

文章编号:1000-582X(2011)04-006-07

周期水压力作用下砂岩变形试验与小波分析

杨红伟,许江,吴鑫,彭守建,张媛

(重庆大学 a. 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室;
b. 复杂煤气层瓦斯抽采国家地方联合工程实验室,重庆 400044)

摘要:为了研究周期水压力对岩石的变形特性,利用 MTS815 岩石力学多功能试验机,对砂岩试样进行了不同轴向应力(峰值强度 σ_{\max} 的 60%、70% 和 80%)条件下孔隙水压力循环试验,还运用 Matlab 中小波分析对岩石变形曲线中常见的不规则小变形波动干扰曲线进行处理。试验结果表明:随着恒定轴向应力的增大,周期水压力作用下疲劳变形将加速岩石的破坏;随着孔隙水压力循环次数的增加,塑性滞回环呈疏—密—疏的变形演化过程;运用小波分析方法对周期水压力作用下砂岩受多种因素的干扰的变形曲线进行分解、重构处理及评价,从而得到最优分解尺度的基本曲线较好的吻合了试验曲线,更好的揭示了岩石变形的演化规律。

关键词:岩石力学;砂岩;周期水压力;小波分析

中图分类号:TU458

文献标志码:A

Experimental analysis of the deformation of sandstone under cyclic pore water pressure and wavelet transformation

YANG Hong-wei, XU Jiang, WU Xin, PENG Shou-jian, ZHANG Yuan

(a. Key Laboratory for Exploitation of Southwestern Resources & Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education; b. State and Local Joint Engineering Laboratory of Methane Drainage in Complex Coal Gas Seam, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: To explore the characteristics of deformation of sandstone under cyclic pore water pressure, the experiments with different axial stresses (60%, 70% and 80% of peak intensity) of sandstone subjected to cyclic pore water loading are investigated by using MTS815 rock mechanics testing system, and irregular small deformation in deformation curve of sandstone are also processed by wavelet transformation of Matlab. The results show that with the increase of constant axial stress, fatigue deformation under cyclic pore water pressure will accelerate the failure of the sandstone. With the increase of the number of cyclic pore water pressure, the deformation evolution of the plastic-loop is illustrated as sparse-dense-sparse. The deformation curves of sandstone under cyclic pore water pressure affected by many factors are decomposed, reconfigurable processed and evaluated by using wavelet transformation, which indicates that the basic curve with optimal decomposition scale fits well with the experimental curves and reveals the deformation evolution of sandstone.

Key words: rock mechanics; sandstone; cyclic pore water pressure; wavelet transformation

收稿日期:2010-12-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50974141);国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2011CB201203);重庆大学“211 工程”三期创新人才培养计划建设项目(S-10220)

作者简介:杨红伟(1977-),男,重庆大学博士研究生,主要从事岩石力学与工程的研究,(E-mail) yhw982313@163.com。

许江(联系人),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事岩石力学与工程的研究,(E-mail) jiangxu@cqu.edu.cn。

岩石是多种矿物的天然集合体,具有复杂的结构构造和组成成分,其在外载荷作用下的变形特性十分复杂,加之在对其变形特性进行实验测试过程中,由于实验所用仪器设备、外界等多因素的干扰,岩石在外载荷作用下的变形特性更为复杂。D. J. Holcomb 对玄武岩和花岗岩的实验结果表明,岩石在单轴循环荷载作用下,其应力-应变曲线具有非线性、滞后性、离散记忆和能量耗散等特征^[1]。岩石在其颗粒之间存在微裂隙、颗粒接触面、孔洞等机械缺陷,这些细观结构在不同的局部应力作用下表现出不同的力学行为。A. N. Tutuncu 等对多孔隙颗粒状沉积岩在单轴循环应力作用下的情况进行了研究,指出应力-应变滞后回线的特征与施加荷载的频率、应变振幅以及岩石的饱和流体特性等因素有关,并影响岩石的衰减特性^[2-3]。Tmoislav 通过砂土的不排水循环试验重新定义变形的破坏参数,建立了表述地震引起的孔隙水压力模型^[4]。T. Wichmann 等研究了砂土在载荷循环作用下极化影响及累积变形中的应变滞回环形状^[5]。Mehdi 等研究了饱和砂土在孔隙水压力循环作用下的剪应变演化规律^[6]。因此,在不同因素影响下,变形曲线不可避免的受到干扰,使试验测得的变形曲线演化变得更加复杂。葛修润等研究周期荷载作用下岩石疲劳变形曲线由于受到因素干扰,曲线变化过程出现了不规则的小变形^[7,8,9]。谢和平等砂岩在循环拉伸的载荷-位移曲线也出现了干扰曲线对变形演化规律有一定的影响^[10]。许江等研究周期荷载作用下岩石的应力-应变曲线也出现受干扰的变形曲线^[11-13]。

近年来利用小波分析进行信号处理方面的应用越来越广泛,但是在处理岩石变形曲线方面的应用较少^[14-18]。因此,拟借鉴小波分析方法对周期水压力作用下岩石变形曲线进行去噪处理。由此,总可以将实验测试获取岩石在外载荷作用下的变形 $\epsilon(t)$, 将其分为反映岩石基本力学属性的基本变形 $\epsilon_b(t)$ 和实验过程中由于外界干扰因素所引起的干扰变形 $\epsilon_g(t)$, 即:

$$\epsilon(t) = \epsilon_b(t) + \epsilon_g(t) \quad (1)$$

式中, $\epsilon(t)$ 为变形, $\epsilon_b(t)$ 为基本变形, $\epsilon_g(t)$ 为干扰变形。通过小波分析为进一步分析岩石变形曲线的演化规律提供更加合理参数和试验结果分析。

1 实验方法与结果分析

1.1 实验方法

试验选用砂岩取自重庆地区的三叠系上统须家河组,属陆源细粒碎屑沉积岩,粒径 0.1~0.5 mm,主要成分为石英、长石、燧石和白云母等。加工时采用了水钻法,经切割、打磨等过程最终加工制成国际

标准的 $\Phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 试件。

实验方案:①常规三轴强度试验:测试饱和砂岩在围压 $\sigma_2 = \sigma_3 = 5.0 \text{ MPa}$ 条件下的破坏强度;②周期水压力作用下岩石的变形特性试验:选用试验①测试的破坏强度 σ_{max} 的 60%、70% 和 80% 作为不同的恒定轴压应力 σ_1 , 围压为 $\sigma_2 = \sigma_3 = 5.0 \text{ MPa}$, 孔隙水压力循环范围为 $P = 1.0 \sim 4.0 \text{ MPa}$; 具体试验步骤参见文献^[8]。

1.2 常规三轴强度试验曲线

在研究周期水压力作用下岩石的变形特性之前,需进行相同围压条件下的常规三轴强度试验,通过全应力-应变曲线(如图 1)可确定峰值强度、不同轴向应力及所对应应变参数。

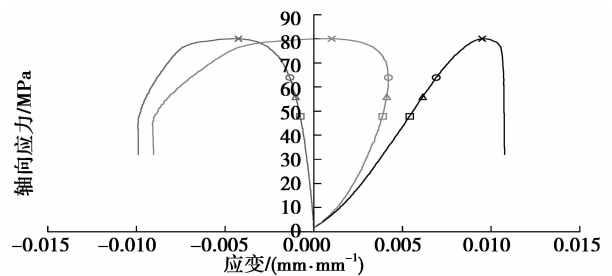


图 1 应力-应变关系曲线

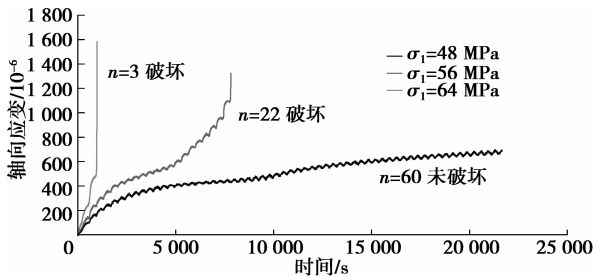
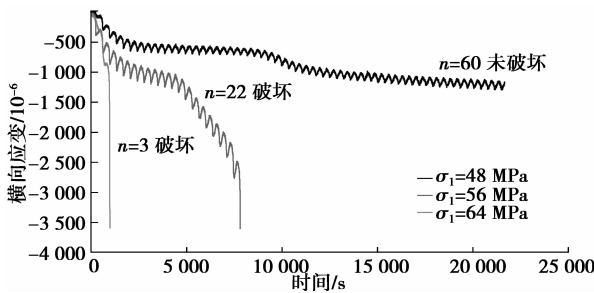
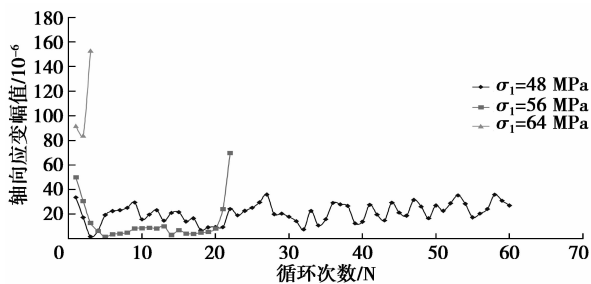
1.3 周期水压力作用下砂岩的变形曲线

本次实验主要研究循环孔隙水压力区间相同时不同轴向应力对砂岩变形特性的影响程度及 $p - \epsilon$ 曲线演化规律。

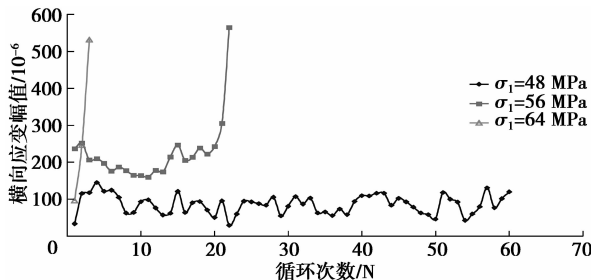
1) 砂岩 $\epsilon - T$ 关系曲线

葛修润院士指出“岩石能否发生疲劳破坏取决于疲劳门槛值,当应力上限低于门槛值时,岩石的轴向、横向、体积变形随着循环次数的增加趋于稳定,这样无论进行多少次循环,岩石都不会发生破坏^[4-6]。疲劳门槛值略低于常规三轴实验的所谓‘屈服值’”,并提出“以静态全过程实验体积压密最小点来近似作为门槛值的观点”。通过 $\epsilon - T$ 关系曲线(图 2(a)、(b))分析可知:轴向应力恒定 $\sigma_1 = 48 \text{ MPa}$ (峰值强度 σ_{max} 的 60%) 时,孔隙水压力在 $P = 1.0 \sim 4.0 \text{ MPa}$ 范围进行了 $n = 60$ 个循环作用下,轴向、横向应变由初始阶段向等速阶段演化,未发生疲劳破坏;轴向应力恒定 $\sigma_1 = 56 \text{ MPa}$ (峰值强度 σ_{max} 的 70%) 时,孔隙水压力在相同范围进行了 $n = 22$ 个循环作用下,发生了疲劳破坏,轴向、横向应变经历了初始阶段、等速阶段和加速破坏阶段的演化规律;轴向应力恒定 $\sigma_1 = 64 \text{ MPa}$ (峰值强度 σ_{max} 的 80%) 时,孔隙水压力在相同范围进行了 $n = 3$ 个循环作用下,发生了加速的变形破坏,轴向、横向应变直接经历了加速破坏阶段的演化过程。不同轴向应力恒定条件下,砂岩疲劳变形中主要由弹性变形与塑性变形循

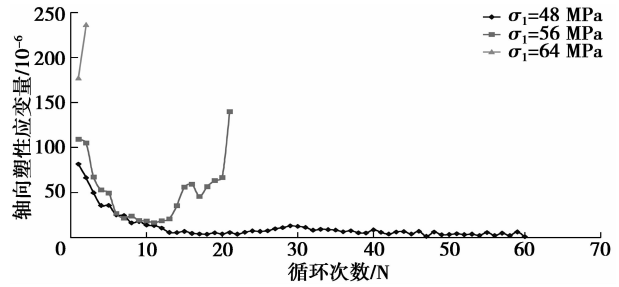
环耦合,通过实验分析弹性变形表现在应变幅值的变化,塑性变形表现在塑性应变量的变化。从轴向、横向应变幅值(图2(c)、(d))可知:在相同孔隙水压力循环幅值作用下,轴向应力恒定值低于或接近应力门槛值时,等速阶段轴向、横向应变幅值随着循环次数在一定范围波动呈上升趋势;当轴向应力恒定值略大于应力门槛值时,轴向、横向应变幅值随着循环次数呈“U”型变化,即初始阶段应变幅值变化较大,等速阶段应变幅值变化较缓慢,加速阶段应变幅值快速增大;当轴向应力恒定值大于应力门槛值时,轴向、横向应变幅值呈急速增大。从轴向、横向应变幅值(图2(e)、(f))可知:轴向、横向塑性应变与应变幅值的变化具有相似性。通过砂岩 $\epsilon-T$ 关系曲线说明了当轴向应力恒定值超过应力门槛值后,周期水压力作用下岩石变形将加速并降低岩石的疲劳破坏强度。

(a) $\epsilon_1 - T$ 关系曲线(b) $\epsilon_2 - T$ 关系曲线

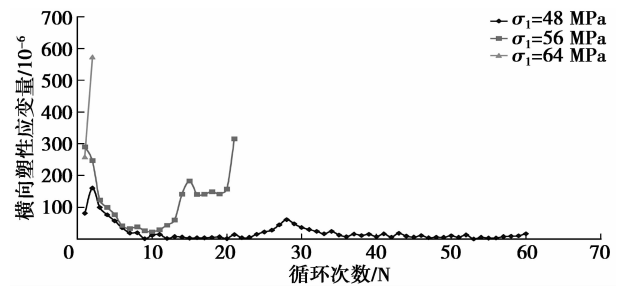
(c) 轴向应变幅值-循环次数曲线对比



(d) 横向应变幅值-循环次数曲线对比



(e) 轴向塑性应变量-循环次数曲线对比

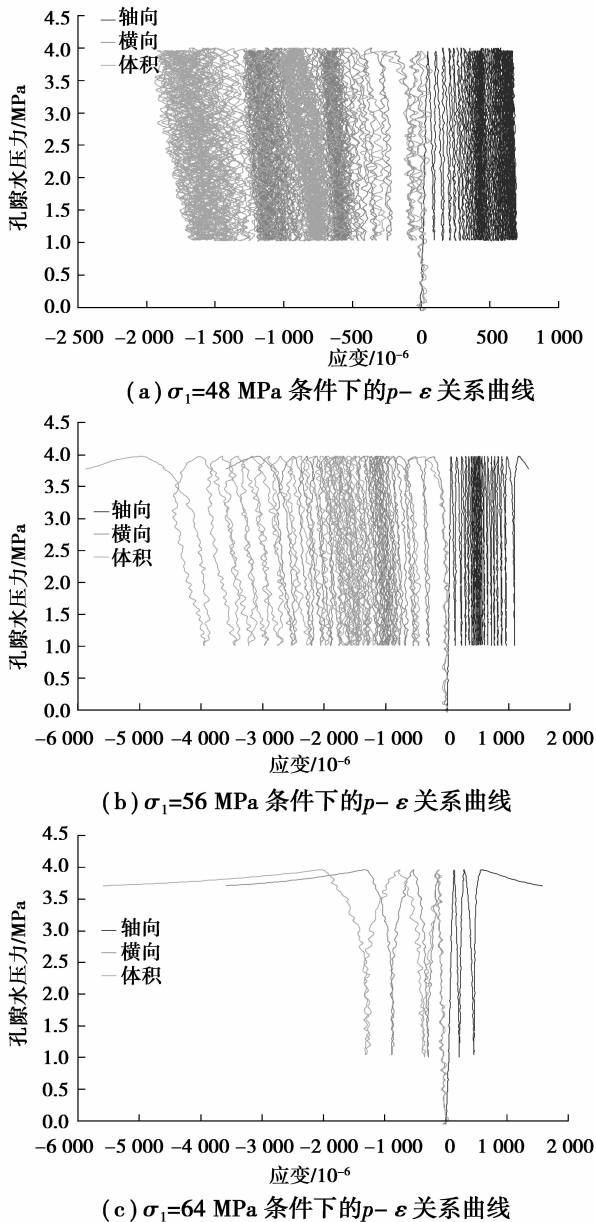


(f) 横向塑性应变量-循环次数曲线对比

图2 $\epsilon - T$ 关系曲线

2) 砂岩 $p - \epsilon$ 关系曲线

在周期载荷作用下岩石疲劳变形特性的研究方面取得了很多成果,主要研究了应力-应变关系曲线的演化规律,从中主要分析塑性滞回环的变形特性。因此,在周期水压力作用下砂岩变形特性的规律研究中,将主要分析周期水压力作用下砂岩 $p - \epsilon$ 关系曲线(图3a、3b、3c)。通过 $p - \epsilon$ 关系曲线可知:轴向应力恒定 $\sigma_1 = 48$ MPa(峰值强度 σ_{max} 的60%)时,经过 $n = 60$ 次的循环下未发生疲劳破坏,随着孔隙水压力循环次数的增加,逐渐形成稳定塑性滞回环,且呈疏-密-疏-密的变形过程;轴向应力恒定 $\sigma_1 = 56$ MPa(峰值强度 σ_{max} 的70%)时,经过 $n = 22$ 次的循环下发生疲劳破坏且发生在孔隙水压力卸载过程,随着孔隙水压力循环次数的增加,塑性滞回环形成过程由不稳定到稳定再到不稳定,且呈疏-密-疏-密的变形过程,其变形规律与葛修润^[5]研究三轴周期荷载下疲劳破坏变形的演化规律一致;轴向应力恒定 $\sigma_1 = 64$ MPa(峰值强度 σ_{max} 的80%)时,经过 $n = 3$ 次的循环下发生疲劳破坏且在第3次孔隙水压力卸载过程的瞬间失稳破坏伴随变形急速增大。分析塑性滞回环演化规律过程中观测到应变曲线中有很多不规则的“Z”状波动曲线,密集的“Z”状波动曲线对演化规律影响很大,为了更清晰的分析应变曲线的演化过程,将选用小波分析的方法处理不规则的“Z”状波动的干扰曲线。

图 3 不同轴向应力条件下的 $p-\varepsilon$ 关系曲线

2 岩石变形曲线的小波分析

2.1 小波分析原理及评价指标

小波分析在信号处理方面已经取得很多成果^[11-15],而在岩石的变形曲线的方面缺乏分析和应用。小波分析基本理念是选择合理的阈值去掉干扰信号,利用保留下来的小波分解系数进行重构,就能得到有效的变形信号,继而获得变形体的基本变形信息。

由于影响小波去噪效果的因素很多,选择不同小波基函数、不同的阈值、不同的分解尺度,其去噪的效果都不尽相同,因此,必须通过一些具体的指标来衡量,常用的评价指标有均方误差(RMSE),信噪比(SNR)。

均方误差即原始信号与去噪后的估计信号之间的方差的平方根,其定义式为:

$$\text{RMSE} = \left\{ \left[\sum_n (f(n) - f'(n))^2 \right] / n \right\}^{1/2} \quad (2)$$

式中, $f(n)$ 为原始信号, $f'(n)$ 为去噪后的信号。

信噪比(dB)是测量信号中噪声量度的传统方法,其定义式为:

$$\text{SNR} = 10 \lg(P_s/P_z) \quad (3)$$

式中, $P_s = (\sum_n f^2(n))/n$ 为原始信号功率, $P_z = \text{RMSE}^2$ 为噪声功率。

在评价去噪的效果中均方误差与信噪比还不能完全反映出优势,由此,可选用另一种评价去噪效果的指标—平滑度指标,其定义式为

$$r = \left[\sum_{n=1} (f'(n+1) - f'(n))^2 \right] / \left[\sum_{n=1} (f(n+1) - f(n))^2 \right] \quad (4)$$

2.2 岩石应变曲线的小波分析

选择 MATLAB7.0 中 Wavelet 1-D 作为分析应变曲线的软件包,使用小波分析方法对如图 2 所示的不同实验条件下的周期水压力作用下砂岩变形曲线的一维变形信号进行去噪处理。

针对不同实验条件下的砂岩变形主要采用的小波分析方法中的 sym8 进行去噪分析,其中可选择分解尺度为 1~8 层,选用软阈值的除去白噪声进行去噪处理。根据以上方法对不同轴向应力条件下的砂岩变形曲线进行分析和分解去噪处理,为了更详细的说明和评价不同分解尺度的应变信号的分析过程及对比去噪后的变形曲线演化特征,以图 2a 中的轴向应力 $\sigma_1=48$ MPa 条件下周期水压力的砂岩轴向应变曲线作为演示图例进行分解尺度从 1~8 层去噪处理。对于不同分解尺度的小波处理结果,需要引入评价方法,分析最优分解尺度的应变曲线。

对于小波处理信号评价方法,初始多采用计算阈值和处理阈值等方法对信号的噪声成分进行抑制分析;为了更加精确地评价去噪结果,可利用式(2)给出的去噪后信号的均方误差(RMSE)、式(3)给出的信噪比(SNR)及式(4)给出的平滑度指标(r)进行评价,分析结果参见图 4。

通过比较分解阈值、均方误差指标、信噪比指标和平滑度指标,本实验选用小波分析方法中 sym8 的分解尺度第 5 层为最优去噪处理信号。因此,对于应变曲线所受多种因素的干扰曲线程度不同,须根据小波分析类型和评价方法进行合理的对比得到最优分解尺度的基本曲线。

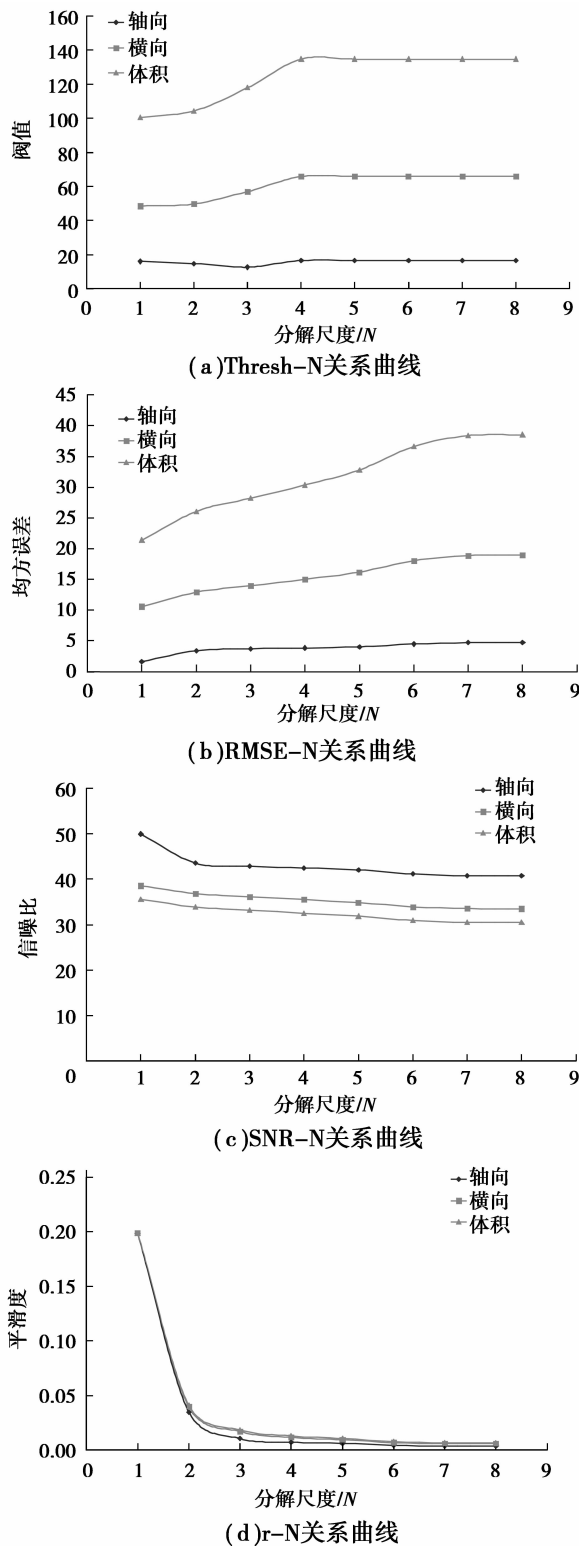


图 4 不同评价指标曲线对比

3 小波分析与试验结果对比

3.1 砂岩 $\epsilon_p - n$ 关系曲线对比

将轴向应力 $\sigma_1 = 48 \text{ MPa}$ 与 $\sigma_1 = 56 \text{ MPa}$ 的砂岩轴向、横向和体积应变的 $\epsilon_p - n$ 关系曲线的试验数

据与小波分析结果进行对比(如图 5)可知:小波分析结果与试验数据吻合较好,分析数据都比较接近试验数据;相比之下小波分析数据的连续性和光滑性比试验数据更优。

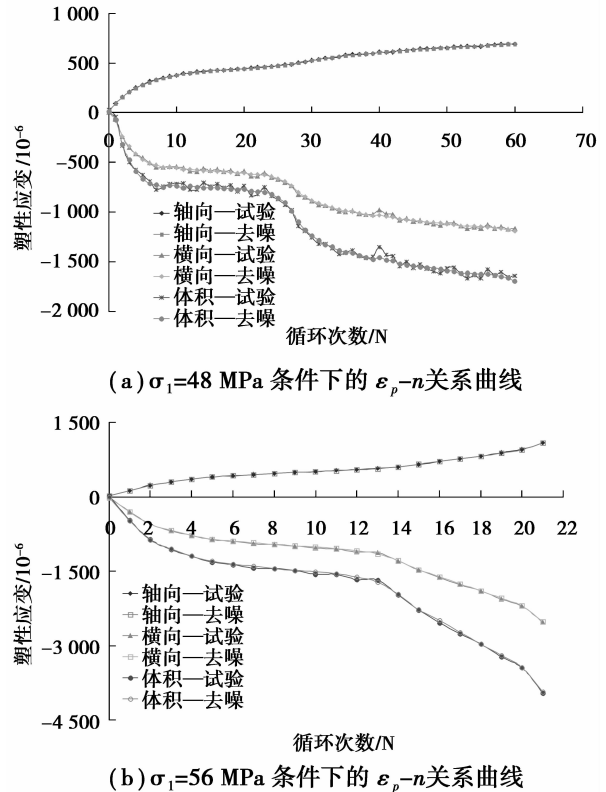


图 5 $\epsilon_p - n$ 关系曲线对比

3.2 砂岩 $p - \epsilon$ 关系曲线对比

将试验中 $\sigma_1 = 48 \text{ MPa}$ 条件下的第 60 个循环的砂岩 $p - \epsilon$ 关系曲线分别对轴向、横向和体积应变与小波分析的 $p - \epsilon$ 关系曲线进行对比(如图 6(a)-(c))可知:周期水压力作用下的轴向、横向和体积应变曲线呈“Z”状波动,在小变形的情况下,曲线变得密集严重影响到应变曲线的演化趋势;通过小波分析的 $p - \epsilon$ 关系曲线不仅在连续性和光滑性方面较好,还清晰反映 $p - \epsilon$ 关系曲线的演化规律。

通过小波分析得到不同轴向应力条件下的砂岩 $p - \epsilon$ 关系曲线(如图 6(d)-(f))与试验的 $p - \epsilon$ 关系曲线(图 3(a)-(c))对比可知:经小波分析的 $p - \epsilon$ 关系曲线中变形曲线演化过程清晰,塑性滞回环演化轨迹明显。因此,对于孔隙水压力作用下的岩石变形过程中受到各种因素影响所引起干扰的变形特征曲线,根据受干扰程度不同的变形曲线,可选用小波分析中的不同分析方法进行最优化评价和处理,确保小波分析的变形曲线能更好地揭示岩石变形过程的演化规律。

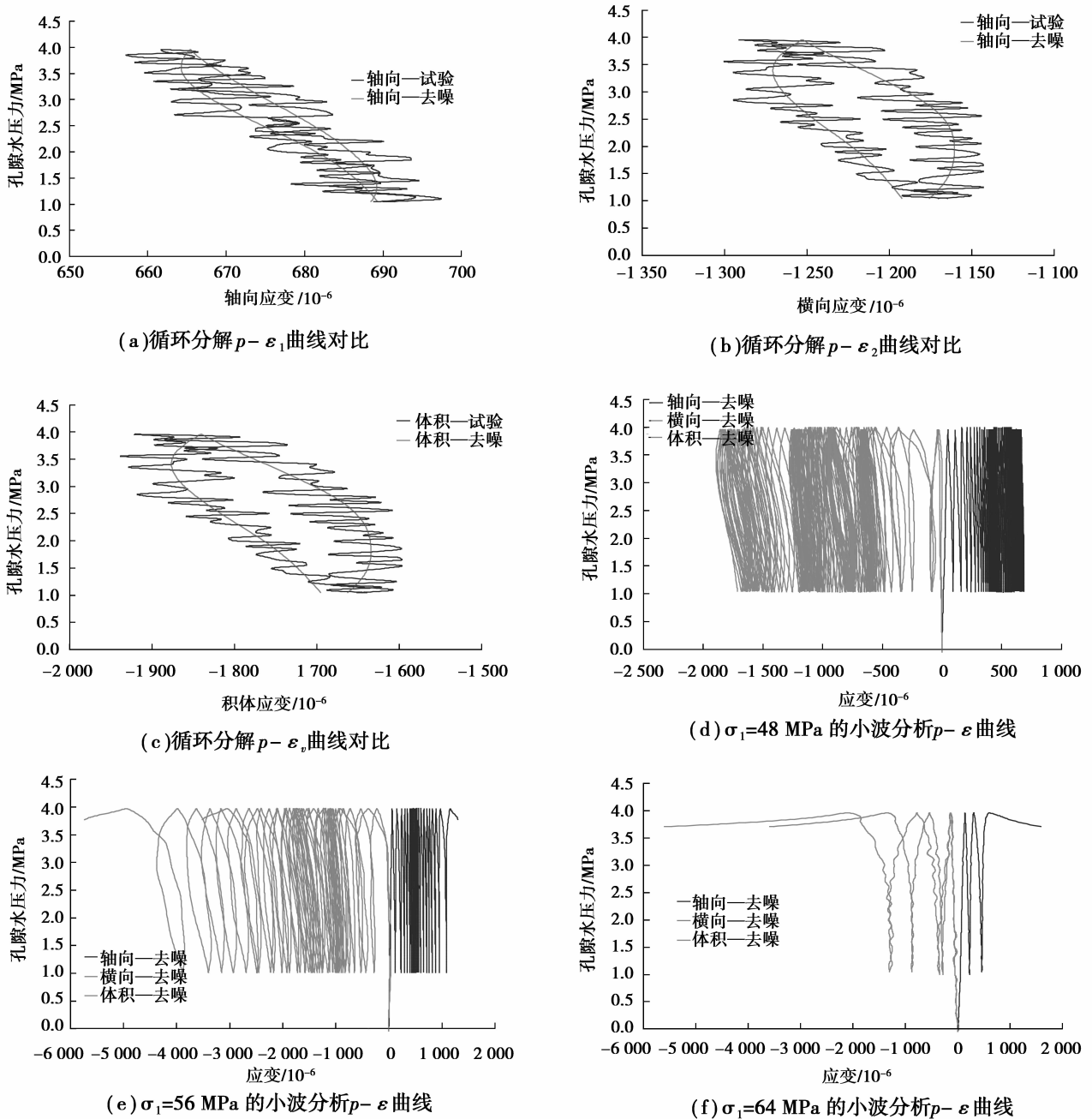


图 6 小波分析 $p-\varepsilon$ 曲线对比

4 结论

1) 在不同轴向应力恒定时周期水压作用下砂岩变形试验,当轴向应力小于或接近应力门槛值,则周期水压力作用下岩石疲劳变形随着循环次数的增加逐渐趋于稳定;当轴向应力大于应力门槛值且逐渐增大时,则周期水压力作用下疲劳变形将加速岩石的破坏;周期水压力作用下岩石疲劳变形过程中横向应变的变化量大于轴向应变的变化量。

2) 对于不同轴向应力条件下的 $p-\varepsilon$ 关系曲线,当轴向应力恒定值小于或接近应力门槛值且未发生疲劳破坏,随着孔隙水压力循环次数的增加,逐渐形成稳定塑性滞回环,呈疏-密-疏-密的变形演化

过程;当轴向应力恒定值大于应力门槛值,随着孔隙水压力循环次数的增加,塑性滞回环形成过程由不稳定到稳定再到不稳定且发生疲劳破坏,呈疏-密-疏的变形演化过程。

3) 运用小波分析方法对周期水压力作用下砂岩受多种因素的干扰的变形曲线进行分解、重构处理及评价,从而得到最优分解尺度的基本曲线较好的吻合了试验曲线,而且基本曲线的整体性、规律性及光滑性更好的揭示了岩石变形的演化规律。

综上所述,不同轴向应力条件下周期水压力作用下砂岩变形特性的演化规律,为周期水压力对库区的地质体的稳定性分析提供一定的实验参数和经验理论。

参考文献:

- [1] HOLCOMB D J. Memory relaxation, and microfracturing in dilatant rock[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1981, 86: 6235-6248.
- [2] TUTUNCU A N, PODIO A L, GREGORY A R, et al. Nonlinear viscoelastic behavior of sedimentary rock, part I: effect of frequency and strain amplitude[J]. *Geophysics*, 1998, 63(1): 184-194.
- [3] TUTUNCU A N, PODIO A L, GREGORY A R, et al. Nonlinear viscoelastic behavior of sedimentary rock, part II: hysteresis effects and influence of type of fluid on elastic moduli[J]. *Geophysics*, 1998, 63(1): 195-203.
- [4] TOMESLAV I, ŠIĆ. A model for presentation of seismic pore water pressures[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2006, 26(2-4): 191-199.
- [5] WICHTMANN T, NIE A TH TRIS. On the influence of the polarization in sand under high-cyclic loading[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2007, 27(1): 14-28.
- [6] MEHDI DERA KHSHANDI, ELLEN M RATHJE, KENAN HAZIRBABA, et al. The effect of plastic fines on the pore pressure generation characteristics of saturated sands[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2008, 28(5): 376-386.
- [7] MÜLLER-SALZBURG L, GE X R. Studies on the mechanical behavior (deformation behavior) of jointed rock masses under cyclic load[C]// *Proceedings of the 5th Int Congress of the Society for Rock Mechanics*. Melbourne, Australia, 1983, 1: 43-49.
- [8] 葛修润, 蒋宇, 卢允德, 等. 周期荷载作用下岩石疲劳变形特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(10): 1581-1585.
GE XIU-RUN, JIANG YU, LU YUN-DE, et al. Testing study on fatigue deformation law of rock under cyclic loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(10): 1581-1585.
- [9] 章清叙, 葛修润, 黄铭, 等. 周期荷载作用下红砂岩三轴疲劳变形特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(3): 473-478.
ZHANG QING-XU, GE XIU-RUN, HUANG MING, et al. Testing study on fatigue deformation law of red sandstone under triaxial compression with cyclic loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(3): 473-478.
- [10] 彭瑞东, 谢和平, 鞠杨. 砂岩拉伸过程中的能量耗散与损伤演化分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(12): 2526-2531.
PENG RUI-DONG, XIE HE-PING, JU YANG. Analysis of energy dissipation and damage evolution of sandstone during tensile process[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(12): 2526-2531.
- [11] 许江, 杨红伟, 李树春, 等. 循环加、卸载孔隙水压力对砂岩变形特性影响实验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(5): 892-899.
XU JIANG, YANG HONG-WEI, LI SHU-CHUN, et al. Experimental study of effects of cyclic loading and unloading pore water pressures on deformation characteristic of sandstone[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(5): 892-899.
- [12] 许江, 尹光志, 王鸿, 等. 不同应力水平时砂岩滞回曲线演化的实验研究[J]. *重庆建筑大学学报*, 2006, 28(2): 40-42.
XU JIANG, YIN GUANG-ZHI, WANG HONG, et al. Experimental research on the evolution of hysteresis curve of rock in different axial stress levels[J]. *Journal of Chongqing Jianzhu University*, 2006, 28(2): 40-42.
- [13] 王鸿, 许江, 杨秀贵. 循环荷载条件下岩石塑性滞回环的演化规律[J]. *重庆大学学报*, 2006, 29(4): 80-82.
WANG HONG, XU JIANG, YANG XIU-GUI. Evolution of plastic-loop of fine-sandstone under the loading and unloading conditions[J]. *Journal of Chongqing University*, 2006, 29(4): 80-82.
- [14] BERKRER K, WELLS JR R O. Wavelet transforms and denoising algorithm[J]. *Signal, System & Computers, Conference Record of the Thirty Second Asilomar Conference*, 1998(2): 1639-1643.
- [15] 陈强, 黄声享, 王伟. 小波去噪效果评价的另一指标[J]. *测绘信息与工程*, 2008, 33(5): 13-14.
CHEN QIANG, HUANG SHENG-XIANG, WANG WEI. An evaluation indicator of wavelet denoising[J]. *Journal of Geomatics*, 2008, 33(5): 13-14.
- [16] 董小刚, 秦喜文. 信号消噪的小波处理方法及 Matlab 实现[J]. *长春工业大学学报*, 2003, 24(2): 1-4.
DONG XIAO-GANG, QIN XIWEN. The elimination of signal noise by wavelet analysis and its demonstration by matlab[J]. *Journal of Changchun University of Technology*, 2003, 24(2): 1-4.
- [17] 吴伟, 蔡培升. 基于 MATLAB 的小波去噪仿真[J]. *信息与电子工程*, 2008, 6(3): 220-222, 229.
WU WEI, CAI PEI-SHENG. Simulation of wavelet denoising based on MATLAB[J]. *Information and Electronic Engineering*, 2008, 6(3): 220-222, 229.
- [18] 闫长斌, 王贵军, 石守亮, 等. 岩体爆破损伤声波测试信号频谱特征的小波(包)分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(7): 1496-1502.
YAN CHANG-BIN, WANG GUI-JUN, SHI SHOU-LIANG, et al. Analysis of acoustic wave frequency spectrum characters of rock mass under blasting damage based on wavelet(packet) transformation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(7): 1496-1502.