



深部循环荷载下花岗岩损伤变形与 细观结构分析

胡建华, 曾平平, 杨东杰, 徐 晓

(中南大学 资源与安全工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 通过对花岗岩进行不同围压损伤控制的三轴等幅循环荷载试验, 采用核磁共振技术, 对岩石损伤变形和细观结构特征进行了分析。结果表明: 1) 当围压从 50 MPa 增大到 120 MPa 时, 试样累计塑性应变和应变损伤参数整体上呈增大趋势; 2) 随着循环次数增加, 试样轴向累计塑性应变逐渐增大, 径向和体积累计塑性应变呈阶段增长趋势, 而塑性应变增量呈先急剧衰减后趋于稳定的阶段现象; 3) 在围压一定条件下, 随着循环次数增加, 试样轴向应变损伤参数减小, 体积应变损伤参数增大, 径向应变损伤参数先增大后减小; 4) 循环加卸载后, 试样的 T_2 谱曲线由三峰结构变为双峰结构, 其细观结构主要表现出大孔隙数量增多、孔径增大以及整体孔隙度大幅升高的特征。

关键词: 花岗岩; 循环荷载; 围压; 循环次数; 塑性应变; 损伤参数

文章编号: 1004-0609(2022)-04-1187-12

中图分类号: TD853

文献标志码: A

引文格式: 胡建华, 曾平平, 杨东杰, 等. 深部循环荷载下花岗岩损伤变形与细观结构分析[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(4): 1187–1198. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-37914

HU Jian-hua, ZENG Ping-ping, YANG Dong-jie, et al. Analysis of damage deformation and mesoscopic structure of granite under deep cyclic loading[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(4): 1187–1198. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-37914

深部开采已成为资源开发的主战场^[1-3], 这类资源的开采处在“三高一扰动”^[4]的恶劣地质环境中, 其岩体工程响应规律及力学效应与浅部开采不同。随着开采活动加深, 在高地应力和复杂地质环境影响下, 岩体的破坏模式发生了变化, 其在机械开挖或爆破振动等循环扰动影响下的力学性能也发生了变化。大量研究表明: 深部岩体破坏模式变化具体表现为岩石由脆性控制变为侧向应力延展控制^[2]; 力学性能变化表现为循环荷载作用下岩石强度劣化及其不可逆变形^[5-7]。因此, 深部高地应力与循环荷载的耦合作用严重影响着矿山岩体工程的

整体稳定性。

室内模拟深部矿山岩体循环加卸载过程的实验有两种, 即单轴循环荷载试验^[8]和三轴循环荷载试验^[5]。在单轴循环荷载试验方面, COSTIN 等^[9]研究表明, 循环疲劳和应力腐蚀共同作用会使岩石强度劣化。葛修润等^[10-11]提出了完整岩石的疲劳损伤阈值, 并且发现变形不断累积将导致岩石疲劳破坏。肖建清等^[12-13]根据岩石劣化行为和轴向不可逆变形发展的规律, 建立了基于塑性应变的损伤累积模型。CERFORTAINE 等^[14]研究发现循环荷载是累积破坏的主要原因。周家文等^[15]研究了脆性岩石在

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41672298); 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0602901); 中南大学研究生自主探索创新项目(2021ZZTS0872)

收稿日期: 2021-03-10; **修订日期:** 2021-09-28

通信作者: 杨东杰, 博士; 电话: 18684911183; E-mail: yangdjxx@csu.edu.cn

单轴循环加卸载作用下的损伤特性,提出了岩石宏观力学特性取决于内部微裂纹的细观力学响应。上述研究对理解循环荷载作用下岩石的变形破坏机理有着重要的意义。同时,部分研究人员为了使室内模拟过程更加接近岩石三向受力的真实状态,也讨论了围压对循环荷载作用下岩石力学性能和疲劳损伤演化的影响。刘恩龙等^[16]研究表明,在围压为2~40 MPa的范围内,砂岩试样破坏时的轴向应变随着围压的增大而增大,其围压水平对岩石损伤变形具有重要的作用。黄正均等^[17]研究了花岗岩在围压为0~15 MPa条件下的疲劳损伤变形规律,揭示了岩石的疲劳寿命随着围压增大而增长的规律。卢辉等^[18]对北山深部花岗岩石开展了三轴循环加卸载力学特性研究试验(围压为5~25 MPa),并分析了岩石循环加卸载效应与围压效应的耦合作用。赵星光等^[19]研究了深部花岗岩在三轴循环加卸载条件下(围压为1~30 MPa)的损伤和扩容特性,并探讨了岩石扩容对围压的依赖性。胡广等^[20]研究了围压(5~30 MPa)对斜长花岗岩在三轴循环荷载作用下的弹性模量演化规律。赵军等^[21]对花岗岩进行了10、30、40和50 MPa围压下的三轴循环加卸载试验,揭示了花岗岩试样的变形破坏规律。GATELIER^[22]对多孔砂岩进行了三轴循环试验(围压为0~50 MPa),揭示了加载过程中的压实和微裂纹机制,并认为随着围压的增加,岩石各向异性对变形特性的影响显著减小。上述研究对理解深部岩石变形特征有着积极意义。

以上研究成果主要针对围压为0~50 MPa范围内岩石在循环荷载作用下的强度参数、变形特征和疲劳损伤演化方面,但超深部工程中高围压循环荷载与浅部低围压循环荷载对岩石的变形机理影响不同。目前,对围压超过50 MPa时花岗岩在循环荷载作用下的损伤变形规律及细观结构特征分析方面少有研究。由于有色金属矿产资源主要成矿基岩为致密花岗岩,因此本文选取致密花岗岩为研究对象,考虑深部1779~4721 m(围压在50~120 MPa之间^[23])的高围压作用,设计了一系列不同围压下损伤控制的三轴等幅循环荷载试验,同时采用核磁共振测试技术对循环荷载前后的花岗岩试样进行细观分析与表征,探究岩石在高围压循环荷载作用下的变形特征、损伤演化及其机理,为深部开采活动中岩体工程的设计、开挖和稳定性分析提供依据,具

有重要的工程应用价值。

1 实验

1.1 试样和实验设备

试验样品为致密花岗岩试样,平均孔隙度为0.88%。根据国际岩石力学学会(ISRM)要求,制备了直径为50 mm、高度为100 mm的圆柱形试样,如图1所示。实验使用MTS815型三轴电液伺服材料试验机(见图2(a)),进行三轴压缩循环加卸载测试。该设备能提供伺服液压闭环控制,并且具有2300 MPa的轴压能力和140 MPa的围压能力。轴向动态加载系统由液压驱动,同时通过轴向和径向引伸计测量岩石的变形。实验还使用了上海纽迈科技有限公司生产的核磁共振仪(见图2(b)),用于测量试样的孔隙度及孔隙分布。



图1 花岗岩试样

Fig.1 Granite specimens

1.2 试验方法和步骤

本文首先进行单轴压缩试验。该试验是以2 kN/s的恒定加载速率对饱水花岗岩试样进行单调加载,试验结果如图3所示,其平均单轴抗压强度 σ_c 为164.88 MPa。为探究致密花岗岩在三轴循环加卸载条件下的变形行为,设计了在50、80、100和120 MPa围压下的三轴等幅循环加卸载试验。三轴循环加卸载试验的基本流程如下(见图4),循环加载路径取等幅循环加卸载(见图5):

1) 花岗岩试样真空饱水,利用核磁共振仪测量花岗岩试样的初始孔隙度和初始 T_2 图谱。

2) 利用MTS815试验机,先通过加载较小的轴向应力固定花岗岩试样,然后以0.5 MPa/s的速率将围压加载到额定围压值(如围压50 MPa),并在试验中保持围压恒定。

3) 在恒定围压下循环加卸载20次。在此过程中,先将轴向应力以2 kN/s的加载速率加载至平均应力水平(约为单轴抗压强度的48%),然后以正弦



图2 实验主要设备

Fig. 2 Main experimental equipment: (a) Electro-hydraulic servo material testing machine; (b) Nuclear magnetic resonance apparatus

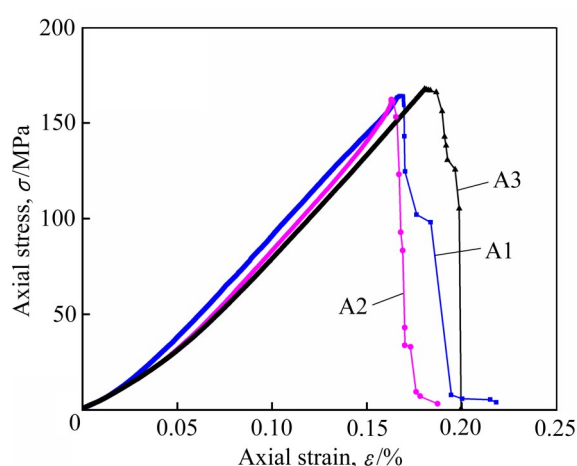


图3 花岗岩单轴压缩试验结果

Fig. 3 Granite uniaxial compression test results

波形式循环加卸载。应力上限为单轴抗压强度的93%，应力下限为单轴抗压强度的3%。

4) 将其他组试样的围压增加到相应的额定围压(分别为80、100和120 MPa), 循环荷载以与步骤3相同的方式进行, 重复20次, 直至做完所有不同围压的循环加卸载试验为止。

5) 重复步骤1, 利用核磁共振仪分别测量循环加卸载20次后花岗岩试样的孔隙度和 T_2 图谱。

2 分析与讨论

2.1 花岗岩循环加卸载试验结果

通过三轴压缩循环加卸载试验, 得到了在50、

80、100和120 MPa围压下花岗岩试样的偏应力-应变曲线(见图6)。由图6可知, 初次循环加卸载时花岗岩试样处于弹性状态, 随着循环次数的增加, 花岗岩试样发生了不可逆变形, 即花岗岩试样完全卸载后有残余的塑性应变产生, 包括轴向变形、径向变形和体积变形, 且花岗岩试样的残余塑性应变逐渐增大。当加载到应力上限后卸载时, 卸载曲线低于加载曲线, 形成塑性滞回环, 并由“疏”向“密”发展。随着循环加卸载的不断进行, 滞回环产生“迁移”现象, 这与卢高明等^[24]和徐鹏等^[25]的研究成果一致。在不同围压下花岗岩试样的应变变化规律相似。在50 MPa和80 MPa的围压下, 滞回环要相对紧密。随着围压的增加, 花岗岩试样的轴向应变和径向应变均向应变增大的方向移动, 塑性变形增加。

2.2 塑性应变分析

根据加卸载试验中应变的可恢复性, 将应变分为弹性应变和塑性应变两个部分^[25], 即如图7所示, 应变值计算如式(1)所示。

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p \quad (1)$$

式中: ε^e 为弹性应变; ε^p 为塑性应变, 即不可逆变形; ε 为总应变。在主应力作用下, ε 有3个主应变, 分别为 ε_1 、 ε_2 、 ε_3 ; 其中, ε_1 为试验测得的轴向应变, ε_2 和 ε_3 为试验测得的径向应变。

体积应变是轴向应变与径向应变的叠加^[26, 15],

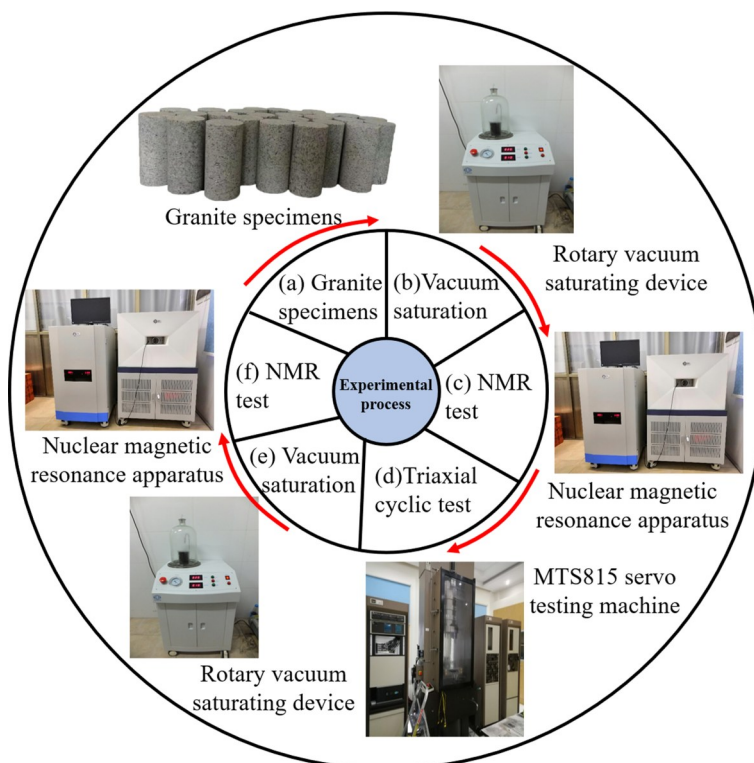


图4 实验流程图

Fig. 4 Flow chart of experiment

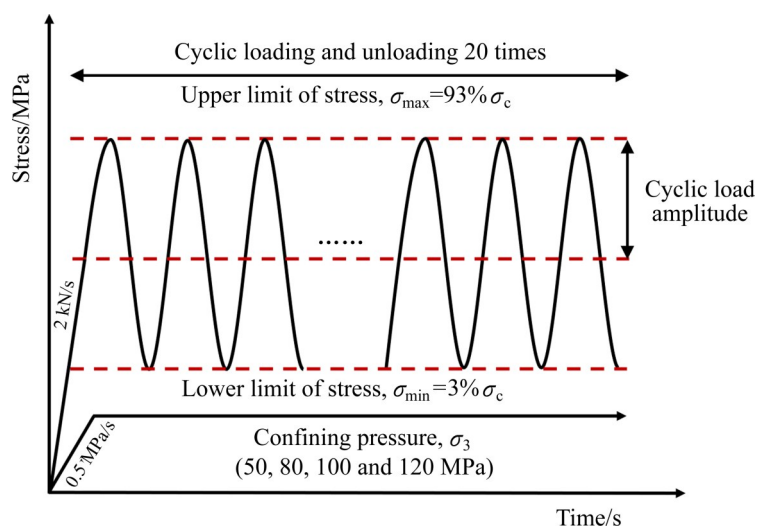


图5 实验加卸载路径

Fig. 5 Experiment loading and unloading paths

如式(2)所示, 即

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \quad (2)$$

式中: ε_v 为体积应变。对于常规三轴应力状态有 $\varepsilon_2 = \varepsilon_3$, 因此式(2)可以简写为

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3 \quad (3)$$

为进一步分析循环阶段塑性应变的演化规律,

计算塑性应变增量^[27], 即

$$\Delta \varepsilon^p(i) = \varepsilon^p(i) - \varepsilon^p(i-1) \quad (4)$$

式中: $\Delta \varepsilon^p(i)$ 为第 i 次循环阶段的塑性应变增量。

因此, 累计塑性应变为

$$\Delta \varepsilon^{cp}(i) = \sum_{j=1}^i \Delta \varepsilon^p(j) \quad (5)$$

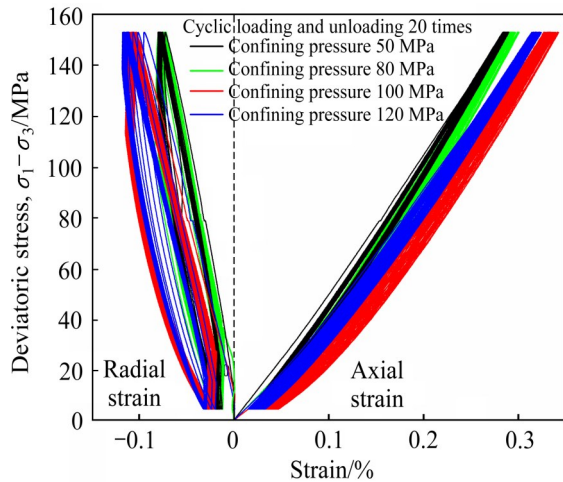


图6 不同围压下花岗岩循环加卸载试验结果

Fig. 6 Test results of cyclic loading and unloading of granite under different confining pressures

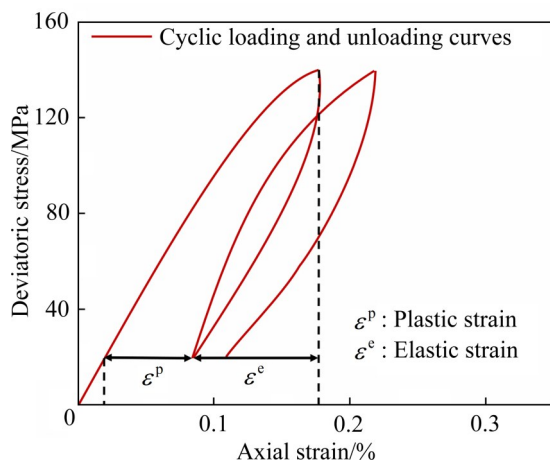


图7 循环荷载下塑性应变和弹性应变示意图

Fig. 7 Schematic diagram of plastic and elastic strains under cyclic loading

式中: $\Delta\epsilon^p(i)$ 为循环 i 次后的累计塑性应变; n 为循环加卸载次数。

结合花岗岩试样三轴压缩循环加卸载试验的结果, 可以得到不同围压下花岗岩试样在每一次加卸载过程中的轴向塑性应变和径向塑性应变, 然后利用式(3)计算出体积应变后, 进一步得到每一次加卸载过程中的体积塑性应变。最后利用式(4)和式(5), 计算得到每一次循环的轴向、径向和体积塑性应变增量及其累计塑性应变, 以定量分析岩石在循环荷载下的应变演化规律。

循环加卸载下花岗岩试样的损伤是一种累积损伤, 导致岩石逐渐劣化。实际上, 由于加卸载作用

产生了微裂纹, 岩石在第一次加卸载后便不再完好无损^[28]。基于实验结果, 在本节中将讨论塑性应变随循环次数和围压水平的演化关系。

图8所示为不同围压水平下轴向、径向、体积累计塑性应变及其对应的塑性应变增量与循环次数的关系。由图8(a)、(c)和(e)可知, 轴向、径向和体积塑性应变增量随着循环次数的变化可分为两个阶段, 初始的快速衰减阶段和后期的稳定发展阶段。在初始几次循环加卸载时, 塑性应变增量急剧衰减, 随后在循环加卸载过程中逐渐趋于稳定。不同围压水平下轴向、径向和体积塑性应变增量的演化规律相似, 具有典型的Kaiser效应^[29]。体积塑性应变增量的变化是循环加卸载的结果, 它是整个加卸载过程中循环次数的函数, 表明压实和膨胀之间存在竞争关系^[22]。如图8(e)所示, 围压的变化强烈影响岩石的扩容行为, 导致其在前几次循环中波动较大。在围压为50 MPa和80 MPa时, 第一次循环中观察到体积塑性应变正增量可以揭示压实机理, 该值发生突降现象表明微裂纹很快就会萌生, 体积应变由压实向膨胀转变。这种过渡变得更加难以恢复, 因为岩石遭到了严重破坏。在随后的循环加卸载中观察到体积塑性应变负增量, 表明膨胀成为主要的非线性变形。但在围压为100 MPa和120 MPa时, 花岗岩试样均表现出体积膨胀行为, 没有观察到压实现象, 这与花岗岩试样在50 MPa和80 MPa围压下的体积压缩行为有明显差异。由于高应力作用下花岗岩试样本身是十分致密的岩石, 在受到循环荷载时, 其内部逐渐萌生微裂纹, 导致体积扩容。

如图8(b)、(d)和(f)所示, 轴向、径向和体积累计塑性应变都随着循环次数的增加而增大, 但对比轴向累计塑性应变, 径向和体积累计塑性应变的非线性变化规律更加明显。如图8(d)和(f)所示, 当围压为50 MPa时, 花岗岩试样的径向和体积累计塑性应变呈现出分为初始减速变形阶段、中期匀速变形阶段和后期加速变形阶段的演化趋势。这种塑性变形分为三个阶段的发展规律是普遍存在的^[30]。当围压增大时, 径向和体积累计塑性应变曲线均呈现出前两种变形阶段特征。这表明围压越小, 塑性变形量的发展越迅速, 即在循环加卸载20次时花岗岩变形已经进入后期加速变形阶段, 每次循环的塑性变形累计的越来越快。匀速变形阶段的线性斜率

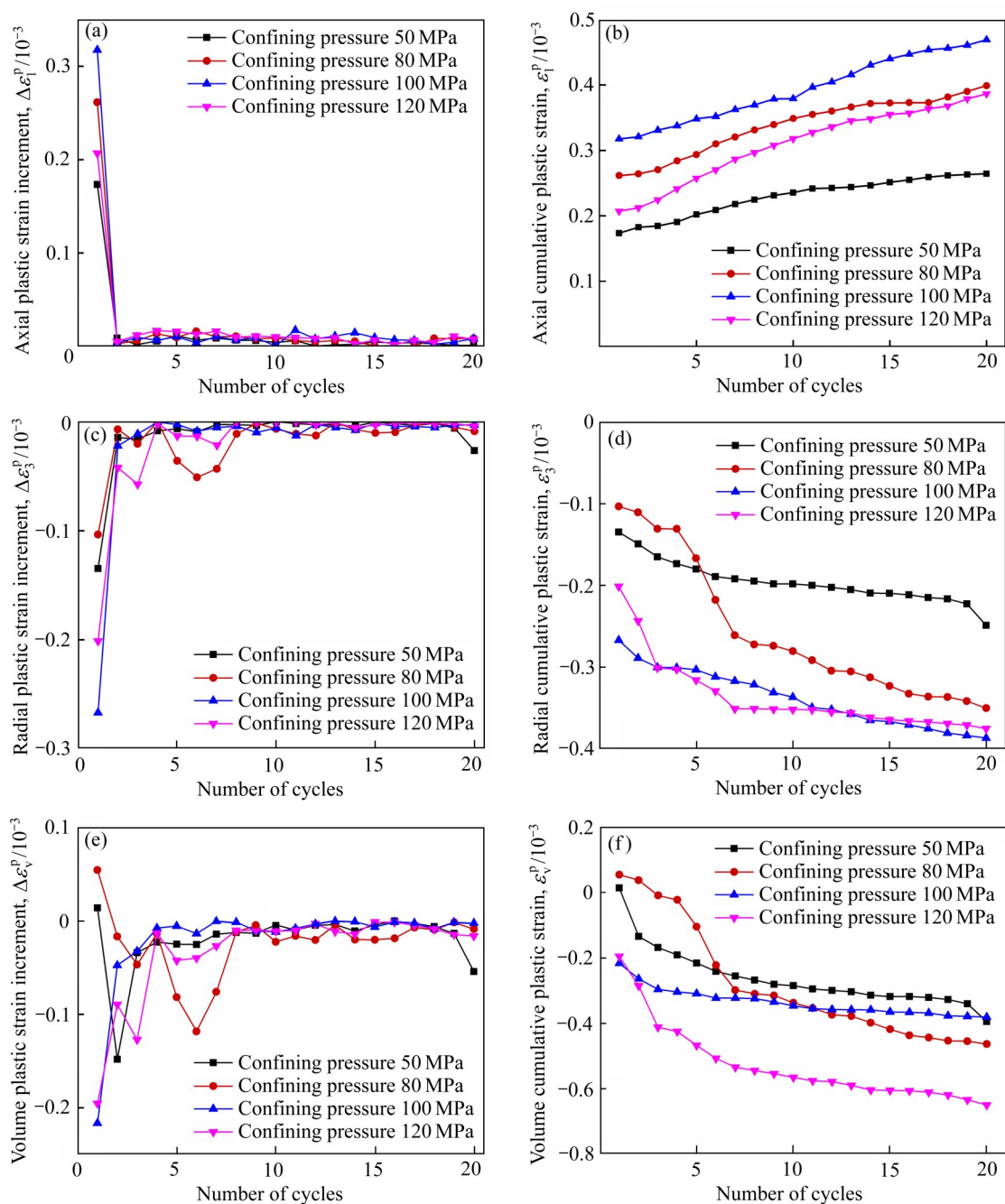


图8 不同围压下花岗岩塑性应变损伤过程

Fig. 8 Plastic strain damage processes of granite under different confining pressures: (a) Relationship between axial plastic strain increment and number of cycles; (b) Relationship between axial cumulative plastic strain and number of cycles; (c) Relationship between radial plastic strain increment and number of cycles; (d) Relationship between radial cumulative plastic strain and number of cycles; (e) Relationship between volumetric plastic strain increment and number of cycles; (f) Relationship between volumetric cumulative plastic strain and number of cycles

为应变速率，经计算得出围压为50~120 MPa条件下的径向累计塑性应变速率分别为 -2.24×10^{-6} 、 -7.04×10^{-6} 、 -5.84×10^{-6} 和 -1.90×10^{-6} ，其应变速率值随着围压的增大，呈现出先增大后减小的趋势，表明围压会对花岗岩试样的匀速变形阶段起到抑制

作用。此外，在围压为80 MPa和120 MPa条件下，花岗岩试样的径向和体积累计塑性应变在初始阶段分别存在明显的加速增大阶段。从最终的累计塑性应变值比较分析可知(见表1)，在围压为120 MPa时，轴向、径向和体积累计塑性应变相对于围压为

表 1 不同围压下花岗岩试样的最终累计塑性应变值

Table 1 Final cumulative plastic strain values of granite specimens under different confining pressures

Confining pressure/MPa	Axial plastic strain/ 10^{-3}	Radial plastic strain/ 10^{-3}	Volumetric plastic strain/ 10^{-3}
50	0.264	-0.249	-0.394
80	0.399	-0.350	-0.463
100	0.469	-0.387	-0.381
120	0.386	-0.375	-0.650

50 MPa 时分别增大了 46.2%、50.6% 和 65.0%。这表明围压越大, 花岗岩试样的变形程度越大, 且体积变形对损伤最为敏感。这一规律与许多学者在低围压状态下的研究结论相反, 在低围压状态下围压被证实对塑性变形的束缚作用非常大^[21-22], 从而导致变形程度会随着围压的增大而降低。但在本试验中的围压为 50~120 MPa, 此时围压只表现出对塑性变形的匀速变形阶段起到一定的抑制, 而整体上却加剧了花岗岩试样的变形。这有可能是由于围压过高, 即花岗岩试样在侧向的约束力非常大, 使得围压的侧向束缚功能从有利因素变为不利因素, 导致围压促进了花岗岩试样的变形。

2.3 循环加卸载应变损伤参数分析

从前面对花岗岩试样的塑性应变分析已经知道, 花岗岩试样的循环加卸载过程是岩石损伤逐渐累积的过程。按照卢高明等^[24]关于应变损伤参数的定义, 考虑了弹性应变的作用, 能够更好地反映岩石循环加卸载过程中的损伤演化规律, 计算公式为

$$w_1 = \frac{\varepsilon_1^p(i)}{\varepsilon_1^p(i) + \varepsilon_1^e(i)} \quad (6)$$

$$w_3 = \frac{\varepsilon_3^p(i)}{\varepsilon_3^p(i) + \varepsilon_3^e(i)} \quad (7)$$

$$w_v = \frac{\varepsilon_v^p(i)}{\varepsilon_v^p(i) + \varepsilon_v^e(i)} \quad (8)$$

式中: w_1 、 w_3 和 w_v 分别为轴向、径向和体积应变损伤参数; $\varepsilon_1^p(i)$ 、 $\varepsilon_3^p(i)$ 和 $\varepsilon_v^p(i)$ 分别为每次循环中轴向、径向和体积塑性应变; $\varepsilon_1^e(i)$ 、 $\varepsilon_3^e(i)$ 和 $\varepsilon_v^e(i)$ 分别为每次循环中轴向、径向和体积弹性应变。应变损伤参数计算结果如图 9 所示。

由图 9(a)可以看出, 轴向应变损伤参数随循环次数的增加而减小, 表明花岗岩试样的轴向弹性应变比轴向塑性应变增长要快。由于加卸载作用造成花岗岩试样内部损伤, 在第一次循环时花岗岩试样

产生了较大的轴向应变损伤参数值, 但最大不超过 0.1, 表明花岗岩试样的大部分变形为轴向弹性应变, 并且轴向弹性应变随循环次数增加而不断增大。在循环次数一定条件下, 围压越大, 花岗岩试样的轴向应变损伤参数越大; 但在 120 MPa 围压下, 其轴向应变损伤参数产生大幅的降低, 表明围压在一定程度上能够促进花岗岩试样的轴向变形, 但当围压增大到一定值(120 MPa)时, 就会抑制花岗岩试样的轴向变形。

由图 9(b)可以看出, 在围压一定的条件下, 径向应变损伤参数变化趋势比较复杂, 均随循环次数的增加, 呈现出先增大后降低的趋势; 表明在前几次循环中花岗岩试样的径向塑性应变增长较快, 在随后的循环过程中其径向塑性应变增长逐渐降低, 并以径向弹性变形为主。在围压为 50 MPa、80 MPa、100 MPa 和 120 MPa 时, 花岗岩试样的径向应变损伤参数峰值分别为 0.25、0.28、0.27 和 0.29, 呈现出整体增大的趋势。由图 9(c)可以看出, 在围压为 50 MPa、80 MPa 和 100 MPa 时, 随循环次数增加, 花岗岩试样的体积应变损伤参数先增大后趋于平缓; 但在围压为 80 MPa 条件下, 花岗岩试样的体积应变损伤参数值大部分低于围压为 50 MPa 下的体积应变损伤参数值; 在围压为 120 MPa 时, 体积应变损伤参数随循环次数增加而迅速增大。同时, 可以看出体积应变损伤参数总体上随围压的增大而增大。

2.4 核磁共振 T_2 谱分析

对于饱水岩石, 横向弛豫时间 T_2 与孔隙尺寸相关, T_2 值越小则对应的孔隙越小, 反之则对应的孔隙越大。 T_2 谱曲线的振幅和峰面积均可代表岩石中的孔隙数量, T_2 谱曲线的连续性则反映了孔隙的连通性^[31]。本文参考周科平等^[32]的研究方法, 将 T_2 值小于 10 ms 对应的孔隙视为小孔, 将 T_2 值大于 10

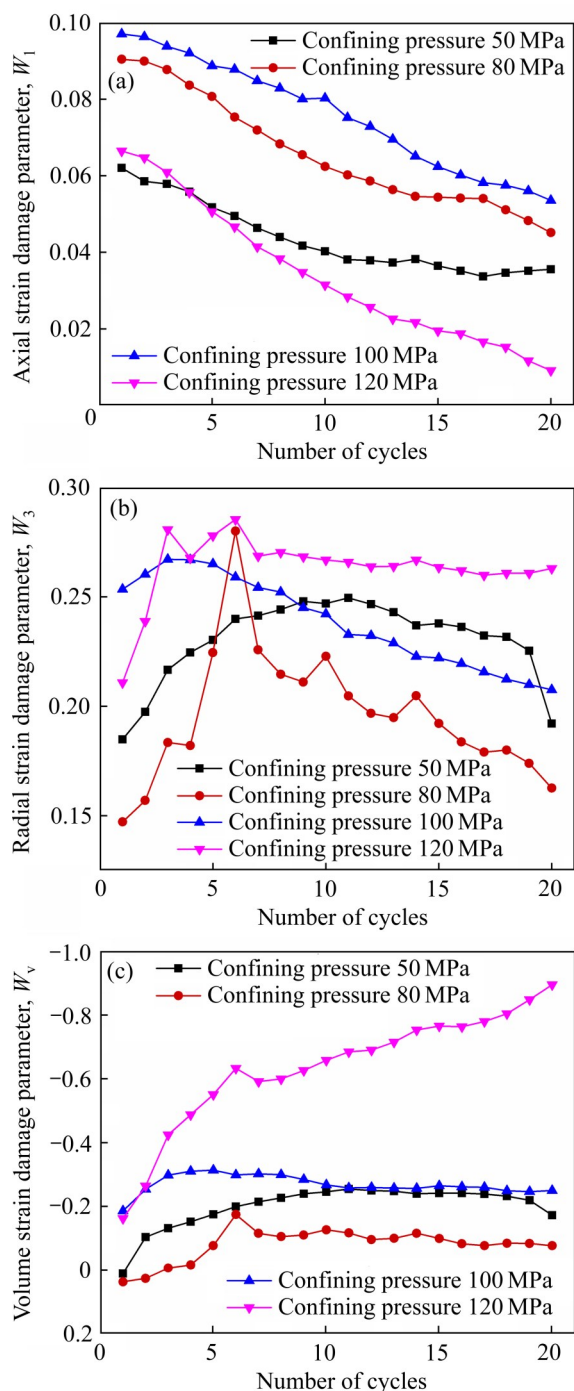


图9 不同围压下花岗岩应变损伤参数演化

Fig. 9 Evolutions of strain damage parameters of granite under different confining pressures: (a) Axial strain damage parameters; (b) Radial strain damage parameters; (c) Volumetric strain damage parameters

ms对应的孔隙视为大孔。

图10(a)~(d)所示为不同围压下循环20次前后花岗岩试样的 T_2 谱分布曲线。从任一图中均可以看出,在循环加卸载前后花岗岩试样内部的孔隙分布

存在一定的差异性。循环加卸载前,除了围压为120 MPa时花岗岩试样表现出双峰结构外,其他围压条件下花岗岩试样均存在三个波峰。左峰和中峰最大孔隙分布对应的 T_2 值均小于10 ms,而右峰最大孔隙分布对应的 T_2 值大于10 ms,且 T_2 值均在100 ms左右,表明花岗岩试样内部存在两种尺度的小孔隙(T_2 值分别约为0.1~1 ms和1~10 ms)以及一种尺度的大孔隙(T_2 值约为10~1000 ms),且不同围压下试样的初始损伤程度较一致。循环加卸载20次后, T_2 谱分布曲线主要呈现双峰结构,具体变化表现为中峰消失,而左右两峰的振幅和峰面积均有所增大,特别是右峰的振幅和峰面积增大更显著。这表明循环加卸载作用后花岗岩试样内部的孔隙数量增多,尤其是大孔径的孔隙数量。大孔隙数量显著增多,有可能是来自试样内部基质中新生成的大孔隙以及部分小孔隙(T_2 值约为1~10 ms部分)进一步发育而成的大孔隙。同时,从图10中还可以发现,每个波峰对应的 T_2 值均比循环加卸载前的 T_2 值大,表明循环加卸载作用后,花岗岩试样内部各种尺度孔隙(小孔隙和大孔隙)的孔径均有所增大。从围压的角度分析,在不同围压作用下,花岗岩试样内部的孔隙分布变化不显著。当围压为50 MPa时(见图10(a)),循环加卸载后花岗岩试样在 T_2 值约为0.1 ms时才呈现小孔隙的分布,表明循环加卸载20次后花岗岩试样内部的小孔隙孔径整体上均比原始小孔孔径大。这与围压为80 MPa(见图10(b))时的观察结果一致,但是在围压为100 MPa(见图10(c))和120 MPa(见图10(d))时,循环加卸载后花岗岩试样内部小孔隙分布对应的 T_2 值基本没有变化。由此可见,循环加卸载作用使得花岗岩试样内部大孔隙的数量显著增多且孔径增大,对花岗岩的细观损伤较大。而围压作用对花岗岩试样内部的小孔径孔隙特征有一定影响,但对大孔径孔隙特征的影响并不显著。

2.5 孔隙度分析

为了研究细观变形损伤,使用核磁共振技术来测量循环荷载前后花岗岩试样的孔隙度。花岗岩试样的孔隙度变化如图11所示。由孔隙度测试结果可知(见图11),在围压分别为50、80、100和120 MPa的条件下,循环加卸载前花岗岩试样的孔隙度分别为0.889%、0.878%、0.857%和0.897%,而循

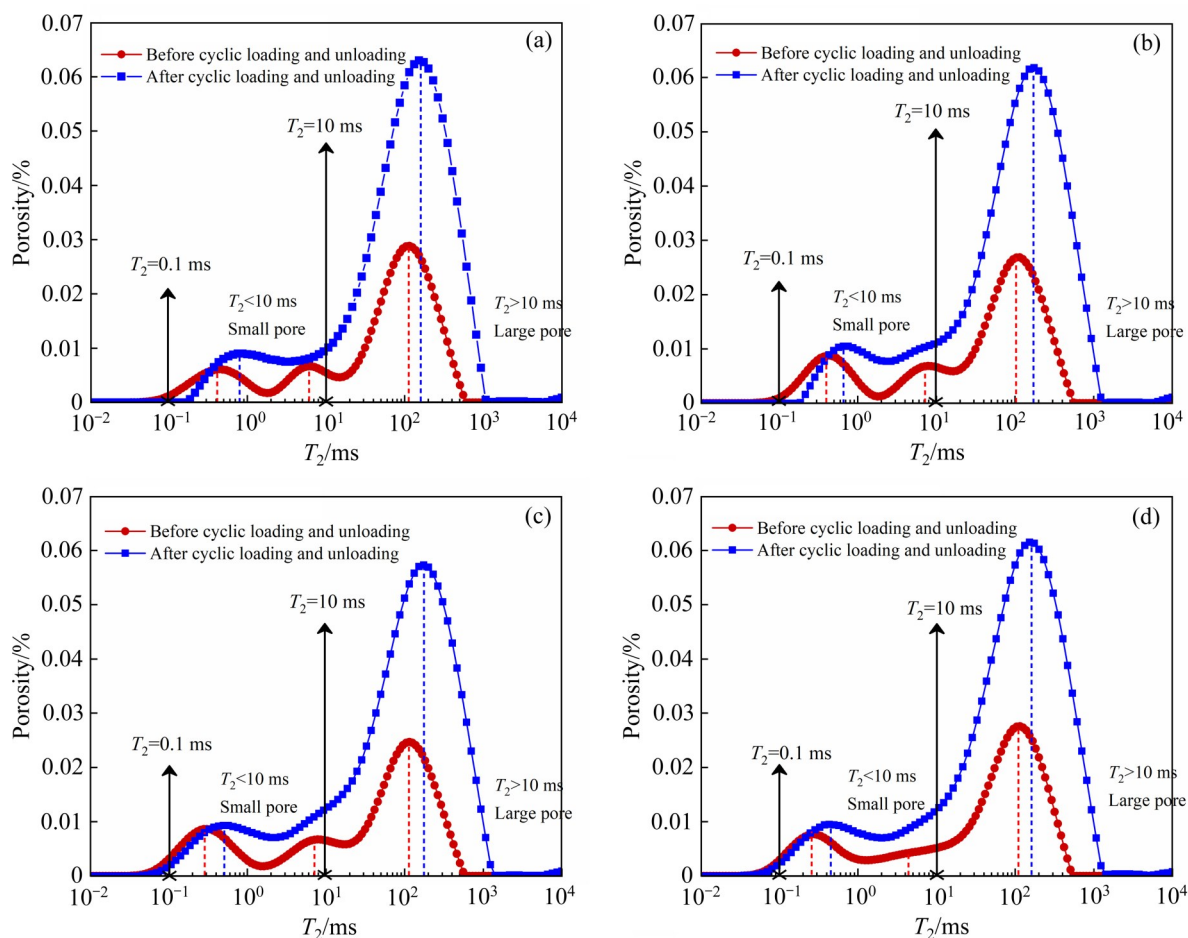


图 10 不同围压下花岗岩循环加卸载前后的 T_2 谱分布曲线

Fig. 10 T_2 spectrum distribution curves of granite before and after cyclic loading and unloading under different confining pressures: (a) 50 MPa; (b) 80 MPa; (c) 100 MPa; (d) 120 MPa

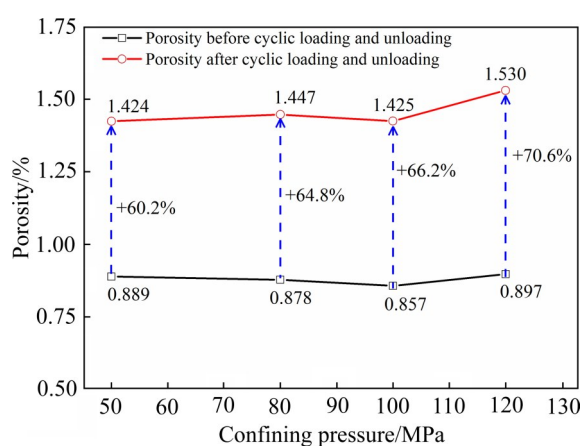


图 11 不同围压下花岗岩循环加卸载前后的孔隙度变化

Fig. 11 Porosity changes of granite before and after cyclic loading and unloading under different confining pressures

环加卸载后花岗岩试样的孔隙度分别为 1.424%、1.447%、1.425% 和 1.530%，可以看出循环加卸载前后的孔隙度有显著变化。循环加卸载 20 次后，

四种围压下花岗岩试样的孔隙度均升高，且增幅比也分别增加了 60.2%、64.8%、66.2% 和 70.6%。本次试验中，循环荷载施加的振幅较大，约为花岗岩试样单轴抗压强度的 45% (高达 74.2 MPa)，其循环扰动的强度会对花岗岩试样内部结构造成损伤。在第 2.4 节中已经得出，循环荷载下花岗岩试样内部的大孔隙数量变得更多，因此花岗岩试样通过反复加卸载作用促使了大孔隙的发育，大量大孔隙的产生使其内部细观结构发生不可恢复的变化，导致孔隙度明显增加；而继续施加循环加卸载，花岗岩试样将会发生疲劳损伤破坏。从细观角度看，循环加卸载引起花岗岩试样细观结构发生变化是不可逆的过程。在宏观力学变形特征中，花岗岩试样的累计塑性应变逐渐增大，而每次循环中不可逆的体积变形是由于花岗岩试样内部不同尺度的孔隙结构无法完全闭合引起的。

3 结论

1) 围压与累计塑性应变及应变损伤参数的关系较为复杂,但在总体上,当围压从50 MPa增大到120 MPa时,花岗岩试样的累计塑性应变和应变损伤参数呈现增大的趋势。但表征细观结构的 T_2 谱分布和孔隙度变化与围压的关系不显著。当围压为50 MPa和80 MPa时,花岗岩试样表现出先压实后膨胀的变形特征,而当围压为100 MPa和120 MPa时,花岗岩试样仅表现出体积膨胀行为。

2) 随着循环次数增加,花岗岩试样的轴向累计塑性应变逐渐增大,而径向和体积累计塑性应变呈现阶段增长的趋势;且对比轴向累计塑性应变,径向和体积累计塑性应变的非线性变化规律显著,其中体积累计塑性应变对损伤更敏感。而塑性应变增量变化呈现出先急剧衰减,后趋于稳定的阶段现象。

3) 在围压一定的条件下,随着循环次数的增加,花岗岩试样的轴向应变损伤参数减小,体积应变损伤参数增大,而径向应变损伤参数先增大后减小。这表明针对轴向应变损伤参数,花岗岩试样的弹性变形增长速度比塑性变形更快;针对径向应变损伤参数,花岗岩试样在循环前期的塑性变形增长速度较快,而循环后期的塑性变形增长速度逐渐降低;针对体积应变损伤参数,花岗岩试样的塑性变形增长速度比弹性变形快。

4) 循环加卸载前后花岗岩试样的 T_2 谱分布曲线和孔隙度有显著差异。循环加卸载前花岗岩试样的 T_2 谱分布曲线呈现三峰结构,其细观结构表现出两种小孔隙尺度(T_2 值分别约为0.1~1 ms和1~10 ms)和一种大孔隙尺度(T_2 值约为10~1000 ms)的结构特征,且不同围压下花岗岩试样的初始损伤程度较一致;循环加卸载后花岗岩试样的 T_2 谱分布曲线呈现双峰结构,其细观结构主要表现出大孔隙数量增多、孔径增大以及整体孔隙度大幅升高的特征。

REFERENCES

- [1] ALBER M, FRITSCHEN R, BISCHOFF M, et al. Rock mechanical investigations of seismic events in a deep longwall coal mine[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2009, 46(2): 408–420.
- [2] XU Jian-kun, ZHOU Rui, SONG Da-zhao, et al. Deformation and damage dynamic characteristics of coal-rock materials in deep coal mines[J]. *International Journal of Damage Mechanics*, 2019, 28(1): 58–78.
- [3] HU Jian-hua, YANG Dong-jie. Meso-damage evolution and mechanical characteristics of low-porosity sedimentary rocks under uniaxial compression[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2020, 30(4): 1071–1077.
- [4] 姚 军, 黄朝琴, 刘文政, 等. 深层油气藏开发中的关键力学问题[J]. *中国科学: 物理学力学天文学*, 2018, 48(4): 1–27.
- [5] YAO Jun, HUANG Zhao-qin, LIU Wen-zheng, et al. Key mechanical problems in the development of deep oil and gas reservoirs[J]. *Scientia Sinica(Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2018, 48(4): 5–31.
- [6] JIA Chao-jun, XU Wei-ya, WANG Ru-bin, et al. Characterization of the deformation behavior of fine-grained sandstone by triaxial cyclic loading[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 162: 113–123.
- [7] WANG Zhe-chao, LI Shu-cai, QIAO Li-ping, et al. Fatigue behavior of granite subjected to cyclic loading under triaxial compression condition[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2013, 46(6): 1603–1615.
- [8] ZHOU Zi-long, WANG Hai-quan, CAI Xin, et al. Damage evolution and failure behavior of post-mainshock damaged rocks under aftershock effects[J]. *Energies*, 2019, 12(23): 4429.
- [9] 苏承东, 杨圣奇. 循环加卸载下岩样变形与强度特征试验[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2006, 34(6): 667–671.
- [10] SU Cheng-dong, YANG Sheng-qi. Experimental study on deformation and strength characteristics of rock specimens under cyclic loading and unloading[J]. *Journal of Hohai University (Science and Technology)*, 2006, 34(6): 667–671.
- [11] COSTIN L S, HOLCOMB D J. Time-dependent failure of rock under cyclic loading[J]. *Tectonophysics*, 1981, 79: 279–296.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.

- [12] XIAO Jian-qing, DING De-xin, JIANG Fu-liang, et al. Fatigue damage variable and evolution of rock subjected to cyclic loading[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2010, 47(3): 461–468.
- [13] XIAO Jian-qing, DING De-xin, XU Gen, et al. Inverted S-shaped model for nonlinear fatigue damage of rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2009, 46(3): 643–648.
- [14] 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.
- [15] 周家文, 杨兴国, 符文熹, 等. 脆性岩石单轴循环加卸载试验及断裂损伤力学特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(6): 1172–1183.
- ZHOU Jia-wen, YANG Xing-guo, FU Wen-xi, et al. Experimental test and fracture damage mechanical characteristics of brittle rock under uniaxial cyclic loading and unloading conditions[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(6): 1172–1183.
- [16] LIU En-long, HUANG Run-qiu, HE Si-ming. Effects of frequency on the dynamic properties of intact rock samples subjected to cyclic loading under confining pressure conditions[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2012, 45(1): 89–102.
- [17] 黄正均, 赵星光, 张磊. 不同围压下花岗岩三轴压缩疲劳特性试验[J]. *实验室研究与探索*, 2018, 37(8): 15–19.
- HUANG Zheng-jun, ZHAO Xing-guang, ZHANG Lei. Experiment on the fatigue characteristics of granite under different confining pressures[J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2018, 37(8): 15–19.
- [18] 卢辉, 景政, 孙雪, 等. 北山花岗岩三轴循环加卸载声发射特性研究[J]. *江苏建筑*, 2020, 28(6): 102–106.
- LU Hui, JING Zheng, SUN Xue, et al. Acoustic emission characteristics of Beishan granite under triaxial cyclic loading and unloading[J]. *Jiangsu Construction*, 2020, 28(6): 102–106.
- [19] 赵星光, 李鹏飞, 马利科, 等. 循环加、卸载条件下北山深部花岗岩损伤与扩容特性[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(9): 1740–1748.
- ZHAO Xing-guang, LI Peng-fei, MA Li-ke, et al. Damage and dilation characteristics of deep granite at Beishan under cyclic loading-unloading conditions[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(9): 1740–1748.
- [20] 胡广, 赵其华, 何云松, 等. 循环荷载作用下斜长花岗岩弹性模量演化规律[J]. *工程地质学报*, 2016, 24(5): 881–890.
- HU Guang, ZHAO Qi-hua, HE Yun-song, et al. Elastic modulus's evolution law of plagiogranite under cyclic loading[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2016, 24(5): 881–890.
- [21] 赵军, 郭广涛, 徐鼎平, 等. 三轴及循环加卸载应力路径下深埋硬岩变形破坏特征试验研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(5): 1521–1530.
- ZHAO Jun, GUO Guang-tao, XU Ding-ping, et al. Experimental study of deformation and failure characteristics of deeply-buried hard rock under triaxial and cyclic loading and unloading stress paths[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(5): 1521–1530.
- [22] GATELIER N. Mechanical damage of an anisotropic porous rock in cyclic triaxial tests[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2002, 39(3): 335–354.
- [23] LI Xin-ping, WANG Bin. Research on distribution rule of geostress in deep rock in Chinese mainland[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 243: 2116–2122.
- [24] 卢高明, 李元辉, 张希巍, 等. 脆性岩石循环加卸载试验及应变损伤参数分析[J]. *金属矿山*, 2015(5): 28–33.
- LU Gao-ming, LI Yuan-hui, ZHANG Xi-wei, et al. Experimental test and strain damage parameters analysis of brittle rock under cyclic loading-unloading[J]. *Metal Mine*, 2015(5): 28–33.
- [25] 徐鹏, 周剑波, 黄俊, 等. 循环加卸载下大理岩损伤与能量演化特征[J]. *长江科学院院报*, 2020, 37(3): 90–95, 107.
- XU Peng, ZHOU Jian-bo, HUANG Jun, et al. Damage evolution and strain energy characteristic of marble under triaxial cyclic compression[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2020, 37(3): 90–95, 107.
- [26] 李存宝, 谢和平, 谢凌志. 页岩起裂应力和裂纹损伤应力的试验及理论[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(4): 969–976.
- LI Cun-bao, XIE He-ping, XIE Ling-zhi. Experimental and theoretical study on the shale crack initiation stress and crack damage stress[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(4): 969–976.
- [27] 刘海涛, 秦涛. 砂岩循环加卸载下损伤特性及声发射 Kaiser 效应研究[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(6): 73–80.
- LIU Hai-tao, QIN Tao. Study on damage characteristics and acoustic emission Kaiser effect of sandstone under cyclic loading and unloading conditions[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(6): 73–80.
- [28] MOMENI A, KARAKUS M, KHANLARI G R, et al. Effects of cyclic loading on the mechanical properties of a granite[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2015, 77: 89–96.
- [29] LAVROV A. The Kaiser effect in rocks: principles and stress estimation techniques[J]. *International Journal of Rock*

- Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(2): 151–171.
- [30] 蒋宇, 葛修润, 任建喜. 岩石疲劳破坏过程中的变形规律及声发射特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(11): 1810–1814.
- JIANG Yu, GE Xiu-run, REN Jian-xi. Deformation rules and acoustic emission characteristics of rocks in process of fatigue failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(11): 1810–1814.
- [31] 毛思羽, 曹平, 李建雄, 等. 基于核磁共振 T_2 谱图的裂隙砂岩疲劳损伤分析[J]. 黄金科学技术, 2020, 28(3): 430–441.
- MAO Si-yu, CAO Ping, LI Jian-xiong, et al. Fatigue damage analysis of fractured sandstone based on nuclear magnetic resonance T_2 spectrum[J]. Gold Science and Technology, 2020, 28(3): 430–441.
- [32] 周科平, 胡振襄, 李杰林, 等. 基于核磁共振技术的大理岩卸荷损伤演化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S2): 3523–3530.
- ZHOU Ke-ping, HU Zhen-xiang, LI Jie-lin, et al. Study of marble damage evolution laws under unloading conditions based on nuclear magnetic resonance technique[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S2): 3523–3530.

Analysis of damage deformation and mesoscopic structure of granite under deep cyclic loading

HU Jian-hua, ZENG Ping-ping, YANG Dong-jie, XU Xiao

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Through triaxial constant amplitude cyclic loading tests of granite under different confining pressures and nuclear magnetic resonance technology, the damage deformation and meso-structural characteristics of rock specimens were analyzed. The results show that: 1) When the confining pressure increases from 50 MPa to 120 MPa, the cumulative plastic strain and strain damage parameters of specimens increase as a whole; 2) With the increase of the number of cycles, the axial cumulative plastic strain of specimens increases gradually, while the radial and volumetric cumulative plastic strains increase in stages. The increment of plastic strain decreases sharply first and then tends to be stable; 3) Under a certain confining pressure, the axial strain damage parameters of specimens decrease, the volume strain damage parameters increase, and the radial strain damage parameters first increase and then decrease with the increase of the number of cycles; 4) After cyclic loading and unloading, the T_2 spectrum distribution curves of specimens change from three-peak structure to two-peak structure, and the meso-structure mainly shows the characteristics of increasing the number of large pores, pore size and overall porosity.

Key words: granite; cyclic loading; confining pressure; number of cycles; plastic strain; damage parameter

Foundation item: Project(41672298) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (2017YFC0602901) supported by the National Key Research and Development Program of China; Project (2021ZZTS0872) supported by the Postgraduate Independent Exploration and Innovation Project Fund of Central South University, China

Received date: 2021-03-10; **Accepted date:** 2021-09-28

Corresponding author: YANG Dong-jie; Tel: +86-18684911183; E-mail: yangdjxx@csu.edu.cn

(编辑 何学锋)