水　利　学　报

2017年10月　SHUILI　XUEBAO　第48卷　第10期

文章编号:0559-9350(2017)10-1175-10

# 大理岩干湿循环力学特性试验研究

王　伟[1,2]，龚传根[1,2]，朱鹏辉[1,2]，朱其志[1,2]，徐卫亚[1,2]

（1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室，江苏 南京　210098；
2. 河海大学 江苏省岩土工程技术工程研究中心，江苏 南京　210098）

**摘要：**针对库水变幅带边坡岩体水力风化作用下性能劣化现象，选取锦屏水电站左岸边坡大理岩为研究对象，采用干湿循环处理，开展了单轴和不同围压下的三轴压缩试验，研究了大理岩在不同干湿循环作用下强度、变形和破坏形式等力学特性。试验结果表明：大理岩单轴峰值强度与干湿循环次数呈负相关关系，初次循环阶段的劣化效应显著；较低循环次数下大理岩内摩擦角基本不变，黏聚力有较大幅度下降，总体上黏聚力受干湿循环作用的影响效应比内摩擦角更敏感；干湿循环对大理岩有一定程度的软化作用，多次循环后大理岩弹性模量逐渐降至临界值，围压的增加能有效弱化这种软化作用。

**关键词：**大理岩；干湿循环；力学特性；试验研究

**中图分类号：**P641.2　　**文献标识码：**A　　**doi：**10.13243/j.cnki.slxb.20170231

## 1　研究背景

岩石是一种多孔介质材料，不同岩性材料内部都存在一定量的微裂纹、微孔隙、节理等缺陷，当其与水相遇，在水岩不断耦合作用下，岩体会产生膨胀、润滑、泥化、软化、崩解现象，进而导致岩体产生风化，微观上矿物颗粒之间的黏结力逐渐弱化，岩体物理力学特性发生改变，最终导致宏观上岩体发生变形，甚至破坏。锦屏水电站位于金沙江最大支流雅砻江普斯罗沟峡谷段，坝区两岸山体陡峻，基岩裸露，1 820～1 900 m高程以下为大理岩出露段，库区周边环境地质条件复杂，且水位变化影响范围区域广泛，季节性水位变化、汛期、非汛期或是计划性周期蓄排水都会引起水位周期性变化，水库高边坡岩石承受水力干湿交替风化作用，导致岩石受风化程度严重，往往会诱发边坡滑坡失稳，由此给工程带来诸多安全隐患。因此进行水岩耦合作用下尤其是干湿循环作用下岩石变形破坏规律和细观破坏机理的研究具有十分重要的意义。

水岩相互作用是岩体工程稳定性研究的重要内容，相关的研究领域主要包括：水岩物理作用、水岩化学作用和水岩力学作用。国内外学者针对水岩物理作用干湿循环下岩石力学特性展开了一系列的研究，其中Jeng等[1-2]以砂岩为研究对象，通过大量的室内力学试验，发现砂岩的强度随干湿循环的次数增加而减低，当试验循环进行到60次时，其单轴抗压强度降低了20%。刘新荣等[3-5]对三峡库区砂岩进行了室内干湿循环模拟性试验研究，得到了水-岩循环作用下岩石抗剪强度的劣化规律，进一步将内摩擦角和黏聚力变化规律通过FLAC数值模拟应用于工程实际，取得了良好的效果。姚华彦等[6]对红砂岩进行了干湿循环单轴和三轴压缩试验，结果表明，砂岩的弹性模量随干湿交替次数增加而降低，同时岩石的延性增强。韩铁林等[7]针对水库库岸边坡消落带节理岩体，分析了浸泡在不同化学溶液中的裂隙试样在不同干湿循环作用后其力学特征的变化规律。尹宏磊等[8]将材料性质的循环

收稿日期：2017-03-18；网络出版日期：2017-10-30

网络出版地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20171030.1010.002.html

基金项目：国家自然科学基金项目(11672343，51679068)；中央高校基本科研业务费专项资金项目(2016B20214)

作者简介：王伟(1978-)，男，安徽合肥人，教授，主要从事多场耦合岩石力学研究。E-mail：wwang@hhu.edu.cn

变化等效成载荷，探讨了干湿循环作用对边坡安定性的影响，结果表明，即使只考虑抗剪强度参数10%的循环变化，边坡的安定安全系数也会比极限安全系数有相当程度的减小。此外许多学者开展了岩石渗流应力耦合三轴试验研究和模型分析[9-12]，进一步丰富了水岩耦合作用的机理研究。综上所述，目前关于干湿循环效应的研究多以砂岩(沉积岩)为主，而对孔隙率相对较小的大理岩(变质岩)变形破坏规律研究甚少，此外学者们关于干湿循环作用下岩样破坏形式的研究并不多见。

鉴于此，本文以锦屏水电站库岸边幅带工程的大理岩为研究对象，开展不同干湿循环次数下的单轴和常规三轴力学试验，研究大理岩受干湿循环作用后力学性能劣化规律和破坏形式，为库水变幅带边坡岩体力学性能[13]的研究提供借鉴和参考。

## 2 试样制备与试验方案

试验岩样为取自锦屏水电站左岸边坡的新鲜大理岩，致密坚硬，属于硬脆性岩石。主要成分有石英、钾长石、方解石、蒙脱石等。取回钻取的岩心后，按照《水电水利工程岩石试验规程DLT 5368-2007》、《工程岩体试验方法标准GB/T 50266-2013》等规范以及国际岩石力学学会(ISRM)的要求加工成50 mm×100 mm(直径×高度)的标准圆柱试样(如图1)。试验在河海大学岩土力学及堤坝工程教育部重点实验室全自动岩石三轴流变伺服仪[14]上进行。

DY0-A-1　DY12-A-1　DY28-A-1　DY44-A-1

图1　大理岩试样

试验通过真空桶、真空泵和烘干箱设备来实现试样的干湿循环，本试验干湿循环周期为4 d，先将岩样在负压为0.1 MPa的真空抽压桶内注水浸泡3 d，然后在温度为105 ℃烘箱内干燥1 d。为了研究干湿循环次数对大理岩力学性能的渐进影响，试验制备了7个干湿循环样组，分别开展不同干湿循环次数下的单轴和三轴压缩试验，考虑到水库边幅带大理岩实际地应力状态，围压考虑了4个等级：0、5、10和15 MPa。试验方案见表1。干湿循环后大理岩的单轴和三轴压缩试验步骤如下：(1)根据试验要求，将封存好的干湿循环后大理岩试样进行尺寸测量及拍照，将岩样装入橡胶套内，环向应变计套于橡胶套外，置于试验机压力室内，同时手动调试轴向和环向应变计至合理初始值。(2)单轴压缩试验时，直接进行偏应力加载，加载方式采用应变加载，加载速率为0.02 mm/min。单轴压缩试验中脆性大理岩加载至峰值应力后极易突然破坏，环向应变瞬间增大易损坏仪器，所以不做峰后试验，当试验达至峰值强度后，便停止试验。(3)三轴压缩试验时，先给压力室内充油，待排除压力室内空气且围压达到设定值后，再进行偏应力加载。试验结束时，卸载围压和轴压，逐一卸下轴向和环向应变计，并对岩样拍照记录以便绘制破坏形态图。

表1　大理岩力学试验方案

| 循环次数 | 围压/MPa | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 0 | 5 | 10 | 15 |
| 0 | DY0-A-1 | DY0-T-1 | DY0-T-2 | DY0-T-3 |
| 4 | DY4-A-1 | ——— | ——— | ——— |
| 12 | DY12-A-1 | DY12-T-1 | DY12-T-2 | DY12-T-3 |
| 20 | DY20-A-1 | ——— | ——— | ——— |
| 28 | DY28-A-1 | DY28-T-1 | DY28-T-2 | DY28-T-3 |
| 36 | DY36-A-1 | ——— | ——— | ——— |
| 44 | DY44-A-1 | DY44-T-1 | DY44-T-2 | DY44-T-3 |

## 3 试验结果与分析

**3.1 强度特性试验结果分析** 根据前述试验方案对试件进行大量的室内试验，得到了不同干湿循环次数下的应力–应变曲线，如图2、图3所示。

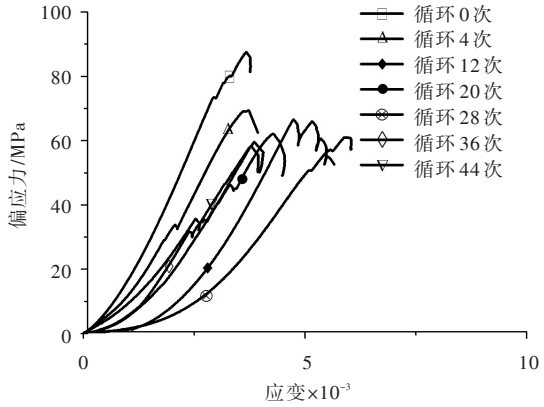
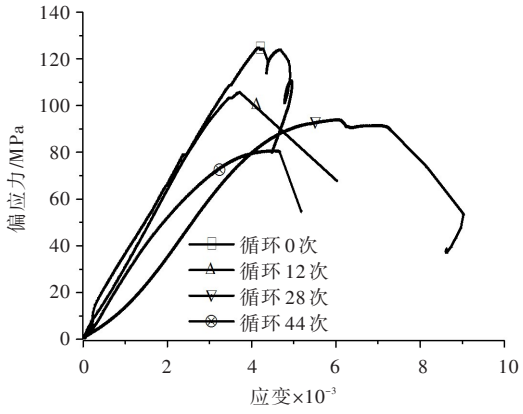
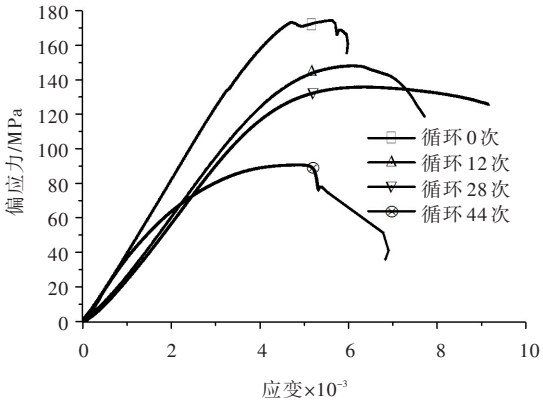


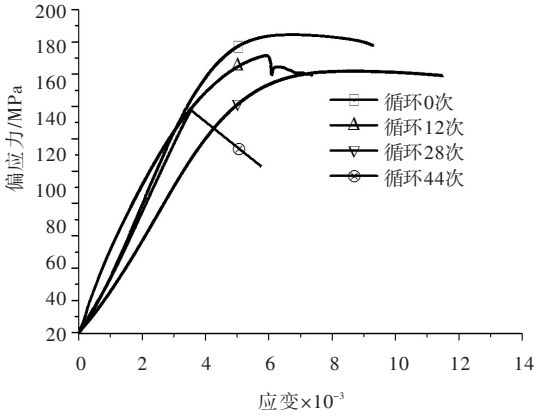

图2 各循环次数下单轴试验应力–应变曲线




（a）围压5MPa




（b）围压10MPa




（c）围压15MPa

图3 各循环次数下三轴试验应力–应变曲线

引入劣化度定量描述干湿循环对大理岩强度的影响，进一步将其分为阶段劣化度和累计劣化度，公式分别如下：

$$D_i(n)=\frac{T_{n-1}-T_n}{T_n}\times 100\% \tag{1}$$

$$\sum D_i(n)=\frac{T_0-T_n}{T_0}\times 100\% \tag{2}$$

式中：$D_i(n)$ 为大理岩力学参数 $i$ 在 $n$ 阶段的劣化程度；$\sum D_i(n)$ 为岩样力学参数 $i$ 在 $n$ 阶段的累计劣化程度；$T_0$ 为岩样干燥状态下力学参数值；$T_{n-1}$、$T_n$ 分别为 $n$-1 和 $n$ 阶段大理岩力学参数值。大理岩单轴和各围压下三轴峰值强度分析如表2、3所示。

表2　干湿循环下大理岩单轴峰值强度

| 循环次数 | 0 | 4 | 12 | 20 | 28 | 36 | 44 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\sigma_c$/MPa | 90.92 | 69.41 | 66.60 | 62.09 | 60.99 | 58.99 | 58.33 |
| $D_\sigma(n)$/% | | 23.66 | 10.55 | 6.77 | 1.77 | 3.28 | 1.12 |
| $\sum D_\sigma(n)$/% | | 23.66 | 26.75 | 31.71 | 32.92 | 35.12 | 35.85 |

注：$\sigma_c$ 为各干湿循环作用下单轴峰值强度，$D_\sigma(n)$ 为单轴峰值强度在n次循环时的阶段劣化度，$\sum D_\sigma(n)$ 为单轴峰值强度在 $n$ 次循环下的累计劣化度。

表3　干湿循环下大理岩三轴峰值强度

| 围压/MPa | 干湿循环次数 | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0 | 12 | | 28 | | 44 | |
| | $\sigma_c$/MPa | $\sigma_c$/MPa | $\sum D_\sigma(12)$/% | $\sigma_c$/MPa | $\sum D_\sigma(28)$/% | $\sigma_c$/MPa | $\sum D_\sigma(44)$/% |
| 0 | 90.9 | 66.6 | 26.73 | 61.0 | 32.90 | 58.3 | 35.86 |
| 5 | 123.9 | 105.5 | 14.85 | 93.7 | 24.37 | 80.8 | 34.80 |
| 10 | 173.3 | 148.0 | 14.60 | 135.5 | 21.81 | 90.8 | 47.61 |
| 15 | 184.2 | 171.5 | 6.89 | 161.1 | 12.54 | 137.4 | 25.41 |

注：$\sigma_c$ 为各干湿循环作用下三轴峰值强度，$\sum D_\sigma(n)$ 为大理岩三轴峰值强度在 $n$ 次干湿循环下的累计劣化度。

结合各循环次数下单轴试验应力-应变曲线(图2)和干湿循环下大理岩峰值强度分析表(表2)可以看出，水力风化耦合作用对大理岩的强度影响较为显著，干湿循环44次后大理岩单轴峰值强度累计劣化度高达35.85%。总体上呈现出单轴峰值强度随干湿循环次数增加而降低的趋势，初次阶段干湿循环作用的劣化效应较为显著，干湿循环4次时的阶段劣化度为23.66%远大于后40次(4～44次)的累计劣化度15.96%。另一方面可以看出，大理岩单轴峰值强度阶段劣化度和累计劣化度都有趋于稳定的趋势，从循环28次后阶段劣化度基本保持稳定，由此看出干湿循环对库岸大理岩的力学性能的影响更大程度的体现在时间效应上。通过各循环次数下三轴试验应力-应变曲线(图3)和干湿循环下大理岩三轴峰值强度分析表(表3)可以看出，同一围压下，三轴峰值强度与干湿循环次数呈负相关关系，高围压下干湿循环的劣化效应有所降低，围压的影响随循环次数增大而减弱；同一循环次数下，围压变化对峰值强度的影响在数值上的变化规律基本一致，三轴峰值强度随围压增加而递增，其中循环44次时，最后一级围压变化下，峰值强度有明显的增加。

进一步探究干湿循环作用对岩石强度指标内摩擦角和黏聚力的影响效应。应用Mohr-Coulomb屈服准则，通过常规三轴室内试验确定岩土体参数内摩擦角和黏聚力[15]，从而定量描述干湿循环作用对大理岩内摩擦角和黏聚力的影响效应。不同干湿循环次数下大理岩强度参数值见表4。

表4　干湿循环下大理岩强度参数值

| 循环次数 | 内摩擦角$\varphi$/° | 黏聚力 $c$/MPa |
|---|---|---|
| 0 | 48.45 | 17.90 |
| 12 | 48.17 | 13.39 |
| 28 | 50.37 | 10.92 |
| 44 | 41.60 | 12.30 |

通过表4可以看出，干湿循环作用下，大理岩的内摩擦角和黏聚力都有不同程度的变化。当干湿循环12次、28次时，大理岩内摩擦角基本保持稳定，分别变化了0.58 %和-3.96 %，而黏聚力有较大幅度的降低，分别降低了25.2%，38.99%；当干湿循环44次时，大理岩内摩擦角有较显著的减小，而黏聚力却有小幅度的增加，但基本和12次、

28次时保持在同一水平。由于试样来自于工程现场，试验结果存在一定的离散性，其中干湿循环28次试样的内摩擦角和黏聚力的数值均存在跳动现象。总体而言，综合对比大理岩两个强度参数内摩擦角和黏聚力受干湿循环作用的影响效应，不难发现，大理岩内摩擦角在较低循环次数下基本保持稳定，随着循环的进一步加剧出现了一定程度的下降，大理岩黏聚力在初次循环阶段有较大程度下降，随着循环次数的增加而呈现出稳定状态。因此，大理岩黏聚力受干湿循环作用的影响效应较内摩擦角相对更加明显，更为敏感。对比国内学者关于砂岩力学参数研究成果[6,16-17]，发现砂岩内摩擦角和黏聚力随干湿循环变化规律描述的不尽相同，可能与试样的离散性、干湿循环的方案以及岩性的差别有关，有待进一步考证。

**3.2 岩石变形特性结果分析** 锦屏水电站大理岩是一种脆性较强的硬岩[18]，试验的岩样根据试样方案进行了不同程度的干湿循环作用，风化的程度也不尽相同，在一定程度上会影响本身结构特征，所以在应力-应变曲线上也会存在一定程度的差异，下面就大理岩在不同次数的干湿循环作用下，分别对单轴和三轴试验应力-应变曲线在不同阶段变形特性进行对比分析。图2为单轴压缩试验下不同干湿循环次数大理岩的应力-应变曲线，图4为大理岩在不同循环作用、各围压下三轴压缩试验的偏应力-轴向/环向应变曲线，其中竖轴左侧为偏应力-环向应变曲线，竖轴右侧为偏应力-轴向应变曲线。

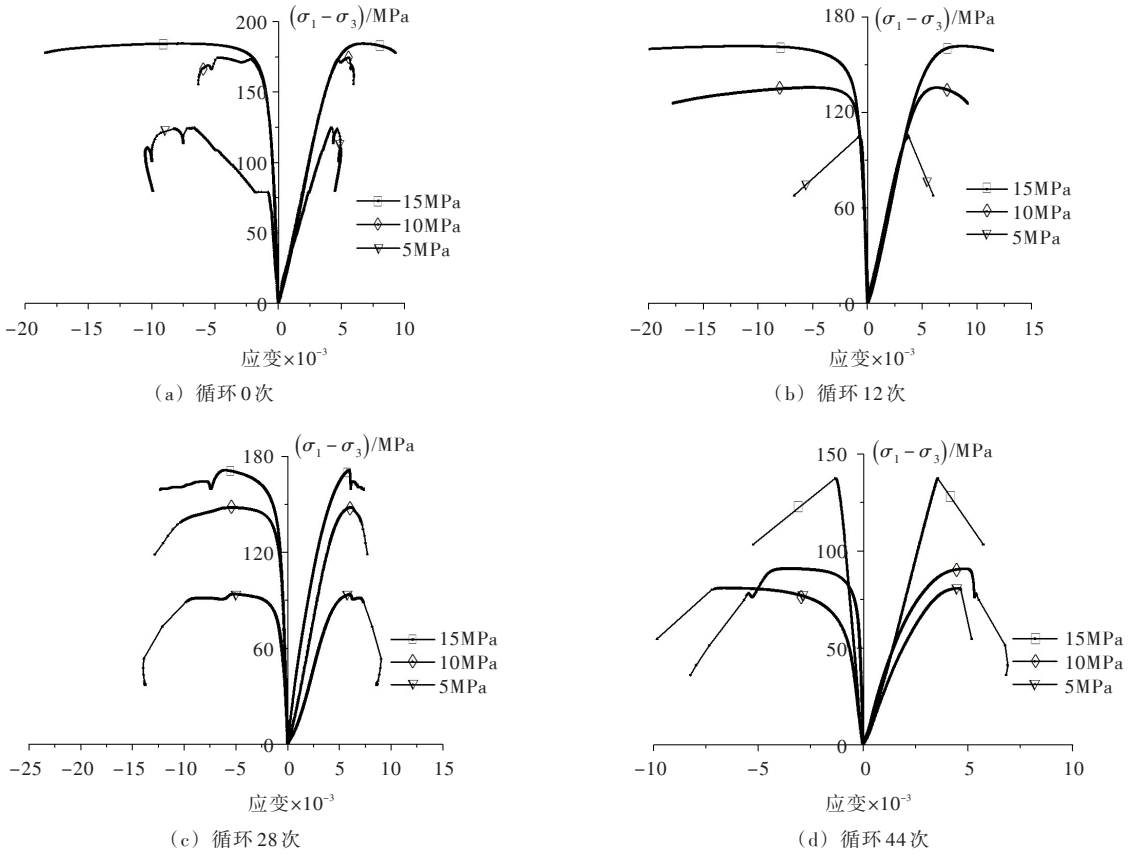



图4 不同循环作用、各围压下大理岩应力-应变曲线

对一般岩石而言，岩石变形有弹性变形、塑性变形和黏性变形3种不同的形式，全应力-应变曲线可分为4个阶段：微裂纹压密阶段、弹性变形阶段、塑性变形阶段和应变软化阶段。德国学者米勒(L.Müller)根据峰前应力-应变曲线特征，将属于变质岩的大理岩称为塑-弹-塑性体。从图2可以看出，不同干湿循环次数下大理岩单轴应力-应变曲线的形状基本保持不变，大理岩达到单轴峰值应力后表现出明显的应力跌落。天然大理岩在组织结构上较致密，岩性很脆，所以应力-应变曲线的压密段特征很不明显，直接进入近似线性的弹性变形阶段，而且塑性变形阶段也表现的很不明显。大理岩成岩的过程中难免会形成微裂纹、孔隙、缺陷等结构缺陷，经过多次干湿循环，材料性能不断劣

化，相当于对这些缺陷某种程度的放大，从而使大理岩在压密过程中应力增加速率要小于应变增加速率，在应力应变曲线上表现出不同程度的下凹。从整体上看，在微压密阶段经过干湿循环处理后的大理岩均要比天然大理岩应力–应变曲线下凹的更明显，压密段更长。

岩样经过弹性阶段，由于偏应力持续加载，应力值超过该样的屈服应力值后，岩样内部开始萌生新的裂纹，并且新生裂纹随着应力加载不断发育，最后裂纹之间出现相互搭接贯通，应力–应变曲线上出现屈服平台，该阶段中应力–应变曲线表现为上凸，曲线切线斜率随着应力的增加而递减。图2中不同循环次数下大理岩在应力–应变屈服阶段都没有出现明显的屈服点，这是说明大理岩经过干湿循环作用后脆性依然比较强。天然状态下岩石干湿循环0次和4次后峰值应变差异不明显，而经过干湿循环12次之后，峰值应变随循环次数有较显著增大，说明干湿循环作用相应次数后对大理岩有一定程度的应变软化作用；三轴试验下，从图3可以看出各循环次数不同围压下对应的峰值应变随着围压的增加呈现出增大的趋势，说明围压越大，在偏应力加载的过程中，岩样受到的约束作用也会更强，这使得岩石的延性也得到了增强，所以其对应的峰值应变也会变得更大。

综合对比图2、图3和图4可以看出，单轴和三轴压缩试验的应力–应变曲线在压密阶段和塑性变形阶段表现出明显的不同。大理岩在三轴试验的加载过程中，压密阶段很不明显，曲线下凹程度很小，很快就进入了弹性变形阶段，随着围压的增大，干湿循环在此阶段的影响效应基本可以忽略不计。通过图4可以清晰看出，同一循环次数下，压密阶段应力–应变曲线在围压5、10和15 MPa下基本重合，说明大理岩在低围压5 MPa下很快就被压密了，产生的新生孔隙不是很多，所以表现出明显的线弹性。单轴压缩试验下，干湿循环作用对塑性变形阶段的影响较小，规律不明显，进一步说明该锦屏大理岩脆性很强；三轴压缩试验下，特别是在围压5和10 MPa下，循环28次和44次后的大理岩表现出很明显的延展性，大理岩出现脆塑性[19~20]，塑性变形明显提高。结果表明，干湿循环作用能一定程度增加大理岩的塑性变形，低围压下这种影响效应更加显著。

干湿循环后大理岩弹性阶段的变形特性通常用弹性模量和泊松比进行描述，其中弹性模量一般通过切向弹性模量、割线弹性模量和平均弹性模量三种方法确定，本文采用平均弹性模量来描述大理岩的弹性模量，进一步探究干湿循环对大理岩变形特性的影响，其中平均模量由轴向应力–应变曲线上近似直线区段的平均斜率确定。本试验方案中，弹性模量能够量化反映干湿循环作用对大理岩的软化程度，弹性模量越小，干湿循环对大理岩的软化程度越大。通过单轴试验应力–应变曲线确定了不同干湿循环次数下大理岩单轴弹性模量及其拟合曲线，如表5和图5所示。同时通过常规三轴试验可得到大理岩在不同围压下的弹性模量，如表6所示。

表5　大理岩单轴试验弹性模量

| 循环次数 | 0 | 4 | 12 | 20 | 28 | 36 | 44 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $E$/MPa | 26.84 | 23.12 | 21.76 | 20.57 | 19.69 | 19.33 | 19.28 |
| $\sum D_E(n)$ | | 13.86 | 18.93 | 23.36 | 26.64 | 27.89 | 28.17 |

注：$E$为各干湿循环作用下大理岩单轴弹性模量，$\sum D_E(n)$为大理岩弹性模量$E$在$n$次干湿循环下的累计劣化度。

表6　大理岩三轴试验弹性模量　（单位：MPa）

| 循环次数 | 围压 | | |
|---|---|---|---|
| | 5/MPa | 10/MPa | 15/MPa |
| 0 | 31.55 | 42.34 | 44.50 |
| 12 | 30.94 | 34.83 | 36.86 |
| 28 | 30.37 | 34.40 | 44.29 |
| 44 | 28.67 | 33.75 | 41.27 |

表5和图5可看出，干湿循环作用对单轴试验下大理岩的弹性模量影响显著，大理岩单轴弹性模量随循环次数的增加逐渐降低。在初次循环阶段，弹性模量有较大幅度的降低，当循环到28次后，弹性模量基本稳定在19.5 MPa左右，当干湿循环达到44次时，单轴弹性模量累计劣化度高达28.17%，这进一步说明干湿循环作用对库岸大理岩力学性能的劣化效果较为显著，实际工程设计时应给予充分考虑。从单轴试验弹性模量劣化曲线（图5）变化规律上看，弹性模量最终会趋于某一较低的下限值，此时大理岩已经处于一种严重的水力风化状态。经MATLAB拟合，大理岩单轴试验弹性模量$E$和干湿循环次数$n$的关系可用式（3）表示，其相关系数$R^2 = 0.9574$，拟合公式如下：

$$E_n = 19.40 + 7.07 \times 0.896^n (n \leqslant 44) \tag{3}$$

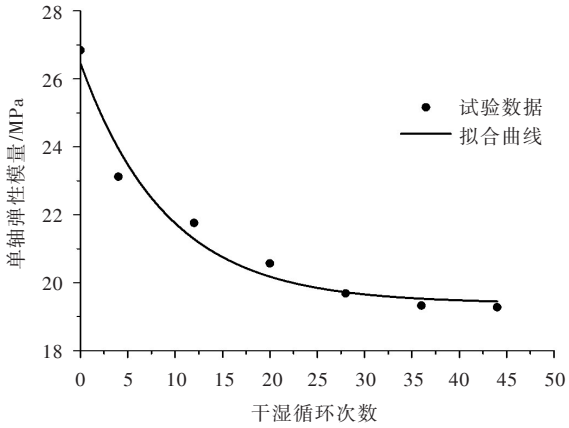



图5　单轴试验弹性模量劣化曲线

对比表5和表6可以看出，同一循环次数下，三轴试验弹性模量随围压增大而增加，与相同循环次数下单轴试验弹性模量相比有较大幅度的提高；同一围压下，三轴试验弹性模量随干湿循环次数的增加而减小，弹性模量随循环次数下降的幅度较单轴试验有明显的降低。综上说明干湿循环对大理岩弹性模量有一定程度的劣化效应，多次循环后大理岩弹性模量趋于稳定，高围压环境能有效弱化干湿循环对弹性模量的劣化效应。

**3.3　破坏形式结果分析**　岩石的破坏形式，指的是岩石在荷载作用下呈现出的宏观破坏形态，破坏形式可分为三大类：脆性张拉劈裂破坏、张拉和剪切混合破坏、剪切破坏。岩石在其形成过程中，由于复杂的地质作用，成岩过程中内部难免会出现孔隙、裂纹等缺陷。这些缺陷的分布具有随机性，而不同程度和分布的缺陷将会影响岩石的破坏形式。大理岩在不同次数干湿循环作用下，其内部微观结构产生的劣化会导致岩石不同程度的风化，这种风化程度将对大理岩宏观破坏形式产生一定的影响。为了研究不同干湿循环作用下大理岩的破坏形式，整理出了各试样破坏形态图及相应的素描图。表7描述了大理岩不同干湿循环次数下试样单轴试验的破坏形式。限于篇幅，表8仅给出了围压为15 MPa时不同干湿循环次数下试样三轴试验的破坏形态图。

由表7可以看出，在天然状态下大理岩单轴压缩破坏呈现出清晰可见的张拉破坏形式，破裂面有多条。循环至12次时，破坏形式依然呈现出明显的脆性张拉，但破坏面条数开始呈现增加的趋势。从0次和12次干湿循环下大理岩破坏对应的素描图可以看出，在干湿循环初期，大理岩破坏的裂纹与试样轴向基本保持水平，说明在单轴压缩试验下，大理岩在干湿循环初期脆性依然表现的很明显，此阶段的破坏形式可以描述为脆性张拉破坏。从干湿循环20次和28次时大理岩破坏形态图及其素描图可以发现随着干湿循环次数的增加试样破坏时的裂纹逐渐倾斜交叉，同时裂纹的条数也有明显的增加，岩石开始出现了较多局部破裂面，破裂面的发展演化不再是单一的纵向拉裂，破坏形态趋于复杂化，由此说明随着干湿循环次数的增加，岩石的脆性开始减弱，出现了塑性破坏特征，此阶段的破坏特征形式可以描述成张拉、剪切混合破坏。随着干湿循环次数逐渐增加，循环至36次和44次时，此阶段大理岩的破坏形式出现了显著的变化，岩样出现明显的剪切破坏，而且剪切的破坏面为多条，其中以一条呈45°贯通的破裂面为主，其它几条次破裂面搭接在主破裂面上，体现了岩样局部受干湿循环风化作用的影响。这说明单轴试验下，干湿循环作用后的大理岩表现出脆性转化为塑性的趋势，在试样破坏形态图上表现出随着干湿循环次数的增加，裂纹不断延展搭接，破裂面逐渐增加。

从表8围压为15 MPa时不同干湿循环次数下试样三轴试验的破坏形式可以看出：三轴压缩试验下，由于围压约束了岩石在加载过程中的侧向变形，当有较高围压存在时，大理岩的破坏形式和单轴压缩试验相比有较大差异，无论是天然状态下的岩样还是干湿循环作用后的岩样，其破坏都表现为剪切破坏形式，各岩样破裂面只有一条呈60°左右的剪切破裂面，不存在局部破裂面，岩样没有明显的被分裂成两半，岩样上只形成了一条可见的裂痕，说明高围压一定程度上增强了岩样的延性。同时对比15 MPa围压下各循环次数大理岩破坏时的素描图，不难发现随着循环次数的增加，剪切面

表7　不同干湿循环下大理岩单轴试验破坏形式

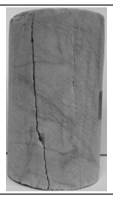
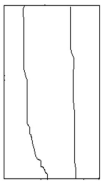
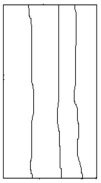
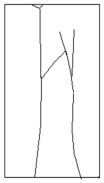
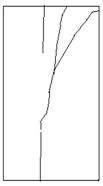
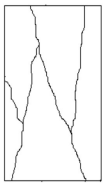
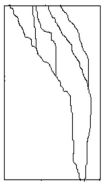
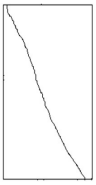
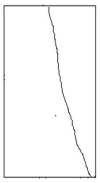
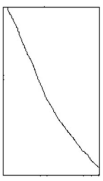
| | 循环次数 | | |
|---|---|---|---|
| | 0 | 12 | 20 |
| 破坏图 |  | | |
| 素描图 |  |  |  |
| | 28 | 36 | 44 |
| 破坏图 | | | |
| 素描图 |  |  |  |

表8　不同干湿循环下大理岩三轴试验破坏形式(围压15MPa)

| | 循环次数 | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 0 | 12 | 28 | 44 |
| 破坏图 | | | | |
| 素描图 |  |  | |  |

基本保持不变，进一步说明高围压下干湿循环的劣化效应被弱化。

## 4　结论

本文以锦屏大理岩为研究对象，分别进行了不同干湿循环次数下的单轴和三轴压缩试验，分析了大理岩受干湿循环作用后力学性能劣化规律和破坏形式。得出的主要结论如下：(1)在单轴压缩试验中，大理岩单轴峰值强度随干湿循环次数增加而降低，初次阶段干湿循环作用的劣化效应显著，单轴峰值强度阶段劣化度和累计劣化度都有趋于稳定的趋势；从常规三轴试验中看出，高围压下大理岩峰值强度有明显提高，围压的增加使干湿循环的劣化效应有所降低。(2)大理岩内摩擦角在较低

循环次数下基本保持稳定，随着循环的进一步加剧出现了较大幅度的下降，大理岩黏聚力在初次循环阶段有大幅度下降，随着循环次数的增加而呈现出稳定状态。总体上，大理岩黏聚力受干湿循环作用的影响效应较内摩擦角，更为敏感。(3)不同干湿循环次数下大理岩单轴应力-应变曲线的形状基本保持不变，大理岩达到单轴峰值应力后表现出明显的应力跌落。大理岩在三轴压缩试验加载过程中，压密阶段不明显，很快就进入弹性变形阶段。干湿循环对大理岩弹性模量有一定程度的劣化效应，多次循环后大理岩弹性模量趋于稳定，高围压环境能有效弱化干湿循环对弹性模量的劣化效应。(4)单轴压缩试验下，干湿循环初期的大理岩表现出明显的脆性，随着干湿循环次数的增加，岩石的脆性开始减弱，出现了塑性破坏特征。同时裂纹不断延展搭接，破裂面逐渐增加。对比15 MPa围压下各循环次数大理岩破坏时的素描图，不难发现随着循环次数的增加，剪切面基本保持不变，进一步说明高围压下干湿循环的劣化效应被弱化。

## 参 考 文 献：


[1] JENG F S, LIN M L, HUANG T H . Wetting deterioration of soft sandstone-microscopic insights[C]//An International Conference on Geotechnical and Geological Engineering . Melbourne: [s.n.], 2000 .

[2] LIN M L, JENG F S, TSAI L S, et al . Wetting weakening of tertiary sandstones-microscopic mechanism[J] . Environment Geology, 2005, 48(2): 265-275 .

[3] 刘新荣，傅晏，王永新，等 . 库水岩作用下砂岩抗剪强度劣化规律的试验研究[J] . 岩土工程学报，2008，30(9)：1298-1302 .

[4] 刘新荣，傅晏，王永新，等 . 水岩相互作用对库岸边坡稳定的影响研究[J] . 岩土力学，2009，30(3)：613-616 .

[5] 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，2012，8(1)：78-88 .

[6] 姚华彦，张振华，朱朝辉，等 . 干湿交替对砂岩力学特性影响的试验研究[J] . 岩土力学，2010，31(12)：3704-3709 .

[7] 韩铁林，师俊平，陈蕴生 . 干湿循环和化学腐蚀共同作用下单裂隙非贯通试样力学特征的试验研[J] . 水利学报，2016，47(12)：1566-1575 .

[8] 尹宏磊，徐千军，李仲奎 . 抗剪强度随干湿循环变化对边坡安定性的影响[J] . 水利学报，2008，39(5)：568-572 .

[9] 俞缙，李宏，陈旭，等 . 渗透压-应力耦合作用下砂岩渗透率与变形关联性三轴试验研究[J] . 岩石力学与工程学报，2013，32(6)：1203-1213 .

[10] 王伟，郑志，王如宾，等 . 不同应力路径下花岗片麻岩渗透特性的试验研究[J] . 岩石力学与工程学报，2016，35(2)：260-267 .

[11] 孙粤琳，沈振中，吴越健 . 岩体裂缝扩展的渗流-应力耦合分析模型[J] . 水利学报，2007，38(S1)：334-339 .

[12] 刘明明，胡少华，陈益峰，等 . 基于高压压水试验的裂隙岩体非线性渗流参数解析模型[J] . 水利学报，2016，47(6)：752-762 .

[13] 周创兵 . 水电工程高陡边坡全生命周期安全控制研究综述[J] . 岩石力学与工程学报，2013，32(6)：1081-1093 .

[14] 王 伟，徐卫亚，王如宾，等 . 低渗透岩石三轴压缩过程中的渗透性研究[J] . 岩石力学与工程学报，2015，34(1)：40-47 .

[15] 蔡美峰 . 岩石力学与工程[M] . 北京：科学出版社，2002 .

[16] 曾胜，李振存，陈涵杰，等 . 干湿循环下红砂岩强度衰减规律及工程应用[J] . 长沙理工大学学报：自然科学版，2011，8(4)：18-23 .

[17] 王莎莎，谢学斌，肖崇春，等 . 考虑干湿循环效应的砂岩边坡稳定性研究[J] . 矿冶工程，2015，35(6)：20-24 .

[18] 张春生，陈祥荣，侯靖，等 . 锦屏二级水电站深埋大理岩力学特性研究[J] . 岩石力学与工程学报，2010，29(10)：1999-2009 .

[19] 史贵才，葛修润，卢允德．大理岩应力脆性跌落系数的试验研究[J]．岩石力学与工程学报，2006，25(8)：1625-1631．
[20] 余华中，阮怀宁，褚卫江．大理岩脆-延-塑转换特性的细观模拟研究[J]．岩石力学与工程学报，2013，32(1)：55-64．

## Experimental study on mechanical properties of marble under hydraulic weathering coupling

WANG Wei[1,2], GONG Chuangen[1,2], ZHU Penghui[1,2], ZHU Qizhi[1,2], XU Weiya[1,2]
(1. *Key Laboratory of Education for Geomechanics and Embankment Engineering*, *Hohai University*, *Nanjing* 210098, *China*;
2. *Jiangsu Research Center for Geomechanical Engineering Technology*, *Hohai University*, *Nanjing* 210098, *China*)

**Abstract**: Aiming at the deterioration of performance under the action of hydraulic weathering of rock mass located in reservoir water fluctuating zone, the marble of Jinping hydropower station is chosen as the research object. A series of uniaxial and triaxial compression experimental tests on the marble under dry-wet cycling have been carried out to study the mechanical properties of marble, such as strength, deformation behavior and failure mode. The experimental results show that there is a negative correlation between the uniaxial peak strength of marble and the number of dry-wet circulation, and the degradation effect under the initial stage of cycle is remarkable; the internal friction angle of the marble after a small number of cycling times is almost constant, while the cohesion has decreased remarkably. In general, the effect of dry-wet cycling on marble cohesion is more sensitive than internal friction angle. The dry-wet cycling has a certain degree of softening effect on the marble and the elastic modulus of the marble decreases to the critical value after multiple repeated cycles. The increase in confining pressure can effectively weaken the softening effect.

**Keywords**: rock mechanics; marble; dry-wet cycling; mechanical properties; experimental study

（责任编辑：李　琳）

---

（上接第1174页）

## Comparative study on effect of induced joints of different interface patterns

LI Haifeng, YANG Bo, ZHANG Guoxin, XU Xiuming
(*China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, *Beijing* 100038, *China*)

**Abstract**: Induced joints are commonly used to control cracks in the design of RCC arch dam. At present, Radial twist stitches are used in some projects. In those projects, it occurred that cracks appeared around the induced jointsbut the joint itself is not open during the construction period. In the view of fracture mechanics, it is about the split of induced joints under different interfaces. In this paper, a tutorial of a finite plate containing different interface patterns of joint cracks and a cylindrical arch dam is set, based on the stress change characteristics of RCC arch dam and the law of induced crack change, using virtual crack closure technique and Richard brittle fracture criteria to obtain equivalent Stress Intensity Factor of interface and study on the law of variation of crack intensity factor following the joint angle change. In order to acquire the effect of induced jointsfor different interface patterns, correction coefficient of equivalent strength namely theinterface space form factors $\lambda(\theta)$ for induced crack in the seam surface is achieved by getting the reciprocal of the normalized Stress Intensity Factor. The research shows that with the increase of the angle between the surfaces, it would be harder for the interface to be open, which means that the equivalent strength for joint surface is gradually increasing. Therefore, in practical design of RCC Arch Dam, it is better to use vertical seams, and the maximum angle of seam surface should not exceed 10° if radial twist stitch is used.

**Keywords**: RCC arch dam; induced joints; equivalent strength; space form; virtual crack closure technique

（责任编辑：王冰伟）