

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.12.002

# 循环荷载的频率和幅值对砂岩动力特性的影响

邓华锋, 胡 玉, 李建林, 王 哲, 张小景, 张恒宾

(三峡大学 三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002)

**摘 要:** 岩体动力参数的取值关系到岩体结构工程动力计算结果是否符合工程实际。鉴于实际动力荷载的频率和幅值都可能在一定范围内变化, 设计了综合考虑频率和幅值变化的循环加、卸载试验方案, 分析这两种因素对砂岩动应力-应变滞回曲线、动弹性模量、阻尼比和阻尼系数等动力参数的影响。研究表明: (1) 应力-应变滞回圈的形态与加卸载的频率和幅值有关, 频率越大则越饱满, 幅值越大则越狭长; (2) 循环荷载频率从 0.02 Hz 增至 1.00 Hz, 砂岩的阻尼系数逐渐减小, 而阻尼比和动弹性模量逐渐增大, 比较而言, 阻尼比和阻尼系数变化幅度较大, 动弹性模量的变化幅度较小; (3) 循环荷载应力幅从 10 MPa 增至 35 MPa 时, 砂岩的阻尼比逐渐减小, 阻尼系数变化不大, 而动弹性模量逐渐增大, 比较而言, 应力幅对动弹性模量的影响较大。研究成果可为岩石动力参数的合理选取提供较好的参考。

**关键词:** 循环荷载; 频率; 应力幅; 阻尼比; 阻尼系数; 动弹性模量

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2017)12-3402-09

## Effects of frequency and amplitude of cyclic loading on the dynamic characteristics of sandstone

DENG Hua-feng, HU Yu, LI Jian-lin, WANG Zhe, ZHANG Xiao-jing, ZHANG Heng-bin

(Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area of Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China)

**Abstract:** The values of rock dynamic parameters directly influence the results of dynamic calculation in rock structural engineering, which shall be validated with the results obtained from practical engineering projects. As the frequency and amplitude of actual dynamic loading could change within a specific range, a series of cyclic loading and unloading experiments was conducted by considering the variations of these two factors. The effects of these two factors on the dynamic characteristics of sandstone were analysed, such as dynamic stress-strain hysteresis curve, dynamic elastic modulus, damping ratio and damping coefficient. The results showed that the shape of stress-strain hysteresis loop was closely related to the frequency and amplitude of cyclic loading and unloading. It was found that the higher the frequency was, the plumper the hysteresis loop was, and the greater the cyclic loading amplitude was, and the narrower the hysteresis loop was. When the frequency of cyclic loading increased from 0.02 Hz to 1.00 Hz, the damping coefficient of sandstone gradually decreased, whereas the damping ratio and dynamic modulus slowly increased. The varying ranges of damping coefficient and damping ratio were relatively larger, while the growth range of dynamic elastic modulus was smaller. When the stress amplitude of cyclic loading increased from 10 MPa to 35 MPa, the damping ratio of sandstone gradually decreased, whereas the damping coefficient slightly changed and the dynamic elastic modulus slowly increased. However, the effects of stress magnitude on the dynamic elastic modulus were more significant. Therefore, this study can provide useful references for reasonably selecting dynamic parameters of rock mass.

**Keywords:** cyclic loading; frequency; stress amplitude; damping ratio; damping coefficient; dynamic elastic modulus

## 1 引 言

工程岩体不仅要承受静力荷载, 而且还要承受

地震、爆破和其他多种动力荷载的作用。我国是地震多发的国家, 近年来, 由于地震造成的岩体工程结构破坏屡见不鲜。因此, 岩体工程的动力反应计

收稿日期: 2016-04-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.51439003, No.51679127); 水利部公益性科研专项经费项目 (No.201401029); 湖北省自然科学基金重点项目 (No.2015CFA140); 三峡大学研究生科研创新基金 (No.2015CX)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51439003, 51679127), the Ministry of Water Resources Public Welfare Profession Special Scientific Research Foundation of China (201401029), the Natural Science Foundation of Hubei Province (2015CFA140) and the Graduate Research and Innovation Fund of China Three Gorges University (2015CX)。

第一作者简介: 邓华锋, 男, 1979 年生, 博士, 教授, 主要从事岩土工程方面的研究工作。E-mail: dhf8010@ctgu.edu.cn

算分析是结构设计和安全评价的重要组成部分，其中，岩体结构本身的动力参数选取直接关系到计算结果是否符合工程实际。

以往的研究表明，循环载荷作用下，控制变量或因素的不同，结构会表现出不同的力学行为<sup>[1]</sup>。影响岩体动力特性的因素很多，主要包括岩石饱水状态，内部缺陷、加载的应力状态、频率、振幅等。Tutuncu 等<sup>[2-3]</sup>基于多种状态沉积岩的单轴循环加、卸载试验研究，发现荷载频率和岩样的饱和和流体特性对岩石的动力参数影响较大；朱珍德等<sup>[4]</sup>研究发现，循环频率在 0.01~1.0 Hz 范围内变化时，随着频率增大，花岗岩的滞回圈面积、动弹性模量和阻尼比存在增大趋势；Shalev 等<sup>[5]</sup>基于不同幅值砂岩的循环加、卸载试验，分析了加、卸载过程中的滞回效应及幅值对体积应变、体积模量的影响；郭印同等<sup>[6]</sup>研究发现，提高循环荷载上限应力和平均应力值会显著影响岩石疲劳破坏的进程；刘建锋等<sup>[7]</sup>通过不同频率和幅值的循环加、卸载试验，得到了频率和幅值对大理岩动弹性模量和动泊松比的影响规律；马林建等<sup>[8]</sup>研究发现，循环荷载应力上、下限和频率对盐岩变形演化和损伤发展影响较大；何明明等<sup>[9]</sup>对砂岩、砾岩和砂砾岩进行了分级循环荷载试验，研究发现，应力水平越高，动弹性模量越大；赵凯等<sup>[10]</sup>开展了 0.5~3.0 Hz 频率的石灰岩低周疲劳试验；较多学者也考虑不同的岩石类型、饱和状态、频率、加卸载循环次数等因素，开展了岩石动力特性的研究<sup>[11-20]</sup>。

由于岩体工程遭受实际动力荷载的频率和幅值可能都不是一个固定的值，而是在一定范围内变化，但目前综合考虑循环荷载频率和幅值对岩石动力特性影响的研究很少，文献[7]中探讨了循环荷载频率和幅值对大理岩动弹性模量和动泊松比的影响，但没有分析这两个因素对岩石阻尼比、阻尼系数等动力参数的影响。鉴于此，设计了考虑频率和幅值变化的循环加、卸载试验方案，分析加、卸载频率和幅值对砂岩动应力-应变滞回曲线、动弹性模量、阻尼比和阻尼系数等动力参数的影响规律。

## 2 试验方案设计

砂岩试样取自三峡库区，经鉴定为绢云母中粒石英砂岩，微风化，完整性较好，孔隙式钙质胶结。试样尺寸为  $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ （直径 $\times$ 高度），严格控制制样精度，试验之前测试岩样的纵波波速、密度和回弹值进行试样筛选<sup>[21]</sup>。共选取 18 个岩样，一组岩样进行单轴抗压强度试验，另外的岩样进行

循环加、卸载试验。试验在 RMT-150C 岩石力学试验系统上进行，设备允许循环荷载频率：0.001~1.0 Hz，波形可为正弦波、方波、三角波、斜波。

根据以往类似试验经验和 RMT-150C 岩石力学试验系统的功能限制，循环荷载频率考虑 0.02、0.05、0.10、0.20、0.50、1.00 Hz 等 6 种情况，各种频率分别进行 2 个岩样的试验。

循环加、卸载过程中，采用固定下限应力，逐级增大上限应力的分级循环加、卸载方式。基于目前岩体工程结构动力计算主要在弹性范围进行分析，试验中的上限应力取值范围相对较小。天然状态下岩样的单轴抗压强度为 65 MPa 左右，循环荷载的下限应力统一为 5 MPa，上限应力分别考虑 15、20、25、30、35、40 MPa 等 6 个级别，对应的循环荷载应力幅  $\Delta\sigma$  分别为 10、15、20、25、30、35 MPa，每级荷载循环次数为 10 次，每级循环结束之后提高上限应力进行下一级的循环。循环加、卸载过程中采用应力控制，加载波形为正弦波。最后一级循环加卸载完毕之后，采用位移控制方式加载至破坏，以分析多级循环加、卸载对岩样抗压强度的影响。

## 3 岩石动力参数计算原理

岩石是一种典型的非均匀材料，内部往往弥散分布着不同级别的裂纹、孔隙、孔洞等微观缺陷，矿物颗粒之间的胶结界面也是一个相对的弱面<sup>[4]</sup>。在循环加、卸载过程中，这些微观缺陷存在反复闭合、张开、扩展和颗粒界面滑移等微观损伤现象，导致了岩石的非线性弹性变形和显著的滞后性，加、卸载曲线往往呈明显的非线性特性，卸载曲线低于加载曲线，宏观上就表现为循环加、卸载过程中的滞回圈<sup>[13]</sup>。如图 1 所示，滞回圈面积大小反映了一次加、卸载过程中所耗散的能量。

阻尼比  $\lambda$ 、阻尼系数  $C$  ( $\text{kN}\cdot\text{s}\cdot\text{mm}^{-1}$ ) 和动弹性模量  $E_d$  (MPa) 定义为<sup>[19]</sup>

$$\lambda = A_R / (4\pi A_s) \quad (1)$$

$$C = A_R / (\pi X^2 \omega) \quad (2)$$

$$E_d = (\sigma_{d\max} - \sigma_{d\min}) / (\varepsilon_{d\max} - \varepsilon_{d\min}) \quad (3)$$

式中： $\sigma_{d\max}$ 、 $\sigma_{d\min}$  分别为动应力-动应变滞回圈的最大和最小动应力； $\varepsilon_{d\max}$ 、 $\varepsilon_{d\min}$  分别为滞回圈的最大和最小动应变； $A_R$  为滞回圈 ABCD 的面积 ( $\text{kN}\cdot\text{mm}$ )； $A_s$  为三角形 AEF 的面积 ( $\text{kN}\cdot\text{mm}$ )， $4A_s$  反映了岩石在一个周期内所储备的最大弹性应变能； $X$  为响应振幅 (mm)； $\omega$  为加卸载圆频率 (rad/s)<sup>[4]</sup>。

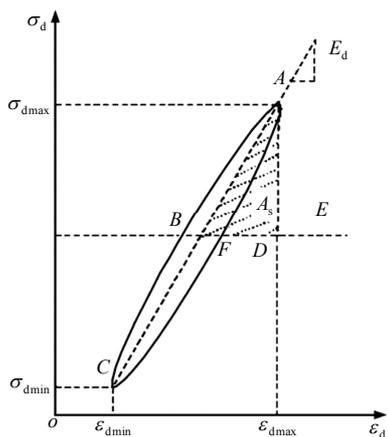


图 1 动应力-动应变滞回圈  
Fig.1 Hysteresis loop of dynamic stress-strain

### 4 砂岩动应力-应变曲线特征分析

不同循环荷载幅值和频率下的应力-应变曲线总体变化趋势基本一致，限于篇幅，只列出部分典型曲线如图 2 所示。

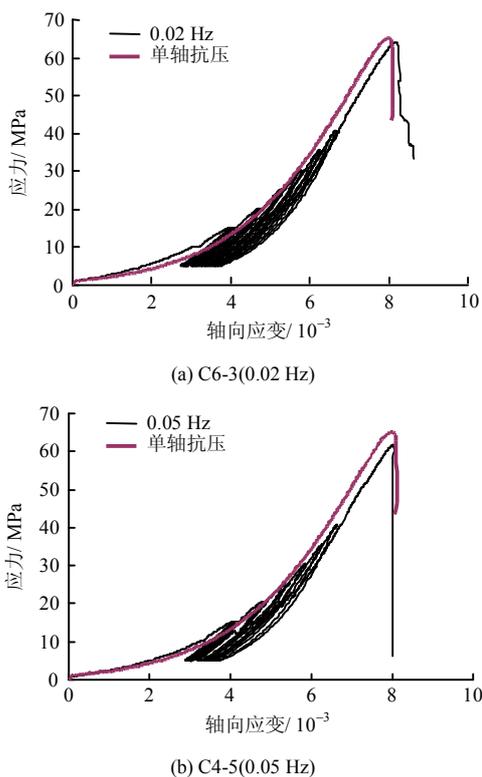


图 2 典型应力-应变关系曲线  
Fig.2 Typical curves of stress versus strain

从图中可以看出，在每级荷载循环作用过程中，动应力-应变曲线呈交叉平行趋势分布，随着循环次数的增加，应力-应变滞回圈向应变增大的方向发展；随着循环荷载幅值上限的增加，滞回圈面积增大，岩样产生的不可逆变形增大。

岩样在分级循环加、卸载和单调加载破坏两种应力路径加载过程中控制破坏点的应变基本一致，说明本文的试验结果和葛修润院士等<sup>[17]</sup>提出的从变形控制岩石破坏的思路是一致的。在循环荷载作用下，微结构损伤逐步累积，从而使得材料弱化<sup>[18]</sup>。在经历 6 次分级循环加、卸载后，岩样的单轴抗压强度存在一定程度的降低，具体统计如图 3 所示(图中频率为 0 的点表示单轴抗压强度试验结果)，可以用二次函数较好地拟合。从统计曲线来看，0.2 Hz 循环荷载作用时，强度下降了 10%左右，1.0 Hz 时强度下降约 15%，说明荷载即使较小也会对岩石试件造成损伤，而且，随着循环荷载频率的增大，岩样损伤有增大趋势。

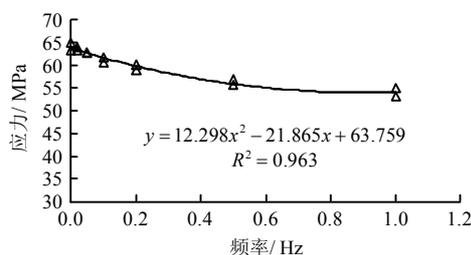


图 3 砂岩抗压强度统计曲线  
Fig.3 Statistical curve of uniaxial compressive strength of sandstone

为了分析循环荷载频率及幅值对砂岩动应力-应变变形特征的影响，取每一级循环荷载中间一次的动应力-应变滞回圈进行对比分析，典型曲线如图 4 所示(滞回圈从左向右，循环荷载上限分别为：15、20、25、30、35、40 MPa)；考虑到不同应力幅的滞回圈有部分重复，为了便于观察，将不同频率的滞回圈依次在坐标轴上横向排开，如图 5 所示(滞回圈从左向右，循环荷载频率依次为：0.02、0.05、0.10、0.20、0.50、1.00 Hz)。在循环加、卸载过程中，由于存在残余变形，下限应力水平处滞回圈往往是不闭合的，为了便于滞回圈面积的统计，进行了近似闭合连接处理。

由图 4、5 可以看出，对于加载阶段，应力幅较小时，动应力-应变曲线近似线性分布，应力幅较大时，下凹的非线性特性明显；对于卸载阶段，动应力-应变曲线呈现明显下凹的非线性特性，并且，随着应力幅的增大，下凹的特征更加明显。

文献[13]中将循环荷载作用下的动应力-应变滞回圈形态分为：新月形、长茄形、椭圆形等，并分析了循环加、卸载过程中岩石的塑性变形和黏滞性对滞回圈形态的影响；朱明礼等<sup>[15]</sup>基于云母花岗岩的循环加、卸载试验得到了尖叶形的滞回圈；

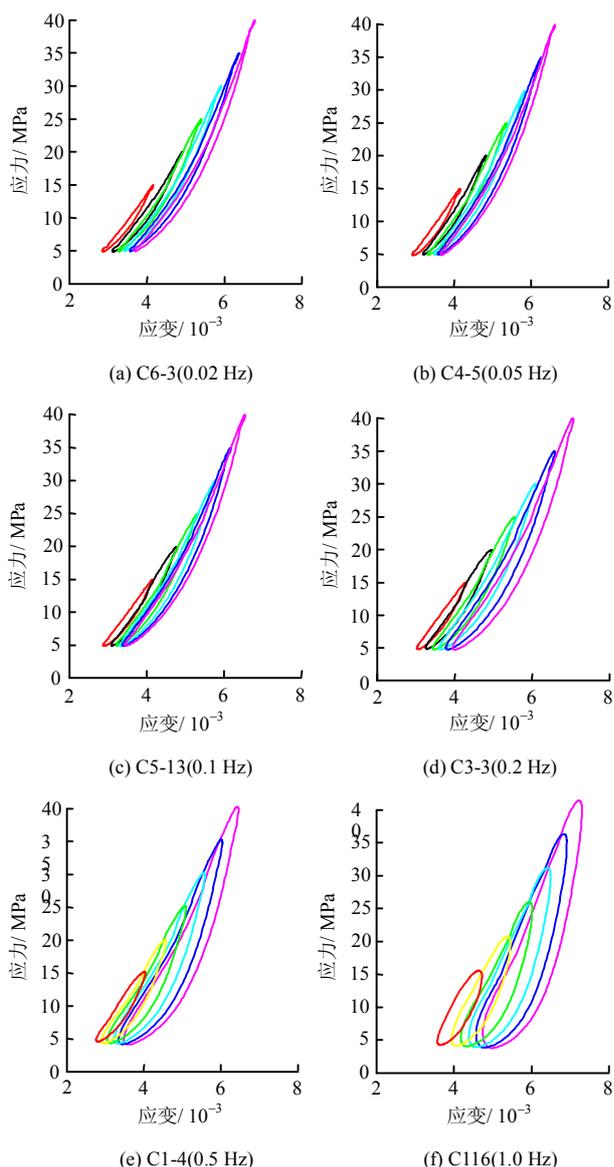


图 4 不同频率作用下动应力-应变滞回圈  
Fig.4 Dynamic stress-strain hysteresis loop curves under loads with different frequencies

McKavanagh 等<sup>[11]</sup>研究发现，在中等应变时（应变振幅为  $10^{-5} \sim 10^{-3}$ ），滞回圈呈尖叶形；BRENNAN 等<sup>[12]</sup>研究发现，当应变很小（应变振幅为  $10^{-6}$ ）时，滞回圈呈椭圆形；很多学者针对不同性质岩石的循环加、卸载试验也得到了不同形态的滞回圈。综合图 4、5 来看，在本文试验得到的滞回圈中，上述这些形态都存在，这也说明一个问题，即在循环加卸载作用下，应力-应变滞回圈的形态不仅与岩石的性质有关，而且与加、卸载的频率和幅值有关，亦即循环加、卸载的频率和幅值直接影响岩石的滞回圈形态。

当循环荷载频率固定时，随着幅值的增大，滞回曲线下凹的形态明显，滞回圈变得扁而尖。例如，如图 4(a)所示，频率为 0.02 Hz 时，应力幅由 10 MPa

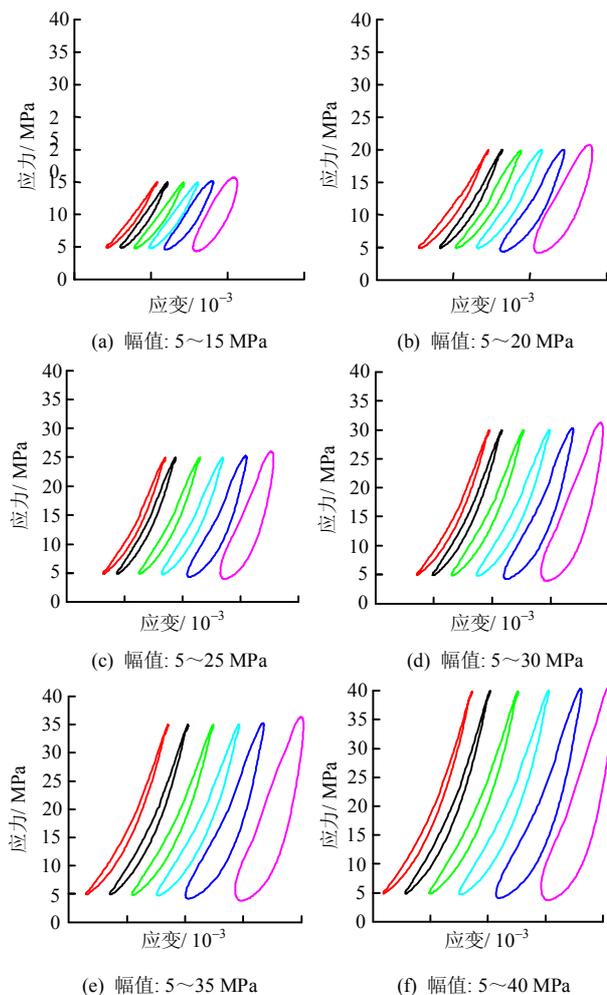


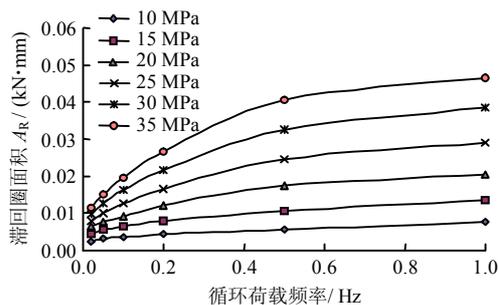
图 5 不同幅值作用下动应力-应变滞回圈  
Fig.5 Dynamic stress-strain hysteresis loop curves under loads with different stress amplitudes

增加到 35 MPa 时，滞回圈形态由尖叶形逐渐变为新月形；如图 4(f)所示，频率为 1.00 Hz 时，应力幅由 10 MPa 增加到 35 MPa，滞回圈形态由饱满的近椭圆形逐渐变为长茄形。从滞回圈形态来看，不同应力幅的滞回圈总体呈现下部宽度大，上部宽度小的形态，这主要是由于砂岩孔隙度较大，在应力较小时，加、卸载过程孔隙的闭合和张开产生了较大的滞后，宏观上表现为滞回圈下部宽度大；在应力较大时，岩样孔隙逐渐压密，加、卸载过程中产生的滞后效应明显减弱，宏观上表现为滞回圈上部宽度小。

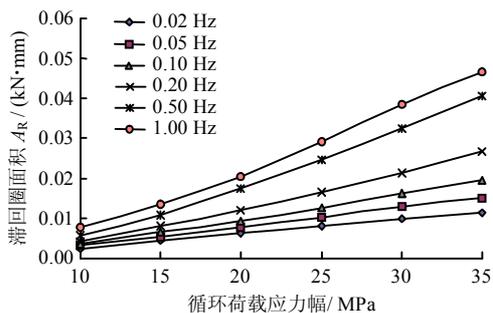
当循环荷载应力幅固定时，随着循环荷载频率增大，滞回圈形态变化明显，从尖叶形变得趋于饱满。其典型如图 5(a)所示，当循环荷载应力幅为 10 MPa 时，0.02 Hz 时的滞回圈为狭长的尖叶形，随着加、卸载频率的增加，滞回曲线趋于饱满；频率为 0.20 Hz 时，滞回曲线趋近比较饱满的长茄形；频率为 1.00 Hz 时，滞回圈趋近于近似的椭圆形。

如图 5(f)所示,当循环荷载的应力幅为 35 MPa 时,0.02 Hz 的滞回圈为狭长的新月形,当频率增大为 1.00 Hz 时,滞回圈趋近于长茄形。

加、卸载循环过程中滞回圈面积的大小表示在一个循环周期中所耗散的能量大小,耗散能量的一部分转化为热能,另一部分以不可逆的变形存储在岩样中,造成岩样的损伤<sup>[4]</sup>。从图 4、5 可以看出,随着循环荷载频率、幅值的变化,在滞回圈形态变化的同时,其面积也变化明显,如图 6 所示。



(a) 滞回圈面积与循环荷载频率关系曲线



(b) 滞回圈面积与循环荷载应力幅关系曲线

图 6 滞回圈面积与循环荷载频率、应力幅关系曲线  
Fig.6 Relationship curves of the area of hysteresis loop with frequency and stress amplitude

从图 6(a)可以看出,随着循环荷载频率增加,滞回圈面积增大,呈幂函数  $A_R = af^b$  ( $a$ 、 $b$  为试验拟合参数,  $b > 0$ ) 形式增长。幅值越大,滞回圈面积增长的幅度越大。从 0.02 Hz 到 1.00 Hz,应力幅为 10、25、35 MPa 时,滞回圈面积分别增大 3.21 倍、3.64 倍和 4.03 倍。随着应力幅的增加,应变幅值也明显增大,滞回圈面积近似呈幂函数形式增长,应力幅从 10 MPa 增至 35 MPa 时,荷载频率为 0.02、0.10、1.00 Hz 相应的滞回圈面积分别增大 4.83 倍、5.44 倍和 6.07 倍。

总体而言,循环加、卸载应力幅越大、频率越高,滞回圈面积越大,循环加、卸载过程中消耗的能量越多,岩样的疲劳损伤量越大,这一点从图 3 中不同频率作用下岩样的单轴抗压强度变化规律也

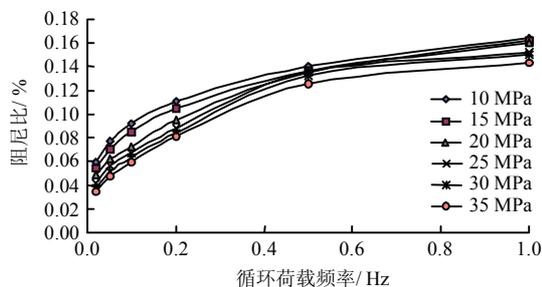
可以得到印证。

## 5 阻尼比、阻尼系数和动弹模分析

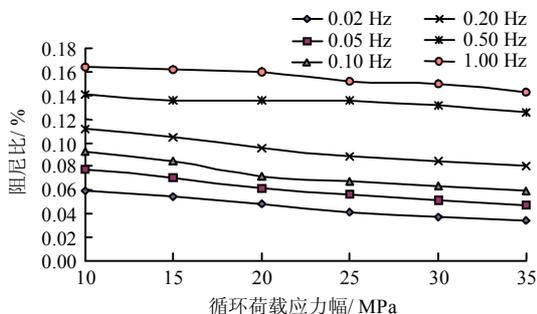
根据式 (1)~(3) 可得到不同频率、幅值作用下砂岩的阻尼比、阻尼系数和动弹模量,循环荷载频率和幅值的影响如图 7~9 所示。

### 5.1 砂岩的阻尼比分析

从图 7(a)可以看出,随着循环荷载频率增大,砂岩的阻尼比增大,在频率较小时,阻尼比增长趋势较快,在频率达到 0.5 Hz 以后,趋于稳定,总体呈幂函数形式  $\lambda = af^b$  ( $a$ 、 $b$  为试验拟合参数,  $b > 0$ ) 分布,分布规律与文献[4]的分析结论是一致的,循环荷载频率对砂岩的阻尼比影响很大。



(a) 阻尼比与循环荷载频率关系曲线



(b) 阻尼比与循环荷载应力幅关系曲线

图 7 阻尼比与循环荷载频率、应力幅关系曲线  
Fig.7 Relationship curves of the damping ratio with frequency and stress amplitude

从图 7(b)可以看出,在循环荷载频率相同的情况下,随着循环荷载应力幅的增加,砂岩的阻尼比减小,近似呈线性关系。可见,与循环荷载频率相比,应力幅对砂岩的阻尼比影响相对较小。

### 5.2 砂岩的阻尼系数分析

从图 8(a)可以看出,随着循环荷载频率增大,砂岩的阻尼系数减小,在频率较小时,阻尼系数减小趋势较快,在频率达到 0.20 Hz 以后,趋势渐缓并趋于稳定。不同循环幅值情况下,阻尼系数的变化趋势一致,总体呈幂函数形式  $C = af^b$  ( $a$ 、 $b$  为试

验拟合参数,  $b < 0$ ) 分布。从图 8(b)可以看出, 在循环荷载频率相同的情况下, 随着循环荷载应力幅的增加, 砂岩的阻尼系数变化很小, 基本呈线性关系。总体而言, 循环荷载频率对砂岩的阻尼系数影响显著, 而幅值大小对阻尼系数的影响较小。

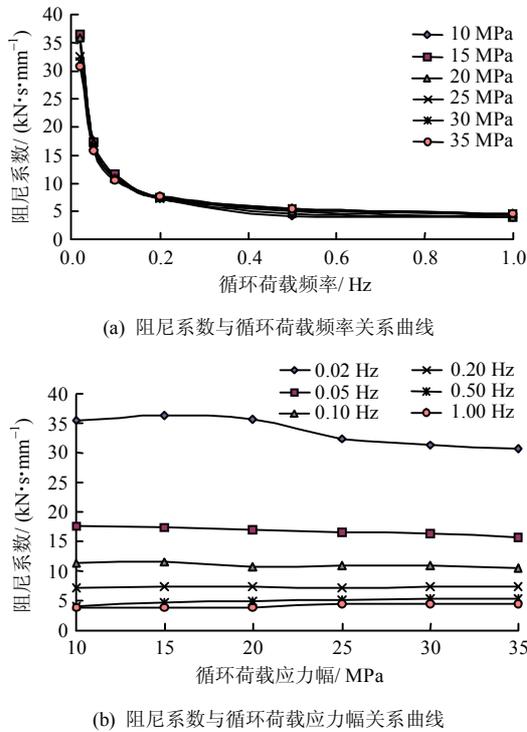


图 8 阻尼系数与循环荷载频率、应力幅关系曲线  
Fig.8 Relationship curves of the damping coefficient with frequency and stress amplitude

### 5.3 砂岩的动弹性模量分析

从图 9(a)可以看出, 随着循环荷载频率增大, 砂岩的动弹性模量增大, 但总的变化幅度较小, 循环荷载频率从 0.02 Hz 增大到 1.00 Hz 时, 不同应力幅的动弹性模量仅仅增大 10%左右, 总体变化趋势基本一致, 可以用幂函数  $E = af^b$  ( $a$ 、 $b$  为试验拟合参数,  $b > 0$ ) 较好地拟合, 总体变化规律与文献[4]、[7]分析结论是一致的。从图 9(b)可以看出, 在循环荷载频率相同的情况下, 随着循环应力幅的增大, 砂岩的动弹性模量增大, 不同频率条件下的动弹性模量增大 42%~48%, 总体呈近似线性形式增长。从前述图 2 中岩样的单轴抗压强度应力-应变曲线可以看出, 在应力水平较低时, 存在明显的压密阶段, 随着应力的增加, 曲线斜率增大, 相应地, 在分级循环加、卸载过程中, 随着循环荷载上限应力的增加, 岩样的动弹模增大。当然这个增大趋势只能是在岩样的弹性范围之内, 如果上限应力超过岩样的屈服强度, 弹性模量将出现劣化趋势。总体而

言, 当循环荷载幅值在岩样弹性范围内时, 循环荷载频率对砂岩的动弹性模量影响相对较小, 由于压密效应, 应力幅对砂岩的动弹性模量影响相对比较明显。

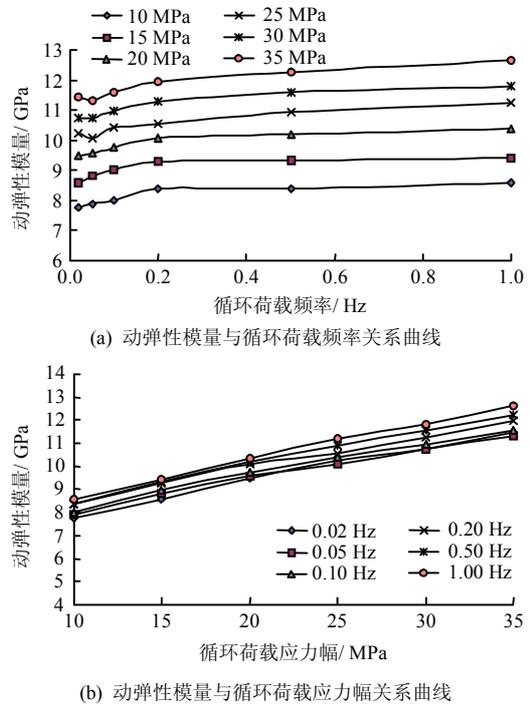


图 9 动弹性模量与循环荷载频率、应力幅关系曲线  
Fig.9 Relationship curves of the dynamic elastic modulus with frequency and stress amplitude

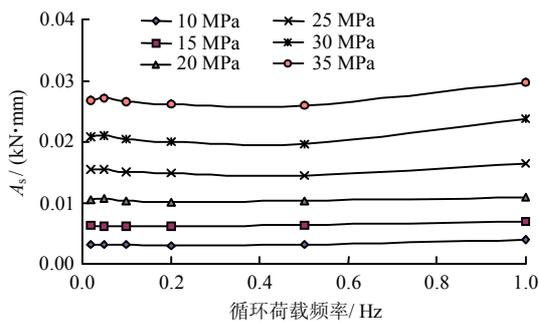
## 6 循环荷载的频率及幅值对砂岩动力特性影响机制探讨

### 6.1 循环荷载频率的影响

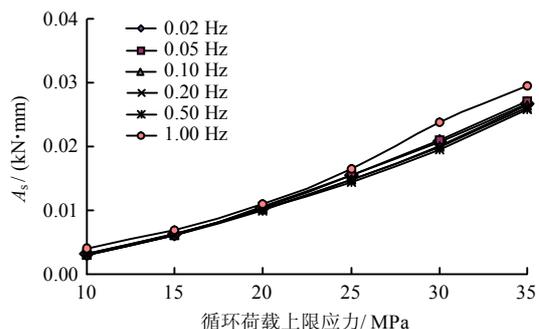
加、卸载滞回圈的形态变化显示了应力-应变的滞后程度的变化, 也反映了动力参数的变化。一定的幅值情况下, 在循环荷载频率较小时, 岩石内部的微观变形有相对比较充裕地调整时间, 应力-应变滞后效应不明显, 加、卸载曲线轨迹间的距离较小, 形成狭长的分布形态, 而且, 在加、卸载应力反转时变形响应迅速, 滞回圈就表现为面积较小的、狭长的尖叶形或者新月形; 在循环荷载频率较大时, 应力在增大或者减小时, 岩样内部的微观裂纹、孔隙、矿物颗粒变形在短时间没法调整到位, 应变明显滞后于应力, 加、卸载曲线轨迹间的距离较大, 形成相对饱满的分布形态, 在加、卸载应力反转时变形响应明显滞后, 呈弧线状分布, 滞回圈就表现为面积较大的、饱满的椭圆形或者长茄形。这也较好地解释了图 6 中滞回圈面积的变化规律。

根据式 (1)~(2) 可知, 岩石阻尼比主要与

滞回圈面积  $A_R$ 、三角形  $AEF$  的面积  $A_s$  有关, 阻尼系数主要与滞回圈面积  $A_R$ 、响应振幅  $X$  和加、卸载圆频率  $\omega$  有关。图 6(a)显示, 随着循环荷载频率的增大,  $A_R$  呈幂函数形式增大; 而  $A_s$  (见图 10) 基本不变, 这意味着循环加、卸载过程中弹性应变能与荷载的频率关系不大, 主要与岩石的弹性性质和应力幅有关。在  $A_R$  和  $A_s$  的影响因素共同作用下, 导致了阻尼比增大、阻尼系数减小。



(a)  $A_s$  与循环荷载频率关系曲线



(b)  $A_s$  与循环荷载应力幅关系曲线

图 10  $A_s$  与循环荷载频率、应力幅关系曲线  
 Fig.10 Relationship curves of  $A_s$  with frequency and stress amplitude

### 6.2 循环荷载幅值的影响

循环加卸载过程中滞回圈的形态与岩石内部的密实程度有关, 岩石内部越密实, 加、卸载循环中累积的塑性变形越小, 加、卸载曲线的轨迹越接近, 滞回圈越狭长。在应力水平较低时, 岩样内部的孔隙、裂隙、孔洞等缺陷的逐渐压密, 塑性变形特征明显, 应变滞后特征明显, 加、卸载曲线轨迹间的距离相对较大; 在分级加载过程中, 随着循环荷载应力幅的增大, 砂岩内部趋于密实, 单次加、卸载循环中累积的塑性变形越来越小, 加载和卸载曲线的轨迹越来越接近, 滞回圈高度越来越大, 越来越狭长。

从图 6(b)可知, 在相同的频率条件下, 随着应力幅的增大, 滞回圈面积  $A_R$  近似线性增大, 应力幅从 10 MPa 增加到 35 MPa 时,  $A_R$  增大 4.83~6.07

倍, 从图 10(b)可知, 在相同条件下,  $A_s$  增大 8.37~7.36 倍, 增长幅度明显大于  $A_R$ 。由式 (1) 知, 在循环荷载应力幅增大的情况下, 导致岩石阻尼比近似线性地减小; 同时, 如图 11 所示, 应力幅从 10 MPa 增加到 35 MPa 时, 位移振幅的平方  $X^2$  增大 5.51~5.98 倍, 与  $A_R$  的变化幅度相近, 由式 (2) 可知, 当应力幅增大时, 阻尼系数变化较小, 亦即应力幅对阻尼系数的影响较小。

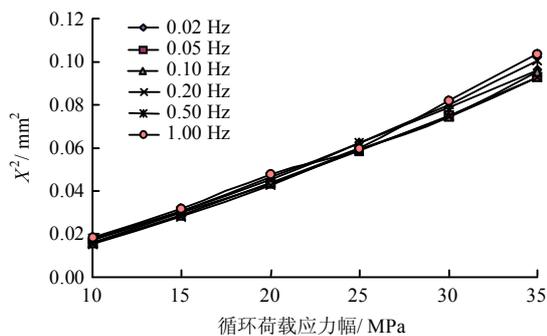


图 11 响应振幅  $X$  的平方与循环荷载应力幅关系曲线  
 Fig.11 Relationship curves of the response amplitude  $X$  square with stress amplitude

## 7 结论

(1) 循环荷载作用下, 应力-应变滞回圈的形态不仅与岩石的性质有关, 而且与加、卸载的频率和幅值有关, 频率越大, 则滞回圈更大、更饱满, 应力幅越大, 则滞回圈越狭长。

(2) 循环荷载频率从 0.02 Hz 增大到 1.0 Hz 时, 砂岩阻尼比呈幂函数形式增大, 阻尼系数呈幂函数形式减小, 变化幅度较大, 动弹性模量出现了小幅度的增长。

(3) 循环荷载应力幅从 10 MPa 增加到 35 MPa 时, 砂岩阻尼比减小, 阻尼系数变化幅度不大, 基本呈线性关系; 在应力幅增大的过程中, 砂岩的动弹性模量出现了比较明显的增大, 但这个增大趋势只能是在岩样的弹性范围之内, 如果上限应力超过岩样的屈服强度, 弹性模量将出现劣化趋势。

(4) 通过本文的试验结果分析可以发现, 循环荷载频率和幅值对岩石的动力特性影响明显, 因此, 在实际结构动力分析时, 应该综合考虑循环荷载的频率和幅值选取合理的动力参数。

### 参考文献

[1] YUN S J, PALAZOTTO A. Plastic deformation under cyclic loading using two-back stress hardening models[J]. *International Journal of Fatigue*, 2008, 30(3): 473-482.

- [2] TUTUNCU A N, PODIO A L, GREGORY A R, et al. Nonlinear viscoelastic behavior of sedimentary rocks, Part I: Effect of frequency and strain amplitude[J]. **Geophysics**, 1998, 63(1): 184—194.
- [3] TUTUNCU A N, PODIO A L, SHARMA M M. Nonlinear viscoelastic behavior of sedimentary rocks, Part II: Hysteresis effect and influence of type of fluid on elastic moduli[J]. **Geophysics**, 1998, 63(1): 195—203.
- [4] 朱珍德, 孙林柱, 王明洋. 不同频率循环荷载作用下岩石阻尼比试验与变形破坏机制细观分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 8—12.  
ZHU Zhen-de, SUN Lin-zhu, WANG Ming-yang. Damping ratio experiment and mesomechanical analysis of deformation failure mechanism on rock under different frequency cyclic loadings[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(1): 8—12.
- [5] SHALEV EYAL, LYAKHOVSKY VLADIMIR, QUGIER-SIMONIN AUDREY, et al. Inelastic compaction, dilation and hysteresis of sandstones under hydrostatic conditions[J]. **Geophysical Journal International**, 2014, 197(2): 920—925.
- [6] 郭印同, 赵克烈, 孙冠华, 等. 周期荷载下盐岩的疲劳变形及损伤特性研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1353—1359.  
GUO Yin-tong, ZHAO Ke-lie, SUN Guan-hua, et al. Experimental study of fatigue deformation and damage characteristics of salt rock under cyclic loading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(5): 1353—1359.
- [7] 刘建锋, 翟俨伟, 裴建良, 等. 不同频率循环荷载下大理岩动力学特性试验研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2014, 33(4): 432—436.  
LIU Jian-feng, ZHAI Yan-wei, PEI Jian-liang, et al. Experimental study on dynamic characteristics of marble specimens under cyclic loadings with different frequencies[J]. **Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science)**, 2014, 33(4): 432—436.
- [8] 马林建, 刘新宇, 许宏发, 等. 循环荷载作用下盐岩三轴变形和强度特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(4): 849—856.  
MA Lin-jian, LIU Xin-yu, XU Hong-fa, et al. Deformation and strength properties of rock salt subjected to triaxial compression with cyclic loading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(4): 849—856.
- [9] 何明明, 李宁, 陈蕴生, 等. 分级循环荷载下岩石动力学行为试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(10): 2907—2913.  
HE Ming-ming, LI Ning, CHEN Yun-sheng, et al. An experimental study of dynamic behaviors of rock under stepwise cyclic loading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(10): 2907—2913.
- [10] 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(增刊 2): 3466—3475.  
ZHAO Kai, QIAO Chun-sheng, LUO Fu-rong, 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(Supp.2): 3466—3475.
- [11] MCKAVANAGH B, STACEY F D. Mechanical hysteresis in rocks at low strain amplitudes and seismic frequencies[J]. **Physics of the Earth and Planetary Interiors**, 1974, 8(3): 246—250.
- [12] BRENNAN B J, STACEY F D. Frequency dependence of elasticity of rock—test of seismic velocity dispersion[J]. **Nature**, 1977, 268: 220—222.
- [13] 肖建清, 冯夏庭, 丁德馨, 等. 常幅循环荷载作用下岩石的滞后及阻尼效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(8): 1677—1683.  
XIAO Jian-qing, FENG Xia-ting, DING De-xin, et al. Study of hysteresis and damping effects of rock subjected to constant amplitude cyclic loading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(8): 1677—1683.
- [14] 邓华锋, 罗骞, 李建林, 等. 浸泡-风干循环作用下砂岩动力特性劣化规律研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(9): 2468—2474.  
DENG Hua-feng, LUO Qian, LI Jian-lin, et al. Dynamic characteristics deterioration laws of sandstone under cyclic saturation-air drying[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(9): 2468—2474.
- [15] 朱明礼, 朱珍德, 李刚, 等. 循环荷载作用下花岗岩动力特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(12): 2520—2526.  
ZHU Ming-li, ZHU Zhen-de, LI Gang, et al. Experimental study of dynamic characteristics of granite under cyclic loading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(12): 2520—2526.
- [16] 邓华锋, 胡亚运, 李建林, 等. 考虑滞后效应的岩石加卸载响应比试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊 1): 2915—2921.  
DENG Hua-feng, HU Ya-yun, LI Jian-lin, et al. Experimental research on load/unload response ratio considering hysteresis effect of rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(Supp.1): 2915—2921.