

含水率对泥质粉砂岩物理力学性质影响的规律与机制

贾海梁¹, 王 婷², 项 伟³, 谭 龙³, 申艳军¹, 杨更社¹

(1. 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064;
3. 中国地质大学(武汉) 工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 含泥质类软岩遇水后强度会发生显著弱化, 严重影响各类工程的安全。对泥质粉砂岩进行室内吸水、脱水全过程试验, 并测定其在脱水过程中不同饱和度下的物理(尺寸、纵波波速)、力学性质(单轴压缩、抗拉强度)。试验结果表明: (1) 脱水过程中岩样收缩具有明显的阶段性, 饱和度由 55% 降至 40% 的过程中其尺寸的减小速率最快; (2) 脱水过程中岩样纵波波速呈现先降低后升高的趋势, 在饱和度 65% 左右达到极小值; (3) 随着饱和度的增加, 岩样强度和弹性模量均呈降低趋势, 且超过 60% 的强度损失(抗压强度损失 68.2%、抗拉强度损失 62.6%) 发生在低饱和度的状态下(40% 以下); (4) 抗拉强度相较于抗压强度对水的软化效应更为敏感。综合分析上述结果, 对岩石吸水和脱水的微(细)观过程进行描述。继而提出孔隙水对泥质粉砂岩的微(细)观软化机制, 并将其分为两类: 荷载依赖性机制——主要包括孔隙水压力变化、孔隙水的流动、结合水膜的润滑、Rheobinder 效应等软化机制; 非荷载依赖性机制——主要包括以黏土矿物水化为基础的软化机制, 以及以可溶性矿物的溶蚀为基础的软化机制。最后, 对不同含水状态下岩石软化的主导机制进行探讨。

关键词: 岩石力学; 泥质粉砂岩; 饱和度; 强度软化; 宏观变化特征; 微(细)观机制

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2018)07 - 1618 - 11

Influence of water content on the physical and mechanical behaviour of argillaceous siltstone and some microscopic explanations

JIA Hailiang¹, WANG Ting², XIANG Wei³, TAN Long³, SHEN Yanjun¹, YANG Gengshe¹

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China;
2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China; 3. Faculty of Engineering, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: The strength of clay-bearing siltstone is strongly susceptible to the moisture and the moisture-induced decay of strength endangers seriously the safety of engineering constructions. The results of experiments on the full process saturation and dehydration of argillaceous siltstones were presented. During the dehydration stage, the sizes of rock samples and their P-wave velocities were monitored. The mechanical properties of the samples, especially the compressive and tensile strengths, were discussed at designated degrees of saturation. The results indicate that the shrinkage of rock samples has clearly four stages during the dehydration and that the maximum rate of size reduction lies in the range of degree of saturation 55% - 40%. The P-wave velocities of rock samples

收稿日期: 2017 - 08 - 21; **修回日期:** 2018 - 04 - 08

基金项目: 中国博士后科学基金面上项目(2017M613293XB); 国家自然科学基金资助项目(41702334, 41772333)

Supported by China Post Doctoral Science Fund Project(Grant No. 2017M613293XB) and National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 41702334 and 41772333)

作者简介: 贾海梁(1987 -), 男, 2016年毕业于中国地质大学(武汉)获博士学位, 现任讲师, 主要从事岩石力学、岩石冻融损伤等方面的研究工作。E-mail: jia.hailiang@outlook.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.1037

decrease firstly and increase subsequently, and reach the minimum at the degree of saturation of 65%. With the increasing of the degree of saturation, both the strength and elastic moduli of rock samples drop. Over 60% of the strength loss (68.2% of compressive strength loss and 62.6% of tensile strength loss) occurs in the low saturation interval (below 40%). The tensile strength is more susceptible to the softening effect of water than the compressive strength. The microscopic mechanisms of the softening effect of pore water on argillaceous siltstone may be divided into two categories: one is the load-dependent mechanisms including the change of pore water pressure, flow of pore water, lubricating effect of bound water film and the Rhebinder effect; the other is the load-independent mechanisms including clay mineral hydration and dissolution of soluble minerals. Finally, the dominant mechanism of rock softening under different saturations is discussed.

Key words: rock mechanics; argillaceous siltstone; saturation degree; strength softening; macroscopic changing characteristics; micro(meso)-scopic mechanisms

1 引言

含泥质类软岩遇水后强度会发生显著弱化, 引发一系列工程问题, 如库岸边坡失稳^[1]、矿井巷道坍塌^[2]、隧道围岩破坏^[3]、水电站坝基变形^[4]等。对此, 国内外学者对含泥质类软岩遇水后物理、力学性质的变化进行了大量的研究。

L. S. Burshtein^[5]研究了含水率对含泥质砂岩和泥岩强度和变形的影响, 含水率泥质粉砂岩的强度对含水率的变化更为敏感, 且强度快速衰减发生在低含水率状态下。A. B. Hawkins 和 B. J. McConnell^[6]研究了砂岩含水率与岩石强度的关系, 结果表明 80%~90% 强度损失发生在低含水率情况下。朱珍德等^[7]研究了泥板岩不同吸水率下的单轴压缩强度的变化, 发现泥板岩抗压强度的软化与吸水率密切相关。B. Vásárhelyi 和 P. Ván^[8]研究了含水率对砂岩强度的影响, 发现砂岩对水的敏感度很大程度上依赖于岩石的有效孔隙度。Z. A. Erguler 和 R. Ulusay^[9]测量了多种黏土质软岩不同含水率时的单轴抗压强度、弹性模量以及抗剪强度, 发现随着含水率的增加, 岩石在饱和状态下的单轴抗压强度、弹性模量、抗剪强度相比于干燥时分别减小了 90%, 93%, 90%, 且大部分的强度衰减都发生在含水率为 0%~2% 时。熊德国等^[10]通过对砂岩、砂质泥岩和泥岩在自然和饱水状态下进行一系列力学试验, 给出了 3 种岩石饱水后抗拉强度、单轴抗压强度、弹性模量、变形模量以及泊松比的降低和软化系数。D. G. Roy 等^[11]研究了不同饱水时间对 3 种砂岩力学参数的影响, 发现岩石的抗拉强度、杨氏模量以及断裂刚度都随着饱和度的增加而降低。D. Han 等^[12]研究了含水率、黏土含量对岩石波速的影响, 发现当孔隙度为 2%~30%、黏土含量为 1%~50% 时, 泥质砂岩

的纵波波速与孔隙度和黏土含量存在明显的线性关系。何满潮等^[13]对深井泥岩吸水后的试样微观结构特征进行分析, 发现泥岩孔隙率与吸水量、吸水速率成正比关系, 黏土矿物含量与吸水量、吸水速率成反比关系。左清军等^[14]研究了软板岩的吸水率对岩石膨胀特性的影响, 发现软板岩的膨胀率会随着吸水率的增长呈幂函数关系增长。

此外, 国内外学者对含泥质类软岩遇水软化机制也有诸多研究。王幼麟和蒋顺清^[15]通过对粉砂岩遇水前后的微观结构特征、黏土分布以及矿物成分的分析发现, 粉砂岩遇水发生崩解软化的机制有: “水化-分散性或膨胀性软化、崩解”和“吸附-楔裂性软化、崩解”2 个作用。J. Hadizadeh 和 R. D. Law^[16]等研究了水对砂岩的软化过程, 发现岩石本身的微观结构特征如孔隙的几何尺寸、是否存在黏土矿物以及颗粒的接触等, 在控制孔隙水的物理化学作用对岩石强度的影响程度上具有显著作用。周翠英等^[17]研究了粉砂质泥岩和泥质粉砂岩遇水软化机制, 认为软岩的软化机制包括: 黏土矿物吸水膨胀与崩解机制、离子交换吸附作用、易溶性矿物溶解与矿物生成等, 各种机制综合作用导致软岩力学性质降低。杨春和等^[18]通过对含层理板岩浸泡吸水试验, 分析岩石吸水特性以及吸水前后微观结构的变化, 发现板岩在水的作用下胶结松散, 孔隙度增大, 矿物颗粒产生膨胀的时间稍滞后于吸水率的变化过程。黄宏伟和车平^[2]通过对泥岩天然状态和饱水状态下的微观结构的对比发现, 泥岩在水的作用下发生软化的原因是岩石在水的作用下内部出现了大量的微孔隙, 颗粒间胶结连接破坏, 岩石由致密的结构变为疏松的不规则疏松絮状结构。冒海军等^[19]研究了泥页岩和板岩在干燥状态、不同浸泡时间后的微观结构和含量, 发现黏土矿物定向排列时, 更易发生水化, 岩石的水化同时受胶结物以及胶结

程度的影响。柴肇云等^[20]分析了煤系泥岩的显微孔隙裂隙形态特征和分布规律,发现泥岩吸水软化崩解是在宏观结构破坏或扰动的基礎上,微孔隙裂隙吸附效应引起的。

现有研究集中在对各类软岩遇水后物理、力学性质变化的观测和描述,软岩的软化机制则多从其微观结构的变化进行阐释。笔者认为,软岩遇水软化的诱因是孔隙水含量和赋存状态的动态变化,对软化原因的分析不仅要考虑孔隙水对岩石结构潜在的损伤机制(反映于力学性质的变化),还要考虑不同含水率下孔隙水自身的性质和状态(反映于物理性质的变化)。因此,有必要对岩石吸、脱水过程中孔隙水的动态变化做详细的论述。

本文对泥质粉砂岩进行了室内吸水、脱水全过程试验,并测定了其在脱水过程中物理(尺寸、纵波波速)性质的变化,及不同饱和度下的力学性质(单轴抗压强度、单轴压缩弹性模量、抗拉强度)。综合分析上述结果,对岩石吸水和脱水的微(细)观过程进行了描述,对不同饱和度下孔隙水的性质和状态进行了分析;继而对泥质粉砂岩的微(细)观软化机制进行了分类;最后,对不同含水状态下岩石软化的主导机制进行了探讨。

2 试样制备与试验方案

2.1 试样的制备

(1) 岩石矿物成分

试验所用含泥质粉砂岩取自宜昌地区白垩系地层,具体来源于厚层泥质粉砂岩地层。岩石呈灰白色,肉眼观察无明显层理。岩样粉晶X射线衍射分析结果表明:试样中石英、长石和方解石等晶体矿物含量分别为33%、24%和16%;黏土矿物含量约为27%,主要黏土矿物成分I/S(伊蒙混层)、绿泥石和伊利石,其相对含量分别为48%、29%、23%。

(2) 样品加工和选取

根据规范^[21]中的误差要求,将岩石加工成直径50 mm、高度100 mm的标准试样用于单轴压缩试验和超声波波速测试;加工成直径50 mm、高度25 mm的圆盘状试样用于巴西劈裂试验。此外,选取代表性岩块切割成30 mm长、10 mm厚的样品,用于环境扫描电镜(ESEM)观测。上述所有样品均来自同一块岩石。测量样品天然状态下的纵波波速,选取波速相近且外观无缺陷的试样作为试验样品。

(3) 不同饱和度试样制备

由于采用真空抽气饱和的方法对试样进行饱和,吸水过程中质量难以控制,因此采用先饱和,后控制脱水过程的方法来获得不同饱和度的试样。上述过程中使用的设备主要有真空抽气饱和装置、烘箱、电子天平等。主要步骤如下:① 烘干(烘干前测量初始质量)——烘干温度为105℃,持续48 h以上,直至样品质量不再变化,认为其达到干燥状态;② 真空抽气饱和——抽气压力为1个大气负压,在抽气2 h后将水放进饱和缸内直至没过试样表面,之后持续抽气至气泡不再逸出,打开放气阀门,之后每隔一定的时间测定一次试样质量,直至其达到稳定,认为样品达到完全饱和状态(此阶段持续约72 h);③ 自然脱水——将岩样从水中拿出用湿毛巾擦干表面多余水分,测量质量后开始进行脱水计时,每隔一定时间对岩样进行称重,并按照下式计算不同脱水时间下的饱和度:

$$S_t = \frac{m_t - m_d}{m_s - m_d} \quad (1)$$

式中: S_t 为试样在 t 时刻的饱和度, m_t 为试样在 t 时刻的质量(g), m_d 为试样的干燥质量(g), m_s 为试样的饱和质量(g)。脱水在实验室环境下进行,温度为24℃,湿度为80%左右。需要说明的是,对于含黏土矿物的泥质粉砂岩来说,一部分水会进入了黏土矿物层间,严格来讲层间水并没有占据原有孔隙空间,因此按式(1)计算得到的饱和度与传统意义上的饱和度稍有差异,但仍可作为含水率的归一化度量指标。

单轴压缩试验和巴西劈裂试验设定的样品饱和度为0%,20%,40%,60%,80%,100%。其中0%饱和度试样干燥后不进行饱和,100%饱和度试样饱和后不进行脱水。环境扫描电镜样品的饱和度为0%。

2.2 试验方案

(1) 岩样纵波波速和尺寸随饱和度变化

岩样尺寸和纵波波速的测试采用电子游标卡尺(量程为150 mm,精度为0.01 mm)及RSM-SY5声波检测仪(发射脉宽为0.1~600 μs,最小采样间隔为0.1 μs)。由于孔隙水传递剪切波的能力较弱(或接近于0),饱和度对砂岩剪切波速的预期影响相对较小。而孔隙水的不可压缩性导致了砂岩纵波波速对饱和度的敏感性,反之,纵波波速可反映孔隙水的赋存状态。因此,本文只测定了不同饱和度岩样的纵波波速。

试样尺寸和纵波波速测量都是在脱水过程中进

行, 脱水过程如上文所述。试样尺寸、纵波波速的测量时间节点与质量的测量节点相同。每次测定的时间尽量短, 以保证测试过程中含水状态基本保持恒定。试样尺寸测量之前在岩样上、下底面设置相互垂直的 2 条测线, 在侧面上、中、下 3 个部位标记直径测点(见图 1)。在上、下底面的中心点做标记, 作为超声波速的测点(见图 1)。

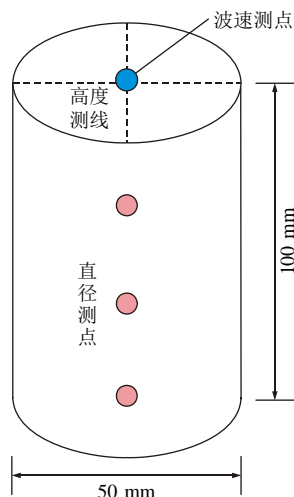


图 1 直径和高度及波速测量点示意图

Fig.1 Locations of measuring points of diameter, height and wave velocity

(2) 岩样单轴压缩强度随饱和度变化

用于单轴压缩试验的圆柱状试样共 6 组, 饱和度分别为 0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%, 每个饱和度 3 个岩样。在脱水过程中, 样品含水率达到设定的饱和度时, 将样品用保鲜膜包好置于保湿缸中, 静置 1 周, 使岩样中的水均匀分布, 方可用于试验。

单轴压缩试验中, 以 8×10^{-6} (mm/mm)/s 的速率加载至相对位移 0.84 mm(为预计最大抗压强度的 70%时对应的相对位移值), 然后改用环向控制加载, 速率为 1×10^{-5} (mm/mm)/s, 直至破坏。

(3) 岩样抗拉强度随饱和度变化

用于劈裂试验的圆盘状试样共 6 组, 饱和度分别为 0, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%, 每组 3 块。在脱水过程中, 样品含水率达到设定的饱和度时, 将样品用保鲜膜包好置于保湿缸中, 静置 1 周, 使岩样中的水均匀分布, 方可用于试验。

劈裂试验采用 MTS 配置的弧形压头, 试验速率为每 600 s 使位移加载 2 mm, 直至破坏。记录各个岩样的峰值荷载, 并计算抗拉强度。

(4) 岩样微(细)观结构

砂岩的微观孔隙结构通过环境扫描电镜(ESEM)的背散射功能(EBSD)进行观察。样品共 3 块, 来源于同一块岩石, 且空间位置相互垂直。基于试验方法的需要, 样品的上表面被抛光。观察前先将样品放入样品处理机抽真空, 当达到试验要求后在抛光的上表面喷涂碳层; 之后将样品放入扫描电镜样品室进行观察。

3 试验结果

3.1 脱水过程中饱和度对试样尺寸和纵波波速的影响

(1) 试样吸、脱水过程

真空抽气 2 h 候将样品放入水中浸没, 在入水浸泡前期试样饱和度增长迅速, 浸泡约 2 h 后, 试样饱和度已达到 91%。浸泡约 60 h 后基本达到饱和状态(见图 2)。

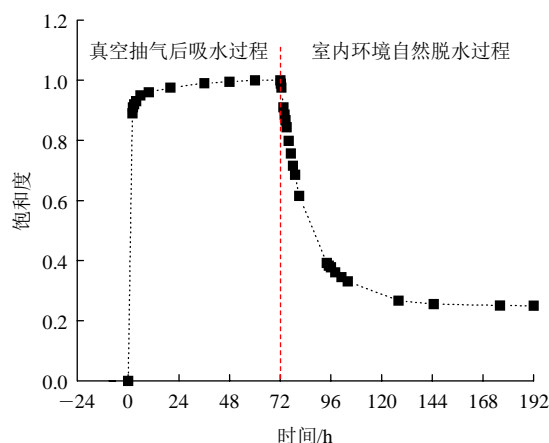


图 2 试样的吸、脱水去全过程

Fig.2 The whole process of saturation and dehydration of samples

在开始脱水后的 24 h 内试样内部水分散失较快, 饱和度已降至约 35%; 之后减小速率逐渐降低, 脱水持续 3 d 后样品饱和度基本不再变化。最终饱和度稳定在 25%左右, 达到天然含水状态(见图 2), 这与样品开始测试前的饱和度(平均约 28%)较为接近。

(2) 饱和度对尺寸的影响

岩样含有伊蒙混层黏土矿物, 因此具有微弱的膨胀性, 完全饱和后体积膨胀约 1.5%。

在脱水过程中, 岩样的高度和直径均呈明显的“四阶段”减小趋势。阶段一, 饱和度由 100%降至 85%, 直径和高度下降速度较快; 阶段二, 饱和

度由 80% 降至 55%，高度和直径降低速率缓慢，降低幅度较小；阶段三，饱和度由 55% 降至 40% 左右，直径和高度快速降低；阶段四，饱和度 40% 以下，直径和高度降低速率重新变缓(见图 3)。

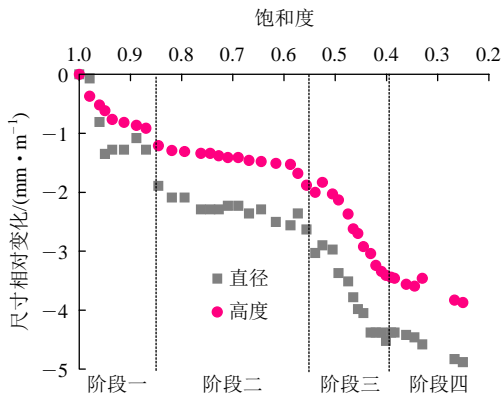


图 3 脱水过程中岩样尺寸随饱和度的变化(各数据点为不同测点的平均值)

Fig.3 Variation of sizes of rock samples along with the dehydration process(each data point is the average value of the results from different measuring points)

(3) 饱和度对纵波波速的影响

在脱水过程中，试样高度方向上的纵波波速呈现先减小后增加的趋势，极小值出现在饱和度 65% 左右(见图 4)。饱和度在 25% 附近时，试样纵波波速与完全饱和时基本一致。

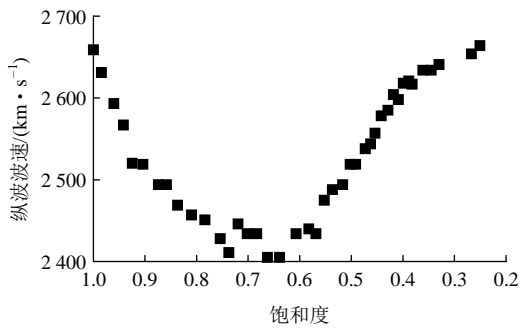


图 4 脱水过程中岩样高度方向纵波波速随饱和度的变化(各数据点为 3 次测量的平均值)

Fig.4 Variation of the P-wave velocity with the degree of saturation during the dehydration process(each data point is the average value of three tests)

3.2 饱和度对试样力学性质的影响

(1) 单轴抗拉强度

泥质粉砂岩的单轴抗压强度随着饱和度增加而降低。从干燥状态到饱和度为 40% 岩样单轴抗压强度降低迅速，相较干燥状态降低幅度为 55.4%；饱和度从 40% 开始，岩样抗压强度的下降趋势逐渐变缓；饱和度达到 80% 之后，岩样的抗压强度基本稳

定(见图 5)。饱和状态下岩样的单轴抗压强度损失(干燥强度与饱和度强度的差值与干燥强度之比)约 65.4%，其中 68.2% 的强度损失发生在低含水率(饱和度小于 40%)的情况下。

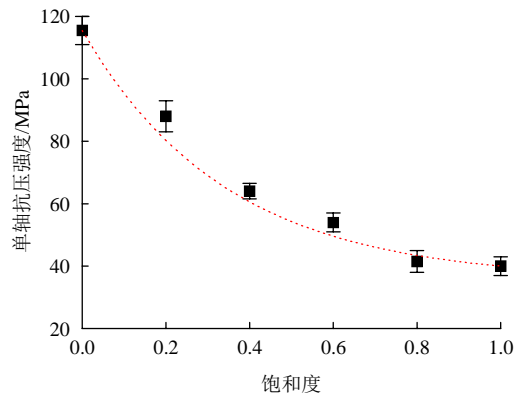


图 5 岩样单轴抗压强度与饱和度的关系

Fig.5 Relationship between uniaxial compressive strength and saturation

(2) 单轴压缩弹性模量

岩样的弹性模量随着饱和度的增大而降低。弹性模量的变化没有明显的阶段性，基本呈线性降低的趋势(见图 6)。

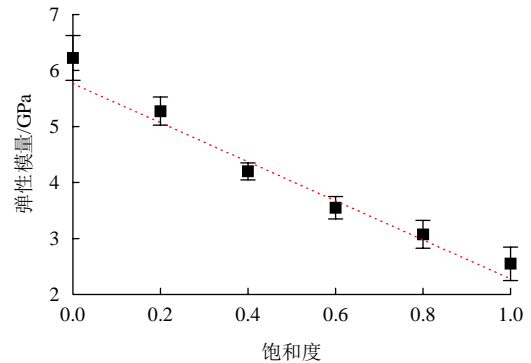


图 6 岩样单轴压缩弹性模量与饱和度的关系

Fig.6 Relationship between elastic modulus and degree of saturation

(3) 抗拉强度

泥质粉砂岩的抗拉强度随着饱和度增加而降低，其变化趋势与单轴抗压强度变化趋势基本一致，即降低速率先快后慢。40% 饱和度同样可作为其速率变化的分界点，从干燥状态到饱和度为 40%，岩样的抗拉强度相较于干燥状态下降了 46.5%；饱和度从 40% 开始，岩样抗拉强度的下降趋势逐渐变缓；饱和度达到 60% 之后，岩样的抗拉强度基本稳定(见图 7)。饱和状态下岩样的抗拉强度损失(干燥强度与饱和度强度的差值与干燥强度之比)约 74.2%，其中约 62.6% 的强度损失发生在低含水率(饱和度小于

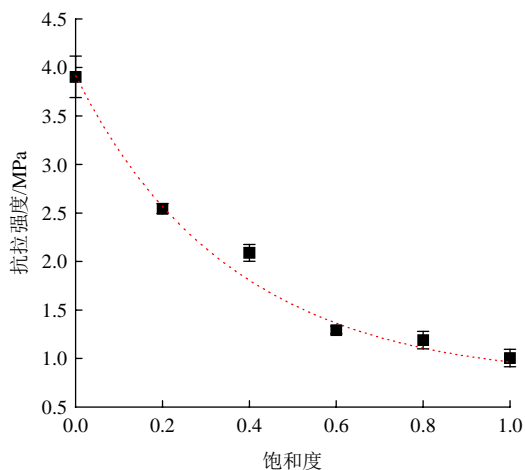


图 7 岩样抗拉强度与饱和度的关系

Fig.7 Relationship between tensile strength and degree of saturation

40%)的情况下；饱和度从 60%到完全饱和，其抗拉强度损失仅为约 10.0%。

(4) 饱和度对岩石抗拉、抗压强度影响的对比分析

岩样吸水后抗压强度和抗拉强度的衰减反映了水对其结构在不同方向上的软化效应。为了更全面地体现水的软化效应，引用“软化系数”的概念^[22]，其计算公式如下：

$$K_{C/T} = \frac{\sigma_s}{\sigma_d} \quad (2)$$

式中： K_C 、 K_T 分别为岩石的抗压和抗拉软化系数； σ_d 为干燥试样的抗压/抗拉强度(MPa)； σ_s 为试样在不同饱和度下的抗压/抗拉强度(MPa)。

由图 8 可知，泥质粉砂岩抗拉强度和抗压强度软化系数的变化趋势基本一致，但抗拉强度对水的软化效应更为敏感。

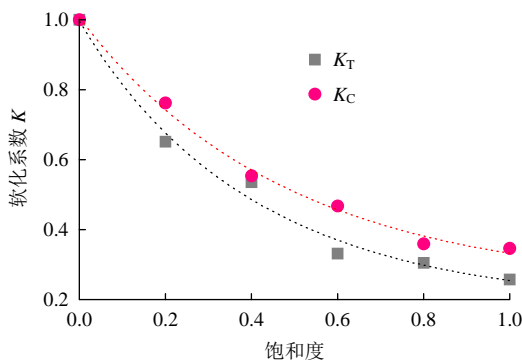


图 8 岩样软化系数与饱和度的关系

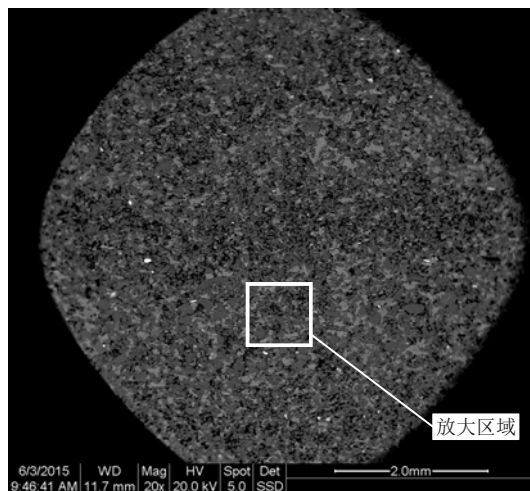
Fig.8 Relationships between softening coefficients and degree of saturation

综上所述，孔隙水对泥质粉砂岩力学性质的软

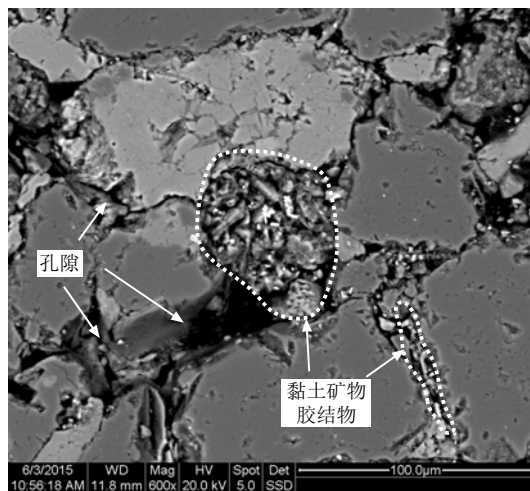
化效应明显。尤其需要注意的是，超过 60%的强度损失(抗压强度损失 68.2%、抗拉强度损失 62.6%)发生在低饱和度的状态下(40%以下)。岩石自然状态下的饱和度一般在 30%左右，其值达到 40%并不困难(短时间浸泡或较高的空气湿度条件即可)，意味着岩石含水状态的正常波动正处于强度快速衰减的饱和度范围内，这对工程是及其不利的。因此，需要对上述现象产生的微(细)观机制进行分析。

3.3 岩石微观孔隙结构

通过统计 SEM 图像中孔隙的长轴倾角，可对岩石孔隙结构的均匀性进行评价。此外，由于用于扫描电镜观察的 3 块样品在空间相互垂直，其结果可在一定程度上反映岩石孔隙结构的各向异性。3 个样品的 SEM 图像统计结果基本一致，此处任取 1 图为例，由图 9(a)可见，岩石的孔隙结构均匀，结构



(a) 20X



(b) 600X

图 9 岩样细观、微观结构示意图

Fig.9 Mesoscopic and microscopic structures of argillaceous siltstone

接近于各向同性。这与肉眼观察岩石无明显层理一致。图 9(b)为一随机视域内的典型孔隙结构。石英、长石、方解石等矿物组成岩石骨架；较大的孔隙被起胶结作用的黏土矿物充填，其与未被充填的孔隙共同构成了孔隙体系。

4 饱和度对岩石物理、力学性质影响的微(细)观机制

4.1 试样的吸水、脱水过程分析

根据孔隙的尺寸，可将其分为微孔(Micro-pores)、介孔(Meso-pores)和大孔(Macro-pores)。孔径小于 0.1 μm 的孔称为微孔，孔径介于 0.1~1 000 μm 的孔归为介孔，将孔径 1 000 μm 以上的孔归为大孔^[23]。大孔中的水为重力水，其运移受重力控制，遵循达西定律；介孔中的水一般认为以毛细水为主，但在尺寸接近大孔的孔隙内也混合着部分重力水；微孔中的水以结合水(也称吸附水)为主，但在尺寸接近介孔的孔隙内也有部分毛细水。此外，几乎在所有的矿物颗粒表面，都存在结合水膜，贴近矿物颗粒表面的为强结合水，向外随着对水束缚力的减弱，逐渐变为弱结合水，最终成为自由水^[24]。结合水膜的厚度很薄，占总含水量的比重很小，但却对岩石的物理、力学性质具有重要影响(详见下文分析)。对于含有黏土矿物的岩石来说，除了一部分水吸附于黏土矿物表面，还有部分水分进入黏土矿物颗粒层间^[25]。

在真空抽气饱和的条件下，样品入水浸泡后，水分向样品内部迁移的驱动力主要有毛细力、表面吸附力、渗透压及大气负压等。由于样品内部空气被抽出，加之大气负压的驱动，样品在入水初期的吸水速率要明显大于自然浸水饱和条件下^[13]。样品

吸水初期，大孔及介孔迅速被水填充，大孔中的黏土矿物也随之吸水膨胀；此后样品饱和度缓慢上升的过程应为水进入微孔和内部黏土矿物吸水的过程(见图 10(a))。

脱水过程中，大孔隙中的自由水最容易失去，其次是小孔隙中的自由水和毛细水，之后是弱结合水、以及黏土矿物颗粒中的层间水，强结合水在常温条件下很难散失。样品脱水过程可分为 3 个阶段：

(1) 脱水初期，在样品内外蒸汽压差的驱动下，大孔中自由水由内向外迁移，并在表面汽化散失，但与大孔相连的毛细孔和部分微孔中的水分也随即向大孔迁移，因此该阶段内散失的水分应主要为毛细孔和部分微孔中的水分(见图 10(b))；(2) 脱水的第二阶段为大孔中自由水的散失，当毛细孔和部分微孔中的水分不足以补充表面水分的散失时，自由水开始脱去，大孔中自由水面逐渐由表面向内部消退，在消退的自由水锋面以外，孔壁上残留结合水膜(见图 10(c))；(3) 在脱水的第三阶段，矿物颗粒表面的结合水、黏土矿物颗粒内部的层间水散失，其主要以水蒸气的形式由内向外逸散(见图 10(d))。

4.2 脱水过程中岩样尺寸和波速变化的微(细)观机制

(1) 脱水过程中岩样尺寸变化的微(细)观机制

对于含有膨胀性黏土矿物的泥质粉砂岩来讲，引起其吸水后膨胀的微观机制主要有以下 2 个：黏土矿物颗粒自身吸水导致的层间膨胀(或称晶层膨胀，crystalline swelling)；黏土矿物颗粒表面结合水膜变厚导致的粒间膨胀(或称渗透膨胀，osmotic swelling)^[24]。前一类机制已被广泛的接受和探讨，此处不再赘述。后一类机制则是基于双电层理论，相邻黏土矿物颗粒间的空间成为离子浓度较高的区域，其与周围溶液之间离子浓度的差异驱动水分子进入该空间，从而将相邻颗粒撑开。此外，已有研

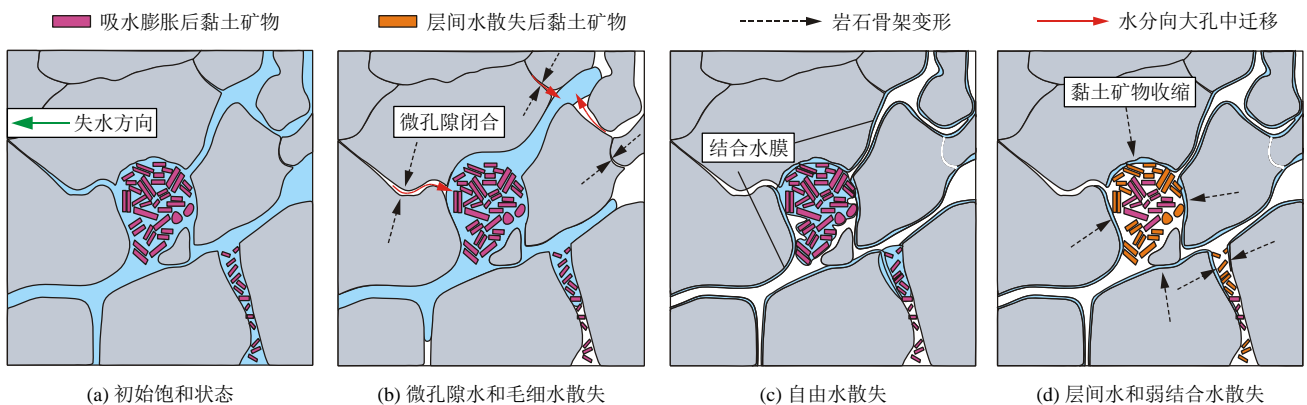


图 10 岩样脱水过程示意图(非真实比例，孔隙结构依据图 9 抽象而成)

Fig.10 Diagram of the decontamination process of argillaceous siltstone(no scale, the pore structure is abstracted from Fig.9)

究表明不含黏土矿物的岩石在吸水后同样会发生体积膨胀^[26]。通常将这类膨胀其归结为“分离压”(disjoining pressure)的作用。上述 3 种机制中,若比较其引起样品体积变化的能力,黏土矿物层间膨胀要显著大于粒间膨胀,后者则一般大于分离压。

岩样尺寸的阶段性变化趋势与脱水过程中的不同阶段相对应。如前文所述,在脱水初期散失的水分主要为毛细孔和部分微孔中的水分(见图 10(b)),这部分水的散失导致分离压的降低,引起样品的收缩(见图 3 中阶段一);在脱水的第二阶段(见图 10(c)),自由水的散失并不会引起样品尺寸的显著变化(见图 3 中阶段二);矿物颗粒表面的弱结合水、黏土矿物颗粒内部的层间水的散失主要发生在脱水的第三阶段(见图 1(d)),导致黏土矿物颗粒体积收缩、颗粒间距离拉近,从而造成样品尺寸显著的减小(见图 3 中阶段三);随着脱水过程的持续,孔壁上(尤其是微孔)吸附的弱结合水等继续散失,会导致样品尺寸的进一步收缩(见图 3 中阶段四)。

综上,样品失水过程中体积的收缩主要由黏土矿物层间水散失引起(约占总收缩量的 50%,见图 3),该过程发生于脱水的中后期,在孔隙中的自由水散失之后。

(2) 脱水过程中岩样纵波波速变化的微(细)观机制

真空抽气饱和后,岩样处于完全饱水状态下。岩石的孔隙空间充满水和膨胀的黏土矿物,弹性波通过岩石骨架、黏土矿物和水的耦合体进行传播。

由上文知,饱和度由 100%降低至 65%的过程中孔隙内的毛细水、自由水逐渐逸出,空气逐渐进入孔隙。此时,水-气界面的存在增大了波的反射幅,使得波速显著降低^[27]。此外,在进行弹性波测试时,孔隙内尚未逸出的自由水不能随岩石骨架同步振动,弹性波传播“路径”变长,同样会导致波速降低^[28]。上述 2 个机制对波速影响显著,波速降到最低。

随着脱水的进行(65%~25%),孔隙内的自由水完全逸出,弹性波传播过程中自由水与岩石骨架的振动不同步现象消失,波速增加。此阶段矿物颗粒表面的弱结合水、黏土矿物颗粒内部的层间水逐渐散失,岩石骨架收缩,孔隙空间减小,导致岩石的弹性模量逐渐增大,这是纵波波速增大的另外一个原因^[29-30]。

4.3 饱和度对岩石力学性质影响的微观机制

笔者认为,孔隙水(包括黏土矿物颗粒层间水)

对泥质粉砂岩产生软化效应的,潜在的微(细)观机制可分为 2 类:一类为荷载依赖性机制,即其只有在外部或内部荷载状态发生变化时才会产生软化效应,若无荷载状态的变化这类机制所涉及的过程往往是可逆的;另一类为非荷载依赖性机制,即这类机制的软化效应与荷载状态是否变化无关,且往往是不可逆的。下面分别介绍各类机制产生软化效应的条件,并对不同含水状态下岩石软化的控制性机制进行探讨。

(1) 各类机制产生软化效应的条件分析

① 荷载依赖性机制

荷载依赖性机制主要包括孔隙水压力变化、孔隙水的流动、结合水膜的润滑、Rhebinder 效应等软化机制。

饱和度较高的岩石在荷载状态发生变化时,岩石骨架发生变形,孔隙空间被压缩或拉伸。当孔隙空间小于孔隙内水(主要指自由水)的体积时,由于水本身具有不可压缩性,因此受到挤压的水会有流动的趋势。在连通性差的孔隙网络中,孔隙水受到挤压会导致孔隙水压力升高。对于孔隙来说,内部水压力的作用相当于向外的拉应力,会加剧孔隙(裂隙)端部的拉应力集中,进而促进裂隙的扩展。当孔隙水压力足够大时,甚至可以引起“水压致裂效应”,导致新的裂隙的产生。上述微观过程均会导致岩石宏观力学性质的衰减。而在连通性好的孔隙网络中,受压孔隙水的流动会导致水压力的重分布(由高压区流向低压区),削弱孔隙水压力的局部集中,并对岩石骨架施加一个动水压力,从而减小岩石骨架变形的阻力。这一过程可解释宏观上岩石弹性模量的降低。

对于饱和度低的岩石,其内部的自由水含量低,孔隙水主要以结合水为主(当含有黏土矿物时还有部分层间水)。岩石荷载状态发生变化时,孔隙空间被压缩或拉伸。当孔隙发生闭合时,两侧孔壁直接接触,此时结合水膜(弱结合水具有一部分液态水的性质)的存在将显著降低两者之间的摩擦剪切强度,类似于 2 块弹性板之间增加了润滑层。这一机制的有效性尚需要实验验证。

此外,水作为一种表面活性介质,若吸附于裂隙端部(由于裂隙端部曲率很大,该位置处吸附水与孔壁上的吸附水性质会有所不同)将会显著降低其断裂能^[31],从而降低裂隙扩展的应力门槛,在宏观上表现岩石强度的降低。这一机制被称为 Rhebinder 效应。

综上, 荷载依赖性机制产生软化效应的前提条件是岩石荷载状态发生改变。孔隙中含水量的多少决定着何种机制起主导作用。若岩石恢复至干燥状态, 上述软化机制也将不具备作用条件。

② 非荷载依赖性机制

非荷载依赖性机制主要包括以黏土矿物的水化作用为基础的软化机制, 以及以可溶性矿物的溶蚀为基础的软化机制。

黏土矿物水化作用导致层间膨胀和粒间膨胀的产生, 在岩石骨架的约束下将产生膨胀力作用于岩石骨架。若膨胀力足够大将导致已有裂隙的扩展和新裂隙的产生。膨胀力的大小主要取决于膨胀性黏土矿物的种类和含量。此外, 由于黏土矿物的胀缩是可逆的, 在岩石干湿循环的条件下, 膨胀力也会反复作用于岩石骨架, 进而产生疲劳损伤。

可溶性矿物的溶蚀同样发生在岩石吸水过程中, 其会直接导致岩石骨架物质的损失, 及孔隙形状的改变。该过程对岩石软化的程度决定于孔隙水的溶蚀性、孔隙水的渗流状态、易溶盐的含量等因素。

综上所述, 这类机制发生于岩石吸水过程中, 即发生于岩石力学测试之前, 因而与其荷载状态是否变化无关。黏土矿物水化作用产生的软化效应主要体现为岩石骨架中微裂隙的扩展; 而可溶性矿物的溶蚀产生的软化效应主要表现为岩石骨架物质的损失。两者对岩石骨架的损伤均是不可逆的。

(2) 不同含水状态下岩石软化的控制性机制

由于岩样先经历了饱和过程, 非荷载依赖性软化机制对其造成的损伤已经产生, 各饱和度下岩样均含有这部分损伤。因此, 下文的讨论将不涉及层间水对岩石强度的软化效应。在不同的含水状态下, 这部分损伤与荷载依赖性软化机制发生耦合作用, 进一步降低岩石的强度。

由节 3.2 中的试验数据可见, 饱和度较低的岩样(从干燥状态到饱和度为 40%)其强度衰减较快。结合对岩石吸脱水过程的分析和尺寸变化的测量结果, 该阶段岩石内孔隙水类型主要为结合水和黏土矿物内部的层间水。因此, 该区间其主导作用的软化机制应是结合水膜的润滑效应。饱和度处于 40%~80% 区间内的岩样, 其内孔隙水以自由水和毛细水为主。该区间岩石强度的衰减机制除了由结合水膜的润滑效应外, 还应考虑孔隙水压力潜在的致裂作用、孔隙水受压流动的润滑剂效应。接近饱和的岩样(饱和度大于 80%), 其内孔隙水除自由水、毛细

水、结合水、黏土矿物内部的层间水外, 微裂隙(微孔隙)中也部分或全部充满水。该区间岩石强度衰减的原因除了上述软化机制外, 还应考虑微裂隙端部吸附水的 Rhebinder 效应。

综上所述, 泥质粉砂岩在低饱和度下强度的显著衰减, 除了由于黏土矿物的水化及可溶性矿物的溶蚀产生的岩石骨架的损伤外, 在外荷载变化的过程中, 结合水膜的润滑效应是另外一个重要原因。而加载过程中孔隙水压力的变化对岩石强度的软化效应并不显著, 这与 A. B. Hawkins 和 B. J. McConnell^[6]的试验结果相一致(饱和砂岩在单轴压缩过程中最大的孔隙水压力仅 1.3 kPa 左右, 大部分样品在压缩过程中孔隙水压力几乎没有增加)。

5 结 论

本文对含水量影响下泥质粉砂岩物理、力学性质变化的宏观特征进行了试验研究, 并对上述变化的微(细)观机制进行了探讨, 主要得到以下结论:

(1) 在脱水过程中, 泥质粉砂岩尺寸的变化表现出明显的“四阶段”减小趋势, 其中饱和度在 100% 降至 85% 和从 55% 降至 40% 左右范围内, 直径和高度快速降低, 其余饱和度范围内尺寸下降缓慢; 脱水过程中纵波波速呈现先减小后增加的趋势, 极小值出现在饱和度 65% 左右。

(2) 泥质粉砂岩强度和弹性模量均随含水量的增加而降低, 且超过 60% 的强度损失(抗压强度损失 68.2%、抗拉强度损失 62.6%)发生在低饱和度的状态下(40% 以下)。

(3) 泥质粉砂岩尺寸的阶段性变化趋势与脱水过程中的不同阶段相对应。脱水初期毛细孔和部分微孔中的水分散失, 分离压降低, 引起样品收缩; 脱水中期大孔中自由水散失, 岩样尺寸无显著变化; 脱水后期岩石内的层间水、弱结合水散失, 岩样尺寸显著减小。

(4) 泥质粉砂岩纵波波速的变化趋势受孔隙水含量和赋存状态的控制。岩样脱水前期(饱和度由 100% 至 65%), 水-气界面的出现, 以及弹性波在水、岩中振动不同步导致波速呈下降趋势; 脱水后期(饱和度由 65% 至 25%), 随着弹性波振动不同步现象消失, 以及岩石骨架收缩导致弹性模量增大, 波速呈增加趋势。

(5) 泥质粉砂岩在低饱和度下强度的显著衰减, 除了由于黏土矿物的水化及可溶性矿物的溶蚀

产生的岩石骨架的损伤外, 在外荷载变化的过程中, 结合水膜的润滑效应是另外一个重要原因。

参考文献(References):

- [1] 高秀君, 大久保誠介, 福井勝則, 等. 三峡库区滑坡地带岩石特性的研究[J]. 地球与环境, 2005, 33(3): 125 - 131.(GAO Xiujun, OKUBO Seisuke, FUKUI Katsunori, et al. Characteristics of rocks in the landslide area around the Three Gorges reservoir[J]. Earth and Environment, 2005, 33(3): 125 - 131.(in Chinese))
- [2] 黄宏伟, 车平. 泥岩遇水软化微观机理研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2007, 35(7): 866 - 870.(HUANG Hongwei, CHE Ping. Research on micro-mechanism of softening and argillitization of sandstone[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2007, 35(7): 866 - 870.(in Chinese))
- [3] 何满潮, 景海河, 孙晓明. 软岩工程力学[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 1 - 2.(HE Manchao, JING Haihe, SUN Xiaoming. Engineering mechanics of soft rock[M]. Beijing: Science Press, 2002: 1 - 2.(in Chinese))
- [4] 刘光廷, 胡昱, 李鹏辉. 软岩遇水软化膨胀特性及其对拱坝的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9): 1 729 - 1 734.(LIU Guangting, HU Yu, LI Penghui. Behavior of soaking rock and its effect on design of arch dam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(9): 1 729 - 1 734.(in Chinese))
- [5] BURSHEIN L S. Effect of moisture on the strength and deformability of sandstone[J]. Soviet Mining, 1969, 5(5): 573 - 576.
- [6] HAWKINS A B, MCCONNELL B J. Sensitivity of sandstone strength and deformability to changes in moisture content[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology, 1992, 25(2): 115 - 130.
- [7] 朱珍德, 邢福东, 王思敬, 等. 地下水对泥板岩强度软化的损伤力学分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(增 2): 4 739 - 4 743.(ZHU Zhende, XING Fudong, WANG Sijing, et al. Analysis on strength softening of argillite under groundwater by damage mechanics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(Supp.2): 4 739 - 4 743.(in Chinese))
- [8] VÁSÁRHELYI B, VÁN P. Influence of water content on the strength of rock[J]. Engineering Geology, 2006, 84(1/2): 70 - 74.
- [9] ERGULER Z A, ULUSAY R. Water-induced variations in mechanical properties of clay-bearing rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(2): 355 - 370.
- [10] 熊德国, 赵忠明, 苏承东, 等. 饱水对煤系地层岩石力学性质影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(5): 998 - 1 006.(XIONG Deguo, ZHAO Zhongming, SU Chengdong, et al. Experimental study of effect of water-saturated state on mechanical properties of rock in coal measure strata[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(5): 998 - 1 006.(in Chinese))
- [11] ROY D G, SINGH T N, KODIKARA J, et al. Effect of water saturation on the fracture and mechanical properties of sedimentary rocks[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, 50(10): 2 585 - 2 600.
- [12] HAN D, NUR A, MORGAN D. Effect of porosity and clay content on wave velocity in sandstones[J]. Geophysics, 1986, 51(11): 2 093 - 2 107.
- [13] 何满潮, 周莉, 李德建, 等. 深井泥岩吸水特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(6): 1 113 - 1 120.(HE Manchao, ZHOU Li, LI Dejian, et al. Experimental research on hydrophilic characteristics on mudstone in deep wall[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(6): 1 113 - 1 120.(in Chinese))
- [14] 左清军, 吴立, 袁青, 等. 软板岩膨胀特性试验及微观机制分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(4): 986 - 990.(ZUO Qingjun, WU LI, YUAN Qing, et al. Swelling characteristics test and micro mechanism of soft slate[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(4): 986 - 990.(in Chinese))
- [15] 王幼麟, 蒋顺清. 葛洲坝工程某些粉砂岩软化和崩解的微观特性[J]. 岩石力学与工程学报, 1990, 9(1): 48 - 57.(WANG Youlin, JIANG Shunqing. A study of mechanism of softening and slaking of some siltstones in the foundation of Gezhouba Project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1990, 9(1): 48 - 57.(in Chinese))
- [16] HADIZADEH J, LAW R D. Water-weakening of sandstone and quartzite deformed at various stress and strain rates[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1991, 28(5): 431 - 439.
- [17] 周翠英, 谭祥韶, 邓毅梅, 等. 特殊软岩软化的微观机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(3): 394 - 400.(ZHOU Cuiying, TAN Xiangshao, DENG Yimei, et al. Research on softening of micro-mechanism of physical soft rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(3): 394 - 400.(in Chinese))
- [18] 杨春和, 冒海军, 王学潮, 等. 板岩遇水软化的微观结构及力学特性研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(12): 2 090 - 2 098.(YANG Chunhe, MAO Haijun, WANG Xuechao, et al. Study on variation of microstructure and mechanical properties of water-weakening slates[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(12): 2 090 - 2 098.(in Chinese))
- [19] 冒海军, 郭印同, 王光进, 等. 黏土矿物组构对水化作用影响评价[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2 723 - 2 728.(MAO Haijun, GUO Yintong, WANG Guangjin, et al. Evaluation of impact of clay mineral fabrics on hydration process[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(9): 2 723 - 2 728.(in Chinese))

- [20] 柴肇云, 郭卫卫, 陈维毅, 等. 泥岩孔隙分布特征及其对吸水性的影响[J]. 煤炭学报, 2012, 37(增 1): 75 - 80.(CHAI Zhaoyun, GUO Weiwei, CHEN Weiyi, et al. Distribution characteristics of mudstone pore-fracture and its influence on absorption[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(Supp.1): 75 - 80.(in Chinese))
- [21] 中华人民共和国行业标准编写组. DL T 5368—2007 水利水电工程岩石试验规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 2007.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. DL T 5368 — 2007 Code for rock tests of hydroelectric and water conservancy engineering[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2007.(in Chinese))
- [22] 谢和平, 陈中辉. 岩石力学[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 45 - 49.(XIE Heping, CHEN Zhonghui. Rock mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2004: 45 - 49.(in Chinese))
- [23] RUEDRUCH J, SIEGESMUND S. Fabric dependence of length change behaviour induced by ice crystallization in the pore space of natural building stones[C]// FORT R, ALVAREZ DE BUERGO M, GOMEZ-HERAS M, et al, ed. Heritage, Weathering and Conservation. London: Taylor and Francis Group, 2006: 497 - 505.
- [24] LAIRD D A. Influence of layer charge on swelling of smectites[J]. Applied Clay Science, 2006, 34(1): 74 - 87.
- [25] NORRISH K. The swelling of montmorillonite[J]. Discussions of the Faraday Society, 1954, 18: 120 - 134.
- [26] SCHULT A, SHI G. Hydration swelling of crystalline rocks[J]. Geophysical Journal International, 1997, 131(1): 179 - 186.
- [27] DOMENICO S N. Effect of water saturation on seismic reflectivity of sand reservoirs encased in shale[J]. Geophysics, 2012, 39(6): 759 - 769.
- [28] 邓华锋, 原先凡, 李建林, 等. 饱水度对砂岩纵波波速及强度影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(8): 1 625 - 1 631. (DENG Huafeng, YUAN Xianfan, LI Jianlin, et al. Experimental research on influence of saturation degree on sandstone longitudinal wave velocity and strength[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(8): 1 625 - 1 631.(in Chinese))
- [29] 姚增, 赵平芳, 邱新红. 不同测试方法的纵波波速与静弹模量的相关研究[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 1991, (3): 126 - 130. (YAO Zeng, ZHAO Pingfang, QIU Xinhong. Research on correlation between p-wave velocity and static modulus of different test methods[J]. Journal of Lanzhou University: Natural Science, 1991, (3): 126 - 130.(in Chinese))
- [30] 李洁. 岩石声学特性影响因素的实验研究[硕士学位论文][D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2008.(LI Jie. Experimental research on the affection factors of the rock's sound wave character[M. S. Thesis][D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2008.(in Chinese))
- [31] REHBINDER P A, LICHTMAN V. Effect of surface active media on strains and rupture in solids[C]// Proceedings of the Second International Congress of Surface Activity. [S. l.]: [s. n.], 1957: 563 - 580.