

砂岩弹塑性力学特性的水物理化学作用效应—— 试验研究与本构模型

刘 建, 乔丽苹, 李 鹏

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要: 针对干燥、饱水、蒸馏水以及不同离子浓度和 pH 值水溶液循环流动作用至水-岩反应平衡后的砂岩试件, 开展一系列单轴压缩试验和 CT 损伤测试, 获得这些不同状态及水溶液作用后砂岩试件的应力-应变关系全过程曲线和 CT 扫描结果; 分别研究砂岩弹塑性力学特性包括应力-应变关系、弹性模量、峰值强度及残余强度的水物理作用和水化学作用效应与机制; 基于 CT 检测结果开展相应的水物理化学损伤分析; 在此基础上, 通过分析水物理化学作用对砂岩应力-应变关系的影响特征与规律, 探讨并采用改进的 Duncan 模型来描述存在水物理化学作用效应的砂岩非线性弹性变形行为。研究结果对于水-岩相互作用及相关领域的理论与应用研究, 具有良好的促进与借鉴作用。

关键词: 岩石力学; 砂岩; 弹塑性力学特性; 水物理化学作用; 试验研究; 损伤分析; 本构模型

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2009)01-0020-10

EXPERIMENTAL STUDIES AND CONSTITUTIVE MODEL OF ELASTOPLASTIC MECHANICAL BEHAVIORS OF SANDSTONE WITH HYDRO-PHYSICOCHEMICAL INFLUENCING EFFECTS

LIU Jian, QIAO Liping, LI Peng

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: A series of uniaxial compression tests and computerized tomography(CT) scanning tests on dry, saturated sandstones, and the sandstones with hydro-physicochemical influencing effects due to the circulating flow of distilled water and different hydro-chemical solutions are conducted. The corresponding complete stress-strain curves and CT scanning results are obtained. The hydrophysical and hydrochemical influencing effects on the elastoplastic mechanical behaviors of sandstone, such as stress-strain relationship, elastic modulus, peak strength and residual strength are derived. The hydrophysical and hydrochemical influencing mechanisms of water-sandstone interaction are studied. The hydro-physicochemical damages of sandstones are analyzed based on the CT scanning results. The modified Duncan model is used to describe the mechanical behaviors of sandstones with different hydro-physicochemical influencing effects. This study has a useful reference to the theoretical and applied research in the field of water-rock interaction.

Key words: rock mechanics; sandstone; elastoplastic mechanical behaviors; hydro-physicochemical effects; experimental study; damage analysis; constitutive model

收稿日期: 2008-06-11; **修回日期:** 2008-09-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40672192, 50479072); 国家自然科学基金重点项目(50539090); 湖北省自然科学基金项目(2007ABB040)

作者简介: 刘 建(1966-), 男, 博士, 1987年毕业于湖南科技大学, 现任研究员、博士生导师, 主要从事岩土力学与工程的理论与应用方面的研究工作。E-mail: jliu@whrsm.ac.cn

1 引言

地下水通过孔隙静、动水压力影响岩体的应力状态, 而应力状态的改变又会通过介质颗粒间的孔隙或裂隙面几何形状的变化来影响介质的水力特性, 这种相互作用构成了岩体应力 - 渗流两场耦合问题, 近年来已引起广泛的关注。然而, 地下水对岩体不只具有上述力学作用, 还存在着复杂的物理化学作用, 后者通过对岩石中矿物颗粒接触性状以及结构与成分的不断改变, 可成为影响岩体力学性质的重要因素。对遇水后强度降低的岩石, 水物理化学作用是造成其损伤的一个重要原因, 有时它比力学因素造成的损伤更为严重^[1~18]。因此, 水对岩体的作用不能仅从有效应力原理来考虑, 还应考虑水物理化学作用对其弹塑性力学特性的影响效应。长期以来, 针对岩体力学特性的水物理化学作用效应所开展的研究, 与其对工程安全所产生的潜在危害相比是很不充分的。本文就这一问题开展了深入细致和定量化的研究, 不但可以丰富岩石力学理论, 而且对于存在水物理化学作用效应的岩体工程稳定性、石油工程井壁稳定与提高开采率、核废料储存库安全以及环境工程中的污染物处置等问题均具有良好的应用价值。

水 - 岩物理作用包括水对岩体介质的润滑、软化、泥化、结合水强化以及冲刷运移等。J. M. Logan 和 M. I. Blackwell^[1]发现水的存在使砂岩的内摩擦因数降低 15%。C. G. Dyke 和 L. Dobereiner^[2]对石英砂屑岩的试验研究表明, 岩石强度越低, 对含水量反应越敏感。A. B. Hawkins 和 B. J. McConnell^[3]对分布于英国的 35 种砂岩分别进行了干燥和饱和状态下的单轴抗压强度试验, 发现不同砂岩的强度损失为 8.2%~78.1%, 平均为 31.0%, 且加载过程中孔隙水压力的变化对其强度的衰减影响不大。李炳乾^[4]分析了地下水对岩石弹性性质、变形过程和摩擦特性的影响。陈钢林和周仁德^[5]的研究表明: 饱水砂岩单轴抗压强度和弹性模量可分别衰减至自然状态时的 20.2%和 33.3%; 花岗闪长岩单轴抗压强度和弹性模量可分别衰减至自然状态时的 64.4%和 77.4%。康红普^[6]以山东兖州煤矿泥岩的试验结果为基础, 提出了单轴抗压强度、弹性模量损失率与应力状态及含水率的关系式。此外, L. S. Burshtein 等^[7, 8]也曾就岩石强度与含水量关系开展过研究。

水 - 岩化学作用包括水与岩体介质之间的离子

交换、溶解、水化、水解、溶蚀、氧化还原等。水 - 岩化学作用可改变岩体介质的矿物成分与微观结构, 使其产生次生孔隙及溶蚀裂隙, 增加其孔隙度, 并进而改变其强度和刚度等宏观力学性质。В. И. Кузькин^[9]通过研究, 提出了白云质砂岩、石灰岩等沉积岩在不同负载状态和盐酸溶液作用时其强度衰减与作用时间的关系。J. Dunning 等^[10]得出水化学作用对岩石摩擦性质有重要影响的结论。L. J. Feucht 和 J. M. Logan^[11]研究了干燥、蒸馏水、不同离子浓度及 pH 值等水溶液对石英砂岩裂纹面摩擦因数和摩擦强度的影响。汤连生等^[12~14]对不同酸碱性及矿化度浸泡下的红砂岩、灰岩及花岗岩进行了单轴抗压强度试验, 并探讨了水 - 岩化学损伤的定量表述方法。冯夏庭和赖户政宏^[15]开展了化学腐蚀环境下岩石破裂、变形及强度特性的试验与机制研究。霍润科等^[16, 17]在试验基础上建立了砂岩在酸性环境下的化学损伤模型。

由于水 - 岩物理化学作用的复杂性, 上述已开展的研究工作, 或在水物理作用效应研究中未对水的初始酸碱度和离子浓度等水 - 岩化学作用影响作出必要的考虑; 或在水化学作用效应研究中, 未充分估计或分析其中所包含的水 - 岩物理作用效应。事实上, 自然界或工程中的水 - 岩物理化学作用往往是同时存在且并行发生的, 这就需要二者统一起来开展分析, 而且有必要从不同角度分别研究其各自的作用效应与机制。此外, 尽管关于岩石水化学损伤的定量描述已有少量研究, 但考虑水物理化学作用效应的本构模型研究, 迄今鲜见其研究进展的报道。

基于上述考虑, 本文在乔丽苹等^[18]已完成的砂岩水物理化学微细观损伤试验及理论分析基础上, 进一步针对干燥、饱水、蒸馏水以及不同离子浓度和 pH 值水溶液循环流动作用至水 - 岩反应平衡后的砂岩试件, 开展了一系列单轴压缩试验和 CT 损伤测试, 获得了这些不同状态及水溶液作用后砂岩试件的应力 - 应变关系全过程曲线和 CT 扫描结果; 分别研究了砂岩弹塑性力学特性包括应力 - 应变关系、弹性模量、峰值强度及残余强度的水物理作用和水化学作用效应与机制; 基于 CT 检测结果开展了相应的水物理化学损伤分析; 在此基础上, 通过分析水物理化学作用对砂岩应力 - 应变关系的影响特征与规律, 探讨并采用改进的 Duncan 模型来描述存在水物理化学作用效应的砂岩非线性弹性变形行为。本文的工作对水 - 岩相互作用及相关领

域的理论与应用研究,具有良好的促进与借鉴作用。

2 试验方法与过程

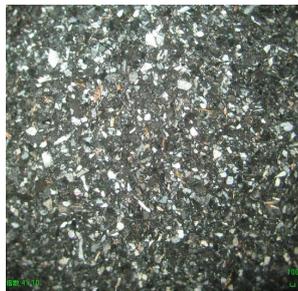
2.1 砂岩试件的制备与选择

试验所用试件为重庆市侏罗纪沙溪庙组砂岩。岩石矿物成分鉴定为嵌晶结构,接触孔隙式胶结细粒砂状结构。岩石由石英、长石、岩屑、云母及少量副矿物经绿泥石、石膏胶结组成。碎屑呈次圆状,粒径为 0.05~0.2 mm,个别达 0.25 mm。长石以正长石为主,部分长石晶粒中含有绿帘石、绿泥石包体。岩屑由基性火山岩、绿帘石石英片岩及绿泥石板岩屑组成。黑云母轻度变形伴有绿泥石化作用。次生石膏大晶粒中包含由碎屑组成的嵌晶胶结结构。主要矿物成分含量为石英 58.5%,长石 13.5%,绿泥石胶结物 10.0%,生物岩屑 18.0%。试件为细粒砂状结构,颗粒呈次棱角状至次圆状,呈点接触至线接触,致密均匀分布,其平均孔隙率与容重经过测定分别为 7.50%和 24.9 kN/m³。

考虑到试件的均匀性及成果的可比性等,试件在同一完整的岩块上切割加工而成,尺寸均采用 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的圆柱形标准试件。除去具有缺陷的试件,进而对试件进行声波波速测试,并将声波波速离散性大的试件剔除。图 1 为在干燥状态下随机选择的不同砂岩试件的显微结构照片,可以看出用于本次试验研究的试件均一性良好。



(a) 砂岩试件的显微结构照片 1



(b) 砂岩试件的显微结构照片 2

图 1 不同砂岩试件的显微结构照片

Fig.1 Microscopic-structure photos of different sandstone samples

2.2 水溶液配制方案

对大量资料的调研分析表明,构成地下水的阳离子主要为 Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , 阴离子主要包括 Cl^- , SO_4^{2-} 等。考虑到水溶液作用因素的典型性与代表性,同时根据本次研究的目的,设计如下 6 种水溶液配置方案来模拟实际的地下水环境:

水溶液 A: 蒸馏水条件,即离子浓度接近于 0,且酸碱度为中性($\text{pH} = 7$)。

水溶液 B: 阳离子种类组合为 Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , 离子浓度为 0.500 mol/L, $\text{pH} = 6$ 。

水溶液 C: 阳离子种类同上,离子浓度为 0.001 mol/L, $\text{pH} = 6$ 。

水溶液 D: 阳离子种类同上,离子浓度为 0.010 mol/L, $\text{pH} = 6$ 。

水溶液 E: 阳离子种类同上,离子浓度为 0.010 mol/L, $\text{pH} = 3$ 。

水溶液 F: 阳离子种类同上,离子浓度为 0.010 mol/L, $\text{pH} = 9$ 。

与上述 6 种水溶液配制方案相对应的研究目的分别为:(1) 蒸馏水条件:水-岩物理作用效应研究;(2) 酸碱度相同($\text{pH} = 6$)而离子浓度不同(0.500, 0.010, 0.001 mol/L)情况:砂岩弹塑性力学特性的离子浓度作用效应研究;(3) 离子浓度相同(0.010 mol/L)而酸碱度不同($\text{pH} = 3, 6, 9$)情况:砂岩弹塑性力学特性的酸碱度(pH 值)作用效应研究。

2.3 试验内容与过程

试验采用自行设计的循环水作用装置,试验中保持各装置中的水流循环速率为 150 L/h。试件在浸入水溶液前先以 45 °C 恒温烘干 48 h,然后在抽真空箱中按 0.1 MPa 压力抽真空 12 h,试件浸入水溶液后对水作用装置进行严格密封。

为了解砂岩在不同状态及水溶液作用后的损伤情况,分别对干燥、蒸馏水以及不同离子浓度和 pH 值水溶液循环流动作用至水-岩反应平衡后(180 d)的砂岩试件,以 45 °C 恒温烘干 48 h,再在 ProSpeed AII SYS 型双螺旋 CT 机上进行扫描,每个试件按等间距分 10 个扫描层,各扫描层均选择 3 个兴趣区域进行分析。

分别针对干燥、饱水、蒸馏水以及不同离子浓度和 pH 值水溶液循环流动作用至水-岩反应平衡后的砂岩试件,开展系统的单轴压缩试验。试验在 MTS 试验机上进行,加载速率为 0.002 MPa/s。其中,除干燥状态砂岩试验外,饱水状态(未经历循环

水溶液作用)和蒸馏水循环流动作用至水 - 岩反应平衡后的砂岩试件在单轴试验前都以蒸馏水、其他试件则均以其相应的水溶液采用抽真空方法强制饱和。此外, 为防止不同水溶液及蒸馏水饱和后的砂岩试件在试验中的水分蒸发, 同时避免干燥状态砂岩在试验中吸收空气中的水分, 试验前均用聚氯乙烯树脂和环己酮按质量比为 1 : 4 调和后, 用毛刷均匀薄抹于试件表面密封。

3 砂岩弹塑性力学特性的水物理作用效应与机制分析

用于单轴压缩试验的干燥状态砂岩试件未经过循环水溶液作用, 且试件中无水存在, 因此, 可将其试验结果作为基准或初始值, 用以分析饱水或不同水溶液作用后砂岩弹塑性力学性质的水物理化学作用效应。

表 1 给出了干燥、饱水(未经循环水溶液作用)和水溶液 A 循环流动作用至水 - 岩反应平衡(180 d)后砂岩试件的单轴压缩试验结果。由表 1 可见, 与干燥状态砂岩相比, 饱水和水溶液 A 循环流动作用后砂岩的弹性模量、峰值强度和残余强度值均出现不同程度的降低。饱水砂岩的弹性模量由干燥状态下的 16.460 GPa 降至 15.237 GPa, 峰值强度和残余强度则分别由 124.00 和 28.46 MPa 降至 105.00 和 21.52 MPa。其中, 弹性模量和峰值强度的下降百分率分别为 7.43%和 15.32%。

表 1 干燥、饱水和水溶液 A 循环流动作用后砂岩力学性质
Table 1 Mechanical properties of dry, saturated sandstones and sandstone with hydrophysical effects due to circulating flow of distilled water

状态与水溶液类型	峰值强度 σ_c /MPa	残余强度 σ_r /MPa	弹性模量 E /GPa	$\frac{\sigma_{c\text{干燥}} - \sigma_c}{\sigma_{c\text{干燥}}}/\%$	$\frac{E_{\text{干燥}} - E}{E_{\text{干燥}}}/\%$
干燥	124.00	28.46	16.460	0.00	0.00
饱水	105.00	21.52	15.237	15.32	7.43
水溶液 A	76.79	2.09	10.406	38.07	36.78

经过水溶液 A 循环流动作用后, 砂岩上述力学指标的降低更为明显, 其弹性模量、峰值强度和残余强度已分别降为 10.406 GPa, 76.79 MPa 和 2.09 MPa。而弹性模量和峰值强度的下降百分率则相应地增至 36.78%和 38.07%。

图 2 给出了干燥、饱水和水溶液 A 循环流动作用后砂岩应力 - 应变关系全过程曲线。为便于对砂岩应力 - 应变关系的水物理作用效应进行分析, 图 3 给出了岩石的典型全过程应力 - 应变关系曲线。

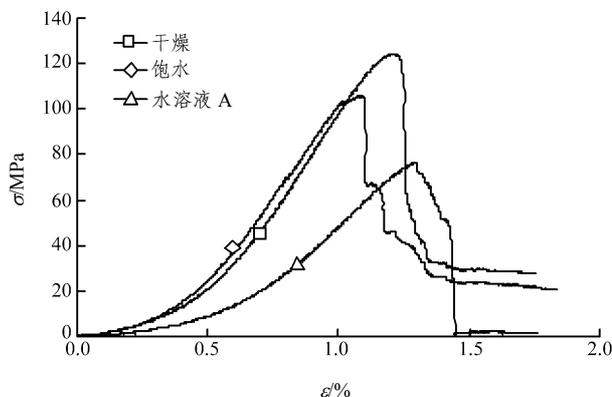


图 2 干燥、饱水和水溶液 A 循环流动作用后的砂岩应力 - 应变关系

Fig.2 Stress-strain relationship of dry, saturated sandstones and sandstone with hydrophysical effects due to circulating flow of distilled water

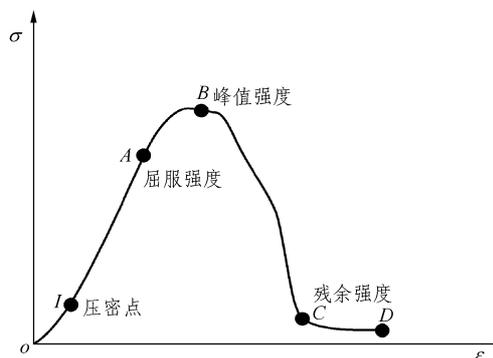


图 3 岩石的典型全过程应力 - 应变关系曲线

Fig.3 Typical complete stress-strain curve of rock

一般来说, 岩石的典型全过程应力 - 应变关系曲线可分为 5 个阶段(见图 3), 即: (1) 压密阶段(OI 段): 在开始施加轴向压力时, 试件体应变增加, 体积缩小, 岩石被压密, 大部分孔隙闭合。(2) 弹性变形阶段(IA 段): 体应变继续增加, 岩石表现出明显的线弹性。(3) 屈服阶段(AB 段): 体应变有一个极值, 这个极值对应的应力就是岩石抗压强度, 在此以前试件的体应变都在增大, 试件体积不断缩小。(4) 应变软化阶段(BC 段): 试件的横向变形迅速增加, 体应变开始减小, 试件体积增大, 到峰值时, 体应变趋于 0, 试件又恢复原来的体积。这个阶段岩石内部开始产生微裂隙, 且裂隙随载荷增加迅速扩展, 最终裂隙汇合贯通使岩石破裂。(5) 塑性流动阶段(CD 段): 试件破裂后, 岩石的承载能力

没有完全丧失，还具有一定的承载能力，强度减弱到残余强度。据此对图 2 进行分析，可发现如下特点：

(1) 无论是干燥、饱水还是水溶液 A 循环流动作用后砂岩试件的应力 - 应变关系全过程曲线均遵循上述 5 个典型发展阶段。

(2) 与干燥状态砂岩相比，饱水砂岩应力 - 应变关系全过程曲线中压密段的长度差别不大，但水溶液 A 循环流动作用后砂岩的压密段长度明显增加。

(3) 与干燥状态砂岩相比，饱水砂岩应力 - 应变关系全过程曲线中弹性变形段的斜率差别不大，而屈服强度、峰值强度和残余强度的减小相对明显。水溶液 A 循环流动作用后，砂岩应力 - 应变关系曲线的弹性变形段斜率、屈服强度、峰值强度和残余强度均出现明显减小。

上述试验结果表明，饱水和水溶液 A 循环流动作用后砂岩的弹塑性力学性质与干燥状态砂岩相比，存在较明显的差异，这种差异说明了水作用效应的存在不可忽视。其作用机制可结合图 4 来进行分析。

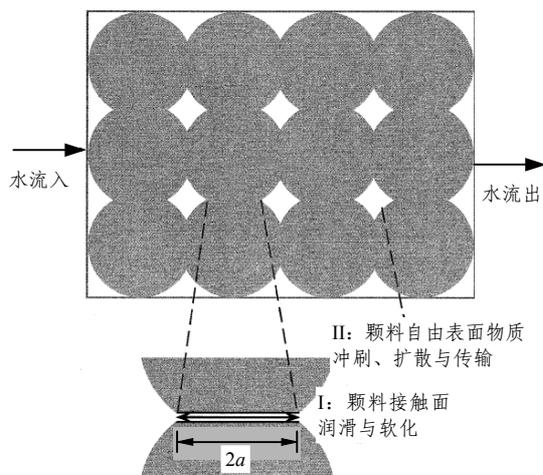


图 4 砂岩弹塑性力学特性的水物理作用机制示意图

Fig.4 Hydrophysical influencing mechanisms of elastoplastic mechanical behavior of sandstone

如前所述，饱水砂岩采用蒸馏水饱和且未经过水溶液循环流动作用，在单轴压缩试验中由于无侧限，其排水良好，可忽略孔隙水压力影响。因此，饱水砂岩弹塑性力学性质与干燥状态砂岩的差异，主要是由于水对砂岩中矿物颗粒间接触面或胶结物的润滑、软化作用，导致颗粒接触面摩擦因数和黏聚力降低引起的。该类水物理作用机制如图 4 中的 I 所示，它对于砂岩屈服强度、峰值强度和残余强

度降低的影响较为明显，而对应力 - 应变关系全过程曲线中压缩段的影响则不明显。

对于水溶液 A 循环流动作用后的砂岩试件而言，由于本试验中的循环水作用装置是严格密封的，水溶液中没有 CO₂ 的来源，同时考虑到蒸馏水溶液的酸碱度为中性，其 pH = 7，故可认为试件在蒸馏水循环流动作用过程中基本上未发生水化学作用。它在采用蒸馏水饱和并进行单轴压缩试验过程中，所表现出的弹塑性力学性质与干燥状态砂岩的差异之所以比饱水砂岩更为明显，是由于兼具了图 4 所示的 I 和 II 两类水物理作用机制，即：(1) 水对砂岩中矿物颗粒间接触面或胶结物的润滑、软化作用，使颗粒接触面摩擦因数和黏聚力降低；(2) 在蒸馏水循环流动作用过程中，砂岩矿物颗粒或胶结物自由表面上的物质，因水流冲刷、扩散或传输等作用，使其粒间孔隙增大，产生次生孔隙率，进而引起了砂岩微观结构的变化。II 是导致水溶液 A 循环流动作用后砂岩应力 - 应变关系全过程曲线中压密段长度明显增加的主要原因。

4 砂岩弹塑性力学特性的水化学作用效应与机制分析

4.1 砂岩弹塑性力学特性的水离子浓度作用效应

表 2 给出了不同水溶液循环流动作用至水 - 岩反应平衡(180 d)后砂岩试件的单轴压缩试验结果。水溶液 B, C, D 的 pH = 6，其酸碱度相同而离子浓度不同，可反映砂岩弹塑性力学性质的离子浓度作用效应。此外，节 3 的研究结果表明，水溶液 A 循环流动作用后的砂岩主要受水物理作用影响，虽然蒸馏水 pH = 7 略大于 6，但在某种程度上仍可

表 2 不同水溶液循环流动作用后砂岩的力学特性

Table 2 Mechanical properties of sandstones with hydro-physicochemical effects due to circulating flow of different hydrochemical solutions

水溶液类型	峰值强度 σ_c /MPa	残余强度 σ_r /MPa	弹性模量 E /GPa	$\frac{\sigma_{c-A} - \sigma_c}{\sigma_{c-A}} / \%$	$\frac{E_A - E}{E_A} / \%$
水溶液 A	76.79	2.09	10.406	0.00	0.00
水溶液 B	38.74	3.94	6.658	49.55	36.01
水溶液 C	57.24	1.20	13.093	25.46	-25.82
水溶液 D	54.63	1.55	11.475	28.86	-10.27
水溶液 E	50.67	3.62	9.373	34.02	9.93
水溶液 F	48.28	1.51	9.289	37.13	10.73

参照其单轴压缩试验结果, 对砂岩力学性质的水离子浓度作用效应进行分析。

由表 2 可知, 水溶液 B, C 和 D 循环流动作用后的砂岩峰值强度分别为 38.74, 57.24 和 54.63 MPa。与水溶液 A 作用后的砂岩试件相比, 水溶液 B, C 和 D 作用后砂岩的峰值强度分别降低了 49.55%, 25.46% 和 28.86%。总体上表现出水溶液离子浓度越高, 砂岩峰值强度则越小的规律。

从弹性模量来看, 水溶液 B, C 和 D 作用后的模量值分别为 6.658, 13.093 和 11.475 GPa, 亦呈现出水溶液离子浓度越高, 砂岩弹性模量越小的特点。但与水溶液 A 循环流动作用后的砂岩试件相比, 其弹性模量和残余强度相对离散, 未见有明显的规律, 究其原因, 可能是由于 pH 值差异、水物理化学作用的复杂性或试验误差所致。

图 5 给出了水溶液 B, C 和 D 循环流动作用后的砂岩应力 - 应变关系曲线。

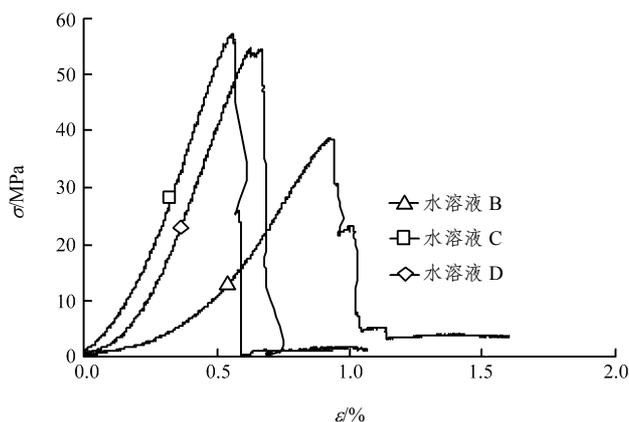


图 5 水溶液 B, C, D 循环流动作用后的砂岩应力 - 应变关系曲线

Fig.5 Stress-strain relation curves of sandstones with hydrophysicochemical effects due to circulating flow of hydrochemical solutions B, C, D

同样参照图 3 对其进行分析, 可获得如下规律:

(1) 不同离子浓度水溶液循环流动作用后砂岩试件的应力 - 应变关系全过程曲线亦遵循一般岩石所具有的 5 个典型发展阶段。

(2) 水溶液离子浓度越高, 则砂岩应力 - 应变关系曲线中的压密段越长。

(3) 水溶液离子浓度越高, 则砂岩应力 - 应变关系曲线的弹性变形段斜率、屈服强度和峰值强度降低越显著。

上述试验结果表明, 水溶液离子浓度对砂岩的弹塑性力学性质亦存在较为明显的影响效应。

4.2 砂岩弹塑性力学特性的酸碱度作用效应

表 2 给出了水溶液 A, D, E 和 F 循环流动作用后砂岩的力学特性。水溶液 D, E 和 F 的离子浓度均为 0.010 mol/L, 其离子浓度相同而酸碱度不同, 可反映砂岩弹塑性力学性质的酸碱度作用效应。

由表 2 可知, 水溶液 D(pH=6), E(pH=3)和 F(pH=9)循环流动作用后的砂岩峰值强度分别为 54.63, 50.67 和 48.28 MPa。与水溶液 A 作用后的砂岩试件相比, 水溶液 D, E 和 F 循环流动作用后砂岩的峰值强度分别降低了 28.86%, 34.02% 和 37.13%。总体上表现出水溶液的酸度或碱度越高, 砂岩峰值强度的降低则越大的规律。

从弹性模量来看, 经水溶液 D, E 和 F 循环流动作用后的模量值分别为 11.475, 9.373 和 9.289 GPa, 亦呈现出水溶液的酸度或碱度越高, 砂岩弹性模量越小的特点。与水溶液 A 循环流动作用后的砂岩试件相比, 其弹性模量和残余强度或减或增, 亦未见有明显的规律。

图 6 给出了水溶液 D, E, F 循环流动作用后的砂岩应力 - 应变关系曲线。

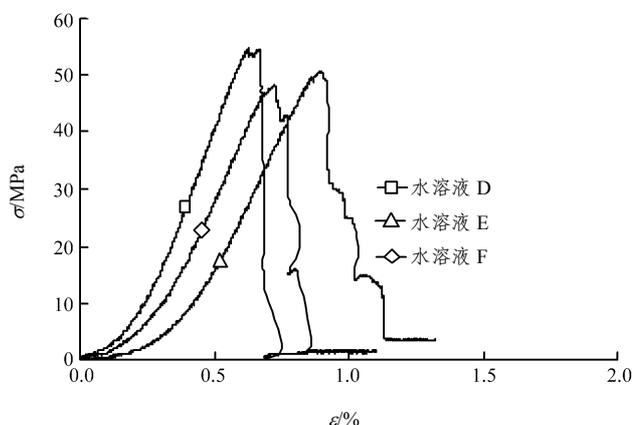


图 6 水溶液 D, E, F 循环流动作用后的砂岩应力 - 应变关系曲线

Fig.6 Stress-strain relation curves of sandstones with hydrophysicochemical effects due to circulating flow of hydrochemical solutions D, E, F

参照图 3 对其进行分析, 可获得如下规律:

(1) 不同酸碱度水溶液循环流动作用后砂岩试件的应力 - 应变关系全过程曲线均符合岩石的 5 个典型发展阶段。

(2) 水溶液酸度或碱度越高, 则砂岩应力 - 应变关系曲线中的压密段越长。

(3) 水溶液酸度或碱度越高, 则经水溶液循环流动作用后砂岩应力 - 应变关系曲线的弹性变形段斜率、屈服强度和峰值强度降低越显著。

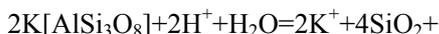
上述试验结果表明, 水溶液酸碱度对砂岩的弹塑性力学性质的影响效应明显。

4.3 砂岩弹塑性力学特性的水化学作用机制

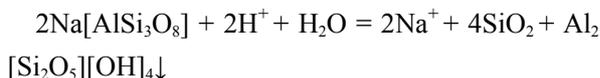
砂岩弹塑性力学特性的水化学作用机制相对较为复杂。本次试验所用重庆砂岩主要由石英、长石与岩屑胶结组成, 从它们物理化学性质的稳定性来看, 含量最多的石英最为稳定, 通常情况下不与水溶液发生化学反应; 各种岩屑(除硅质外)的物理化学性质最不稳定, 在水流环境下很容易发生蚀变; 而长石类矿物的水物理化学稳定性, 则介于两者之间, 在酸性环境下, 较易发生溶解或溶蚀等反应。

由于水溶液中存在着不同种类的正离子和负离子, 一些结合力强的离子可以把原有矿物中的一些离子置换出来, 从而形成新的矿物。例如, 水中的 H^+ 可以置换出钾长石中的 K^+ 、钠长石中的 Na^+ 和钙长石中的 Ca^{2+} , 从而导致钾长石、钠长石和钙长石溶蚀, 并生成黏土矿物高岭石, 其反应方程式如下:

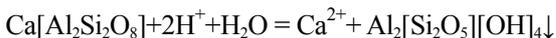
(1) 钾长石:



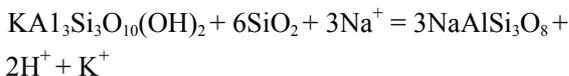
(2) 钠长石:



(3) 钙长石:



(4) 白云母中的 K^+ 被水溶液中的 Na^+ 置换后, 其晶体可转化为钠长石晶体, 其反应方程式为



由此可见, 长石、白云母等矿物在水溶液中会发生溶解溶蚀等化学反应, 部分水溶液中的离子被吸附到矿物表面与矿物中原有离子置换, 从而生成新的矿物。由于这些新生的矿物(或称次生矿物)与原始矿物组成不同, 它们的分子量、密度等也就不同, 从而使其所占据的体积空间发生变化, 进而导致了次生孔隙的产生。此外, 由于不同长石及其他矿物组成成分的不同, 它们在溶解溶蚀过程中形成的次生孔隙也有差异。

上述分析表明, 水 - 岩化学作用受砂岩矿物成分、结构紧密程度及溶液的化学成分、离子浓度、

酸碱度(pH 值)等多种因素的影响。这些化学反应与作用, 引起砂岩的水化学损伤, 进而改变了其弹塑性力学性质。因此, 砂岩在具不同离子浓度和酸碱度水溶液的循环流动作用后, 出现应力 - 应变关系曲线中压密段增长, 以及弹性模量、峰值强度和屈服强度减小等现象。

5 砂岩水物理化学损伤的 CT 检测

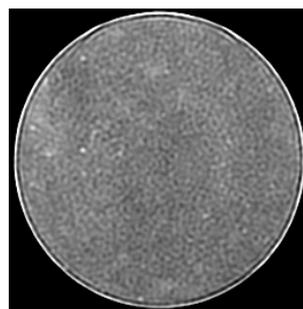
根据 CT 检测的技术原理, CT 检测所得岩石试件的 CT 数越小则其物质密度也越小, 方差数越大则其不同部位密度离散性越大。对于相同试件而言, 随着水 - 岩作用的发展, CT 数减小得越多, 方差增加得越多, 表明试件产生的损伤程度越大, 水物理化学作用的强度也越大。表 3 给出了干燥状态 and 不同水溶液循环流动作用 180 d 后砂岩 CT 检测结果, 图 7 给出了不同状态和水溶液作用 180 d 后的砂岩 CT 扫描图像。

表 3 干燥状态和不同水溶液循环流动作用 180 d 后砂岩 CT 检测结果

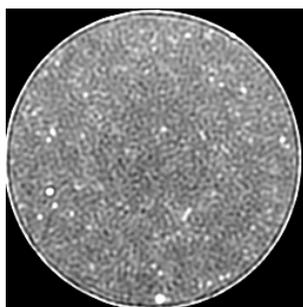
Table 3 CT number and variance of dry sandstone and sandstones with hydro-physicochemical effects due to circulating flow of different hydrochemical solutions

状态与水溶液类型	CT 数	CT 方差数
干燥	2 343.26	28.29
水溶液 A	2 234.49	54.05
水溶液 B	2 260.61	65.12
水溶液 C	1 904.49	48.05
水溶液 D	1 991.96	40.41
水溶液 E	1 999.74	40.51
水溶液 F	2 000.15	41.14

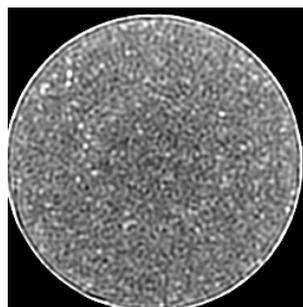
CT 检测结果表明, 干燥状态下砂岩 CT 数最大, 方差最小, 表明干燥状态的试件相对而言最为致密均匀。水溶液 A~F 循环流动作用后的砂岩试件 CT 数均小于干燥状态砂岩, 说明已发生不同程度的水物理化学损伤。其中, 水溶液 B 浸泡后的试件 CT 数虽然比其他水溶液下大, 但是其方差也最大, 为干燥状态下的 2.30 倍, 说明水溶液 B 循环流动作用后的试件由于水物理化学作用, 试件内部物质密度已比干燥状态下减小。CT 数最小的为水溶液 C 循环流动作用后的砂岩试件, 其方差也较大, 为干燥状态的 1.70 倍。除此之外, 其他水溶液作用



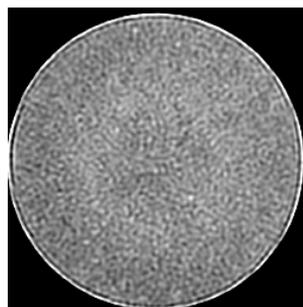
(a) 干燥状态



(b) 水溶液 A



(c) 水溶液 B



(d) 水溶液 E

图 7 不同状态和水溶液作用 180 d 后的砂岩 CT 扫描图像
Fig.7 CT scanning photos of dry sandstone and the sandstones with different hydro-physicochemical effects

后的试件方差均有不同程度的增大。

图 7 显示, 与干燥状态砂岩相比较, 在蒸馏水和其他不同水溶液循环流动作用后, 砂岩试件的颗粒变粗, 亮点增多, 物质密度变得疏松。

上述结果表明, 尽管 CT 数大小与水溶液循环流动作用后砂岩的各项力学指标大小并不完全对

应, 但从总体上来看, CT 检测显示的砂岩水物理化学损伤程度与力学参数的降低具有一致性。

6 反映水物理化学作用效应的非线性弹性本构模型——改进 Duncan 模型

Duncan 模型是 J. M. Duncan 和 C. Y. Chang^[19]提出的岩土类材料非线性弹性本构模型。Duncan 模型为

$$\sigma = \frac{\varepsilon}{a + b\varepsilon} \quad (1)$$

式中: σ 为主应力差, 对于本文即为轴向应力; ε 为轴向应变; a, b 均为与岩石相关的拟合参数。

Duncan 模型形式简洁、不需要人为设定屈服点, 可以通过实验来确定各参数, 且其参数具有与岩石性质相关的物理意义, 但模型只反映了岩石的线性阶段和应变硬化阶段, 而不能描述岩石类介质的初始压密阶段。因此, 在 Duncan 模型的基础上, 加入二次项, 使其能较好地反映水物理化学作用后砂岩的初始压密段。改进后的 Duncan 模型^[20]为

$$\sigma = \frac{\varepsilon}{a + b\varepsilon + c\varepsilon^2} \quad (2)$$

且有

$$\left. \begin{aligned} a &= 1/E_0 \\ b &= 1/\sigma_c - 2/\varepsilon_c E_0 \\ c &= 1/E_0 \varepsilon_c^2 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: E_0 为岩石的初始弹性模量 ($E_0 = d\sigma/d\varepsilon|_{\varepsilon \rightarrow 0}$), σ_c 为岩石抗压强度, ε_c 为与 σ_c 相对应的轴向应变, c 为与岩石相关的拟合参数。

图 8 为改进后的 Duncan 模型的应力 - 应变关系曲线。

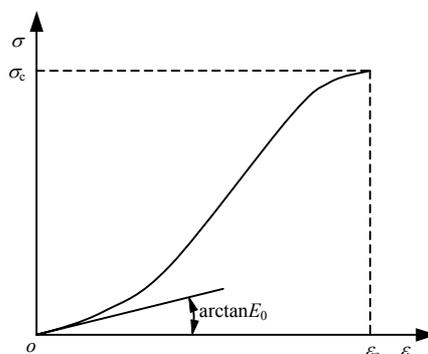


图 8 改进后 Duncan 模型的应力 - 应变关系曲线
Fig.8 Stress-strain curve by the modified Duncan model

对砂岩不同水溶液和干燥状态下的单轴压缩试验数据,用改进的 Duncan 模型进行拟合,得到拟合出的参数及初始弹性模量见表 4。

表 4 改进 Duncan 模型的拟合参数及相应的初始弹性模量
Table 4 Fitting parameters of the modified Duncan model and corresponding initial elastic modulus

状态与水溶液类型	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	初始弹性模量 <i>E</i> ₀ /MPa
干燥	0.050 42	-0.072 33	0.032 06	1 983.340
饱水	0.048 50	-0.076 56	0.038 09	2 061.856
水溶液 A	0.109 40	-0.148 00	0.059 40	914.077
水溶液 B	0.154 60	-0.299 80	0.173 30	646.830
水溶液 C	0.023 90	-0.053 40	0.050 00	4 184.100
水溶液 D	0.046 90	-0.122 00	0.106 00	2 132.200
水溶液 E	0.115 10	-0.233 50	0.139 90	868.810
水溶液 F	0.074 20	-0.182 90	0.141 40	1 347.710

图 9 给出了试验数据与改进后的 Duncan 模型拟

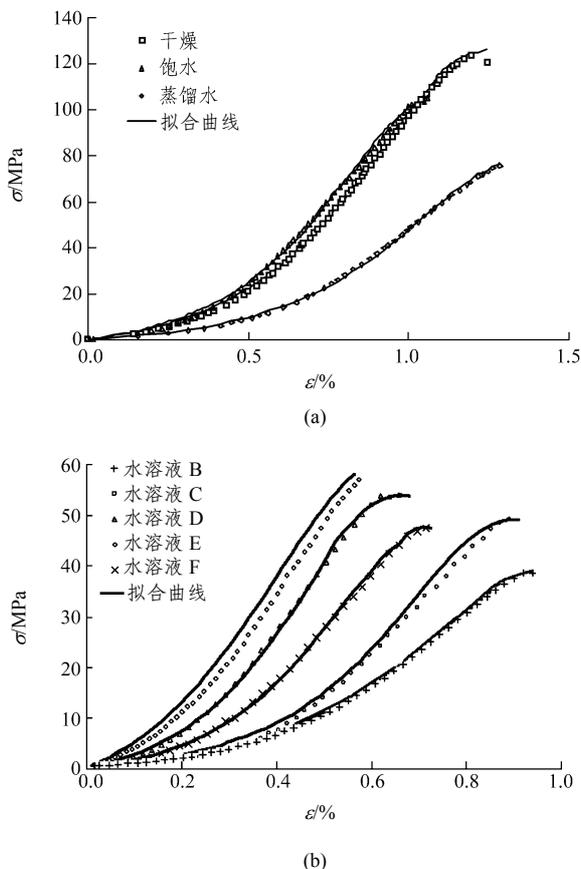


图 9 试验数据与改进后的 Duncan 模型拟合曲线的比较
Fig.9 Comparison of test data and fitting stress-strain curves by the modified Duncan model

合曲线的比较,从图中可以看出,改进后的 Duncan 模型能够很好地描述不同水物理化学作用后砂岩应力 - 应变关系中的压密段和非线性弹性段。由此可见,采用改进后的 Duncan 模型来反映一定水溶液下砂岩的水物理化学作用效应是可行的。

7 结 论

(1) 本文对砂岩的研究结果表明,岩石弹塑性力学特性的水物理化学作用效应是明显的,水 - 岩物理化学作用对岩石弹塑性力学特性及相关岩土工程问题存在着不可忽视的影响。

(2) 饱水和蒸馏水循环流动作用至水 - 岩反应平衡后的砂岩与干燥状态砂岩相比,其弹性模量、屈服强度、峰值强度和残余强度均出现不同程度的降低;蒸馏水循环流动作用后砂岩应力 - 应变关系全过程曲线中的初始压密段长度明显增加。砂岩的水物理作用机制主要在于矿物颗粒间接触面或胶结物的润滑、软化作用使颗粒接触面摩擦因数和黏聚力降低,以及矿物颗粒自由表面上物质的冲刷、扩散和传输等作用产生的次生孔隙率。

(3) 砂岩弹塑性力学特性的水化学作用效应中兼具水溶液离子浓度和酸碱度的作用效应,二者均可使其弹性模量和峰值强度不同程度降低,且呈现出水溶液离子浓度或酸碱度越高,则相应的弹性模量与峰值强度越低、应力 - 应变关系全过程曲线中初始压密段越长等特点。砂岩的水化学作用机制较为复杂,主要在于长石类矿物及岩屑的溶解、溶蚀和离子交换等所引起的次生孔隙与水化学损伤。

(4) 采用 CT 手段对砂岩水物理化学损伤的检测结果表明,与干燥状态砂岩相比,蒸馏水及各种水溶液循环流动作用后的砂岩物质密度出现不同程度降低,从而导致其弹性模量及强度等力学指标减小,总体上看,CT 检测结果与单轴压缩试验结果具有一致性。

(5) 改进的 Duncan 本构模型对干燥、饱水和不同水物理化学作用后砂岩单轴试验结果中屈服前应力 - 应变关系的拟合度非常接近,说明改进的 Duncan 模型用来描述一定水物理化学作用条件下砂岩的非线性弹性变形行为是可行的。

(6) 关于岩石力学特性的水物理化学作用效应研究,目前尚很不充分,本文的研究对于水 - 岩相互作用及相关领域的理论与应用研究,具有一定的促进与借鉴作用。

参考文献(References):

- [1] LOGAN J M, BLACKWELL M I. The influence of chemically active fluids on the frictional behavior of sandstone[J]. EOS, Transactions, American Geophysical Union, 1983, 64(2): 835 - 837.
- [2] DYKE C G, DOBEREINER L. Evaluating the strength and deformability of sandstones[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 1991, 24(1): 123 - 134.
- [3] HAWKINS A B, MCCONNELL B J. Sensitivity of sandstone strength and deformability to changes in moisture content[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 1992, 25(2): 115 - 130.
- [4] 李炳乾. 地下水对岩石的物理作用[J]. 地震地质译丛, 1995, 17(5): 32 - 37.(LI Bingqian. Physical effects of groundwater on rocks[J]. Seismogeological Transactions, 1995, 17(5): 32 - 37.(in Chinese))
- [5] 陈钢林, 周仁德. 水对受力岩石变形破坏宏观力学效应的实验研究[J]. 地球物理学报, 1991, 34(3): 335 - 342.(CHEN Ganglin, ZHOU Rende. An experimental study concerning the macroscopic effect of water on the deformation and failure of loaded rocks[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1991, 34(3): 335 - 342.(in Chinese))
- [6] 康红普. 水对岩石的损伤[J]. 水文地质工程地质, 1994, (3): 39 - 41.(KANG Hongpu. Rock damage from water effect[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1994, (3): 39 - 41.(in Chinese))
- [7] BURSHTEIN L S. Effect of moisture on the strength and deformability of sandstone[J]. Journal of Mining Science, 1969, 5(5): 573 - 576.
- [8] VASARHELYI B, VAN P. Influence of water content on the strength of rock[J]. Engineering Geology, 2006, 84(1/2): 70 - 74.
- [9] КУЗЬКИН В И. 负载状态下溶解作用对不同成因岩石强度的影响[J]. 赵惠珍译. 地质科技译丛, 1997, 14(2): 61 - 64.(КУЗЬКИН В И. The solution effect on the strength of different origin rock under loading[J]. Translated by ZHAO Huizhen. Journal of Geoscience Translations, 1997, 14(2): 61 - 64.(in Chinese))
- [10] DUNNING J, DOUGLAS B, MILLER M, et al. The role of the chemical environment in frictional deformation: stress corrosion cracking and comminution[J]. Pure and Applied Geophysics, 1994, 43(1/3): 151 - 178.
- [11] FEUCHT L J, LOGAN J M. Effects of chemically active solutions on shearing behavior of sandstone[J]. Tectonophysics, 1990, 175(1 - 3): 159 - 176.
- [12] 汤连生, 王思敬. 水 - 岩化学作用对岩体变形破坏力学效应研究进展[J]. 地球科学进展, 1999, 14(5): 433 - 439.(TANG Liansheng, WANG Sijing. Progress in the study on mechanical effect of the chemical action of water rock on deformation and failure of rocks[J]. Advance in Earth Sciences, 1999, 14(5): 433 - 439.(in Chinese))
- [13] 汤连生, 张鹏程, 王思敬. 水 - 岩化学作用的岩石宏观力学效应的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4): 526 - 531.(TANG Liansheng, ZHANG Pengcheng, WANG Sijing. Testing study on macroscopic mechanics effect of chemical action of water on rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(4): 526 - 531.(in Chinese))
- [14] 汤连生, 王思敬. 岩石水化学损伤的机制及量化方法探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(3): 314 - 319.(TANG Liansheng, WANG Sijing. Analysis of mechanical and quantitative methods of chemical damage in water-rock interaction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(3): 314 - 319.(in Chinese))
- [15] 冯夏庭, 赖户政宏. 化学环境侵蚀下的岩石破裂特性——第一部分: 试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(4): 403 - 407.(FENG Xiating, MASAHIRO S. Rock fracturing behaviors under chemical corrosion—part I: experimental study[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(4): 403 - 407.(in Chinese))
- [16] 霍润科, 李 宁, 刘汉东. 受酸腐蚀砂岩的统计本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(11): 1 852 - 1 856.(HUO Runke, LI Ning, LIU Handong. Statistical constitutive model of sandstone subjected to hydrochloric acid attack[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(11): 1 852 - 1 856.(in Chinese))
- [17] LI N, ZHU Y M, SU B. A chemical damage model of sandstone in acid solution[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(2): 243 - 249.
- [18] 乔丽苹, 刘 建, 冯夏庭. 砂岩水物理化学损伤机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(10): 2 117 - 2 124.(QIAO Liping, LIU Jian, FENG Xiating. Study on damage mechanism of sandstone under hydro-physico-chemical effects[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(10): 2 117 - 2 124.(in Chinese))
- [19] DUNCAN J M, CHANG C Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations, 1970, 96(5): 1 629 - 1 654.
- [20] 姜永东, 鲜学福, 粟 健. 单一岩石变形特性及本构关系的研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(6): 941 - 945.(JIANG Yongdong, XIAN Xuefu, SU Jian. Research on distortion of single rock and constitutive relation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(6): 941 - 945.(in Chinese))