

热湿循环作用下砂岩加卸荷力学特性研究

王乐华^{1, 2}, 金晶¹, 张冰祎¹, 向力¹, 杨超¹

(1. 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; 2. 三峡大学 防灾减灾湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 夏季高温季节频繁的降雨与蒸发过程, 使岩石(体)经常性的处于热湿循环的交替作用。鉴于此, 以三峡库区砂岩为研究对象, 开展不同热湿循环后的三轴加载与卸荷试验, 从变形、强度以及破坏模式等方面研究热湿循环对砂岩力学特性的影响规律。研究表明: (1) 砂岩三轴加载、卸荷的峰值强度随着热湿循环次数的增加而不断减小, 这种劣化效应在循环前期表现的较为明显。可采用对数函数对其变化规律进行描述。(2) 砂岩热湿循环三轴压缩破坏模式以剪切破坏为主, 主要表现为单剪切面的剪切破坏和“X”, “Y”型共轭剪切破坏, 在破坏面上出现明显的滑移现象, 在其端部均形成含有圆锥的对角破坏。(3) 砂岩热湿循环三轴卸荷破坏以剪切破坏为主, 伴有张拉劈裂破坏与拉剪破坏, 与三轴压缩破坏相比, 砂岩破坏的主裂纹和次生裂纹更多, 破坏形式更复杂, 破坏程度也更为严重。随着热湿循环次数的增加, 砂岩的裂纹扩展情况越复杂。(4) 砂岩的力学性质参数随着热湿循环作用呈下降趋势, 且变化趋势一致。定义热湿循环劣化系数 W , 即归一化函数中 $\ln(n+1)$ 的系数绝对值来评价热湿循环作用对力学参数的劣化强弱程度, 该参数可为后续建立岩石随热湿循环劣化的损伤模型提供一定的理论基础。

关键词: 岩石力学; 热湿循环; 劣化效应; 压缩; 卸荷; 破坏模式; 劣化系数

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2018)03 - 0699 - 10

Experimental study on loading and unloading mechanical properties of sandstone under heat and wet cycles

WANG Lehua^{1, 2}, JIN Jing¹, ZHANG Bingyi¹, XIANG Li¹, YANG Chao¹

(1. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area of Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 2. Hubei Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China)

Abstract: During the high temperature season of summer, frequent rainfall and evaporation result in that rock(rock mass) is under the alternate action of heating and wetting cycles. In this study, the variation of mechanical properties and the effect of heating and wetting cycles were investigated through the triaxial loading and unloading tests to intact sandstone samples under cyclic heating and wetting. The peak strength of triaxial loading and unloading of sandstone was found to decrease with the increasing of heating and wetting cycles and the degradation effect is more obvious in the early cycles. The failure mode of sandstone under triaxial compression after heating and wetting cycles is mainly the shear failures, which are the one with a single shear plane and the conjugated shear failure of “X” and “Y” type. The slipping phenomena appears in the failure surface and the

收稿日期: 2017 - 10 - 30; **修回日期:** 2017 - 12 - 12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400200); 国家自然科学基金资助项目(51439003, 51679128)

Supported by the National Key Research and Development Plan of China(Grant No. 2016YFC0400200) and National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 51439003 and 51679128)

作者简介: 王乐华(1977 -), 男, 博士, 2001 年毕业于武汉水利电力大学建筑工程专业, 现任教授, 主要从事岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: lehuatg@126.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.1412

damage occurs along the cone at the end of the sample. The triaxial unloading failures of sandstone under heating and wetting cycles are mainly the shear failure accompanied by the tensile splitting failure. Some specimens have the tensile and shear failures at the same time. The sandstone has more primary and secondary cracks, the modes of failure are more complex, and the extent of damage is more severe than the case of triaxial compression failure. The mechanical properties of sandstone decrease with the increase of heating and wetting cycles, and the trend of variation is consistent. The deterioration coefficient W due to heating and wetting cycles, that is, the absolute value of the coefficient of the term $\ln(n+1)$ in the normalized function, was defined to evaluate the deterioration degree of the mechanical parameters in the heating and wetting cycles.

Key words: rock mechanics; heat and wet cycle; deterioration effect; compression; unloading; failure mode; deterioration factor

1 引言

我国位于欧亚大陆的东部,东临太平洋,受海洋东南风的影响,使大部分地区处于夏季多雨气候。高温季节被烘烤炙热的岩体受多雨气候的影响,使岩石(体)经常性的处于热湿循环的交替作用,引起岩体颗粒结构、胶结程度、矿物成分及细微裂纹扩展等发生改变,从而导致岩体物理、力学性质劣化^[1]。高温储热条件下岩土体内温度场和湿度场之间具有十分强烈的关联性,随着温度-湿度场的增加,裂隙内的湿胀效应明显,裂隙尖端应力涨幅显著,极易引起裂隙贯穿、围岩崩塌等灾害^[2-3]。由此可见热湿循环效应对岩体的温度场、湿度场、能量场和应力场等产生重要影响。

目前,针对水电库岸边坡工程岩体水-岩作用和温度效应下的力学特性已有了较为丰富的研究成果。邓华锋等^[4-7]的研究表明:(1)水岩作用对砂岩的弹性模量、变形模量、抗压强度和抗剪强度参数等都有不同程度的劣化影响;(2)含水量对砂岩应变软化阶段有明显影响,随着含水量的增加,岩石的应变软化特性减弱,塑性破坏特征体现得更为明显。苏海健等^[8-10]的研究表明,砂岩在应力-应变曲线峰值前的斜率随着温度的增加而明显变缓,峰值强度和残余强度也随之降低。曹平等^[11]研究了不同温度的水岩作用对岩石节理表面形貌特征变化影响机制,发现温度的升高可以促进水岩作用,并且存在一个温度敏感极值点,此时温度对水岩作用影响程度达到最大。王冲等^[12]在温度和含水状态对岩石劈裂强度影响的试验研究中发现:常温下,岩石抗拉强度随含水率增加而急剧减小;在不同温度条件下,天然含水状态的试样抗拉强度最大,干燥状态下最小;干燥岩石抗拉强度随温度升高而增大,含水岩石抗拉强度随温度升高而减小。从以上

分析可以看出,目前的研究成果主要针对岩石处于干燥或饱水2种极端状态下的劣化效应,考虑岩石内湿度和温度因素的叠加动态循环情况下的研究相对较少。

本文以三峡库区为研究对象,开展砂岩热湿循环作用后的三轴加载与卸荷试验,从砂岩的变形、强度以及破裂特征等方面研究了热湿循环对砂岩力学特征的影响规律。

2 试验方案设计

2.1 试样制备

试验用砂岩取自三峡库区重庆段某典型边坡,天然裂隙较少,完整性好。利用ZS100型自动岩石取芯机在岩块上钻取高度大于120 mm的试样,然后在JDKQ-4A型自动岩芯切割机上加工并打磨成直径50 mm、高度100 mm的标准岩样。采用肉眼初筛、超声检测分析仪二次筛选的方式,剔除纵波波速偏差较大、密度值异常的试样,从而消除试件离散性带来的影响。试样的密度和纵波波速测试结果如图1和2所示。试样的波速约为1400 m/s,密度约为2.6 g/cm³,单轴压缩试验结果则显示试样

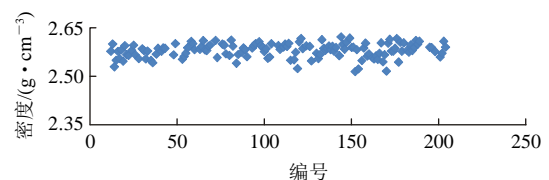


图1 岩样密度统计图

Fig.1 Densities of rock samples

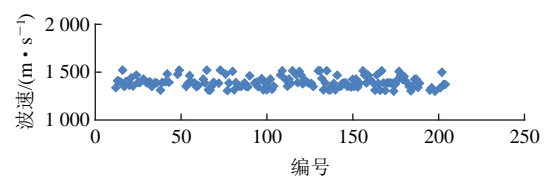


图2 岩样纵波波速统计图

Fig.2 Longitudinal wave velocities of rock samples

的弹性模量约为 16.13 GPa，单轴抗压强度 σ_c 约为 87.70 MPa。

2.2 热湿循环控制参数

根据该地区的气候特点，夏季阳光暴晒下最高地表温度可达 70 °C，因此选用的 70 °C 作为本次试验的加热温度。取 5 个试样(编号 1~5)，在测定质量后将岩样完全浸泡在水中，每 1.5 h 测定质量以监测含水率的变化，待含水率不再变化后放入电热恒温鼓风干燥箱中(加热温度为 70 °C)，每隔 2 h 测量其质量以监测含水率的变化，直至岩样被完全烘干。得到的岩样含水率分别随烘干和浸泡时间的变化曲线如图 3 所示。

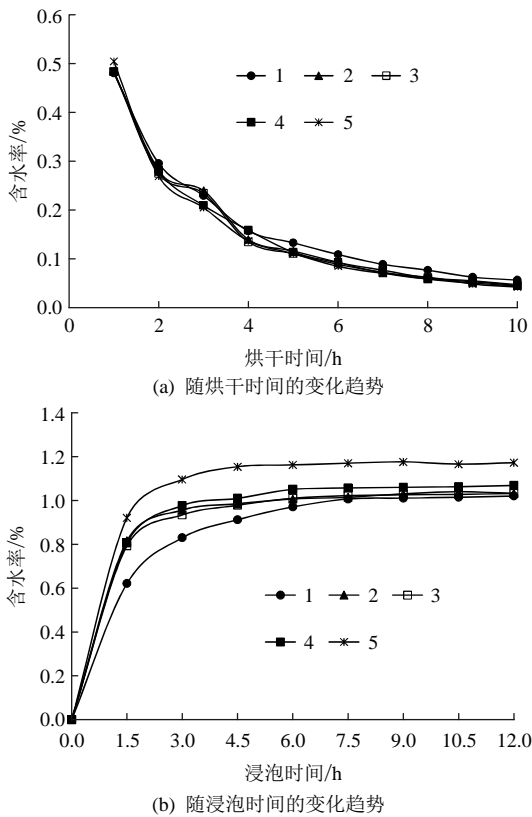


图 3 岩样含水率变化曲线

Fig.3 Curves of water content of rock varying with time

试验结果表明：

(1) 在烘烤开始的 2 h 内岩石含水率急剧下降，3~8 h 试样含水率减少的速度不断减小，8 h 后受随烘烤时间的增加变化不大。经回归拟合，发现可采用指数函数来描述试样含水率随烘烤时间的变化规律(见图 4)，具体为

$$w = 0.046 + 0.658e^{-t/2.308} \quad (1)$$

(2) 在浸泡开始的 3 h 内岩石含水率增加迅速，3~6 h 增速不断减小，6 h 后随浸泡时间的增长而增加缓慢。同样可采用指数函数来描述试样含水率随浸泡时间的变化规律(见图 5)，具体为

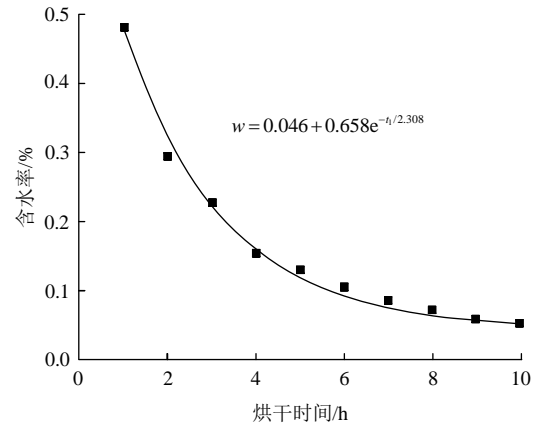


图 4 岩样含水率随烘干时间变化的拟合结果

Fig.4 Fitting curve of moisture content of rock varied with drying time

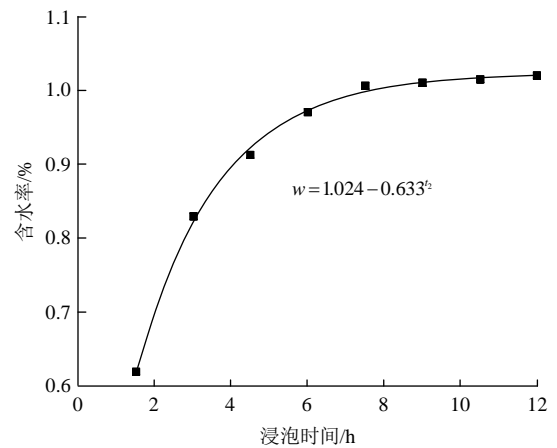


图 5 岩样含水率随浸泡时间变化的拟合结果

Fig.5 Fitting curve of moisture content of rock with immersion time

$$w = 1.024 - 0.798 \times 0.633^2 \quad (2)$$

根据试验结果，岩石的自然含水率为 4.6%，自由饱和后含水率为 12%，分别以烘干和浸泡到自由饱和含水率的 10% 和 90% 为界来确定烘干和浸泡时间，根据试验结果确定本次热湿循环试验中烘干时间为 5 h、浸泡时间为 4.5 h。

2.3 湿热循环与加卸载方案

试验设置的一次热湿循环具体方案为：(1) 将试样搁置在干燥箱中，烘烤时间 5 h(烘烤温度 70 °C)；(2) 将烘烤后的岩样放入浸泡试验箱中浸泡 4.5 h。试验共设置了 7 个循环期次，循环次数分别为 0，5，10，20，30，40 和 50 次。

热湿循环后的砂岩的三轴加载与卸荷试验方案为：(1) 三轴加载试验，取围压 $\sigma_3 = 10, 20$ 和 30 MPa 三个级别，分别加轴压直至岩样破坏；(2) 三轴卸荷试验，取围压 $\sigma_3 = 10, 20$ 和 30 MPa 三个级别，初始轴压 σ_1 为相同围压条件下三轴加载峰值强度的 80%，卸围压直至岩样破坏。整个试验共进行了

42组(三轴压缩 21组, 三轴卸荷 21组), 为便于分析, 对试样按 *a-b-c* 的规则进行编号, 其中 *a* 代表循环次数; *b* 代表加载方式, SZJZ 表示三轴加载, SZXH 表示三轴卸荷; *c* 代表初始围压。如 10[#] - SZJZ - 20 MPa 表示试样经历 10 次的热湿循环后进行围压为 20 MPa 的三轴加载试验。

三轴加载试验的具体过程为: (1) 分别以 0.2 kN/s 和 0.1 MPa 速率将轴向力和围压加载至设计值; (2) 保持围压处于设计值恒定, 以 0.005 mm/s 的速率加载轴向力至试件破坏。

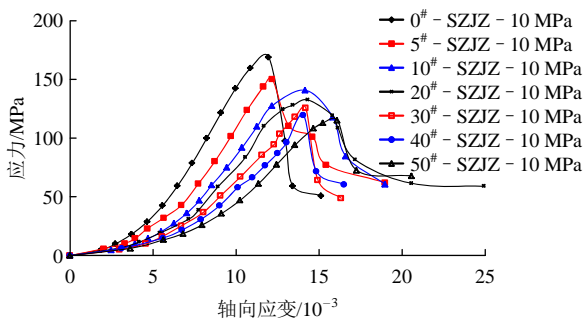
三轴卸荷试验的具体过程为: (1) 分别以 0.2 kN/s 和 0.1 MPa 速率将轴向力和围压加载至静水应力状态; (2) 保持围压处于设计值恒定, 以 0.5 kN/s 的速率加载轴向力至设计值; (3) 以 0.05 MPa/s 的速率卸围压至试件破坏。

3 试验结果分析

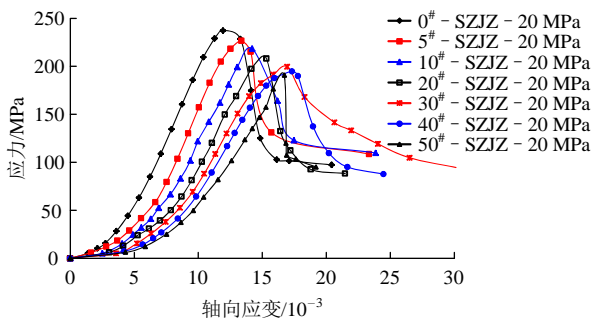
3.1 三轴压缩试验结果分析

(1) 三轴压缩应力 - 应变曲线特征

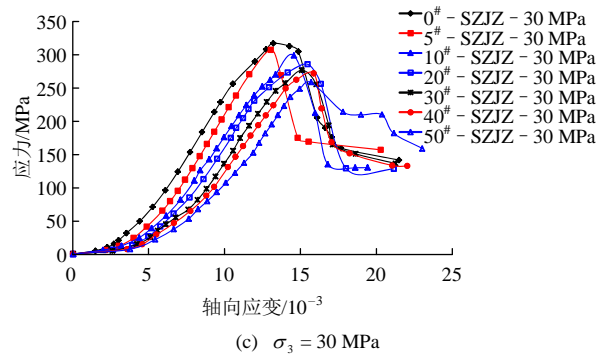
砂岩试样在不同热湿循环次数下的三轴压缩应力 - 应变关系曲线如图 6 所示。图 7 为各试样弹性模量随循环次数的变化规律。从图 6 可以看出, 随着热湿循环次数的增加, 砂岩的峰值强度随之也明显降低; 而峰值应力时对应的轴向应变则随热湿循环次数的增加有增加的趋势; 在弹性变形阶段, 应力 - 应变曲线的斜率即岩样的弹性模量随着热湿



(a) $\sigma_3 = 10 \text{ MPa}$



(b) $\sigma_3 = 20 \text{ MPa}$



(c) $\sigma_3 = 30 \text{ MPa}$

图 6 三轴压缩应力 - 应变关系曲线

Fig 6 Stress-strain curves of triaxial compression

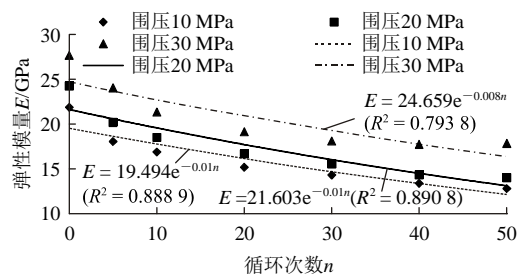


图 7 弹性模量变化规律

Fig.7 Variation of elastic modulus

循环次数的增加而减小。上述变化趋势均表明岩石试样随热湿循环次数的增加呈现出从脆性到塑性的转变趋势。而图 7 的结果表明, 可采用指数函数描述岩石弹性模量随热湿循环次数的变化规律。

(2) 强度特征

砂岩岩样的三轴压缩峰值强度 σ 和残余强度 σ_d 随围压和热湿循环次数的变化分析表如表 1 和 2 所示。从表 1, 2 可以看出:

表 1 砂岩三轴压缩峰值强度变化分析

Table 1 Analysis of peak strength variation for rock under triaxial compression tests

| 循环次数 | 10 MPa | | 20 MPa | | 30 MPa | |
|------|--------------------|---------|--------------------|---------|--------------------|---------|
| | 峰值强度 σ /MPa | 降低百分比/% | 峰值强度 σ /MPa | 降低百分比/% | 峰值强度 σ /MPa | 降低百分比/% |
| 0 | 168.997 | - | 236.976 | - | 316.880 | - |
| 5 | 150.383 | 11.01 | 226.378 | 4.47 | 307.038 | 3.11 |
| 10 | 140.868 | 5.63 | 218.172 | 3.46 | 298.682 | 2.63 |
| 20 | 132.971 | 4.68 | 207.801 | 4.38 | 285.399 | 4.19 |
| 30 | 125.788 | 4.25 | 199.315 | 3.58 | 276.475 | 2.82 |
| 40 | 119.737 | 3.58 | 194.531 | 2.02 | 271.625 | 1.53 |
| 50 | 115.101 | 2.74 | 190.586 | 1.67 | 267.920 | 1.17 |

注: 降低百分比为循环次数为 0 时的峰值强度与循环 *n* 次时峰值强度之比值与循环 0 次时的峰值强度之比。

表 2 砂岩三轴压缩残余强度变化分析

Table 2 Analysis of residual strength variation for rock under triaxial compression tests

| 循环次数 | 残余强度 σ_d /MPa | | | 残余百分比% | | |
|------|----------------------|---------|---------|--------|--------|--------|
| | 10 MPa | 20 MPa | 30 MPa | 10 MPa | 20 MPa | 30 MPa |
| 0 | 50.962 | 97.234 | 141.247 | 30.16 | 41.03 | 44.57 |
| 5 | 62.066 | 108.371 | 156.695 | 41.27 | 47.87 | 51.03 |
| 10 | 60.661 | 109.677 | 130.252 | 43.06 | 50.27 | 43.61 |
| 20 | 59.343 | 88.204 | 127.879 | 44.63 | 42.45 | 44.81 |
| 30 | 48.887 | 94.563 | 136.185 | 38.86 | 47.44 | 49.26 |
| 40 | 60.480 | 87.552 | 132.413 | 50.51 | 45.01 | 48.75 |
| 50 | 67.832 | 94.971 | 158.483 | 58.93 | 49.83 | 59.15 |

注：残余百分比为残余强度与峰值强度的百分比。

① 在相同围压下，砂岩岩样的峰值强度随着热湿循环次数的增加而减小，且减小的幅度随着循环次数的增加不断减小，减小幅度最终趋于平缓，这与单轴抗压强度的变化规律具有一致性。

② 在相同循环次数下，砂岩岩样的峰值强度随着围压值的增大而增大；三轴压缩峰值强度相同循环次数内的降低幅度随着围压值的增大而减小，其原因是施加的围压制约了岩石试样的局部破坏，提高岩石试样的承载力，围压值越大，这种制约就越强。因此在相同热湿循环作用下，围压越大，试样三轴压缩抗压强度的劣化效果越弱。

③ 岩石试样破坏后均具有残余强度，以残余强度与峰值强度的百分比表示残余百分比，残余百分比在 30%~60% 范围。

将砂岩三轴压缩峰值强度 σ 与循环次数 n 进行拟合，发现可采用对数函数进行描述：

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{i(10\text{ MPa})} &= \sigma_{0(10\text{ MPa})} - 12.716 \ln(n+1) \quad (R^2 = 0.977) \\ \sigma_{i(20\text{ MPa})} &= \sigma_{0(20\text{ MPa})} - 10.498 \ln(n+1) \quad (R^2 = 0.913) \\ \sigma_{i(30\text{ MPa})} &= \sigma_{0(30\text{ MPa})} - 11.075 \ln(n+1) \quad (R^2 = 0.893) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中： σ_0 为三轴压缩峰值强度的初始值，围压为 10, 20 和 30 MPa 时， $\sigma_0 = 168.997, 236.976$ 和 316.880 GPa。

根据莫尔 - 库仑准则，计算出砂岩的三轴压缩抗剪强度参数并与循环次数 n 进行拟合，发现同样可采用对数函数进行拟合，具体拟合关系为

$$c_i = c_0 - 0.494 \ln(n+1) \quad (R^2 = 0.976) \quad (4)$$

$$\varphi_i = \varphi_0 - 0.9 \ln(n+1) \quad (R^2 = 0.990) \quad (5)$$

式中： c_0 为三轴压缩黏聚力的初始值，为 12.439 MPa；

φ_0 为三轴压缩内摩擦角的初始值，为 38.88° 。

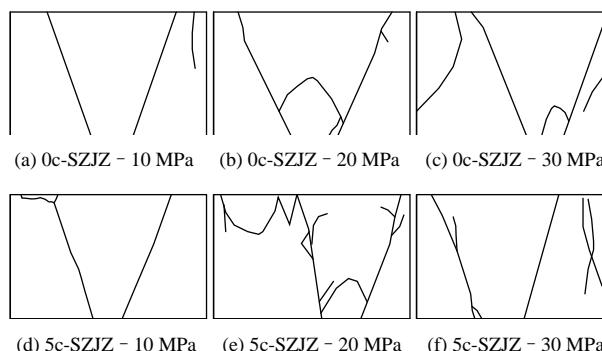
(3) 破坏特征

部分砂岩试样破坏的照片如图 8 所示。可以看出，所有的试样的破坏形式以整体剪切破坏为主，表明热湿循环的次数对试样整体破坏形式影响不大。所有试样的破坏裂纹素描图如图 9 所示。可以看出，压缩的破坏形式以单剪切面的剪切破坏和“X”，“Y”型共轭剪切破坏为主，在破坏面上出现明显的滑移现象，在破坏面的中部出现近乎轴向的张拉应力，在岩样的侧表面出现网状的扩张裂纹，在其端部均形成含有圆锥的对角破坏。而随着热湿循环次数的不断增加，砂岩剪切破坏产生的次生裂纹随之增多，主要是因为砂岩“变软”的缘故。随着围压的增加，三轴压缩的次生破坏裂纹呈现不断增多的趋势。



图 8 部分岩石试样三轴压缩破坏照片

Fig.8 Photographs of some specimens after triaxial compression failure



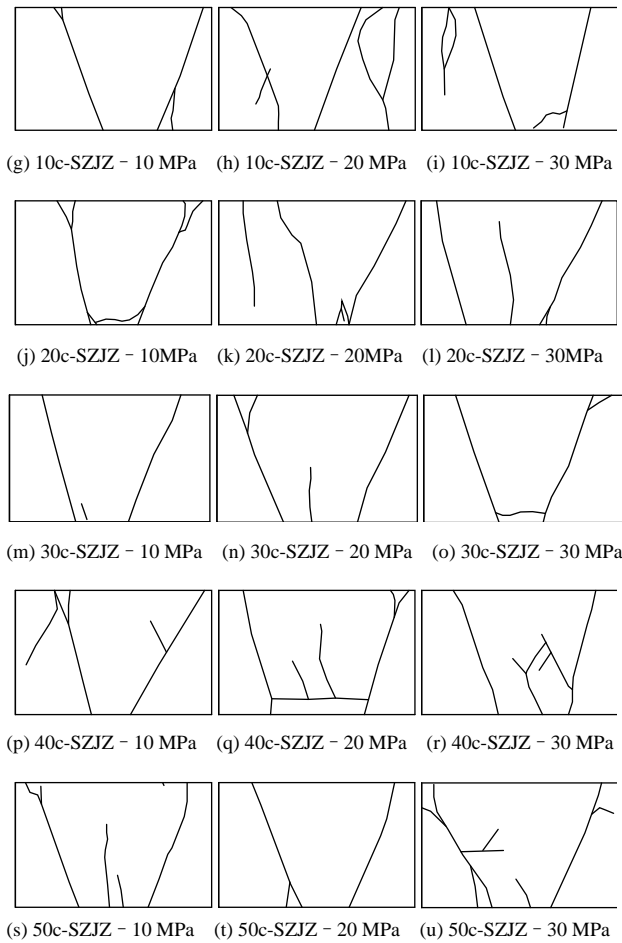


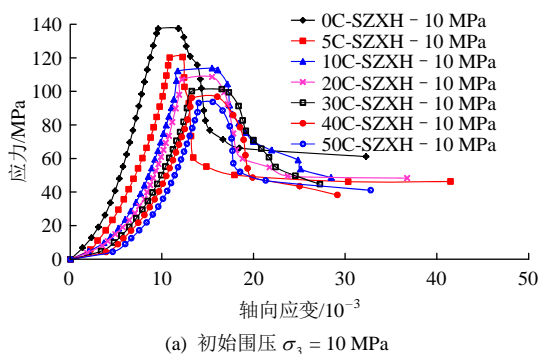
图9 岩石三轴压缩破坏裂纹

Fig.9 Fracture diagrams of rock under triaxial compression tests

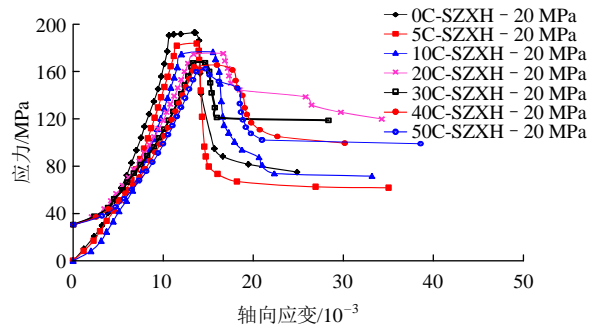
3.2 三轴卸荷试验结果分析

(1) 应力 - 应变曲线特征分析

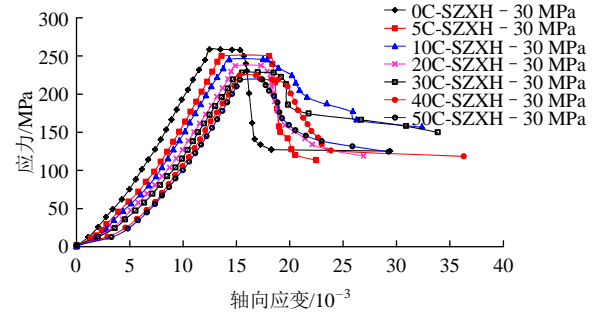
试样在不同热湿循环次数下的三轴卸荷应力 - 应变关系曲线如图 10 所示。从图 10 可以看出，在卸荷前，应力 - 应变曲线显示岩石试样处于弹性变形阶段，且应力 - 应变曲线的斜率随着热湿循环次数的增加而减小。在卸荷阶段，砂岩试样的卸荷峰值强度随着热湿循环次数的增加而减小，在卸荷的初始阶段，砂岩试样的轴向变形增长缓慢，随着



(a) 初始围压 $\sigma_3 = 10$ MPa



(b) 初始围压 $\sigma_3 = 20$ MPa



(c) 初始围压 $\sigma_3 = 30$ MPa

图 10 三轴卸荷应力 - 应变关系曲线

Fig.10 Stress-strain curves under triaxial unloading

围压的不断卸载岩石内部的空隙不断扩大贯通，裂隙逐渐扩展，轴向变形迅速增长，与此同时，岩石试样内部的应力迅速跌落。随着卸荷的不断进行，新生裂纹与旧的裂纹、孔隙深入扩展到全面贯通，岩样的轴向变形出现大幅度快速增长。上述现象说明岩石试样卸荷裂纹扩展具有突发性和阶段性的特点。岩石试样在达到卸荷破坏点后曲线近乎呈铅直线坠落到最低强度，此过程中岩石试样发生的轴向变形较小。

(2) 强度特征

砂岩岩样的三轴卸荷峰值强度 σ_p 和残余强度 σ_q 随围压和热湿循环次数的变化如表 3 和 4 所示。

表 3 砂岩三轴卸荷峰值强度变化分析

Table 3 Analysis of peak strength variation for rock under triaxial unloading

| 循环次数 | 10 MPa | | 20 MPa | | 30 MPa | |
|------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|
| | 峰值强度/MPa | 降低百分比/% | 峰值强度/MPa | 降低百分比/% | 峰值强度/MPa | 降低百分比/% |
| 0 | 137.376 | - | 193.023 | - | 258.452 | - |
| 5 | 120.355 | 12.39 | 183.627 | 4.87 | 250.005 | 3.27 |
| 10 | 113.783 | 17.17 | 176.544 | 8.54 | 245.690 | 4.94 |
| 20 | 107.538 | 21.72 | 169.568 | 12.15 | 236.836 | 8.36 |
| 30 | 101.241 | 26.30 | 160.583 | 16.81 | 228.176 | 11.71 |
| 40 | 96.747 | 29.58 | 158.376 | 17.95 | 224.050 | 13.31 |
| 50 | 93.680 | 31.81 | 154.631 | 19.89 | 218.304 | 15.53 |

表 4 砂岩三轴卸荷残余强度变化分析

Table 4 Analysis of residual strength variation for rock under triaxial unloading

| 循环次数 | 残余强度/MPa | | | 残余百分比/% | | |
|------|----------|---------|---------|---------|--------|--------|
| | 10 MPa | 20 MPa | 30 MPa | 10 MPa | 20 MPa | 30 MPa |
| 0 | 61.156 | 74.967 | 125.142 | 44.52 | 38.84 | 48.42 |
| 5 | 46.321 | 61.734 | 113.206 | 38.49 | 33.62 | 45.28 |
| 10 | 48.615 | 71.520 | 156.761 | 42.73 | 40.51 | 63.80 |
| 20 | 48.316 | 104.796 | 117.744 | 44.93 | 61.80 | 49.72 |
| 30 | 44.690 | 103.503 | 148.923 | 44.14 | 64.45 | 65.27 |
| 40 | 38.297 | 80.797 | 117.218 | 39.58 | 51.02 | 52.32 |
| 50 | 41.070 | 80.308 | 123.248 | 43.84 | 51.94 | 56.46 |

注：残余百分比为残余强度与峰值强度的百分比。

从表 3 可以看出，三轴卸荷条件下试样的卸荷强度随循环次数的增加呈较为明显的降低趋势，经拟合发现可采用对数函数来描述峰值强度 σ_p 与循环次数 n 的关系，具体为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{pi(10\text{ MPa})} &= \sigma_{p0(10\text{ MPa})} - 10.539 \ln(n+1) \quad (R^2 = 0.987) \\ \sigma_{pi(20\text{ MPa})} &= \sigma_{p0(20\text{ MPa})} - 8.752 \ln(n+1) \quad (R^2 = 0.921) \\ \sigma_{pi(30\text{ MPa})} &= \sigma_{p0(30\text{ MPa})} - 8.455 \ln(n+1) \quad (R^2 = 0.864) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中： σ_{p0} 为三轴卸荷加载段峰值强度的初始值，围压为 10, 20 和 30 MPa 时， $\sigma_{p0} = 137.376$ MPa, 193.023 和 258.452 MPa。而表 4 则可以看出，岩石试样破坏后均具有残余强度，残余百分比在 30%~60% 范围，但其随热湿循环次数的变化规律不太明显。

根据 Mohr-Coulomb 强度准则对岩石试样的强度进行线性回归分析，计算出砂岩岩样的三轴卸荷抗剪强度参数循环次数 n 的拟合关系如下：

$$c_{pi} = c_{p0} - 0.494 \ln(n+1) \quad (R^2 = 0.976) \quad (7)$$

$$\varphi_{pi} = \varphi_{p0} - 0.9 \ln(n+1) \quad (R^2 = 0.990) \quad (8)$$

式中： c_{p0} 为三轴压缩黏聚力的初始值，为 10.339 MPa； φ_{p0} 为三轴压缩内摩擦角的初始值，为 23.68°。

(3) 破坏特征

部分砂岩试样破坏的照片如图 11 所示。所有试样的破坏裂纹素描图如图 12 所示。可以看出，砂岩三轴卸荷破坏以剪切破坏为主，伴有张拉劈裂破坏，有的试样破坏兼有拉剪破坏，剪切破坏的形式多是“X”，“Y”型共轭剪切破坏。与三轴压缩破坏相比，砂岩破坏的主裂纹和次生裂纹更多，破坏形



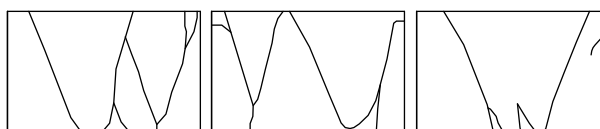
(a) 5c-SZXH - 10 MPa (b) 5c-SZXH - 20 MPa (c) 5c-SZXH - 30 MPa



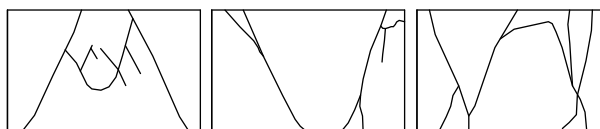
(d) 50c-SZJZ - 10 MPa (e) 50c-SZJZ - 20 MPa (f) 50c-SZJZ - 30 MPa

图 11 部分岩石试样三轴卸荷破坏照片

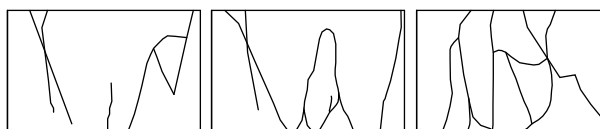
Fig.11 Photographs of some specimens after triaxial unloading compression failure



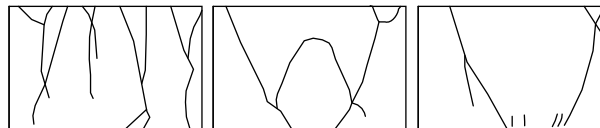
(a) 0c-SXH - 10 MPa (b) 0c-SXH - 20 MPa (c) 0c-SXH - 30 MPa



(d) 5c-SXH - 10 MPa (e) 5c-SXH - 20 MPa (f) 5c-SXH - 30 MPa



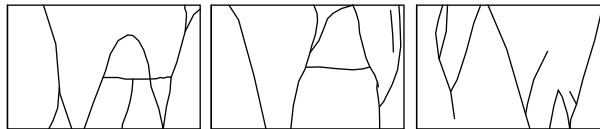
(g) 10c-SXH - 10 MPa (h) 10c-SXH - 20 MPa (i) 10c-SXH - 30 MPa



(j) 20c-SXH - 10 MPa (k) 20c-SXH - 20 MPa (l) 20c-SXH - 30 MPa



(m) 30c-SXH - 10 MPa (n) 30c-SXH - 20 MPa (o) 30c-SXH - 30 MPa



(p) 40c-SXH - 10 MPa (q) 40c-SXH - 20 MPa (r) 40c-SXH - 30 MPa

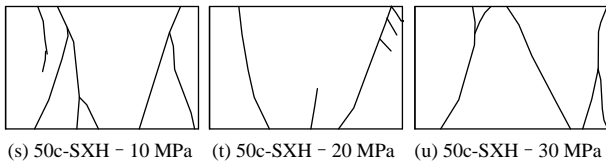


图 12 岩石三轴卸荷破坏裂纹

Fig.12 Fracture diagrams of rock under triaxial unloading compression

式更复杂，破坏程度也更为严重。随着热湿循环次数的增加，砂岩的裂纹扩展情况越复杂。循环次数较少时，砂岩的脆性较强，试样破坏以主裂纹为主，随循环次数增加，延性增强，次生裂纹明显增多，且多发于试样的端部，致使试样端部破损较为严重，同时在岩石破裂面上的岩屑增多，且剪切滑移的现象更为明显。

4 砂岩的热湿循环劣化效应分析

热湿循环效应是一个以不断反复的方式出现的作用过程，因此，如何评判热湿循环作用的劣化效应是非常值得研究的问题。本次试验中，每次循环砂岩的浸泡时间、烘干的温度和时间都是相同的，在整个热湿循环过程中，水和温度的劣化作用是不断深入的，因此，单次热湿循环对砂岩力学性质的劣化增量才能较为合理的衡量热湿循环效应的作用，若砂岩力学性质的劣化增量与热湿循环次的关系是连续的，则表征热湿循环效应的变化率函数可以通过拟合表达式对热湿循环次数求导得到。

通过节 2 的分析可以看出，无论是三轴加载还是卸荷，其峰值强度和抗剪强度参数随热湿循环次数 n 的变化规律均可采用对数函数 $y = y_0 - a \ln(n+1)$ 的形式拟合。为了比较热湿循环对砂岩力学性质的影响，选择式(3)~(8)作归一化处理，其中式(3)和(6)均取 10 MPa 的拟合表达式，得无量纲表达式($n \leq 50$)如下：

$$\sigma_i / \sigma_0 = 1 - 0.064 15 \ln(n+1) \quad (9)$$

$$c_i / c_0 = 1 - 0.039 71 \ln(n+1) \quad (10)$$

$$\varphi_i / \varphi_0 = 1 - 0.023 15 \ln(n+1) \quad (11)$$

$$\sigma_{pi} / \sigma_{p0} = 1 - 0.066 72 \ln(n+1) \quad (12)$$

$$c_{pi} / c_{p0} = 1 - 0.047 78 \ln(n+1) \quad (13)$$

$$\varphi_{pi} / \varphi_{p0} = 1 - 0.038 01 \ln(n+1) \quad (14)$$

图 13 为式(9)~(14)的归一化函数 Y 与热湿循环次数 n 的关系。

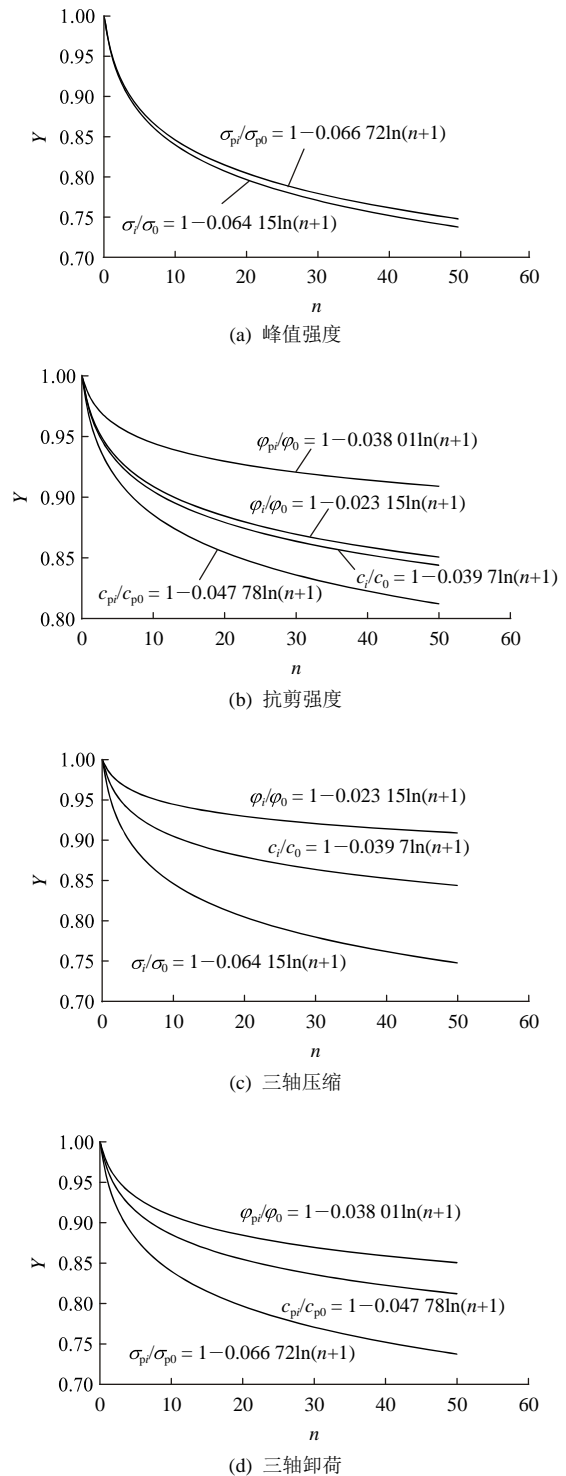


图 13 归一化函数 Y 与热湿循环次数 n 的关系

Fig13 Relationships between the normalized function Y and the number of heating and wetting cycles

横向进行对比，从图 13 可以看出，热湿循环对砂岩峰值强度的影响程度为：三轴卸荷的峰值强度 > 三轴压缩的峰值强度，对砂岩抗剪强度参数的影响

程度为：三轴卸荷的黏聚力 > 三轴压缩的黏聚力 > 三轴卸荷的内摩擦角 > 三轴压缩的内摩擦角。纵向对比，从图 13(c)~(d)可以看出，三轴压缩试验中，热湿循环的劣化效应对各参数的影响强弱为：峰值强度 > 黏聚力 > 内摩擦角；三轴卸荷试验中热湿循环的劣化效应对各参数的影响强弱为：峰值强度 > 黏聚力 > 内摩擦角，与三轴压缩试验的参数影响强弱规律一致。式(9)~(14)中 $\ln(n+1)$ 的系数大小与热湿循环作用对砂岩力学性质参数的影响程度一致，说明该项系数控制着劣化效应曲线的上升和下降的快慢。

选取三轴卸荷参数的归一化函数式(12)~(14)对循环次数 n 求导并取绝对值可得

$$|\dot{Y}(\sigma_p)| = |d[\sigma_{pi} / \sigma_{p0}] / dn| = 0.06672 / (n+1) \quad (15)$$

$$|\dot{Y}(c_p)| = |d[c_{pi} / c_{p0}] / dn| = 0.04778 / (n+1) \quad (16)$$

$$|\dot{Y}(\varphi_p)| = |d[\varphi_{pi} / \varphi_{p0}] / dn| = 0.03801 / (n+1) \quad (17)$$

根据式(15)~(17)得到归一化函数导数 \dot{Y} 与热湿循环次数 n 的关系如图 14 所示。

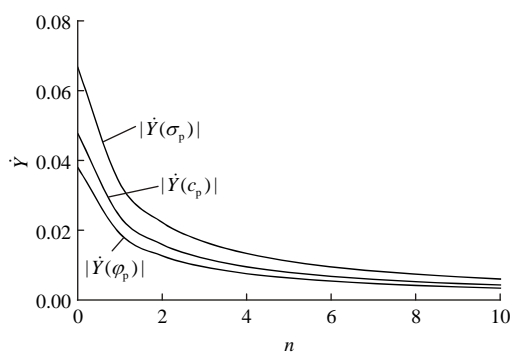


图 14 归一化函数导数函数 \dot{Y} 与热湿循环次数 n 的关系

Fig.14 Relationship between the normalized functional derivative \dot{Y} and the number of heating and wetting cycles n

从图 14 可以较为清楚的看出，砂岩力学参数随热湿循环次数的变化率，归一化函数 Y 中 $\ln(n+1)$ 系数的绝对值越大，其变化率在循环前期越大，当循环次数不断增大，砂岩力学参数的变化率不断降低并最终趋于 0。因此，本文用每次循环后力学参数的劣化增量来表征热湿循环的劣化强弱程度，定义热湿循环劣化系数为 W ，则 W 即为归一化函数中 $\ln(n+1)$ 的系数绝对值。该参数可为后续建立岩石热湿循环作用下的损伤模型提供理论基础。

5 结 论

(1) 砂岩三轴的峰值强度随着热湿循环次数的增加而不断减小，且减小的幅度也随之降低，这种劣化效应在循环前期表现的较为明显。热湿循环次数较少时，砂岩的脆性较强，试样破坏以主裂纹为主，循环次数增加，延性增强，次生裂纹增多，致使试样端部破损较为严重。

(2) 三轴压缩破坏模式以剪切破坏为主，以单剪切面的剪切破坏和“X”，“Y”型共轭剪切破坏为主，在破坏面上出现明显的滑移现象，在破坏面的中部出现近乎轴向的张拉应力，在岩样的侧表面出现网状的扩张裂纹，在其端部均形成含有圆锥的对角破坏。

(3) 砂岩三轴卸荷破坏以剪切破坏为主，伴有张拉劈裂破坏，有的试样破坏兼有拉剪破坏，剪切破坏的形式多是“X”，“Y”型共轭剪切破坏。与三轴压缩破坏相比，砂岩破坏的主裂纹和次生裂纹更多，破坏形式更复杂，破坏程度更严重。随着热湿循环次数的增加，砂岩的裂纹扩展情况越复杂。

(4) 砂岩的力学性质参数随着热湿循环作用呈下降趋势，且变化趋势一致。本文定义热湿循环劣化系数 W ，即归一化函数中 $\ln(n+1)$ 的系数绝对值来评价热湿循环作用对力学参数的劣化强弱程度。该参数可为后续建立岩石热湿循环作用下的损伤模型提供理论基础。

参考文献(References):

- [1] 王乐华, 金 晶, 赵二平, 等. 热湿作用下三峡库区典型砂岩劣化效应研究[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(6): 1 - 6.(WANG Lehua, JIN Jing, ZHAO Erping, et al. Study on the degradation of typical sandstone in the Three Gorges Reservoir under the action of heat and humidity[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(6): 1 - 6.(in Chinese))
- [2] 王华军, 齐承英, 王恩宇, 等. 土壤高温储热条件下热湿迁移过程的实验研究[J]. 太阳能学报, 2010, 31(7): 824 - 828.(WANG Huajun, QI Chengying, WANG Enyu, et al. Experimental study of heat and moisture transfer process for high-temperature heat storage of soils[J]. ActaEnergiae Solaris Sinica, 2010, 31(7): 824 - 828.(in Chinese))
- [3] 李 萌. 高温高湿气候下隧道洞口段围岩(衬砌)热湿应力分析[博士

- 学位论文[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.(LI Meng. Thermal-moisture stress analysis of tunnel portal rock in high temperature and humidity[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.(in Chinese))
- [4] 邓华锋, 李建林, 朱敏, 等. 饱水-风干循环作用下砂岩强度劣化规律试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(11): 3 306 - 3 312.(DENG Huafeng, LI Jianlin, ZHU Min, et al. Experimental research on strength deterioration rules of sandstone under “saturation-air dry” circulation function[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(11): 3 306 - 3 312.(in Chinese))
- [5] 邓华锋, 李建林, 王孔伟, 等. “饱水-风干”循环作用下砂岩损伤劣化规律研究[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(6): 1 091 - 1 096. (DENG Huafeng, LI Jianlin, WANG Kongwei, et al. Research on the deterioration rules of damaged sand rock under “saturation-air dry” cycles[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(6): 1 091 - 1 096.(in Chinese))
- [6] 黄维辉. 干湿交替作用下砂岩劣化效应研究[硕士学位论文][D]. 昆明: 昆明理工大学, 2014.(HUANG Weihui. Study on deterioration of sandstone under dry wet interaction[M. S. Thesis][D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2014.(in Chinese))
- [7] 孔震宁. 干湿循环对红砂岩工程特性的影响分析[J]. 公路与汽运, 2015, (5): 93 - 96.(KONG Zhenning. Influence analysis of dry wet circulation on engineering properties of red sandstone[J]. Highways and Automotive Applications. 2015, (5): 93 - 96.(in Chinese))
- [8] 苏海健, 靖洪文, 赵洪辉. 高温后砂岩单轴压缩加载速率效应的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(6): 1 064 - 1 071.(SU Jianhai, JING Hongwen, ZHAO Honghui. Experimental investigation on loading rate effect of sandstone after high temperature under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(6): 1 064 - 1 071.(in Chinese))
- [9] 尹士兵. 考虑温度效应的岩石动力学行为研究[博士学位论文][D]. 长沙: 中南大学, 2012.(YIN Tubing. Study on dynamic behavior of rocks considering thermal effect[Ph. D. Thesis][D]. Changsha: Central South University, 2012.(in Chinese))
- [10] 李建林, 陈星, 党莉, 等. 高温后砂岩三轴卸荷试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(8): 1 587 - 1 595.(LI Jianlin, CHEN Xing, DANG Li, et al. Triaxial unloading test of sandstone after high temperature[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(8): 1 587 - 1 595.(in Chinese))
- [11] 曹平, 宁果果, 范祥, 等. 不同温度的水岩作用对岩石节理表面形貌特征的影响[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2013, 44(4): 1 510 - 1 516.(CAO Ping, NING Guoguo, FAN Xiang, et al. Influence of water-rock interaction on morphological characteristic of rock joint surface at different temperatures[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2013, 44(4): 1 510 - 1 516. (in Chinese))
- [12] 王冲, 赖远明, 尤哲敏, 等. 温度和含水状态对岩石劈裂强度影响的试验研究[J]. 冰川冻土, 2016, 38(5): 1 317 - 1 324.(WANG Chong, LAI Yuanming, YOU Zhemin, et al. Experimental study of the effect of temperature and moisture state on rock Brazilian splitting strength[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(5): 1 317 - 1 324.(in Chinese))