 循环荷载作用下粉砂岩骨架颗粒间发生错动滑移, 使试件细观结构重新排列、体积逐渐压缩、体积柔量逐渐增大, 随着循环次数增多, 下限应力处残余体应变、体积柔量和声发射累计计数等逐渐趋于稳定。当上限应力高于损伤应力时, 声发射累计计数持续增加, 粉砂岩内部裂纹快速扩展使残余体应变和体积柔量迅速减小, 试件最终发生疲劳破坏, 而体积柔量由正变负可视作发生疲劳破坏的早期先兆。循环加卸载过程中声发射事件数与 k 呈对数线性关系, 其中斜率 b_k 可用于描述岩石破裂模式, 而 b_k 的陡增可视作发生疲劳破坏的临界征兆。

关键词: 多孔弱胶结粉砂岩; 循环加卸载; 疲劳; 破坏先兆; 疲劳强度

中图分类号: TD313

文献标志码: A

文章编号: 0253-9993(2023)04-1476-11

Determination method of fatigue strength and precursors of fatigue failure of porous weakly cemented siltstone

LIANG Mingchun^{1,2}, MIAO Shengjun^{1,2}, CAI Meifeng^{1,2}, HUANG Zhengjun^{1,2}, WANG Hui^{1,2}

(1. Beijing Key Laboratory of Urban Underground Space Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Civil and Resource Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to study the fatigue behavior of porous weakly cemented siltstone, a quantitative calculation method of characteristic stress was established based on uniaxial step loading and unloading tests of siltstone. Then uniaxial cyclic loading and unloading tests of constant amplitude were carried out to study the volumetric strain, bulk compliance, and acoustic emission evolution of siltstone where the upper limit stress was in different stress ranges. The new method separates volumetric strain into the linear elastic strain of solid-phase dominated by rock skeleton, the non-linear elastic strain of gas-phase dominated by void, and the irreversible plastic strain. The peak points of gas-phase and plastic volumetric

收稿日期: 2022-03-11 修回日期: 2022-06-17 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2022.0313

作者简介: 梁明纯 (1993—), 男, 河北保定人, 博士研究生。E-mail: lmch1993@outlook.com

通讯作者: 苗胜军 (1979—), 男, 山东威海人, 教授、博士生导师。E-mail: miaoshengjun@163.com

引用格式: 梁明纯, 苗胜军, 蔡美峰, 等. 多孔弱胶结粉砂岩疲劳强度确定方法及疲劳破坏先兆[J]. 煤炭学报, 2023, 48(4): 1476-1486.

LIANG Mingchun, MIAO Shengjun, CAI Meifeng, et al. Determination method of fatigue strength and precursors of fatigue failure of porous weakly cemented siltstone[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(4): 1476-1486.



移动阅读

strain are taken as crack closure stress and crack initiation stress, besides the points of gas-phase volumetric strain and total volumetric strain changes from positive to negative are taken as crack damage stress and absolute dilatation stress, solving the problem that the calculation of characteristic stress is affected by subjective factors. The crack damage stress and absolute dilatancy stress determined by the new method can be regarded as the threshold stress of low-cycle and high-cycle fatigue failure. When the upper limit stress is lower than the crack damage stress, the continuous friction and slippage between the skeleton particles and the microstructure rearrangement under cyclic loading and unloading result in the specimen being gradually compressed. As the times of cyclic loading-unloading increase, the residual volumetric strain, bulk compliance, and cumulative acoustic emission count tend to be stable. When the upper limit stress is higher than the crack damage stress, due to the generation of a large number of cracks, the residual volumetric strain and bulk compliance continue to decrease while the cumulative acoustic emission count continues to increase, resulting in a fatigue failure of the specimen. The change of bulk compliance from positive to negative can be regarded as the early precursor of fatigue failure. The number of acoustic emission events N_{AE} and k are approximately in a logarithmic-linear relationship. On this basis, it is proposed slope b_k to describe the fracture pattern. The sudden increase of b_k can be regarded as the early precursor and critical precursor of fatigue failure.

Key words: porous weakly cemented rocks; cyclic loading-unloading; fatigue; precursors of fatigue failure; fatigue strength

煤炭是我国的主体能源, 2021 年煤炭消费量占能源消费总量的 56.0%^[1]。近年来我国煤炭资源的开发重心逐渐由中东部地区向西部地区转移, 西部地区的岩层通常表现为强度低、胶结程度弱等特征^[2], 在采掘扰动、周期性来压等循环荷载影响下容易发生疲劳损伤和破坏^[3-4]。因此, 研究循环荷载作用下弱胶结岩石的变形破坏机制和破坏先兆特征对工程灾害预测预报、保障煤矿安全高效开采具有重要意义。

岩石在循环荷载作用下的强度及变形特征与单调加载下有较大区别。BROWN 和 HUDSON^[5]发现循环荷载下的疲劳应力-应变曲线与静态单调加载应力-应变曲线密切相关; 葛修润等^[6]研究了循环荷载下大理岩的疲劳寿命, 提出了岩石发生疲劳破坏的应力“门槛值”概念; BAGDE 等^[7]研究了循环加卸载过程中应力幅值对砂岩疲劳损伤的影响, 提出岩石的轴向刚度和动态模量随幅值的增大而减小; 赵凯等^[8]发现循环荷载下石灰岩轴向变形呈现三阶段演化规律, 且破坏前的累积变形量不受加卸载频率的影响; 李浩然等^[9]研究了三轴多级循环荷载作用下盐岩的超声波波速及声发射的变化特征, 并用裂隙密度和声发射 Felicity 比描述试件的损伤破裂程度; 刘涛等^[10]发现大理岩、砂卡岩和蛇纹岩在低幅值循环荷载下以剪切破坏为主, 而在高幅值循环荷载下会出现板裂化破坏和碎块弹射等现象; 祝艳波等^[11]研究了石膏质岩石的疲劳损伤特性, 结果表明循环应力水平越高、加载频率越低, 试件的疲劳损伤速率越快; 周阳等^[12]发现循环加卸载过程中千枚岩的弹性模量呈现出增大—平缓—降低的变化规律。

有效识别循环荷载作用下岩石破坏的前兆信息是煤矿安全施工的重要基础, 诸多学者对岩石疲劳破坏的先兆信息进行了研究^[13-14]。何明明等^[15]分析了砂岩、砾岩及砂砾岩的阻尼特性, 发现疲劳破坏前阻尼比快速增长; 黄正均等^[16]研究了花岗岩疲劳寿命与体积应变率的关系, 并确定了岩石疲劳破坏的体积应变率“门槛值”; 杨小彬等^[17]建立了描述花岗岩变形局部化的统计指标 S_w , 并提出加卸载过程中 S_w 差的降低是岩石破坏的前兆信息; SONG 等^[18]研究了大理岩疲劳膨胀规律, 并根据应力-应变滞后行为建立了基于“超前比”和“滞后比”的岩石破坏失效指标; SANG 等^[19]采用尾波干涉法计算岩石等效波速和动弹模量, 并以此识别页岩的疲劳破坏。这些研究从多种角度分析和解释了岩石的疲劳损伤过程, 但难以给出物理意义明确的破坏临界阈值^[20]。而且, 目前的研究多集中于致密岩石, 对循环荷载下弱胶结岩石力学性质和破坏先兆的研究较少。

鉴于此, 笔者以多孔弱胶结粉砂岩为研究对象, 首先通过单轴压缩和单轴阶梯加卸载试验建立一种科学合理的特征应力定量计算方法; 然后开展上限应力位于不同应力区间的单轴等幅循环加卸载试验, 研究粉砂岩在疲劳损伤过程中的应变、声发射演化规律和疲劳破坏的先兆信息。

1 试 验

1.1 试件选取

本文所用粉砂岩结构松散、孔隙发育, 主要矿物成分为石英、长石、云母 (图 1), 起胶结作用的黏土矿

物含量较少,属于多孔弱胶结岩石^[21]。为了减小试验结果的差异性,本次所用试件均取自同一块岩石,平均纵波波速为 2 165 m/s,孔隙率为 19.9%。图 2 为采用 SUPAR 55 场发射扫描电镜获得的粉砂岩细观结构。可见粉砂岩骨架颗粒呈较为松散的不规则随机排列,颗粒间接触方式以面-面接触、点-面接触为主^[22],颗粒与颗粒间存在大量孔隙,孔隙中填充有起胶结作用的细粒黏土矿物。

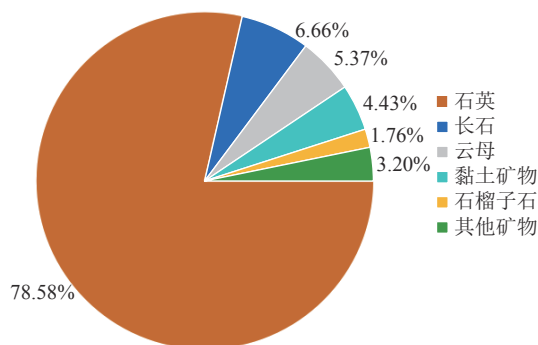


图 1 粉砂岩矿物成分

Fig.1 Mineral composition of siltstone

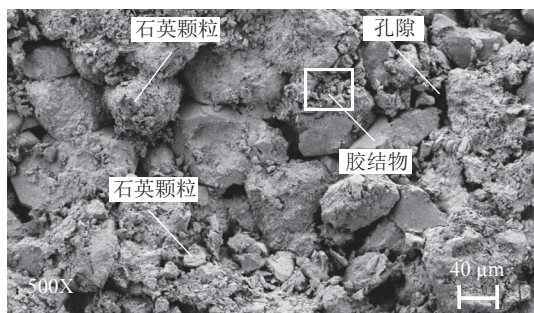


图 2 粉砂岩细观结构

Fig.2 Meso-structure of siltstone

胶结物的细观结构如图 3 所示,可见大部分胶结物呈规则排列的薄片状,互相叠合形成层状结构,而少部分胶结物呈细小颗粒状并团聚成颗粒团。这些胶结物分布于骨架颗粒周围,一方面提供颗粒间的黏聚力,另一方面增加了骨架颗粒之间的摩擦因数。

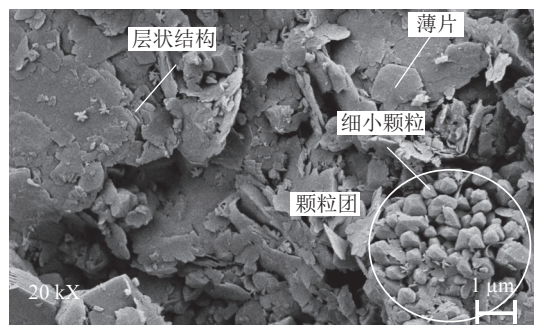


图 3 胶结物细观结构

Fig.3 Meso-structure of cement

1.2 试验设备

试验采用北京科技大学 MTS815 岩石力学测试系统进行加载,同时采用 PCI Micro- II Express 8 声发射系统,并通过 6 个 Nano-30 型声发射探头进行声发射监测(图 4)。声发射前置放大器增益值、阈值、采样频率分别设置为 40 dB、36 dB 和 1 MHz。

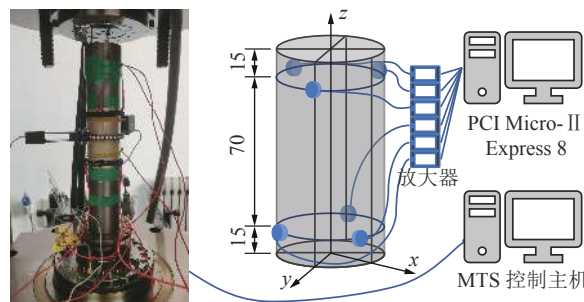


图 4 试验系统

Fig.4 Test system

2 基于体应变的特征应力计算方法

2.1 单轴压缩与单轴阶梯加卸载试验

为了研究不同应力条件下粉砂岩的疲劳力学行为,首先进行单轴压缩试验与单轴阶梯加卸载试验以确定粉砂岩的特征应力。

单轴压缩试验首先以 0.1 MPa/s 的速率将轴向应力(σ_1)加载至体应变最大点,然后以 0.03 mm/min 的环向变形速率加载至试件破坏。单轴阶梯加卸载试验的应力路径如图 5 所示,每级加卸载中先以 0.1 MPa/s 的轴向应力(σ_1)速率加载,当体应变达到最大值后以 0.03 mm/min 的环向变形速率加载,直至轴向应力达到本级上限应力,然后以 0.25 MPa/s 的轴向应力速率卸载至 0.2 MPa。具体试验设计见表 1。

单轴压缩试验与单轴阶梯加卸载试验的应力-体应变曲线如图 6、7 所示。由图 6、7 可以看出,单轴压

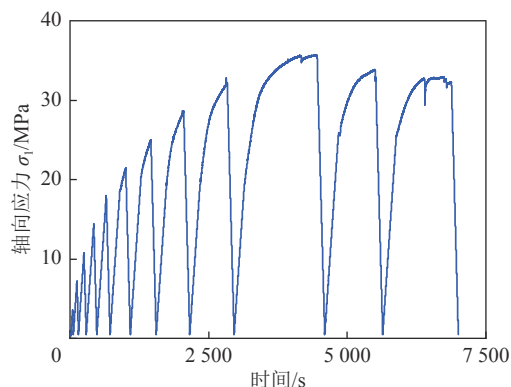


图 5 单轴阶梯加卸载试验应力路径(S-2)

Fig.5 Stress paths of uniaxial incrementally loading-unloading test (S-2)

表1 单轴阶梯加卸载试验设计

Table 1 Uniaxial incrementally loading and unloading test

试件	首次循环上限应力/MPa	上限应力梯度/MPa
S-1	单轴压缩	单轴压缩
S-2	3.7	3.7
S-3	3.0	2.0
S-4	4.0	2.0

缩与阶梯加卸载条件下,粉砂岩体应变拐点应力均未达到单轴抗压强度(UCS)的50%,与致密硬岩70%~85%的比值存在明显差异^[23-25]。同时,粉砂岩的应力和轴向应变在体应变拐点前后仍呈线性相关,表明体应变拐点处应力不适宜作为粉砂岩的损伤应力,而以体应变拐点作为计算关键点的闭合应力和启裂应力定量确定方法亦不适用。因此有必要研究适用于多孔弱胶结粉砂岩的特征应力定量计算方法。

2.2 特征应力计算方法

岩石内部裂纹扩展具有记忆效应,只有施加应力超过历史最大应力后裂纹才会快速增加^[26-27]。因此,较少次数的加卸载并不会令应力-应变包络线偏离单调加载的应力-应变曲线,2种加载条件下的特征应力

近似相同(图6和图7),均可反映岩石在原始状态下的力学特征。由于阶梯加卸载试验可以准确分离弹性应变和塑性应变,本文基于阶梯加卸载试验对粉砂岩的体应变进行分离,以建立科学合理的特征应力计算方法。

目前常用的体应变分离方法是将单轴压缩试验体应变分解为线性弹性体应变和非线性裂纹体应变^[2]。该方法在应用过程中受限于2个问题:①弹性常数没有明确的取值标准,取值差异对体应变分离结果影响较大;②闭合应力和启裂应力均由裂纹体应变的线性段确定,取值受到主观因素影响较大。为此,笔者基于阶梯加卸载试验提出一种多相体应变分离方法。

考虑到每一次卸载后试件均存在较大的塑性体应变,因此首先将荷载作用下粉砂岩的体应变分解为弹性体应变 ε_v^e 和塑性体应变 ε_v^p 。当加载至某一级上限应力时,从该应力完全卸载后的体应变即该上限应力处岩石的塑性体应变,而上限应力处的总体应变 ε_v^t 与塑性体应变之差即弹性体应变。

岩石的弹性体应变主要由3部分组成:①以岩石颗粒为主的固相结构线弹性体应变(固相线弹性体应变 ε_v^s)^[28],可由平均应力与体积模量计算获得;②随着

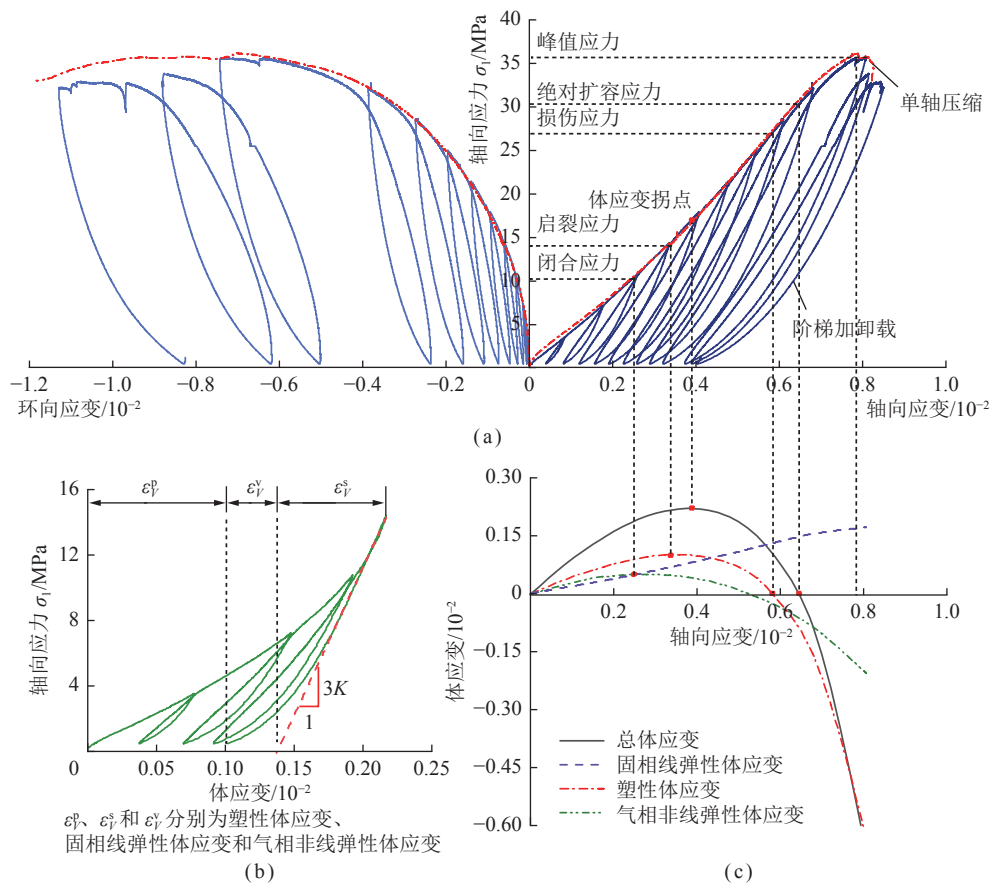


图6 粉砂岩单轴阶梯加卸载应力-应变曲线及特征应力确定方法 (S-2)

Fig.6 Stress-strain curves and characteristic stress of siltstone under uniaxial incrementally loading-unloading (S-2)

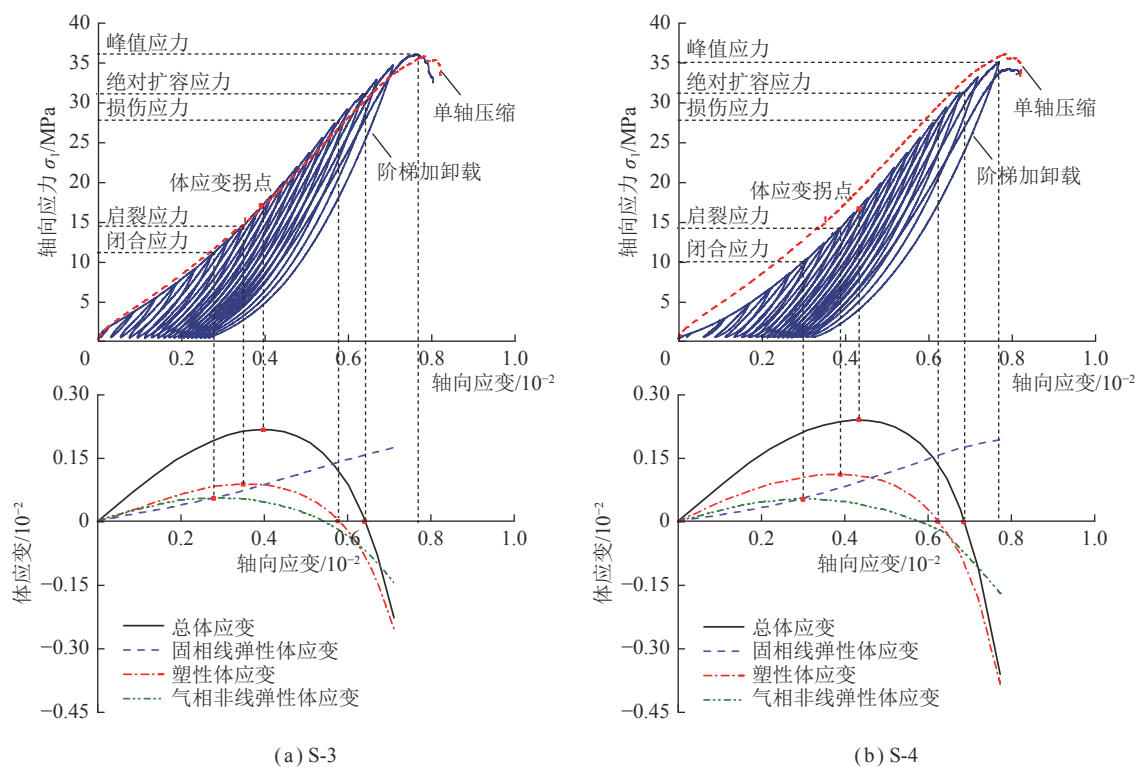


图7 试件 S-3、S-4 应力-应变曲线

Fig.7 Stress-strain curves of specimen S-3 and S-4

应力逐渐增高, 孔隙、裂纹等气相结构沿轴向逐渐闭合, 其中可恢复的应变即弹性压密应变^[24]; ③ 应力作用下剪切裂纹间相对位移使岩石内部产生次生张拉裂纹, 张拉裂纹的可逆变形产生沿横向的弹性膨胀应变^[29]。后 2 种应变可以统称为气相非线性弹性体应变 ε_v^s , 其中孔隙、裂纹沿轴向的压密应变主要发生在较低应力, 其增长速率随着应力的增高而逐渐降低, 而张拉裂纹的弹性膨胀应变的主要发生在较高应力, 其增长速率随着应力的增高而逐渐增大。

如图 6(b) 所示, 当总体应变处于最大值时岩石处于最致密状态, 此时张拉裂纹的弹性膨胀应变较小, 轴向弹性压密应变基本停止增长并且应力卸载时不会立刻恢复。所以此时的卸载切线模量最接近岩石颗粒的真实性质, 可以作为岩石颗粒等固相结构的体积模量。单轴条件下固相线弹性体应变和气相非线性弹性体应变的计算公式为

$$\begin{cases} \varepsilon_v^s = \sigma_1/3K \\ \varepsilon_v^s = \varepsilon_v^+ - \varepsilon_v^p - \varepsilon_v^s \end{cases} \quad (1)$$

式中, K 为固相体积模量。

阶梯加卸载试验中粉砂岩的塑性体应变、固相线弹性体应变和气相非线性弹性体应变计算结果如图 6(c) 和图 7 所示。可见在加卸载初期, 粉砂岩部分裂纹随着应力增加逐渐闭合使气相非线性弹性体应变逐渐增大; 随着应力增加, 气相非线性弹性体应变到达极大值

点后开始减小, 表明此时部分原生裂纹重新张开, 因此可以将最大气相体应变对应的轴向应力作为闭合应力; 而塑性体应变到达极值点后逐渐降低, 表明试件内部开始生成新裂纹, 因此可以将塑性体应变最大时的轴向应力作为启裂应力。

随着上限应力进一步增加, 粉砂岩总体应变增长至最大值后开始降低, 而塑性体应变持续降低。当塑性体应变由正变负时, 代表粉砂岩的裂纹体积较原始体积开始增加, 保持该荷载时试件将持续弱化, 因此笔者提出将塑性体应变由正变负时对应的轴向应力作为损伤应力。相较于总体应变最大点, 塑性体应变由正变负更符合微裂纹由稳定扩展转变为不稳定扩展的宏观表现。对于致密硬岩, 其塑性体应变较小, 当总体应变达到最大值后塑性体应变几乎同时由正变负, 通过体应变最大点与塑性体应变由正变负点确定的损伤应力较为接近; 而多孔弱胶结粉砂岩的塑性体应变较大, 总体应变最大点和塑性体应变由正变负点具有明显的先后顺序, 因此通过塑性体应变由正变负点确定的损伤应力更为合理。

当轴向应力超过绝对扩容应力后, 粉砂岩内部产生的大量裂纹使塑性体应变、气相弹性体应变的减小量超过固相弹性体应变的增加量, 试件由受压收缩转变为受压膨胀。

基于上述方法获得的粉砂岩的特征应力计算结

果见表 2, 可见不同试件的特征应力结果较为相近, 并且闭合应力、启裂应力、损伤应力和绝对扩容应力与峰值应力的比值分别为 0.31、0.41、0.78 和 0.86, 均在经验范围内^[30]。综上, 笔者提出了一种基于多相体应变演化特征的特征应力确定方法, 该方法物理意义科学明确, 计算结果合理, 并且全过程无需人工参与, 避免了结果受主观因素干扰。

表 2 粉砂岩特征应力

Table 2 Characteristic stress of siltstone

试件编号	S-2	S-3	S-4	平均值
闭合应力 σ_{cc}/MPa	10.60	11.94	10.45	11.00
启裂应力 σ_{ci}/MPa	14.16	14.68	14.26	14.37
损伤应力 σ_{cd}/MPa	27.30	27.95	27.86	27.70
绝对扩容应力 σ_{ad}/MPa	29.54	31.19	31.37	30.70
峰值应力 σ_f/MPa	35.65	36.22	35.18	35.68
σ_{cc}/σ_f	0.30	0.33	0.30	0.31
σ_{ci}/σ_f	0.40	0.41	0.41	0.41
σ_{cd}/σ_f	0.77	0.77	0.79	0.78
σ_{ad}/σ_f	0.83	0.86	0.89	0.86

3 多孔弱胶结粉砂岩疲劳破坏先兆

3.1 单轴等幅循环加卸载试验

为了研究上限应力对粉砂岩疲劳力学行为的影响, 开展单轴等幅循环加卸载试验。如图 8 所示, 循环加卸载试验分为 2 个阶段。单调加载阶段以 0.1 MPa/s 的速率将轴向应力加载至 15 MPa, 然后以 0.03 mm/min 的环向变形速率加载至循环上限应力。循环加卸载阶段对试件施加正弦波波形的轴向循环荷载, 循环荷载的上限应力 σ_{\max} 设置在单轴条件下的启裂应力与峰值强度之间, 而循环下限 σ_{\min} 设置为 2.5 MPa 以防止试件与试验机脱离。综合考虑试验机

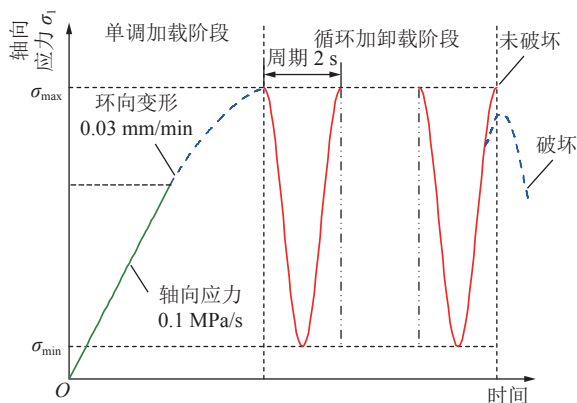


图 8 单轴循环加卸载试验应力路径示意

Fig.8 Stress path of uniaxial cyclic loading-unloading test

应力控制精度和试验时长, 将加卸载频率设为 0.5 Hz。粉砂岩单轴循环加卸载试验结果见表 3。

表 3 粉砂岩单轴循环加卸载试验结果

Table 3 Uniaxial cyclic loading-unloading results of siltstone

试件编号	上限荷载/kN	上限应力/MPa	循环次数	最终状态
S-5	30.0	15.31	8 000	未破坏
S-6	45.0	22.96	8 000	未破坏
S-7	55.0	28.06	15 000	未破坏
S-8	58.0	29.59	1 336	破坏
S-9	60.5	30.87	846	破坏
S-10	61.0	31.12	1 186	破坏
S-11	61.5	31.37	559	破坏
S-12	63.0	32.14	94	破坏
S-13	65.0	33.16	26	破坏

3.2 体应变变化规律及疲劳破坏早期先兆

单轴压缩与部分循环加卸载试验的应力-应变曲线如图 9 所示, 循环加卸载试验中下限应力处的残余体应变如图 10 所示。以单轴压缩试验为例, 轴向应力 (σ_1) 约 16 MPa(46% 单轴抗压强度) 时试件总体应变达到最大值, 轴向应力约 30 MPa(85% 单轴抗压强度) 时岩石进入绝对扩容阶段。由于首次达到循环上限应力时岩石内部裂纹的扩展状态对后续损伤发育规律具有重要影响, 笔者根据上限应力与特征应力的关系将上限应力划分为 3 个区间。当循环加卸载试验的上限应力低于损伤应力 (27.70 MPa) 时, 单调加载至循环上限应力的过程中试件总体应变持续增大 (S-5, 图 9) 或先增大再逐渐减小 (S-6, 图 9); 而循环加卸载过程中, 局部胶结物破坏使岩石骨架颗粒发生错动、细观结构不断重新排列调整, 导致气相结构体积逐渐减小、残余体应变逐渐增大 (图 10)。当上限应力高于绝对扩容应力 (30.07 MPa) 时, 初期单调加载过程中总体应变先逐渐增大再逐渐减小; 循环加卸载过程中细观结构重新排列的同时张拉裂纹也在持续扩展, 使试件整体表现为体积持续膨胀, 残余体应变呈减速减小—匀速减小—加速减小的趋势, 试件在循环一定次数后发生疲劳破坏。而当上限应力介于损伤应力与绝对扩容应力之间时, 初期单调加载过程中总体应变先逐渐增大再逐渐减小; 转为循环加卸载后残余体应变减小速率逐渐放缓, 循环一定次数后残余体应变趋于缓慢匀速降低状态。

由于粉砂岩由受压收缩转为受压膨胀时体积模量处于无穷间断点, 不利于分析粉砂岩损伤发育过程中力学性质的连续变化, 在此采用体积柔量 (体积模

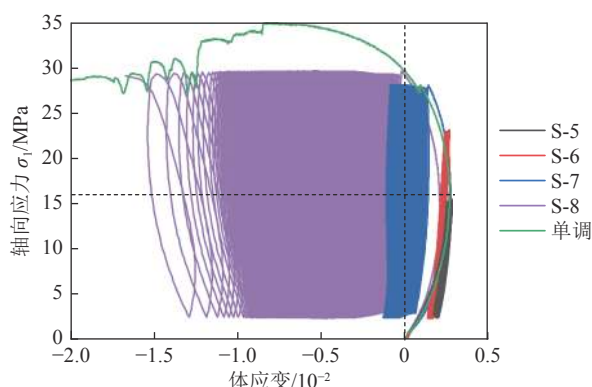


图 9 单轴压缩和部分循环加卸载试验粉砂岩应力-体应变曲线

Fig.9 Stress-volumetric strain curves of partial siltstone under uniaxial cyclic loading-unloading and monotonic compression

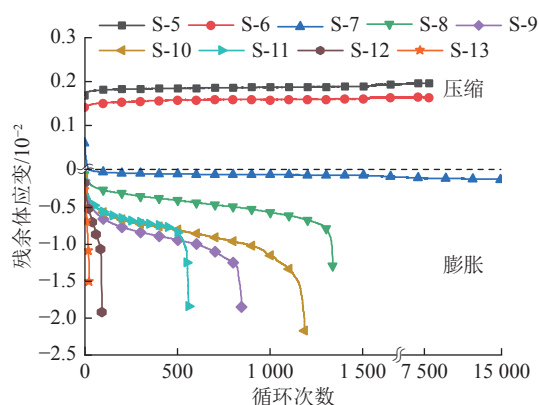


图 10 单轴循环加卸载过程中残余体应变演化规律

Fig.10 Residual volumetric strain under uniaxial cyclic loading-unloading

量的倒数) 进行分析^[31]。体积柔量的计算方法为以卸载阶段应力-体应变曲线的割线柔量 J_i 作为相应循环的体积柔量。

$$J_i = 3 \frac{\varepsilon_{V,i}^{\max} - \varepsilon_{V,i}^{\min}}{\sigma_{1,i}^{\max} - \sigma_{1,i}^{\min}} \quad (2)$$

式中, $\sigma_{1,i}^{\max}$ 和 $\sigma_{1,i}^{\min}$ 、 $\varepsilon_{V,i}^{\max}$ 和 $\varepsilon_{V,i}^{\min}$ 分别为第 i 次循环的上限应力和下限应力、上限应力处和下限应力处的体应变。

循环加卸载过程中不同试件的体积柔量计算结果如图 11 所示。由图 11 可知, 当上限应力低于损伤应力时, 循环加卸载过程中体积柔量先短时增大然后保持稳定, 表明加卸载初期裂纹扩展使试件抵抗变形的能力降低, 之后随着试件逐渐压密, 承载面积增加而有效应力降低, 裂纹逐渐停止扩展, 试件抵抗变形的能力趋于稳定。当上限应力高于绝对扩容应力时, 试件在单调加载过程中产生较多裂纹, 循环荷载作用下这些裂纹的开闭使裂纹体积与应力呈负相关^[32], 抵消了岩石固相结构的部分变形; 随着循环次数增加、

裂纹增多, 这一现象愈加显著, 使体积柔量整体呈现逐渐降低的趋势, 并最终使加载时裂纹体积的增量大于岩石固相结构的体积减小量, 试件整体表现为受压膨胀。而当上限应力介于损伤应力与绝对扩容应力之间时, 试件体积柔量表现为逐渐减小, 并向 0 逼近。

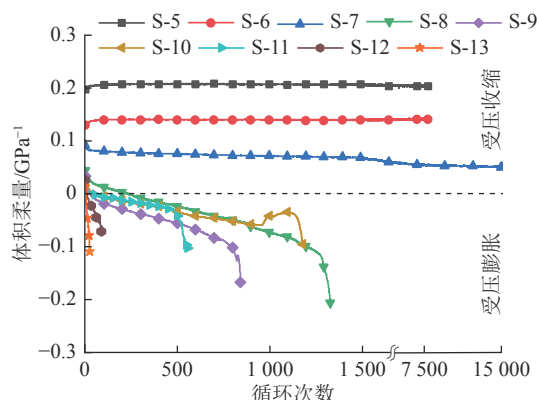


图 11 单轴循环加卸载过程中体积柔量演化规律

Fig.11 Bulk compliance under uniaxial cyclic loading-unloading

由此可见, 上限应力所处应力区间是控制体应变和体积柔量的演化规律以及是否发生疲劳破坏的主要因素。当上限应力低于损伤应力时试件始终不会发生破坏, 体应变和体积柔量均趋于稳定; 而当上限应力高于损伤应力时粉砂岩将会发生疲劳破坏。以试件 S-7 为例, 虽然在有限次循环加卸载下未发生破坏, 但体应变和体积柔量演化规律与疲劳破坏试件的前 2 个阶段相同, 可以判断出持续的加卸载最终会使其发生疲劳破坏。因此, 可以将加卸载过程中体积柔量由正变负视为发生疲劳破坏的早期先兆。

3.3 声发射演化规律及疲劳破坏临界征兆

岩石变形破坏过程中产生的声发射信号可以表征岩石内部微裂纹发育过程。循环加卸载试验中声发射演化规律如图 12 所示, 由图 12 可知在单调加载阶段初期粉砂岩内部裂纹逐渐闭合并产生大量声发射信号, 随后裂纹发展速率逐渐降低, 声发射逐渐减少。循环加卸载过程中, 当上限应力低于损伤应力时, 以试件 S-6 为例, 声发射累计计数在加卸载初期快速增长, 并在循环约 1 000 次后进入稳定期, 表明试件内部不再有新裂纹产生。当上限应力高于绝对扩容应力时, 以试件 S-9 和 S-12 为例, 声发射累计计数分别在加卸载约 700 次和 40 次后迅速增大, 裂纹进入不稳定扩展阶段, 而此时体应变仍保持缓慢降低; 当分别加卸载 800 次和 88 次后声发射累计计数骤然增加、体应变迅速降低, 表明微裂纹逐渐贯通形成宏观裂纹, 试件承载能力快速降低并发生疲劳破坏。而当上限

应力介于损伤应力和绝对扩容应力之间时, 以试件 S-7 为例, 声发射累计计数在加卸载过程中先快速增长

后逐渐趋于缓慢匀速增长, 表明循环加卸载一定次数后粉砂岩微裂纹持续低速扩展。

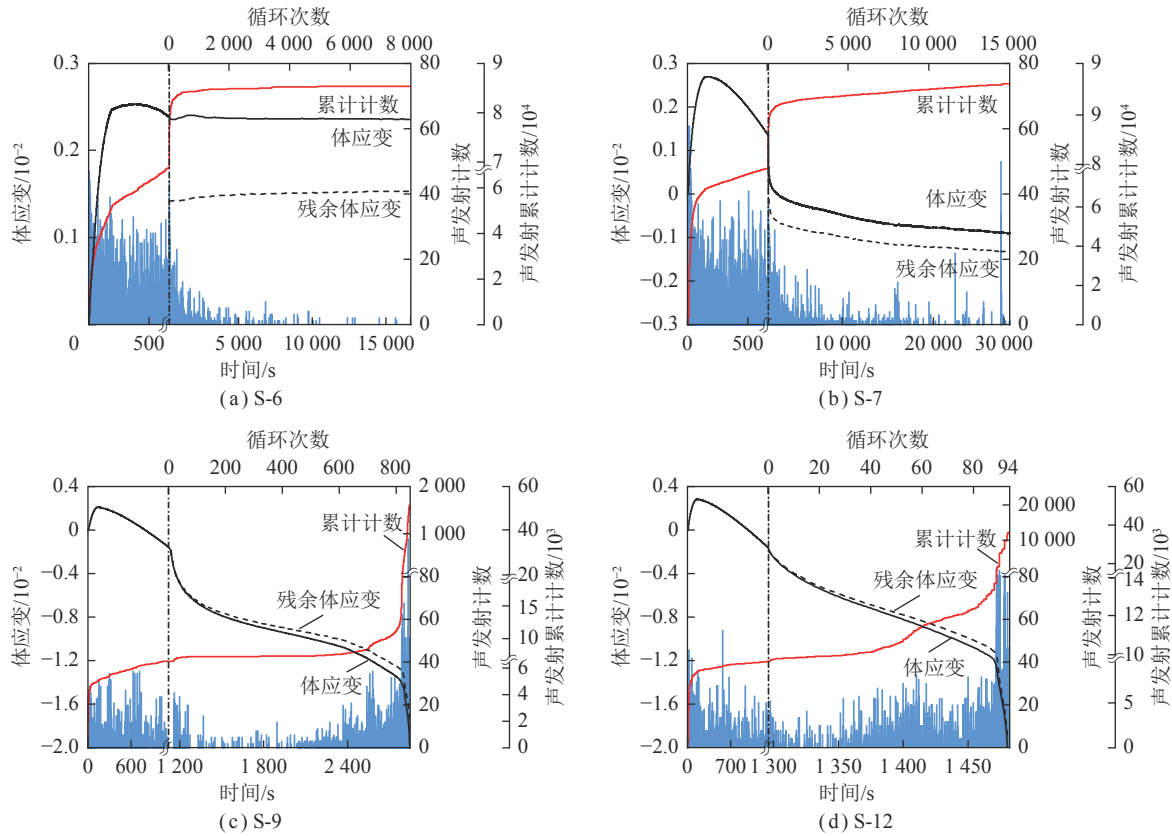


图 12 单轴循环加卸载过程中粉砂岩体应变、声发射计数、累计计数演化规律

Fig.12 Volumetric strain, AE counts and AE counts accumulation for siltstone under uniaxial cyclic loading-unloading

岩石内部产生微破裂时, 不同破裂模式产生的声发射信号具有不同的波形特征^[33], 而上升时间/幅值比 (Risetime/Amplitude Ratio, R_{ra}) 和平均频率 (Average Frequency, F_{avg}) 是描述波形特征的重要参数^[34] (图 13)。一般情况下, 张拉裂纹产生的声发射信号具有较高的 F_{avg} 和较低的 R_{ra} , 而剪切裂纹产生的声发射信号具有较低的 F_{avg} 和较高的 R_{ra} ^[35], 因此可以用 F_{avg}/R_{ra} 的比值 k 来表征裂纹的破裂模式, 即 k 超过某一临界值的声发射信号对应张拉裂纹, 而低于这一临

界值时对应剪切裂纹。大量学者通过试验获得了不同岩石的临界 k , 如甘一雄等^[36] 根据巴西劈裂试验得到花岗岩的临界 k 为 85~95, DU 等^[37] 根据巴西劈裂试验和修正剪切试验标定了花岗岩、大理岩、砂岩的临界 k 。但目前尚未建立统一的临界 k 公式。

为了获得适用性更广泛的破裂模式表征方法, 笔者统计了粉砂岩不同 k 值区间内的声发射事件数 (图 14)。结果表明, 声发射事件数 N_{AE} 与 k 呈对数线性相关, 可以用式 (3) 表示。

$$\lg N_{AE} = a_k - b_k k \quad (3)$$

式中, N_{AE} 为声发射事件数; a_k 和 b_k 均为系数, 系数 b_k 可以反映张拉裂纹与剪切裂纹的比例关系, 即 b_k 越小, 说明张拉裂纹越多, 而 b_k 越大, 则剪切裂纹就越多。

循环加卸载过程中的 b_k 可以由式 (4) 计算获得, 为避免参与计算的声发射事件过少而导致 b_k 的计算误差过大, 笔者取 200 个声发射事件作为一个计算窗口, 采用滑动窗口方式进行计算。

$$b_k = \frac{\sum k_i \sum \lg N_i - \Delta k \sum k_i \sum \lg N_i}{\Delta k \sum k^2 - (\sum k)^2} \quad (4)$$

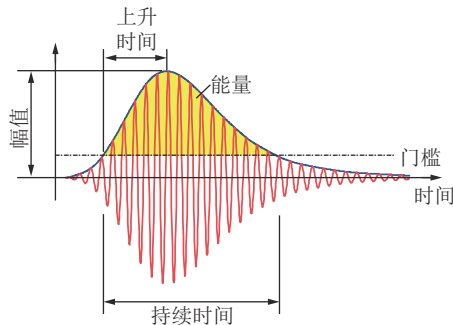
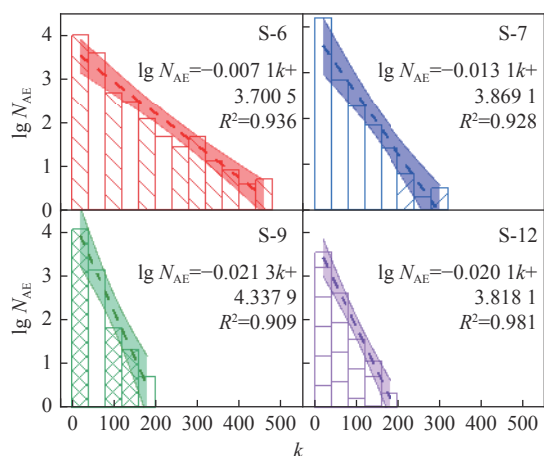


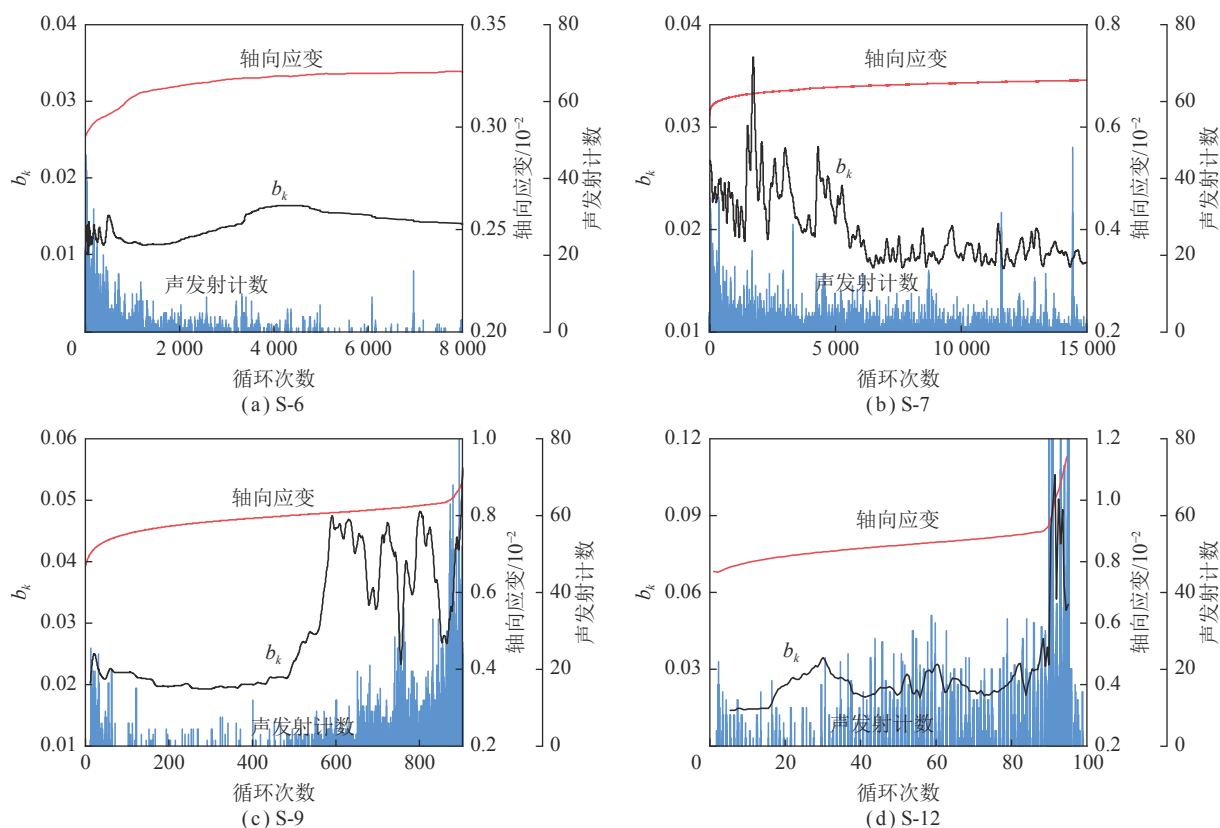
图 13 声发射波形示意

Fig.13 Schematic diagram of acoustic emission waveform

图 14 单轴循环加卸载过程中 k 分布规律Fig. 14 Distribution of k under uniaxial cyclic loading-unloading

式中, Δk 为 k 的分档间距; k_i 为第 i 档 k 的中心值; N_i 为第 i 档声发射事件数。

如图 15 所示, 循环加卸载过程中 b_k 一直处于波动状态。当上限应力低于损伤应力时 (以 S-6 为例), b_k 始终保持在较低水平, 表明新生裂纹以小尺度的张拉裂纹为主。当上限应力介于损伤应力和绝对扩容应力之间时 (以 S-7 为例), 减速变形阶段中 b_k 位于中等水平, 并且随着循环次数增加而逐渐降低, 匀速变形阶段中 b_k 稳定于较低水平; 而当上限应力高于绝对扩容应力时 (以 S-9、S-12 为例), 减速变形阶段和匀速变形阶段中 b_k 位于中等水平, 在加速变形阶段中 b_k 突然陡增, 表明在疲劳破坏的孕育过程中张拉裂纹占比较高, 而当发生疲劳破坏时则以剪切裂纹为主。因此, b_k 的陡增可视为疲劳破坏的临界征兆。

图 15 单轴循环加卸载过程中声发射 b_k 演化规律Fig. 15 b_k value of AE events under uniaxial cyclic loading-unloading

3.4 特征应力与疲劳强度的关系

单轴循环加卸载过程中的体应变和声发射规律表明, 上限应力是影响粉砂岩力学行为的主要因素。当上限应力高于绝对扩容应力时, 循环加卸载过程中粉砂岩体积快速膨胀、残余体应变迅速减小, 并在较低循环次数 ($<10^4$) 内发生疲劳破坏^[38]。当上限应力介于损伤应力和绝对扩容应力之间时, 循环加卸载过

程中岩石体积逐渐膨胀, 声发射累计计数保持匀速增加, 表明循环加卸载过程中裂纹持续扩展, 并在较高循环次数 ($>10^4$) 下发生疲劳破坏。而当上限应力低于损伤应力时, 循环加卸载过程中岩石体积逐渐压缩, 声发射和体积柔量最终趋于稳定, 表明岩石将长期稳定。因此, 可以将单轴条件下的损伤应力和绝对扩容应力分别作为粉砂岩的高周疲劳强度和低周疲劳强度。

4 结 论

(1) 根据单轴阶梯加卸载下多孔弱胶结粉砂石的变形特征, 将岩石的体应变分解为塑性体应变、固相线弹性体应变和气相非线性弹性体应变, 并提出了一种基于多相体应变的特征应力计算方法。新建方法物理意义明确, 计算结果不受主观因素影响。单轴条件下该方法确定的损伤应力和绝对扩容应力可以分别视为发生高周疲劳破坏和低周疲劳破坏的临界应力。

(2) 当上限应力低于损伤应力时, 单轴循环加卸载过程中下限应力处的残余体应变逐渐增大, 试件体积被压缩, 体积柔量先短时增大随后保持稳定; 而当上限应力超过损伤应力时, 循环加卸载过程中残余体应变和体积柔量均逐渐减小。加卸载过程中岩石体积柔量由正变负可以视为发生疲劳破坏的早期先兆。

(3) 循环加卸载过程中, 声发射事件数 N_{AE} 与 F_{avg}/R_{fa} 的比值 k 呈对数线性相关, 可以用关系式 $\lg N_{AE} = a_k - b_k k$ 描述。系数 b_k 的演化规律表明, 当上限应力高于损伤应力时, 疲劳破坏的孕育过程中张拉裂纹占比较高, 而最终发生疲劳破坏时则以剪切裂纹为主, b_k 值的陡增可视为疲劳破坏的临界征兆。

参考文献(References):

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 国家能源消费总量年度数据 [DB/OL]. 北京: 中华人民共和国国家统计局, 2022. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>.
- [2] 孙利辉, 纪洪广, 蒋华, 等. 弱胶结地层条件下垮落带岩层破碎冒落特征与压实变形规律试验研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(10): 2565–2572.
SUN Lihui, JI Hongguang, JIANG Hua, et al. Experimental study on characteristics of broken caving and regularity of compaction deformation of rocks in caving zone in the weakly cemented strata[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(10): 2565–2572.
- [3] 齐庆新, 潘一山, 李海涛, 等. 煤矿深部开采煤岩动力灾害防控理论基础与关键技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1567–1584.
QI Qingxin, PAN Yishan, LI Haitao, et al. Theoretical basis and key technology of prevention and control of coal-rock dynamic disasters in deep coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5): 1567–1584.
- [4] 何俊, 潘结南, 王安虎. 三轴循环加卸载作用下煤样的声发射特征[J]. 煤炭学报, 2014, 39(1): 84–90.
HE Jun, PAN Jienan, WANG Anhu. Acoustic emission characteristics of coal specimen under triaxial cyclic loading and unloading[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(1): 84–90.
- [5] BROWN E T, HUDSON J A. Fatigue failure characteristics of some models of jointed rock[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1973, 2(4): 379–386.
- [6] 葛修润, 卢应发. 循环荷载作用下岩石疲劳破坏和不可逆变形问题的探讨[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(3): 56–60.
GE Xiurun, LU Yingfa. Discussion on fatigue failure and irreversible deformation of rock under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 14(3): 56–60.
- [7] BAGDE M N, PETROŠ V. Fatigue properties of intact sandstone samples subjected to dynamic uniaxial cyclical loading[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2005, 42(2): 237–250.
- [8] 赵凯, 乔春生, 罗富荣, 等. 不同频率循环荷载下石灰岩疲劳特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S2): 3466–3475.
ZHAO Kai, QIAO Chunsheng, LUO Furong, et al. Experimental study of fatigue characteristics of limestone samples subjected to uniaxial cyclic loading with different frequencies[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S2): 3466–3475.
- [9] 李浩然, 杨春和, 李佰林, 等. 三轴多级荷载下盐岩声波声发射特征与损伤演化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(4): 682–691.
LI Haoran, YANG Chunhe, LI Bailin, et al. Damage evolution and characteristics of ultrasonic velocity and acoustic emission for salt rock under triaxial multilevel loading test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(4): 682–691.
- [10] 刘涛, 杨鹏, 吕文生, 等. 岩石在不同应力幅值下受低频循环扰动的力学特性试验[J]. 煤炭学报, 2017, 42(9): 2280–2286.
LIU Tao, YANG Peng, LÜ Wensheng, et al. Rock mechanical properties experiments with low-frequency circulation disturbance under different stress amplitudes[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(9): 2280–2286.
- [11] 祝艳波, 黄兴, 郭杰, 等. 循环荷载作用下石膏质岩的疲劳特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(4): 940–952.
ZHU Yanbo, HUANG Xing, GUO Jie, et al. Experimental study of fatigue characteristics of gypsum rock under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(4): 940–952.
- [12] 周阳, 苏生瑞, 马洪生. 循环荷载作用下绿泥石千枚岩弹性模量演化规律试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(3): 783–792.
ZHOU Yang, SU Shengrui, MA Hongsheng. Experimental research on elastic modulus evolution of chlorite phyllite under cyclic loading[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020, 51(3): 783–792.
- [13] MITCHELL T M, FAULKNER D R. Experimental measurements of permeability evolution during triaxial compression of initially intact crystalline rocks and implications for fluid flow in fault zones[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 2008, 113: B11412.
- [14] RAO M, RAMANA Y V. A study of progressive failure of rock under cyclic loading by ultrasonic and AE monitoring techniques[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1992, 25(4): 237–251.
- [15] 何明明, 李宁, 陈蕴生, 等. 不同循环加载条件下岩石阻尼比和阻尼系数研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(9): 2531–2538.
HE Mingming, LI Ning, CHEN Yunsheng, et al. Damping ratio and damping coefficient of rock under different cyclic loading conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(9): 2531–2538.
- [16] 黄正均, 赵星光, 李远, 等. 体积应变率对北山花岗岩疲劳特性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5): 1161–1168.
HUANG Zhengjun, ZHAO Xingguang, LI Yuan, et al. Influence of volumetric strain ratio on the fatigue characteristics of Beishan gran-

- ite[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(5): 1161–1168.
- [17] 杨小彬, 韩心星, 王逍遥, 等. 等幅循环加载岩石变形局部化带位移演化规律[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(4): 1041–1048.
- YANG Xiaobin, HAN Xinxing, WANG Xiaoyao, et al. Displacements evolution laws of deformation localization bands of rock under constant amplitude cyclic loading[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(4): 1041–1048.
- [18] SONG Z, WANG Y, KONIETZKY H, et al. Mechanical behavior of marble exposed to freeze-thaw-fatigue loading[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2021, 138: 104648.
- [19] SANG G, LIU S, ELSWORTH D. Quantifying fatigue-damage and failure-precursors using ultrasonic coda wave interferometry[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 131: 104366.
- [20] CERFONTAINE B, COLLIN F. Cyclic and fatigue behaviour of rock materials: review, interpretation and research perspectives[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018, 51(2): 391–414.
- [21] 王开林. 神东矿区弱胶结砂岩的宏观细观结构及力学特征研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2018: 36–42.
- WANG Kailin. Research on mechanical and macro-meso structure characteristics of the weakly cemented sandstone in Shendong coal field[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2018: 36–42.
- [22] 宋朝阳. 弱胶结砂岩细观结构特征与变形破坏机理研究及应用[D]. 北京: 北京科技大学, 2017: 35–51.
- SONG Chaoyang. The analysis and application of mesoscopic structure characteristic and deformation and failure mechanism of weak cemented sandstone[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2017: 35–51.
- [23] MARTIN C D, CHANDLER N A. The progressive fracture of Lac Dubonnet granite[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1994, 31(6): 643–659.
- [24] 彭俊, 蔡明, 荣冠, 等. 裂纹闭合应力及其岩石微裂纹损伤评价[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(6): 1091–1100.
- PENG Jun, CAI Ming, RONG Guan, et al. Stresses for crack closure and its application to assessing stress-induced microcrack damage[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(6): 1091–1100.
- [25] 吴锐. 弱胶结疏松砂岩储层变形破坏机理研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018: 13–24.
- WU Rui. Study of failure mechanism in poorly consolidated sandstone considering shear dilation and compaction[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2018: 13–24.
- [26] TENSI H M. The kaiser-effect and its scientific background[J]. *Journal of Acoustic Emission*, 2004, 22: S1–S16.
- [27] HSIEH A, DIGHT P, DYSKIN A V. Ghost Kaiser effect at low stress[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2014, 68: 15–21.
- [28] XUE L, QIN S, SUN Q, et al. A study on crack damage stress thresholds of different rock types based on uniaxial compression tests[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, 47(4): 1183–1195.
- [29] EBERHARDT E, STEAD D, STIMPSON B, et al. Identifying crack initiation and propagation thresholds in brittle rock[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1998, 35(2): 222–233.
- [30] TANG M, WANG G, CHEN S, et al. an objective crack initiation stress identification method for brittle rock under compression using a reference line[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, 54(8): 4283–4298.
- [31] LIU J, LIU J. Prediction models for low-temperature creep compliance of asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement (RAP)[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 306: 124915.
- [32] 纪洪广, 蒋华, 宋朝阳, 等. 弱胶结砂岩遇水软化过程细观结构演化及断口形貌分析[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(4): 993–999.
- JI Hongguang, JIANG Hua, SONG Chaoyang, et al. Analysis on the microstructure evolution and fracture morphology during the softening process of weakly cemented sandstone[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(4): 993–999.
- [33] 王宇, 高少华, 孟华君, 等. 不同频率增幅疲劳荷载下双裂隙花岗岩破裂演化声发射特性与裂纹形态研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(10): 1976–1989.
- WANG Yu, GAO Shaohua, MENG Huajun, et al. Investigation on the acoustic emission characteristics and fracture network pattern for pre-flawed granite subjected to increasing-amplitude fatigue loads[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(10): 1976–1989.
- [34] ZHANG Z, DENG J. A new method for determining the crack classification criterion in acoustic emission parameter analysis[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 130: 104323.
- [35] 何满潮, 赵菲, 杜帅, 等. 不同卸载速率下岩爆破坏特征试验分析[J]. *岩土力学*, 2014, 35(10): 2737–2793.
- HE Manchao, ZHAO Fei, DU Shuai, et al. Rockburst characteristics based on experimental tests under different unloading rates[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(10): 2737–2793.
- [36] 甘一雄, 吴顺川, 任义, 等. 基于RA与AF值的花岗岩劈裂破坏评价指标研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(7): 2324–2332.
- GAN Yixiong, WU Shunchuan, REN Yi, et al. Evaluation indexes of granite splitting failure based on RA and AF of AE parameters[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(7): 2324–2332.
- [37] DU K, LI X, TAO M, et al. Experimental study on acoustic emission (AE) characteristics and crack classification during rock fracture in several basic lab tests[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 133: 104411.
- [38] GOLOS K M, DEBSKI D K, DEBSKI M A. A stress-based fatigue criterion to assess high-cycle fatigue under in-phase multiaxial loading conditions[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2014, 73: 3–8.