

Experimental Research on the Mechanical Properties and Energy Evolution of Rock under Dry-Wet Cycle

Jin Hu, Yixin Niu, Zhizhen Zhang*

State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu
Email: zzzcumt@qq.com

Received: Feb. 20th, 2020; accepted: Mar. 17th, 2020; published: Mar. 24th, 2020

Abstract

Underground water reservoir, hydroelectric power generation, basic engineering, sponge city construction, etc. will encounter the dry and wet cycling environment of rock. However, the process of dry wet cycle can degrade the rock. Therefore, it is of great scientific and engineering significance to study the law of energy evolution and its correlation mechanism of rock under the dry wet cycle for the deep understanding of rock deformation and fracture phenomenon under the dry wet cycle and the scientific decision-making of rock engineering construction and protection. In this paper, granite is selected as the research object. After 0 (without dry and wet cycle treatment), 1, 3, 6 and 10 times of dry and wet cycle, the uniaxial compression and energy evolution tests of rock samples after treatment are carried out, and the mechanical properties of granite after wet dry cycle are summarized combining with the characteristic parameters of acoustic emission.

Keywords

Dry-Wet Cycle, Granite, Energy Evolution, Mechanical Property

干湿循环下岩石力学特性与能量演化规律的实验研究

胡 瑾, 牛一新, 张志镇*

中国矿业大学力学与土木工程学院, 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州
Email: zzzcumt@qq.com

收稿日期: 2020年2月20日; 录用日期: 2020年3月17日; 发布日期: 2020年3月24日

*通讯作者。

摘要

矿井地下水库、水力发电、基础工程、海绵城市建设等均会遭遇到岩石干湿循环环境，而干湿循环过程对岩石有劣化作用，因此研究干湿循环后岩石的能量演化规律及其关联机制，对于干湿循环下岩石变形破裂现象的深度理解、岩石工程施工与防护的科学决策等具有重要的科学和工程意义。本文选取花岗岩为主要研究对象，对试样分别经过0（未干湿循环处理）、1、3、6、10次干湿循环处理后，开展处理后岩样的单轴压缩和能量演化试验，并结合声发射特征参数研究了干湿循环后花岗岩的相关力学特性。

关键词

干湿循环，花岗岩，能量演化，力学特性

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来，不管是自然条件下水环境的改变还是大型水利工程的兴建，随着时间的推移，水对工程岩体影响逐渐显露。广泛地讲，水对于工程岩体具有劣化作用，而这种作用如果任其发展下去，往往会引起十分严重的工程灾害，造成不可预计的环境问题，威胁国民经济的发展，损害人民的生命和财产。

在水对于岩石的劣化影响当中，水的干湿交替作用是其中影响十分大的一种。地下水位的日变化或季节变化，地下工程水的湿度变化，库岸，边坡水位的人为或自然升降都会出现岩石的干湿交替情况。

水岩作用的相关课题的研究最早是由太沙基开启的，他不仅提出了有效应力原理而且在对水环境作用后的云母劈裂试验中，发现云母的裂隙有明显的增长。20世纪50年代，在水文地球化学学科作出突出贡献的前苏联A. M. Овчинников提出了水-岩相互作用(Water-Rock Interaction, 简称WRI)这一术语[1][2]。水的物理、化学、力学作用对岩石的劣化通常并非单一出现，而是相互影响，相互促进的过程。刘新荣，傅晏等人对这三种作用分别进行了深入讨论，他们认为物理作用对岩石的劣化效应分为可逆与不可逆两种，如岩石到风干失水到饱和过程中强度的变化是可逆的，易于崩解性的岩石如页岩泥岩等遇水崩解是不可逆的；化学作用对岩石的劣化效应一般不可逆，化学作用将会改变岩石内部物质组成部分，从性质上改变岩石的力学性能；力学作用主要表现为岩土体中由水产生的静孔隙水压，和超静孔隙水压两方面[3]。王伟，刘桃根等对砂岩进行不同化学溶液作用下的腐蚀试验，获得红砂岩化学腐蚀过程中相对质量变化规律，发现离子成分及pH值均对红砂岩力学特性产生较大影响，各种化学溶液腐蚀后岩石的峰值强度、残余强度、弹性模量均有不同程度的下降[4]；傅晏，刘新荣等对干湿循环处理后的微风化砂岩进行了单轴压缩和劈裂试验，发现单轴抗压强度，抗拉强度和弹性模量的下降值与干湿循环次数有很好的对数关系[5]；邓华锋，胡安龙等建立了砂岩在干湿循环作用后的分段损伤统计模型[6]；王伟，龚传根等人研究了干湿循环处理对大理岩的弱化影响，分析了不同循环次数处理后大理岩的变形破坏特征

[7]; 曾志雄, 孔令伟等针对延吉膨胀岩, 开展干湿循环作用下膨胀岩浸水崩解试验, 研究了其粒径变化规律, 发现前三次干湿循环对膨胀岩的粒组影响较大[8]; 李亚, 余宏明等人选取巴东十字垭隧道的石膏岩为研究对象, 室内完成了 0, 1, 3, 6, 12 次干湿循环试验, 测得了循环过程中吸水率、孔隙度和单轴压缩的试验数据, 分析发现干湿循环作用对石膏岩各个参数的劣化效果是不同的, 其排序为: 吸水率 > 弹性模量 > 单轴抗压强度 > 孔隙度[9]。梁冰, 谭晓引等以阜新海州露天矿泥质岩为研究对象, 探讨了干-湿循环和冻-融循环作用对泥质岩崩解特性的影响[10]。

国外对于干湿循环过程中的岩石的劣化机理研究也有很多。C. W. Badge 总结了干燥页岩遇水崩解的两大机理: 气致崩解和胶体物质消散[11]。气致崩解力学解释为: 岩石失水干燥后使其吸湿压力提高, 大量裂隙、孔隙中充满空气, 当干燥岩石再次浸水后, 由于吸湿压力的作用, 水很快沿裂隙通道渗入, 岩石内空气被挤压, 外部渗入量增加导致内部空气压力上升, 以致矿物骨架沿最弱面发生破裂而逐渐崩解。A. Prick [12]通过试验比较了冻融循环和干湿循环对页岩风化的影响, 指出尽管冻融循环的影响较大, 但干湿循环对岩石的风化作用同样不容忽视; O. Ojo 和 N. Brook [13]总结了前人关于含水对岩石强度影响的研究成果, 认为湿度越大, 岩石抗压和抗拉强度越小。L. Obert 等(砂岩) [14]、宣以琼等(煤系砂、泥岩) [15]的研究均表明部分岩石在驱除水分后恢复原来的强度, 因此, 这是一个可逆过程, 不可逆的现象只有在化学过程(特别是溶解)的影响下才会发生。

近年来, 许多研究者对干湿循环条件对岩石材料动态力学性质的影响进行了研究。对干湿循环后岩石的劣化程度在物理性质方面进行了评估, 包括容重、重量损失、吸水率(含水量)有效孔隙度, 纵波波速 [16]。这些研究结果表明, 随着干湿循环次数的增加, 岩石的体积密度和纵波波速降低, 其吸水率和有效孔隙度增大。Gökceoğlu 等人也研究了 17 种含有黏土的岩石在干湿循环作用下其耐久性指标(SDI)的影响因素, 重点强调了干湿循环次数对 SDI 的影响作用[17]。

本文选取常见的花岗岩为主要研究对象, 对试样分别经过 0 (未干湿循环处理)、1、3、6、10 次干湿循环处理后, 开展处理后岩样的单轴压缩和能量演化试验, 并结合声发射特征参数总结出了干湿循环后花岗岩的相关力学特性。

2. 干湿循环试验

2.1. 岩样制备

所有岩样均从一整块均匀的高大花岗岩中提取。按照国际岩石力学学会建议规范, 将岩样制作成直径为 50 mm, 高为 100 mm 的标准岩样, 并且将端面打磨, 使其粗糙度小于 0.02 mm, 端面垂直度小于 0.001 弧度。给岩样编号如图 1, 并测量出岩样的初始尺寸如表 1。

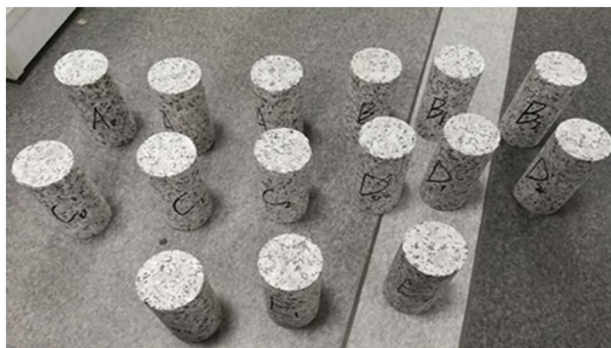


Figure 1. Granite samples without dry and wet cycle
图 1. 未经干湿循环处理的花岗岩岩样

Table 1. Initial size of granite sample**表 1.** 花岗岩岩样初始尺寸

编号	A ₀	A ₁	A ₂	B ₀	B ₁	B ₂	C ₀	C ₁
直径(mm)	49.43	49.60	49.53	49.42	49.58	49.61	49.42	49.63
高度(mm)	100.10	100.08	100.24	100.40	100.90	100.02	100.82	100.08
编号	C ₂	D ₀	D ₁	D ₂	E ₀	E ₁	E ₂	
直径(mm)	49.48	49.54	49.62	49.62	49.52	49.46	49.56	
高度(mm)	100.12	100.82	100.28	100.30	100.32	99.92	100.24	

2.2. 干湿循环处理

本次试验对花岗岩岩样采取饱和浸水 24 小时, 然后放入烘干机内鼓风烘干 12 小时的处理方法为一次干湿循环(图 2), 并且在干燥状态下进行波速、质量等物理性质的测量, 最后的单轴和单轴循环压缩试验也均在干燥状态下进行。表 2 是不同次数干湿循环处理后花岗岩岩样的质量变化。

**Figure 2.** Natural soaking and blast drying of granite**图 2.** 花岗岩的自然浸水与鼓风烘干**Table 2.** Quality measurement results of granite samples after different dry and wet cycles**表 2.** 不同干湿循环处理次数后花岗岩岩样质量测量结果(单位: g)

岩样编号	干湿循环处理次数				
	0	1	3	6	10
A ₀	511.23	-	-	-	-
A ₁	513.70	-	-	-	-
A ₂	513.84	-	-	-	-
B ₀	512.43	512.76	-	-	-
B ₁	517.31	517.68	-	-	-
B ₂	514.89	515.26	-	-	-
C ₀	512.58	512.93	512.80	-	-
C ₁	515.01	515.32	515.18	-	-
C ₂	513.01	513.34	513.18	-	-
D ₀	517.17	517.48	517.32	517.36	-
D ₁	517.76	518.09	517.94	517.95	-
D ₂	516.03	516.36	516.27	516.21	
E ₀	515.08	515.40	515.28	515.30	515.56
E ₁	509.60	509.92	509.81	509.79	510.06
E ₂	512.51	512.80	512.68	512.66	512.93

2.3. 纵波波速的测量

纵波、横波和表面波是岩石内部声波传递的三种形式，其中纵波传播速度最快，又被称为初至波，最好检测，受干扰小，附带信息相对准确，具有重要的测量价值。因此，现阶段对岩石内部波速的测量主要是测量其纵波波速。

本次试验在岩石干湿循环处理前后采用 NM-4 非金属超声检测分析仪测量花岗岩的纵波波速(图 3)，试验结果见表 3。



Figure 3. NM-4 nonmetal ultrasonic testing analyzer
图 3. NM-4 非金属超声检测分析仪

Table 3. Measurement results of wave velocity of granite after different dry and wet cycles
表 3. 不同干湿循环处理次数后花岗岩波速测量结果(单位: km/s)

岩样编号	干湿循环处理次数				
	0	1	3	6	10
A ₀	4.717	-	-	-	-
A ₁	4.717	-	-	-	-
A ₂	4.808	-	-	-	-
B ₀	5.000	4.545	-	-	-
B ₁	5.208	4.902	-	-	-
B ₂	4.808	4.717	-	-	-
C ₀	5.000	5.000	4.902	-	-
C ₁	4.808	4.545	5.102	-	-
C ₂	5.000	4.717	4.902	-	-
D ₀	4.902	4.717	4.902	4.808	-
D ₁	5.000	4.902	4.808	5.000	-
D ₂	4.808	4.464	4.545	4.808	-
E ₀	4.717	4.603	4.808	4.717	5.000
E ₁	4.808	4.603	4.717	4.808	4.808
E ₂	5.000	4.717	4.902	4.808	4.717

3. 干湿循环后花岗岩能量演化规律

单轴压缩和单轴循环试验均采用 MTS-816 电液伺服材料试验系统对花岗岩岩样进行试验。由于试验时要同步检测声发射信号，所以要用凡士林作为耦合剂，将声发射探头紧贴在岩样表面，并用用胶带固定。声发射仪采用 AE21C 声发射检测仪进行声发射检测。

3.1. 单轴压缩试验

通过对岩样 A₀、B₀、C₀、D₁ 和 E₀ 进行常规单轴压缩试验, 了解了花岗岩岩样经过干湿循环后的力学特性(岩样 D₀ 在试验过程中在非常低的应力水平下就发生破坏, 说明其原生裂隙十分发育, 不具备一般性, 因此用岩样 D₁ 代替)。

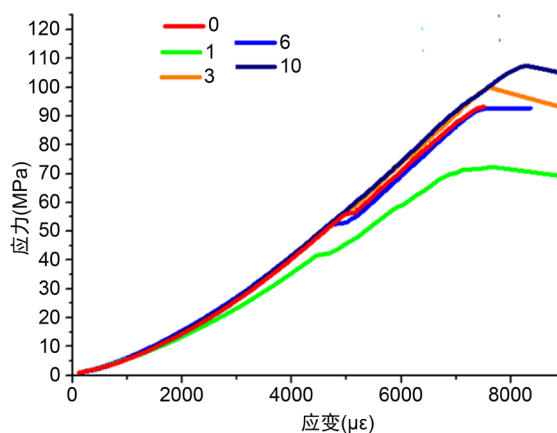


Figure 4. The stress-strain curve of granite sample under conventional uniaxial compression test after different times of drying and wetting cycles

图 4. 不同次数干湿循环处理后花岗岩岩样常规单轴压缩试验应力应变曲线

由图 4 可知干湿循环处理并没有使花岗岩岩样产生明显的规律性的强度变化, 相反岩样的离散性掩盖了干湿循环处理对其内部的影响, 因此对花岗岩这一种质地紧密的岩样, 常规单轴压缩试验并不适用。

3.2. 单轴循环加卸载试验

通过 3.1 常规单轴压缩试验, 已大致确定花岗岩岩样的极限强度大概在 90 MPa 左右, 换算成轴向应力值大概 180 KN。为了每一种干湿循环下得到足够多的应力应变滞回环, 设置每个加卸载循环步长为 15 KN, 即从轴向应力变化方式为 0 KN → 15 KN → 0 KN → 30 KN → 0 KN → …直至花岗岩岩样破坏。由此可得到 5 组应力应变曲线, 通过数据分析与整合, 我们最终绘制出了单轴循环加载条件下岩样弹性模量和极限强度随干湿循环次数的变化(其中试验岩样编号分别为 A₁、B₁、C₁、D₂ 和 E₁), 如下图 5 所示。

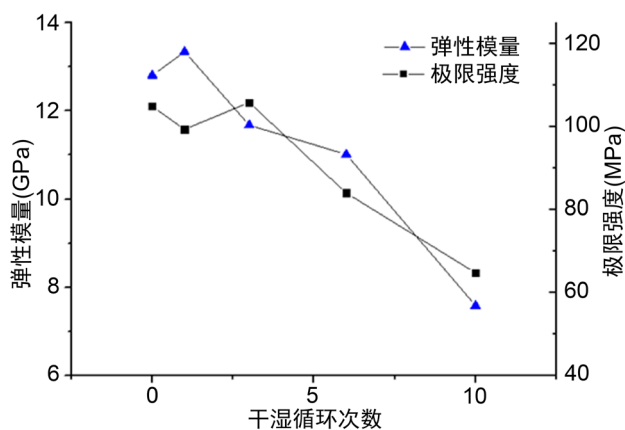


Figure 5. The change of elastic modulus and ultimate strength of rock sample with the number of dry and wet cycles under uniaxial cyclic loading

图 5. 单轴循环加载条件下岩样弹性模量和极限强度随干湿循环次数的变化

由此可知，在单轴循环加载条件下，花岗岩岩样的弹性模量和极限强度均随干湿循环次数的增加逐渐减小。可以看到，10次循环后弹性模量和极限强度有十分明显的下降，其下降幅度超常规发展，弹性模量下降超过50%，极限强度下降超过60%，可以认为这块岩样本身的缺陷比较大，正向作用于干湿循环处理产生的影响。

3.3. 能量演化规律

岩样变形破坏过程中涉及的能量种类有很多，包括弹性能、塑性能、损伤能、声能、热能等，但无法做到每一种都进行实时监测。因此，本次试验将岩石变形破坏过程中的能量分为弹性能和耗散能，耗散能即为除却弹性能其余能量的总和。由能量守恒定律，有如下关系[18]

$$W = E_e + E_d \tag{1}$$

式中， W 为外界的能量输入，即外力对岩石所做的功； E_e 为岩石内积聚的弹性能； E_d 为加载过程中岩石所耗散的能量，主要用于内部损伤和塑性变形。

依据弹性能是可逆的这一观点，可利用岩石的加卸载应力 - 应变曲线对弹性能和耗散能进行计算。我们广泛认为卸载后所释放的能量为卸载时应力水平下所积聚的弹性能[18] [19] [20]。而试验机输入的总能量密度可以用加载应力 - 应变曲线积分得到，弹性能密度则由卸载应力 - 应变曲线积分取绝对值得到，两者之差即为耗散能能量密度。如图 6 所示，对于方向 i 岩石的加卸载应力 - 应变曲线，当加载至应力水平 σ' 时，该方向积聚的弹性应变能密度为 u_{ie} ，由卸载曲线与应变轴之间的面积确定；而耗散能密度 u_{id} 可由该应力水平处加卸载曲线之间的面积确定，即[20]

$$u_{id} = \int_0^{\epsilon'} \sigma_i d\epsilon_i - \int_{\epsilon''}^{\epsilon'} \sigma_i d\epsilon_i \tag{2}$$

$$u_{ie} = \int_{\epsilon''}^{\epsilon'} \sigma_i d\epsilon_i \tag{3}$$

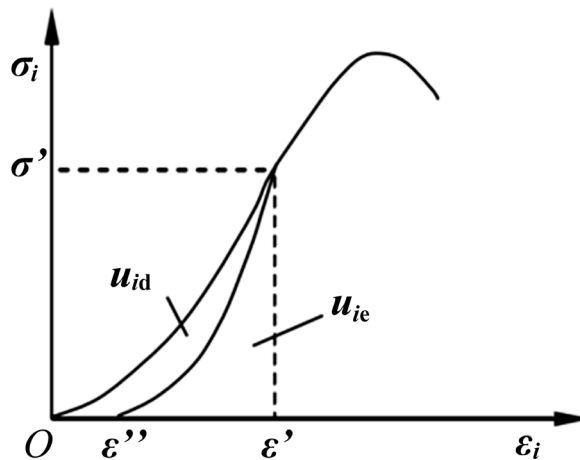


Figure 6. i -direction deviator stress deviator strain curve
图 6. i 方向偏应力偏应变曲线

利用上述的能量计算方法，计算出不同次数干湿循环处理后各个应力水平下岩样的弹性能密度和耗散能密度，得到两者分别与应力水平变化的关系。

由图 7 中可以看出经过不同次数干湿循环处理后花岗岩岩样的弹性能密度曲线几乎重合, 且呈现非线性增长。试验开始时弹性能密度较小, 初始裂隙压密闭合, 随后随应力水平的提高而慢慢增大, 且应力达到峰值阶段时弹性能密度最大, 弹性能密度最大约为 $0.25 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

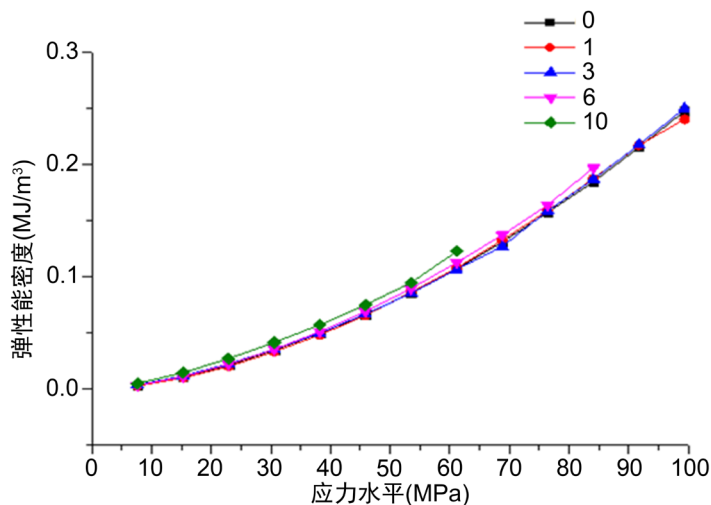


Figure 7. Change of elastic energy density with stress level
图 7. 弹性能密度随应力水平的变化

由图 8 可以看出耗散能的变化十分剧烈。压密阶段岩样内部裂隙压密闭合, 耗散能的大小与岩样初始裂隙的发育程度密切相关, 可以明显看到进行 10 次干湿循环的岩样初始裂隙较为发育, 相对应的其强度极限较低; 在应力水平达到 50 MPa 时, 耗散能的大小产生剧烈波动, 说明岩样内部裂隙发生扩展时耗散能增加, 当裂纹停止扩展时耗散能又下降, 随着应力水平的增大, 微观裂纹发生不稳定扩展, 连通、摩擦滑移, 吸收大量能量, 耗散能急剧增大。

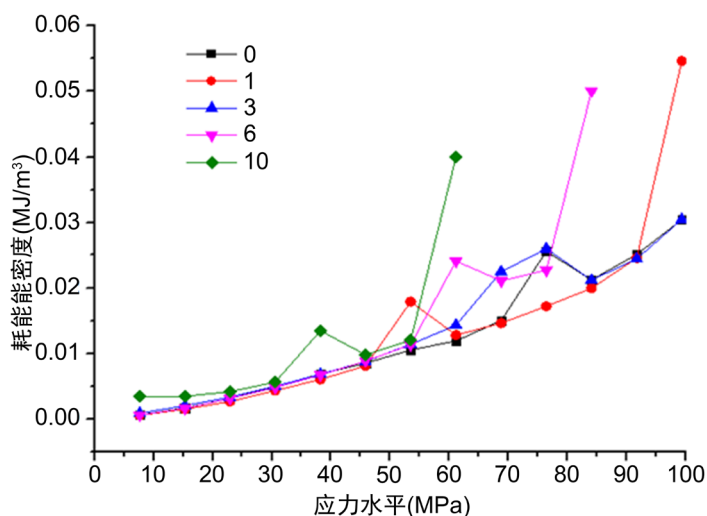


Figure 8. Change of dissipative energy density with stress level
图 8. 耗散能密度随应力水平的变化

从图 9 和图 10 可以看到弹性能密度和耗散能密度在不同的应力水平下均随干湿循环次数的增加而增大, 但是弹性能增长较为平稳, 而耗散能增长幅度较大, 且随着应力水平的提高耗散能增长率也变大。

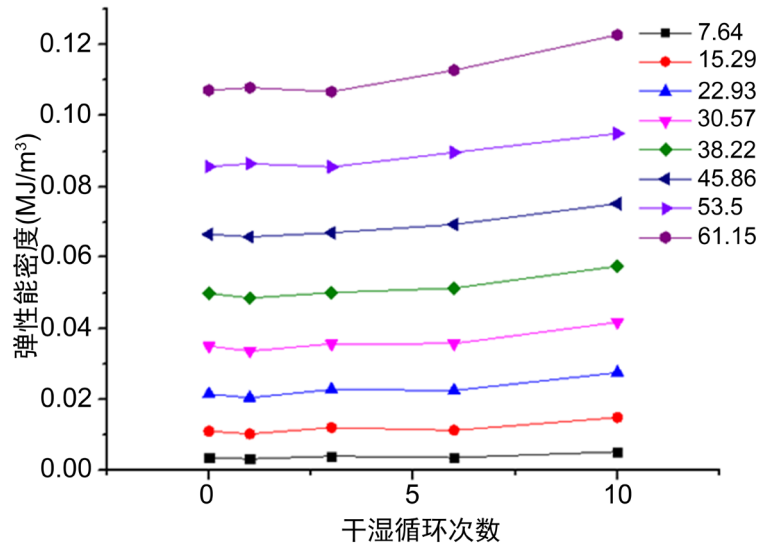


Figure 9. The change of elastic energy density with the number of dry and wet cycles under different stress levels
图 9. 弹性能密度在不同应力水平下随干湿循环次数的变化

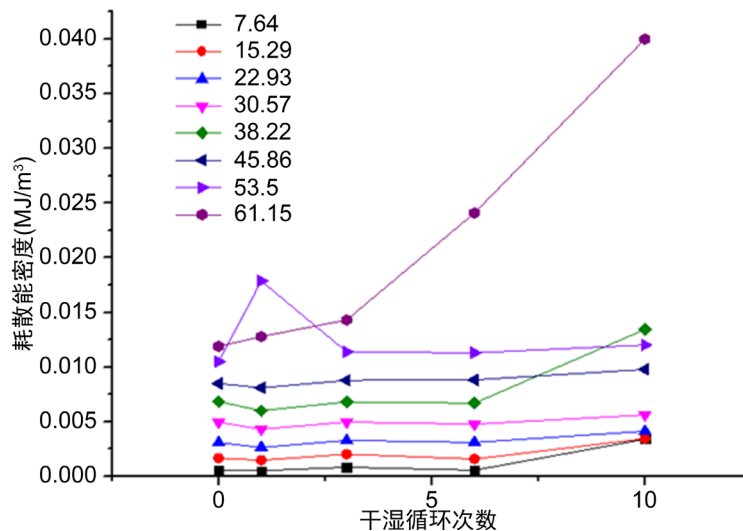


Figure 10. The change of dissipative energy density with the number of dry and wet cycles under different stress levels
图 10. 耗散能密度在不同应力水平下随干湿循环次数的变化

弹性能的增长从理论上来看是由于随着干湿循环次数的增加，花岗岩岩样弹性模量在前文已经提到会明显降低，同一应力水平下应变较大。弹性能的计算公式为[21]

$$U = \frac{\sigma\varepsilon}{2} = \frac{\sigma^2}{2E} \quad (4)$$

显然，岩样的弹性能会增大，同试验结果相符合。耗散能的增长则表明干湿循环处理加剧了岩石内部损伤，干湿循环次数越多，损伤越大，在单轴循环加载中裂隙发育扩展情况越频繁，吸收能量越多。

图 11~15 是 5 种干湿循环条件处理后弹性能密度、耗散能密度和总的输入能量的演化情况。从图中可以看到输入能量的变化形态与耗散能的变化形态基本一致，结合图 7 可知弹性能的变化基本不受干湿循环处理的影响。

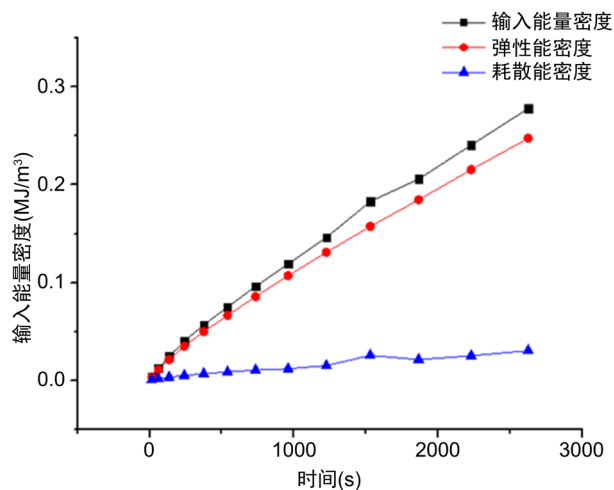


Figure 11. Internal energy evolution of rock samples after 0 dry wet cycles
图 11. 0 次干湿循环后岩样内部能量演化情况

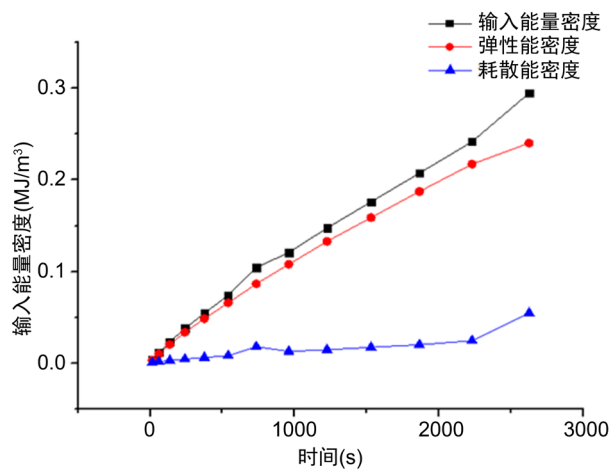


Figure 12. Internal energy evolution of rock samples after 1 dry wet cycles
图 12. 1 次干湿循环后岩样内部能量演化情况

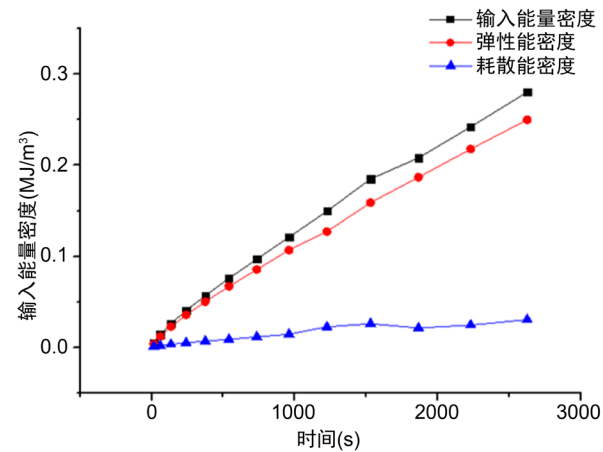


Figure 13. Internal energy evolution of rock samples after 3 dry wet cycles
图 13. 3 次干湿循环后岩样内部能量演化情况

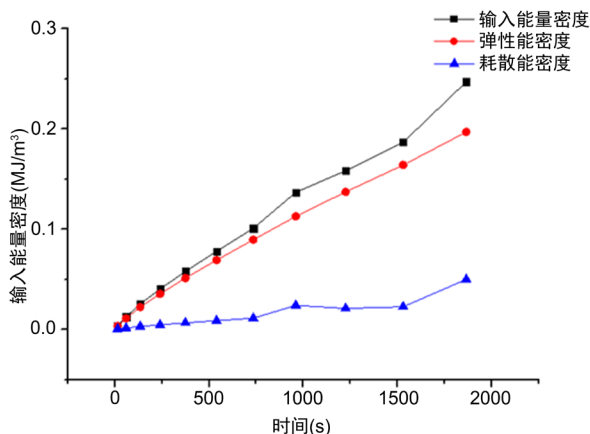


Figure 14. Internal energy evolution of rock samples after 6 dry wet cycles
图 14. 6次干湿循环后岩样内部能量演化情况

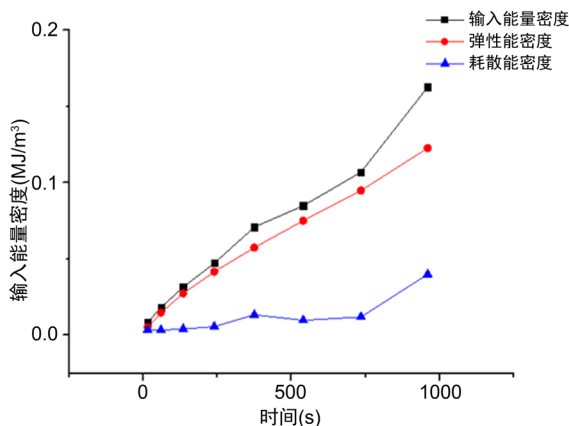


Figure 15. Internal energy evolution of rock samples after 10 dry wet cycles
图 15. 10次干湿循环后岩样内部能量演化情况

4. 干湿循环后花岗岩的声发射特征

4.1. 声发射信号特征参数

岩石在受力后内部会积累能量，当能量达到峰值后将会释放，岩石内部将产生变形甚至裂隙，有一部分能量通过破坏等方式释放，有一部分能量通过声能而释放，声发射就是利用了岩石在受力后释放的声能，从而对岩石破坏过程，能量释放等进行描述。

本次试验结果的分析 and 处理主要依据振铃计数这个特征参数，试验的门槛值为 40 dB。振铃计数可采用总计数和计数率表征，每当声发射信号幅值超过设定的阈值电压时，将产生一个矩形脉冲，此脉冲即为振铃计数的触发信号。将超过阈值的电信号的每一个震荡波视为一个振铃计数。增益即是信号放大器的放大倍数，也用 dB 作为单位，本次声发射试验的增益也是 40 dB。

4.2. 声发射特征分析

声发射数据在单轴压缩和单轴循环加卸载压缩试验进行时同步接受，即压缩试验机开始施加压力时，声发射试验同步开始，以便得到同一时间的轴力，位移和声发射数据，进而得到应力、应变和声发射参数随时间变化的试验数据。

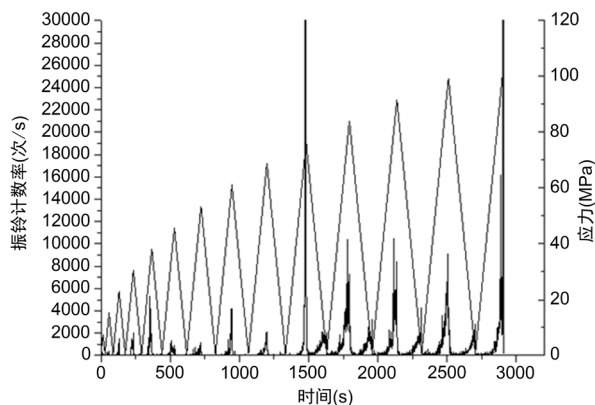


Figure 16. The change of stress and ring count rate with time
图 16. 应力和振铃计数率随时间的变化

由图 16 可以看到, 声发射振铃计数率突增与应力峰值同时发生, 可以认为声发射振铃计数率突增时刻即对应试验压缩机由加载向卸载转变的时刻。在结合声发射振铃计数率与耗散能密度(MJ/m^3)得到图 17~21, 进一步分析干湿循环影响下花岗岩岩样内部能量演化的规律。

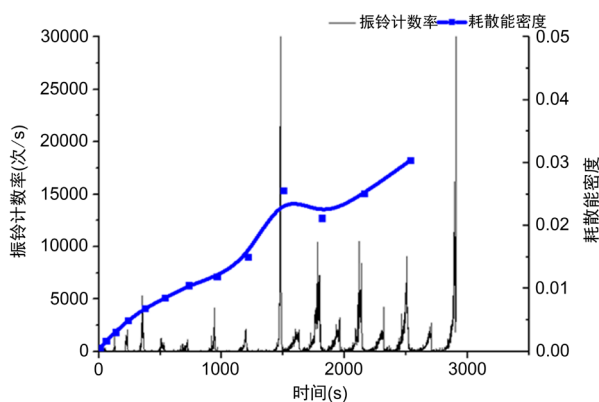


Figure 17. Change of acoustic emission ringing rate and dissipative energy density of rock samples with time after 0 dry wet cycles
图 17. 0 次干湿循环后声发射振铃计数率和岩样的耗散能密度随时间变化情况

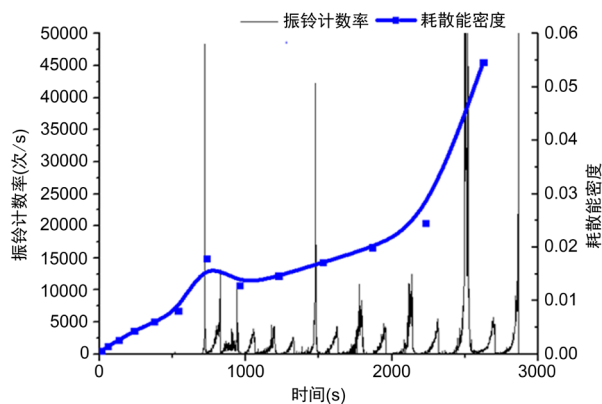


Figure 18. Change of acoustic emission ringing rate and dissipative energy density of rock samples with time after 1 dry wet cycles
图 18. 1 次干湿循环后声发射振铃计数率和岩样的耗散能密度随时间变化情况

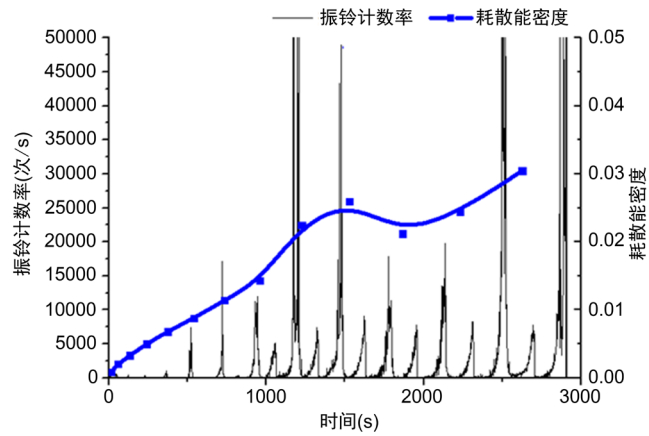


Figure 19. Change of acoustic emission ringing rate and dissipative energy density of rock samples with time after 3 dry wet cycles

图 19. 3 次干湿循环后声发射振铃计数率和岩样的耗散能密度随时间变化情况

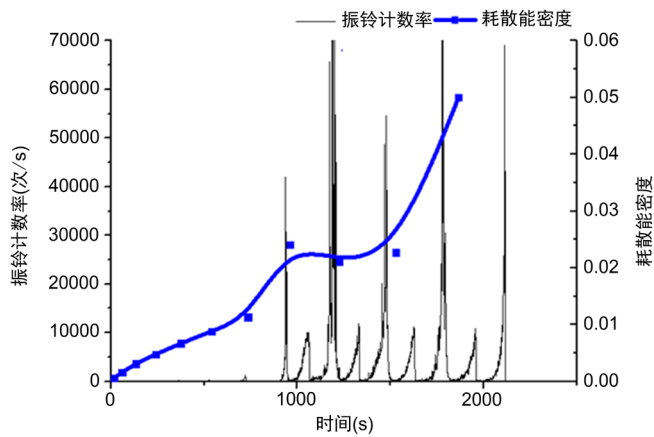


Figure 20. Change of acoustic emission ringing rate and dissipative energy density of rock samples with time after 6 dry wet cycles

图 20. 6 次干湿循环后声发射振铃计数率和岩样的耗散能密度随时间变化情况

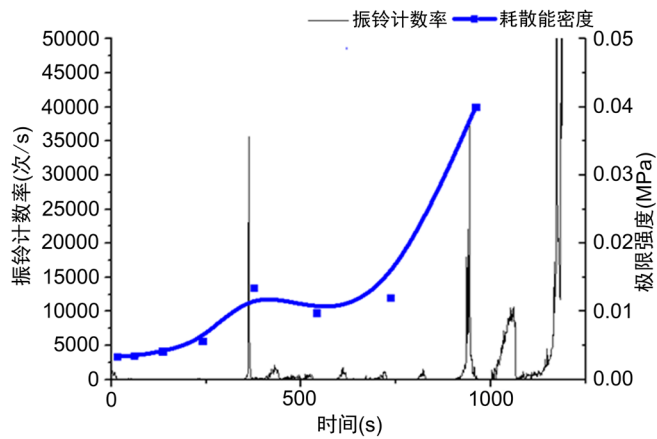


Figure 21. Change of acoustic emission ringing rate and dissipative energy density of rock samples with time after 10 dry wet cycles

图 21. 10 次干湿循环后声发射振铃计数率和岩样的耗散能密度随时间变化情况

总体上来看, 试验开始时, 基本上没有声发射事件的出现, 耗散能缓慢增长, 在出现第一次明显声发射峰值时, 耗散能增长率增大, 出现一个耗散能极大值, 随后耗散能会出现一段小幅下降, 但是仍伴有相对较少的声发射事件的出现, 这说明岩样在这次加卸载循环中内部第一次出现较大尺寸的裂隙扩展, 甚至产生裂隙贯通, 但是这种损伤并没有失去控制, 相反裂隙的开裂到止裂过程消耗大量能量, 止裂结束后耗散能会下降, 岩石内部能量之间的演化重新回归到相对平稳演化状态, 直至出现下一次大规模损伤。

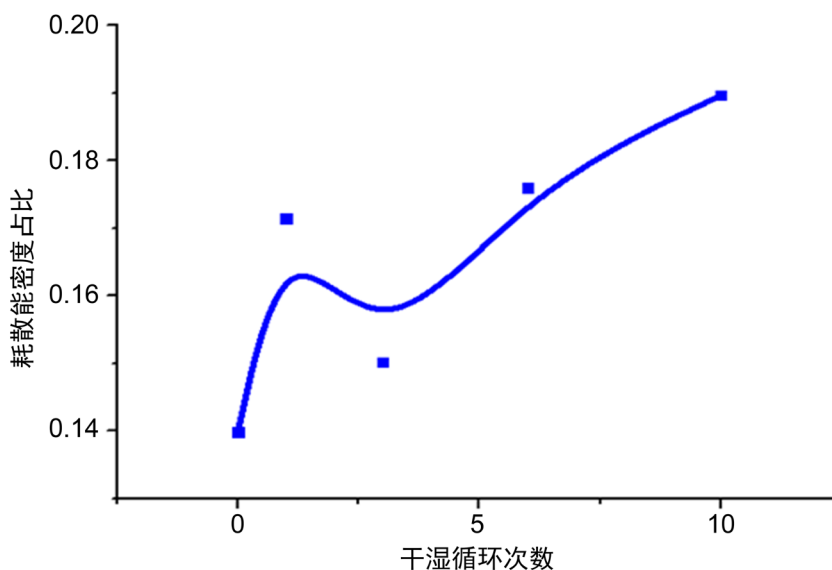


Figure 22. Proportion of dissipated energy density at the first large peak of acoustic emission event event
图 22. 声发射事件首次出现较大峰值时耗散能密度占比

具体来看, 在未经干湿循环处理即 0 次干湿循环处理后的岩样图 17 中, 在 1500 s 左右时出现一个较大的声发射事件峰值, 此时耗散能密度为 0.0256, 应力水平为 76.43; 而经过 1 次干湿循环处理后由图 18 可以看到较大声发射事件峰值出现的时间提前, 在 750s 左右, 也即在较小的应力状态下出现较大损伤, 此时耗散能密度是 0.01789, 应力水平为 53.50; 经过 3 和 6 次干湿循环处理后如图 19、图 20, 都是在 1200 s 左右出现大量声发射事件, 耗散能水平都在 0.02 以上, 应力水平在 60~70 之间; 而 10 次干湿循环处理后的岩样如图 21, 第一次出现较大损伤在 400s 左右就已经发生, 应力水平在 38.22, 耗散能密度仅有 0.01346, 说明 10 次干湿循环处理后的岩样内部初始裂隙更发育, 损伤更大。结合此时的耗散能密度占输入能量密度的比例得到图 22, 和未经干湿循环处理的岩样相比, 10 次干湿循环处理后, 第一次出现较大损伤时耗散能密度占比提高了 35.61%。

5. 结论

从能量的角度来研究岩石的力学状态具有非常多的优越性, 岩石的变形和破坏形态均与岩石内部各种类的能量密度有关, 所以, 从能量的角度出发可以更好的描述岩石的力学状态和破坏形态。

1) 干湿循环条件对花岗岩有劣化作用: 干湿循环后岩样质量和纵波波速变化不明显, 但随着干湿循环次数的增加, 花岗岩试样的强度极限和弹性模量将会降低。相同应力条件下, 应变增大, 弹性能增大, 而耗散能增大更为剧烈。耗散能出现极大值时的时间会提前, 应力水平会明显下降, 耗散能密度占比提高。

2) 花岗岩岩样内部弹性能的演化几乎不受干湿循环条件的影响, 花岗岩岩样的耗散能的演化会随着干湿循环次数的增加而明显增加, 并且随着应力水平的增大, 耗散能的增长率也变大。因此, 输入能量的演化形态和耗散能的演化形态相似。

基金项目

国家大学生创新训练计划(201810290012); 中国矿业大学实验室开放基金(2018-14); 国家自然科学基金(51604260); 中国博士后科学基金特别资助项目(2016T90519); 江苏省博士后科研资助计划项目(1501085B)。

参考文献

- [1] 陶振宇. 岩石力学的理论与实践[M]. 北京: 水利出版社, 1981.
- [2] 董学晟. 水工岩石力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
- [3] 刘新荣, 傅晏, 郑颖人, 等. 水岩相互作用对岩石劣化的影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 1(8): 77-82.
- [4] 王伟, 刘桃根, 吕军, 王如宾, 徐卫亚, 翦波. 水岩化学作用对砂岩力学特性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(S2): 3607-3617.
- [5] 傅晏, 刘新荣, 张永兴, 胡元鑫, 谢应坤. 水岩相互作用对砂岩单轴强度的影响研究[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(6): 54-58.
- [6] 邓华锋, 胡安龙, 李建林, 张小景, 胡玉, 常德龙, 朱敏. 水岩作用下砂岩劣化损伤统计本构模型[J]. 岩土力学, 2017, 38(3): 631-639.
- [7] 王伟, 龚传根, 朱鹏辉, 朱其志, 徐卫亚. 大理岩干湿循环力学特性试验研究[J]. 水利学报, 2017, 48(10): 1175-1184.
- [8] 曾志雄, 孔令伟, 田海, 李聚昭. 膨胀岩崩解特性的干湿循环效应与粒度熵表征[J]. 岩土力学, 2017, 38(7): 1983-1989.
- [9] 李亚, 余宏明, 李科, 李雄峰. 干湿循环作用下石膏岩劣化效应的试验研究[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(3): 63-66.
- [10] 梁冰, 谭晓引, 姜利国, 焦波波. 冻-融及干-湿循环对泥质岩崩解特性影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(4): 705-711.
- [11] Badger, C.W., Cummings, A.D. and Whitmore, R.L. (1956) The Disintegration of Shale. *Journal of the Institute of Fuel*, **29**, 417-423.
- [12] Prick, A. (1995) Dilatometrical Behaviour of Porous Calcareous Rock Samples Subjected to Freeze Thaw Cycles. *Catena*, **25**, 7-20. [https://doi.org/10.1016/0341-8162\(94\)00038-G](https://doi.org/10.1016/0341-8162(94)00038-G)
- [13] Ojo, O. (1990) The Effect of Moisture on Some Mechanical Properties of Rock. *Mining Science and Technology*, **10**, 145-156. [https://doi.org/10.1016/0167-9031\(90\)90158-O](https://doi.org/10.1016/0167-9031(90)90158-O)
- [14] Obert, L., Windes, S.L. and Duvall, W.I. (1946) Standardized Tests for Determining the Physical Properties of Mine Rock. RI-3891, Bureau of Mines, U.S. Dept. of the Interior.
- [15] 宣以琼, 武强, 杨本水. 岩石的风化损伤特征与缩小防护煤柱开采机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(11): 1911-1916.
- [16] Pardini, G., Guidi, G.V., Pini, R., Regues, D. and Gallart, F. (1996) Structure and Porosity of Smectite Mudrocks as Affected by Experimental Wetting-Drying Cycles and Freezing-Thawing Cycles. *Catena*, **27**, 149-165. [https://doi.org/10.1016/0341-8162\(96\)00024-0](https://doi.org/10.1016/0341-8162(96)00024-0)
- [17] Gökceoğlu, C., Ulusay, R. and Sönmez, H. (2000) Factors Affecting the Durability of Selected Weak and Clay-Bearing Rocks from Turkey, with Particular Emphasis on the Influence of the Number of Drying and Wetting Cycles. *Engineering Geology*, **57**, 215-237. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(00\)00031-4](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(00)00031-4)
- [18] 张志镇, 高峰. 受载岩石能量演化的围压效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(1): 1-11.
- [19] 张志镇, 高峰. 单轴压缩下岩石能量演化的非线性特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1198-1207.
- [20] 张志镇, 高峰. 单轴压缩下红砂岩能量演化试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(5): 953-962.
- [21] 张志镇. 岩石变形破坏过程中的能量演化机制[D]: [博士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2013.