

文章编号: 1001-4888(2016)05-0694-13

化学腐蚀后砂岩三轴压缩力学特性 及其能量机制的试验研究^{*}

韩铁林^{1,2}, 陈蕴生^{1,2}, 师俊平¹

(1. 西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048; 2. 西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048)

摘要: 为研究不同化学溶液对砂岩力学性质及能量特征的影响, 采用不同的水化学溶液对砂岩试样进行腐蚀, 利用 WDT-1500 多功能材料试验机对化学腐蚀后饱和状态与自然状态的试样进行常规三轴压缩试验。试验结果表明: 化学腐蚀后砂岩试样的强度及其抗变形能力呈现不同程度的劣化; 化学腐蚀后砂岩试样的峰值应变小于相同围压下自然状态试样的峰值应变, 与单轴压缩条件下不同, 这可能是由于围压和化学溶液共同作用的结果; 砂岩试样的似软化系数与围压之间呈现负相关性, 同时, 其降低速率随着围压的增加而降低。砂岩试样峰值前吸收的能量绝大部分是以可释放弹性应变能 U^e 形式储存下来的, 而化学腐蚀后砂岩试样以 U^e 形式储存下来的能量占其总吸收应变能的百分比却有所下降; 同时, 围压与试样的可释放应变能/应变能比值之间呈负相关性, 而与耗散能/应变能比值存在正相关性; 岩石脆性指标修正值呈现不同程度的增加, 试样的脆性减弱延性增强, 即塑性变形增加, 塑性变形与耗散能之间具有很好的线性特征。溶液的 pH 值、浓度和化学成分对砂岩试样峰值处各部分应变能的影响显著。

关键词: 钙质砂岩; 化学腐蚀; 力学性质; 能量特征; 耗散能; 峰值应变; 峰前塑性变形量

中图分类号: TU452

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-15-222

0 引言

岩石是由各种各样的矿物、空隙以及胶结物形成的天然集合物, 作为地质作用形成的一种特殊的天然材料, 其内部随机地分布着各种缺陷, 使其力学特性具有各向异性、非线性等特性。在外荷作用下, 岩石内部原有的缺陷不断变化, 新的微裂纹不断萌生、扩展, 使岩石内部的损伤越来越严重, 随着岩石继续从外界吸收能量, 其内部裂纹逐渐贯通形成宏观裂隙, 直至岩石失去承载力而发生破坏。从能量的角度分析, 岩石加载破坏过程的实质为能量耗散和能量释放这两者综合作用的结果, 即岩石在峰值前不断从外界吸收能量, 而在峰值后破坏阶段迅速释放能量的全过程。许多学者^[1-13]对岩石加载过程中的能量变化规律进行了研究, 并取得了许多有价值的科研成果。

随着工业与科技的迅速发展, 在人们生活水平提高的同时, 也将面临着越来越严重的环境污染问题, 这些污染物随着降雨直接与建筑物接触, 使其在长期服役过程中遭受着复杂水化学环境的腐蚀作用, 这对岩体工程的长期稳定性与耐久性产生严重的威胁。近年来, 这一领域引起了国内外学者的广泛关注, 并取得许多科研成果^[14-18]。然而上述的这些研究中并未涉及水化学溶液下岩石能量机制等方面的研究。由于经化学溶液腐蚀后岩石的物理力学性质发生变化, 这将会对岩体的力学特性及能量机制

^{*} 收稿日期: 2015-11-17; 修回日期: 2016-02-28

基金项目: 国家自然科学基金(51269024, 11302167)资助; 陕西省教育厅重点实验室科研计划项目(16JS074)

通讯作者: 韩铁林(1985-), 男, 博士生。主要从事岩石力学方面的研究。Email: s3050210133@163.com

产生严重的影响。因此,有必要对化学腐蚀后的岩石能量机制进行试验研究。

鉴于此,本文通过对不同化学腐蚀后及自然状态砂岩试样进行常规三轴压缩试验,研究不同的化学溶液对砂岩力学性质的影响规律,并从能量的角度对化学腐蚀后砂岩试样在三轴压缩变形破坏过程中能量变化规律进行研究,探讨能量机制与化学损伤之间的关系。

1 试验仪器及方法

1.1 试验仪器及试样制备

本次试验在西安理工大学岩土所与长春朝阳试验仪器有限公司联合研制的 WDT-1500 多功能材料试验机上进行,试验中所选用岩样为沉积岩中最为普遍的砂岩,取自陕西省铜川新区正在施工的龙潭水库,该砂岩的完整性和均匀性都非常好。为了保证试验所用砂岩试样的相对均一性,每一组试样尽量从同一块岩石上钻取,并按相关规程及标准将岩石加工成直径 50mm,高度 100mm 的标准圆柱试样。对烘干后的砂岩试样抽真空 8h 密封于如表 1 所示的水化学溶液中至饱和,各浸泡溶液的体积为 0.5L。限于试样的数量,文中仅对不同化学溶液腐蚀 60d 后的砂岩试样开展三轴压缩试验研究。

1.2 试验方案

本文在模拟中,主要考虑 Na^+ 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 离子对试样的影响,选择了 Na_2SO_4 、 NaHCO_3 两种溶液。由于环境中水岩相互作用是一个长期而缓慢的过程,试验过程中,为了在较短的时间尺度内观察到这种变化,以及排除一些因素的干扰,采用浓度较大、pH 值较小或较大的化学溶液来模拟。试验所配置化学溶液如表 1 所示。

表 1 化学溶液的配制

Tab. 1 Preparation of chemical solution		
成分	浓度($\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)	pH 值
Na_2SO_4	0.01	1, 3, 7, 9
NaHCO_3	0.01	1
蒸馏水		7
Na_2SO_4	0.01, 0.1	1

2 三轴压缩试验结果与分析

自然状态与不同水化学溶液腐蚀后砂岩试样常规三轴压缩试验应力应变关系曲线如图 1 所示。由图 1 可知,不同条件下砂岩试样三轴压缩应力应变关系曲线的特征基本相同;砂岩试样应力应变关系曲线在经历了压密阶段、弹性阶段、软化屈服阶段后,进入破坏阶段,随着轴向应变的增加,试样的承载力逐渐降低。与自然状态相比,化学腐蚀后砂岩试样弹性阶段变短,而屈服阶段却有所加长,屈服应力降低,在较低的围压下已出现屈服,围压越大此种情况表现得越突出,其塑性特征更为显著;受水化学溶液腐蚀后砂岩试样的破坏比较缓慢,其脆性减弱延性增强;随着围压的增大,破坏时试样延性特征表现越来越明显。虽然不绝对,但总体上砂岩试样的峰值应变随着围压的增加而增加,并且,与单轴压缩下腐蚀后砂岩试样峰值应变均大于自然状态不同,三轴压缩条件下,相同围压时腐蚀后砂岩试样的峰值应变却小于自然状态,这可能是由于围压和化学溶液共同作用的结果。

图 2 为自然状态与化学溶液腐蚀后砂岩试样的峰值强度与围压关系图。由图 2 可知,无论是自然状态砂岩试样还是化学腐蚀后的砂岩试样,其峰值强度随着围压的增大均呈现出一定程度的增加;自然状态下试样的峰值强度与化学腐蚀后试样的峰值强度有明显的差异,相同围压水平下,自然状态下砂岩的试样峰值强度均高于化学腐蚀后试样的。

化学腐蚀后砂岩试样的峰值强度均出现不同程度的劣化,并且不同的水化学溶液对砂岩试样的腐蚀作用不同。(1)溶液 pH 的影响:相同的围压下,化学溶液的酸性越强(pH 值越小),砂岩试样峰值强度劣化程度越大,这说明溶液的酸性越强,腐蚀后砂岩试样内部微细观结构的化学损伤越大,宏观上表现为其峰值强度越低。(2)在相同条件下,溶液的浓度越大,砂岩试样峰值强度的劣化程度越大。(3)溶液的化学成分不同,对试样的腐蚀作用也不同。中性溶液浸泡后砂岩试样峰值强度相对于自然状态有所降低,这说明中性环境对砂岩试样也有腐蚀作用,但相对其他化学溶液对砂岩的腐蚀作用小一些,主要表现为溶蚀作用, SO_4^{2-} 离子下砂岩试样峰值强度的劣化程度比纯蒸馏水下的大一些;相同条件下, SO_4^{2-} 离子下砂岩试样三轴峰值强度相对于 HCO_3^- 离子下有所降低,这说明 SO_4^{2-} 离子对砂岩试样的

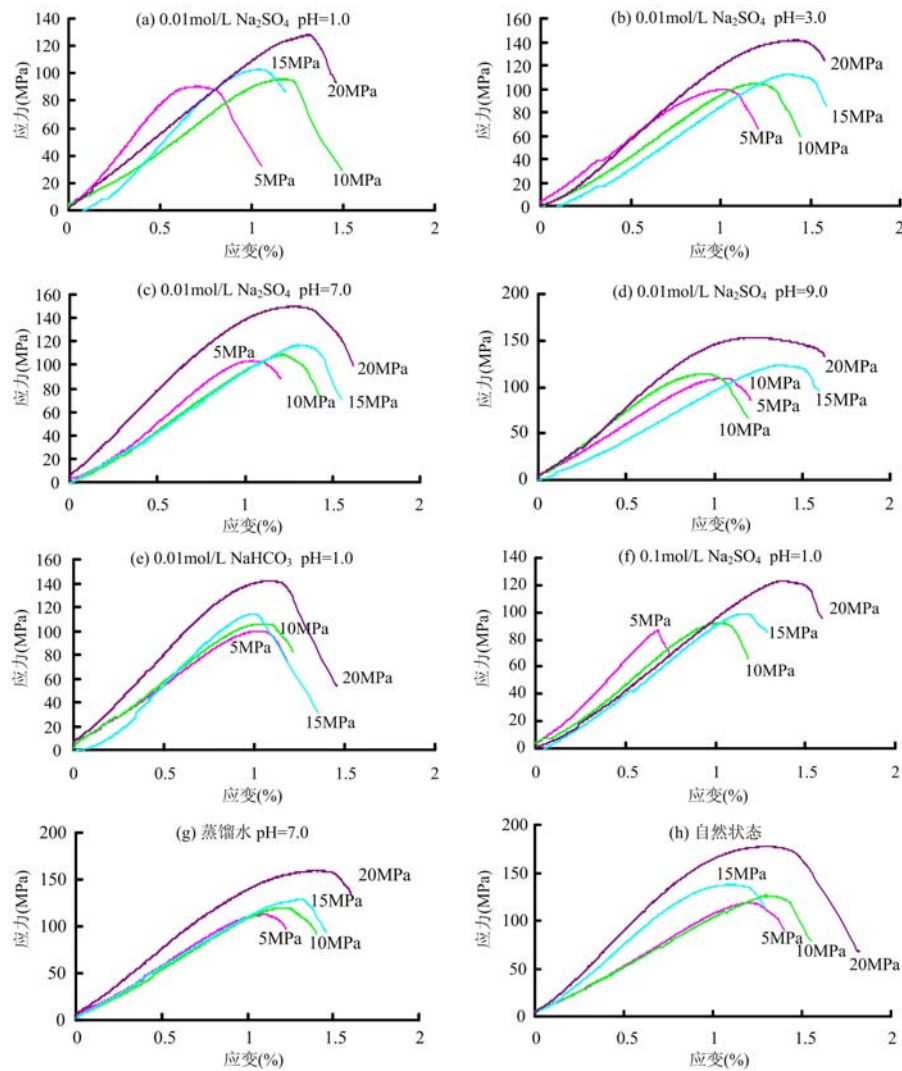


图 1 自然状态及不同化学溶液腐蚀 60d 后,砂岩试样的应力应变关系曲线

Fig. 1 Curves of stress-strain of sandstone under natural state and soaked in different chemical solution for 60 days

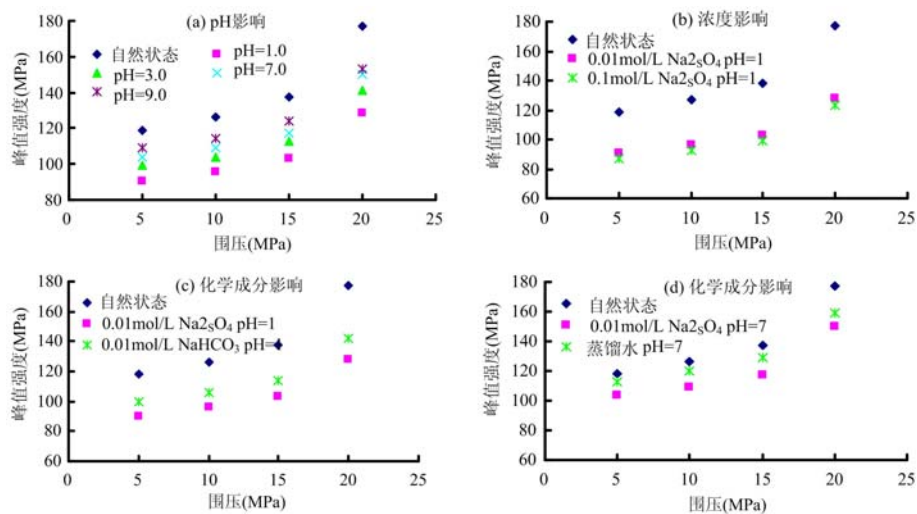


图 2 自然状态及化学溶液腐蚀后砂岩试样峰值强度与围压的关系

Fig. 2 Relation between peak strength and confining pressure of sandstone under natural state and different chemical corrosion

腐蚀作用相对于 HCO_3^- 离子要大一些。

目前 Coulomb 准则被广泛应用于岩石力学领域来描述岩石的强度特征,该准则表征了岩石试样峰值强度与围压之间的关系。由图 2 可知,无论哪种状态下,都可以利用 Coulomb 准则来描述砂岩试样的峰值强度与围压之间的关系是比较合适的。自然状态状态下,试样峰值强度随着围压增加的速率大于化学腐蚀后试样,即相同的围压水平下,自然状态砂岩试样峰值强度大于化学腐蚀后试样,这说明自然状态下砂岩试样峰值强度对围压敏感程度更加显著,压硬性也更强。

为了研究水化学溶液对砂岩试样的腐蚀程度,分析不同的化学溶液对砂岩试样的腐蚀程度,本文定义了似软化系数 K' 这一物理量。

似软化系数 K' :

$$K' = \sigma_{it} / \sigma_{i0} \quad (1)$$

式中, σ_{i0} 为围压 i MPa 时,自然状态砂岩试样峰值强度; σ_{it} 为围压 i MPa 时,化学溶液腐蚀 t 天后砂岩试样峰值强度。

图 3 为不同水化学溶液腐蚀下砂岩试样似软化系数 K' 的变化规律。由图 3 可知,砂岩试样的似软化系数 K' 与围压之间呈现负相关性,即砂岩试样的似软化系数 K' 随着围压的增加而逐渐降低,并且其降低速率也随着围压的增加而降低,这主要是由于自然状态下砂岩试样的峰值强度对围压敏感程度相对于化学腐蚀后试样的更加显著(如图 2 所示),即自然状态下砂岩试样的峰值强度随着围压的增加速率相对化学腐蚀后试样的要快一些,这就造成了似软化系数 K' 随着围压的增加而降低。相同条件下,化学溶液对砂岩试样的腐蚀程度越大,其峰值强度劣化越大,相应的似软化系数 K' 越小。

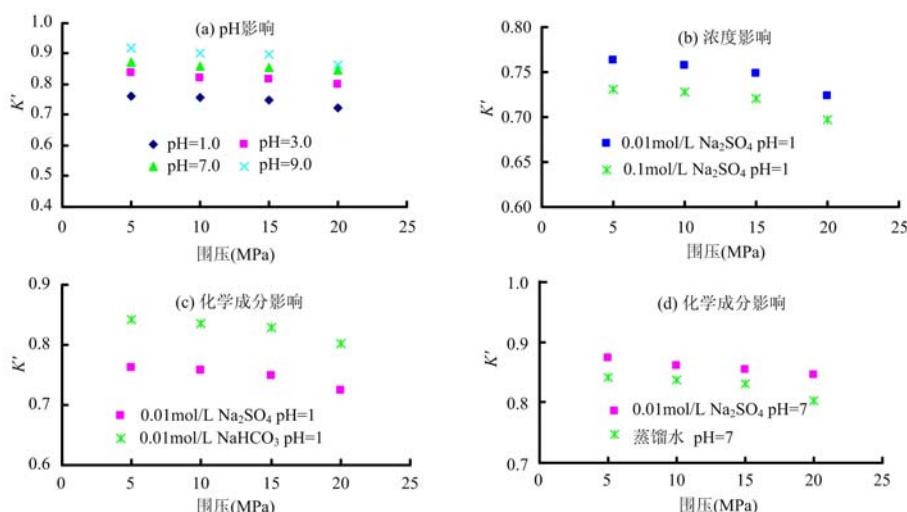


图 3 不同化学溶液腐蚀后砂岩试样似软化系数与围压关系

Fig. 3 Relation between similar softening coefficient of sandstone and confining pressure after different chemical corrosion

作为地质环境中的最活跃因素——地下水是一种复杂的化学溶液,其中含有各种各样的化学成分。地下水进入岩石内部,对矿物颗粒有一定的溶蚀作用,从而消弱颗粒与颗粒的连接力,摩擦力降低使砂岩的抗剪强度降低;另一方面,地下水进入试样后,溶蚀了内部微裂隙中的充填物,加载过程中孔隙水压力引起试样内部产生不均匀应力,从而降低了围压的有效性,导致化学腐蚀后砂岩试样三轴峰值强度相对于自然状态下有所降低;再者,水岩之间一系列的水化学作用,改变岩石的矿物成分及其颗粒大小及形状、内部孔隙、裂隙形态等微观结构,使得化学腐蚀后砂岩试样的裂纹扩展贯通的条件相对于自然状态下的更易满足,这主要是由于化学溶液腐蚀后试样内部微观结构发生改变,导致裂纹增多,裂纹的尖端应力强度增加和试样抗裂韧度降低^[17],以上这些的综合作用最终导致化学腐蚀后砂岩试样三轴峰值强度降低。

图 4 为自然状态及化学腐蚀后砂岩试样三轴压缩峰值强度与平均弹性模量、泊松比的关系图。需

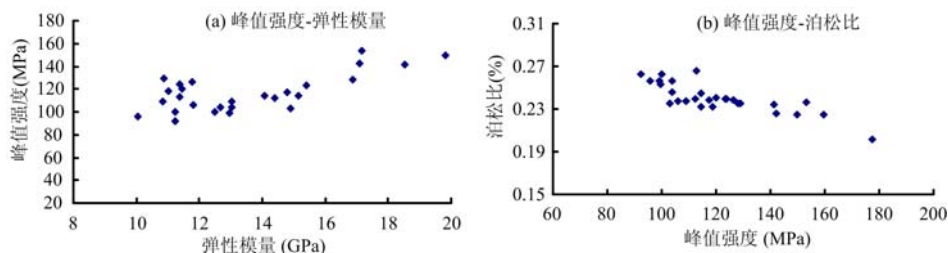


图 4 砂岩试样三轴压缩峰值强度与平均弹性模量、泊松比关系

Fig. 4 Relation between triaxial compression peak strength and mean elastic modulus, Poisson's ratio of specimens

要说明的是,砂岩试样的平均弹性模量是指其应力应变关系曲线上弹性直线段的斜率,由图 4(a)可以看出,试样的峰值强度随着平均弹性模量的增加而增大,两者之间线性关系比较显著,可以用胡克关系进行回归分析。

取试样应力应变关系曲线上弹性段对应的轴向应变,再在侧向应变与轴向应变关系曲线上确定相应的轴向应变值,计算该段的斜率即为平均泊松比。由图 4(b)可知,砂岩试样的峰值强度随着泊松比的增加反而减小,两者之间基本上呈线性关系,这说明了:本文通过应力应变关系曲线弹性直线段来计算弹性模量,进而计算泊松比的方法是合理的,同时证明了本次试验数据是可靠的。

3 能量特征

3.1 能量特征公式与损伤机制

加载过程中,岩石材料中新的裂隙的产生以及裂隙之间的相互滑移等均需要耗散能量,能量耗散是岩石加载过程中变形破坏的本质属性^[7],岩石加载变形破坏的过程实质上是能量耗散和能量释放综合作用的过程。单轴压缩试验时,试验机对岩石试样所做的功就是其所消耗的能量,但三轴压缩条件下围压也对岩石试样做功。常规三轴压缩试验,加载过程中岩石试样的侧向膨胀不断地对液压油做功,使得岩石试样实际吸收的能量小于试验机对试样所做的功。

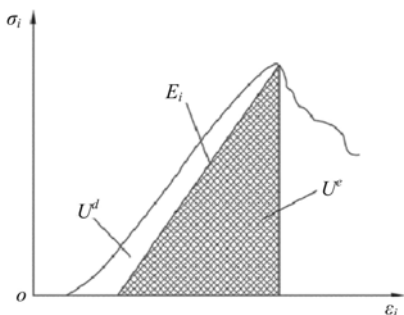


图 5 单位体积中的能量耗散 U^d 和可释放弹性应变能 U^e 的量值关系

Fig. 5 Quantitative relationship between dissipated energy U^d and releasable strain energy U^e of unit rock

岩石试样加载过程实质上是能量转化的过程。在一个封闭的系统下,假设岩石试样在加载过程中没有与外界系统发生热交换,外界对试样所做的功所产生的总输入能量为 U ,依据热力学第一定律^[7],得

$$U = U^d + U^e \quad (2)$$

式中, U^d 为耗散能; U^e 为可释放弹性应变能。

耗散能 U^d 与可释放弹性应变能 U^e 之间关系如图 5 所示。面积 U^d 表示单位体积岩石试样内部损伤与塑形变形量 U_p 所消耗的能量,值等于应力应变关系曲线与卸荷弹性模量 E_i 所围成部分的面积;阴影部分的面积 U^e 表示单位体积岩石试样储存的可释放弹性应变能,为单位体积的岩石

试样卸荷后释放出来的弹性应变能。

复杂应力状态下,单位岩石各部分能量在主应力空间中表示为^[18]:

$$U = \int_0^{\epsilon_1} \sigma_1 d\epsilon_1 + \int_0^{\epsilon_2} \sigma_2 d\epsilon_2 + \int_0^{\epsilon_3} \sigma_3 d\epsilon_3 \quad (3)$$

$$U^e = \frac{1}{2} \sigma_1 \epsilon_1^e + \frac{1}{2} \sigma_2 \epsilon_2^e + \frac{1}{2} \sigma_3 \epsilon_3^e \quad (4)$$

$$U^d = U - U^e \quad (5)$$

$$\epsilon_i^e = [\sigma_i - \mu_i(\sigma_j + \sigma_k)]/E_i \quad (6)$$

式(3)~(5)中, U 为主应力在主应变方向上做的总功; $\sigma_i, \sigma_j, \sigma_k$ ($i, j, k=1, 2, 3$) 为三个方向上的主应力; ϵ_i^e ($i=1, 2, 3$) 为三个主应力方向上的弹性应变; ϵ_i ($i=1, 2, 3$) 为主应力方向上的应变; μ_i 为泊松比。

为了便于计算, 工程应用过程中将可释放的弹性应变能 U^e 改写成^[7]:

$$U^e = [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)]/(2E_0) \quad (7)$$

式中, E_0 为岩石试样的初始弹性模量。

常规三轴压缩试验中 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 均对试样做功, 而 $\sigma_1 = \sigma_3$, 式(3)和式(7)可改写成:

$$U = \int_0^{\epsilon_1} \sigma_1 d\epsilon_1 + 2 \int_0^{\epsilon_2} \sigma_2 d\epsilon_2 + U^0 \quad (8)$$

$$U^e = [\sigma_1^2 + 2\sigma_2^2 - 2\mu(2\sigma_1\sigma_3 + \sigma_3^2)]/(2E_0) \quad (9)$$

式中, U^0 为静水压力状态时岩石试样储存的应变能。

U^0 可以通过弹性力学公式直接求得^[10]:

$$U^0 = \frac{3(1-2\mu)}{2E}(\sigma_3^0)^2 \quad (10)$$

式中, μ, E 分别为岩石试样的泊松比与弹性模量。

又由于侧向应变 ϵ_3 与轴向应变 ϵ_1 存在如下关系:

$$\mu = -\epsilon_3/\epsilon_1 \quad (11)$$

$$U = \int_0^{\epsilon_1} (\sigma_1 - 2\mu\sigma_3) d\epsilon_1 + U^0 \quad (12)$$

依据式(5)~(12)对自然状态与不同水化学溶液腐蚀后砂岩试样三轴压缩所得的试验数据进行处理, 采用 Origin 软件对砂岩试样应力应变关系曲线进行处理, 可得到试验过程中任意应力下砂岩试样各部分的应变能。计算自然状态与化学溶液腐蚀后砂岩试样三轴压缩峰值应力处单位体积吸收的应变能 U 、耗散能 U^d 与可释放弹性应变能 U^e , 详见表 2。

基于本文试验数据, 计算围压为 20MPa 时不同条件下静水压力状态岩石试样储存的应变能 U^0 。pH 影响下: pH=1, pH=3, pH=7 和 pH=9 时 U^0 分别为 2.039638kJ/m³, 2.19759kJ/m³, 2.067928kJ/m³, 1.844756kJ/m³, 分别占相应状态下砂岩试样破坏时总吸收能量的 1.74%, 1.77%, 1.40%, 1.02%; 0.1mol/L Na₂SO₄ pH=1.0, 0.1mol/L NaHCO₃ pH=1.0, 蒸馏水 pH=7.0 和自然状态时 U^0 分别为 2.027949kJ/m³, 1.74726kJ/m³, 2.16906kJ/m³, 1.97835kJ/m³, 分别占相应状态下砂岩试样破坏时总吸收能量的 1.83%, 1.27%, 1.30%, 0.86%。由于 U^0 占试样破坏时吸收的总能量很少, 因此本文在计算砂岩试样三轴压缩吸收的总能量 U 时没有考虑 U^0 , 这与文[11]基本相同, 并不是所有情况下都不考虑 U^0 , 是否考虑 U^0 不仅与岩石试样本身的性质有关, 还与围压的水平有关。

由表 2 对比分析可知, 砂岩试样峰值处各应变能均随着围压的增加而逐渐增加; 并且, 相同的围压水平条件下, 自然状态砂岩试样在峰值应力处吸收的应变能 U 、可释放弹性应变能 U^e 和耗散能 U^d 均大于化学腐蚀后砂岩试样对应各部分的应变能的平均值, 这说明水化学溶液对砂岩试样各部分应变能的影响是显著的。

通过对表 2 试验数据计算分析可知, 无论在何种条件下, 砂岩试样峰值处 U^e/U 的比值均大于 0.5, 有的甚至到达 0.838, 而砂岩试样的塑形变形量及其内部损伤所耗散的能量仅占总吸收应变能的一小部分。这说明三轴压缩过程中砂岩试样峰值前吸收的能量绝大部分是以 U^e 的形式储存下来, 同时, 随着围压水平的提高, 试样的 U^e/U 比值逐渐降低, 而 U^d/U 比值却有不同程度的增加。这解释了随着围压的增加, 试样的脆性逐渐减弱而其延性却有所增加, 即随着围压增加, 砂岩试样峰前的塑形变形量也相应增加, 同时其需要消耗的能量更大。

自然状态条件下砂岩试样的 U^e/U 均大于化学腐蚀后试样的, 这很好地解释了为什么在单轴或较低围压下峰值后砂岩试样的应力会急剧跌落, 峰值前砂岩试样储存了大量的 U^e , 这些应变能在峰值后迅速释放引起试样内部裂隙迅速扩展贯通, 导致试样应力急剧下降, 直至试样失去承载力; 而化学腐蚀引起试样内部微细观结构等发生变化, 导致试样内部微细观结构的化学损伤和塑形变形量有所增加, 使

得三轴压缩过程中试样的耗散能 U^d 有所增加,这解释了在一些岩体工程施工的过程中通过向岩体里注水来防止冲击地压的破坏作用。

表 2 自然状态与不同水化学溶液下砂岩试样三轴压缩时峰值应力对应的应变能

Tab. 2 Strain energy at peak stress point under triaxial compression under natural and different chemical solution

水化学 环境	pH	浓度 (mol/L)	围压 (mol/L)	U (kJ/m ³)	U ^e (kJ/m ³)	U ^d (kJ/m ³)	BIM (%)	U ⁰ (kJ/m ³)	U _p (mm)
Na ₂ SO ₄	1	0.01	5	36.43886	25.15584	11.28302	0.44852	0.115990	0.2189024
Na ₂ SO ₄	1	0.01	10	54.17987	35.26202	18.91785	0.53649	0.690501	0.2738480
Na ₂ SO ₄	1	0.01	15	61.27825	39.13034	22.14791	0.56600	1.203168	0.3553747
Na ₂ SO ₄	1	0.01	20	81.37925	48.32026	33.05899	0.68416	2.039638	0.5141970
Na ₂ SO ₄	3	0.01	5	54.15134	37.93022	16.22112	0.42766	0.148231	0.2068482
Na ₂ SO ₄	3	0.01	10	64.96320	44.22237	20.74083	0.46901	0.690843	0.2538288
Na ₂ SO ₄	3	0.01	15	73.77746	48.46991	25.30755	0.52213	1.642489	0.3249316
Na ₂ SO ₄	3	0.01	20	97.94187	60.03819	37.90368	0.63133	2.197590	0.4339621
Na ₂ SO ₄	7	0.01	5	56.97590	41.00162	15.97428	0.38960	0.149363	0.1869275
Na ₂ SO ₄	7	0.01	10	67.38663	47.71974	19.66689	0.41213	0.714803	0.2316658
Na ₂ SO ₄	7	0.01	15	77.37047	52.17269	25.19778	0.48297	1.639473	0.3037872
Na ₂ SO ₄	7	0.01	20	106.26603	67.05147	39.21456	0.58484	2.067928	0.3738997
Na ₂ SO ₄	9	0.01	5	64.15882	47.41855	16.74027	0.35303	0.165450	0.1547640
Na ₂ SO ₄	9	0.01	10	73.90444	53.33595	20.56849	0.38564	0.523113	0.2074902
Na ₂ SO ₄	9	0.01	15	84.48021	58.84604	25.63417	0.43561	1.541502	0.2906260
Na ₂ SO ₄	9	0.01	20	110.70190	74.01065	36.69125	0.49576	1.844756	0.3440242
Na ₂ SO ₄	1	0.01	5	35.85054	24.10996	11.74058	0.48696	0.112973	0.2217429
Na ₂ SO ₄	1	0.01	10	44.65311	28.81422	15.83889	0.54969	0.562011	0.3093865
Na ₂ SO ₄	1	0.01	15	56.30175	35.05217	21.24958	0.60623	1.271716	0.4035929
Na ₂ SO ₄	1	0.01	20	70.72074	41.17246	29.54828	0.71767	2.027949	0.5805997
NaHCO ₃	1	0.01	5	55.79187	39.66470	16.12717	0.40659	0.149609	0.1986260
NaHCO ₃	1	0.01	10	69.70375	47.54193	22.16182	0.46615	0.617274	0.2406789
NaHCO ₃	1	0.01	15	81.58898	52.72255	28.86643	0.54752	1.122139	0.3102443
NaHCO ₃	1	0.01	20	101.98197	61.75239	40.22958	0.65147	1.747263	0.3904436
蒸馏水	7		5	65.82819	53.90858	11.91961	0.22111	0.144231	0.1714634
蒸馏水	7		10	73.70330	55.24024	18.46306	0.33423	0.639980	0.2219560
蒸馏水	7		15	87.24278	61.26217	25.98061	0.42409	1.443588	0.2734061
蒸馏水	7		20	121.55763	81.53635	40.02128	0.49084	2.169055	0.3496786
自然状态			5	74.89124	62.78218	12.10906	0.19287	0.177452	0.1460023
自然状态			10	80.84319	64.59221	16.25098	0.25159	0.678352	0.2096112
自然状态			15	95.45357	69.67596	25.77761	0.36996	1.205395	0.2413339
自然状态			20	142.50358	97.72975	44.77383	0.45814	1.978347	0.3242800

Aubertin 等^[12]定义了脆性指标修正值 BIM,试样的 BIM 值越大,峰值前试样产生的弹性变形占其

总变形量的百分比越小,试样的塑形变形量越大。依式(13)计算砂岩试样的 BIM 值,详见表 2。

$$\text{BIM} = U^d / U^e \quad (13)$$

通过对表 2 BIM 值分析可知,相同围压水平下,化学腐蚀后砂岩试样的 BIM 值均大于自然状态试样;随着围压增加,砂岩试样的 BIM 值也相应增大,同时,化学腐蚀后试样的 BIM 值的增加速率大于相同围压水平下自然状态。这说明:化学腐蚀后砂岩试样的塑性特性有所增加,并随着围压增大而逐渐增大,即化学腐蚀后砂岩试样具有明显塑性特征,同时,围压越大这一特征越明显。

依据文[8]计算砂岩试样峰值前塑形变形量的平均值,结果详见表 2。分析可知,相同应力水平下,自然状态砂岩试样峰值前的塑形变形量相对于腐蚀后试样的有所降低,同时,具有明显的围压效应,即随着围压的增加,试样峰值前塑形变形量逐渐增大。这主要是由于化学腐蚀引起试样内部微细观结构的化学损伤及其塑形变形量增加,导致三轴压缩过程中砂岩试样的耗散能 U^d 有所增加,而 U^e 却呈现不同程度的降低,导致试样的 BIM 值有所增加,试样的塑形变形量增加,即试样的耗散能与塑形变形量之间一致性比较明显,且这两者具有正相关性关系^[13],这与图 6 中试验结果相一致。因此,我们可以通过试样峰值前 BIM 值的变化来反映其塑形变形量的变化,也证明了本次试验所得数据是可靠的。

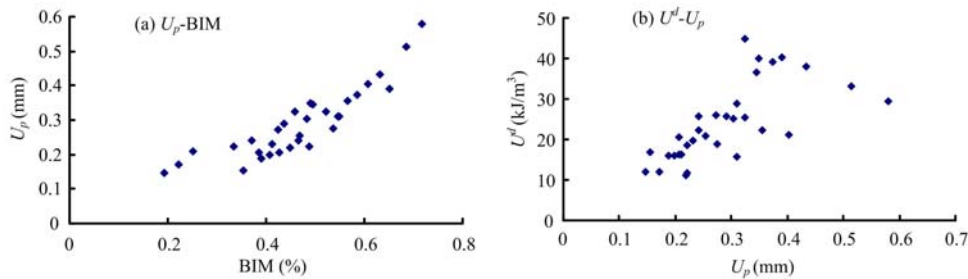


图 6 砂岩试样峰值应力处 U_p 与 BIM、 U^d 关系

Fig. 6 Relations among U_p and BIM、 U^d of sandstone specimens at peak stress point

3.2 砂岩试样三轴压缩能量特征

图 7~图 10 为围压等于 20MPa 时不同条件下砂岩试样三轴压缩各部分应变能与轴向应变的关系曲线。不同情况下砂岩试样各部分应变能随轴向应变的变化规律基本一致。相同的围压下,自然状态砂岩试样在相同的轴向应变时吸收的应变能 U 和可释放弹性应变能 U^e 均大于化学腐蚀后试样相应的应变能,且其增加速率也大于化学腐蚀后砂岩试样相应应变能的增加速率。由表 2 可知,不同水化学溶液下砂岩试样峰值应力处吸收的总应变能 U 和可释放的弹性应变能 U^e 相对于自然状态下试样相应的应变能均呈现不同程度的降低,这说明水化学溶液对砂岩试样吸收的应变能、储存能量极限有非常明显的影响。

结合 3.1 可知,三轴压缩过程中,不同情况下砂岩试样所吸收的应变能的累积转化和损伤破坏过程基本上一致,但不同水化学溶液腐蚀后砂岩试样在三轴压缩变形破坏过程中的能量演化仍与自然状态下有一定的差别。

在初始压密阶段与线弹性阶段,砂岩试样耗散能随轴向应变的变化规律基本一致,但不同化学溶液腐蚀后砂岩试样的耗散能略大于自然状态,化学腐蚀后砂岩试样线弹性非常明显,这主要是由于化学腐蚀后砂岩试样内部空隙等缺陷有所增加,在加载过程中这些增加的空隙缺陷之间相互滑移、摩擦所耗散的能量有所增加,使得化学腐蚀后试样耗散能随着轴向应变的增加而缓慢增加;进入屈服阶段,化学腐蚀后试样内部的孔隙水压力在加载过程中不断增大,使得其内部裂纹、空隙等更容易发生扩展,加上化学溶液对砂岩的弱化作用,导致试样的耗散能均有所增加;进入破坏阶段,外界继续向砂岩试样做功,试样的耗散能极速增大,加载过程中试样储存的可释放弹性应变能突然释放直至试样破坏失去承载能力。

3.3 pH 值对三轴压缩能量特征与损伤机制的影响

由表 2 和图 7 可知,相同的围压下,溶液的 pH 值越大,砂岩试样峰值应力处 U 、 U^e 、 U^d 均随着增大,并随着围压的增大,试样各部分的应变能均呈现不同程度的增加。

由图 11 可知,围压与砂岩试样 U^e/U 值呈负相关性,而与 U^d/U 值呈现正相关性,即砂岩试样 U^e/U

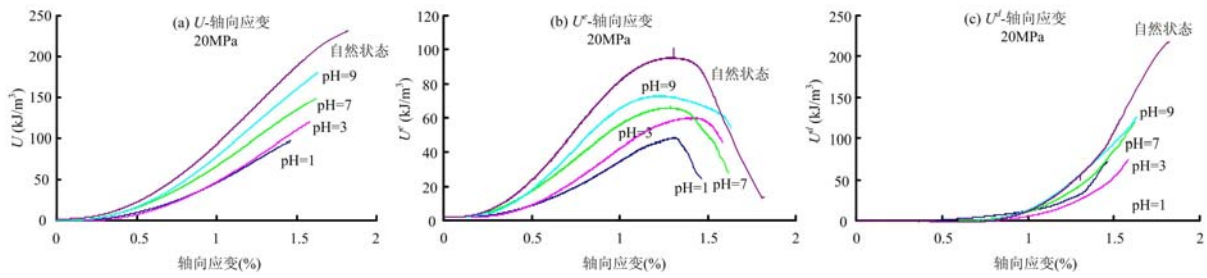


图 7 0.01mol/L Na_2SO_4 pH=1,3,7,9 时,砂岩试样的应变能—轴向应变关系曲线

Fig. 7 Curves of strain energy-axial strain of sandstone specimens in 0.01mol/L Na_2SO_4 of pH=1,3,7,9

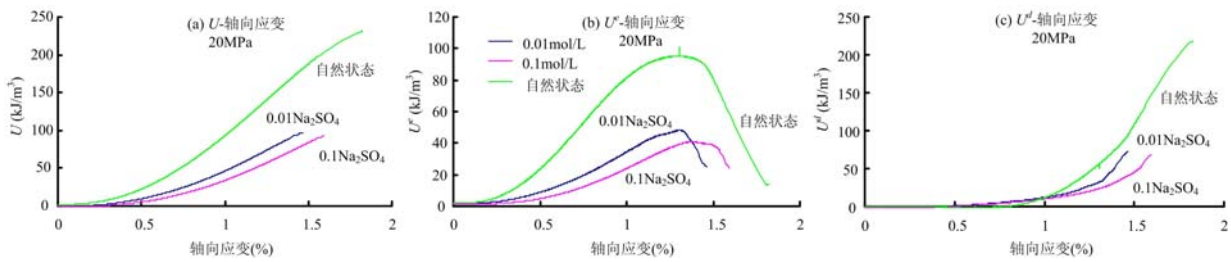


图 8 0.01、0.1 mol/L Na_2SO_4 溶液 pH=1 时,砂岩试样的应变能—轴向应变关系曲线

Fig. 8 Curves of strain energy-axial strain of sandstone specimens in 0.01、0.1mol/L Na_2SO_4 of pH=1.0

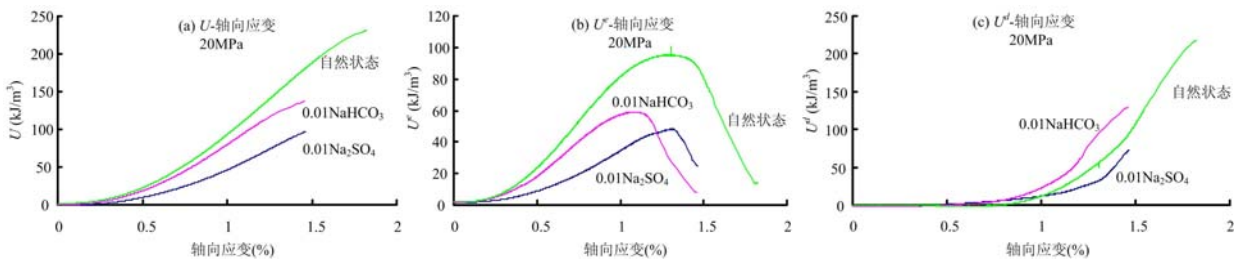


图 9 0.01mol/L Na_2SO_4 和 NaHCO_3 溶液,砂岩试样的应变能—轴向应变关系曲线

Fig. 9 Curves of strain energy-axial strain of sandstone specimens in 0.01mol/L Na_2SO_4 and 0.01mol/L NaHCO_3

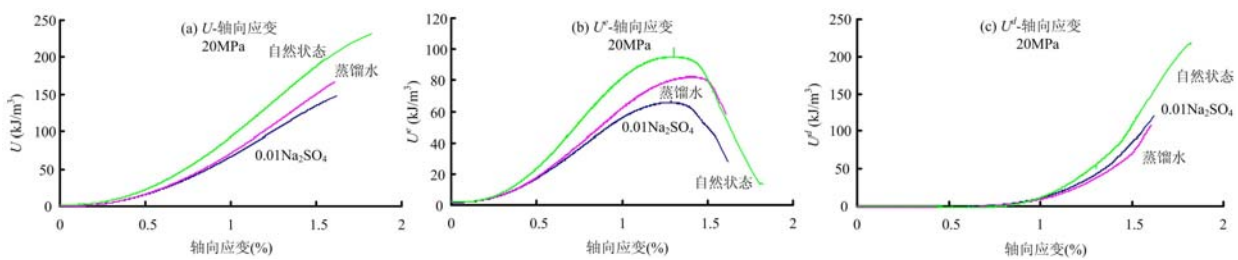


图 10 0.01mol/L pH=7.0 Na_2SO_4 和蒸馏水,砂岩试样的应变能—轴向应变关系曲线

Fig. 10 Curves of strain energy-axial strain of sandstone specimens in 0.01mol/L pH=7.0 Na_2SO_4 and distilled water

U 的值随着围压的增加而呈现不同程度的降低, U^d/U 值却有不同程度的增加,导致试样 BIM 值增加,试样的脆性减弱延性增强,即塑性变形量增加;同时,溶液的 pH 值越小,这些参数的变化幅度越大;相同条件下,围压越高,砂岩试样的塑性变形量越大,试样需要耗散的应变能就越大,这与文[13]结论一致;并且溶液的酸性越强,试样的 U^d/U 值越大,三轴压缩过程中砂岩试样需要消耗的耗散能 U^d 越多,其产生的塑性变形量越大,这主要是由于溶液的酸性越强,其对砂岩试样的腐蚀作用越强,引起试样内部空隙等结构的化学损伤越严重,加之,化学溶液对试样的弱化作用,试样的脆性减弱延性增强,导致试样在加载过程中由于内部损伤所耗散的能量有所增加,使得加载过程中试样吸收的能量有由可释放弹性应变能向耗散能转化的趋势。

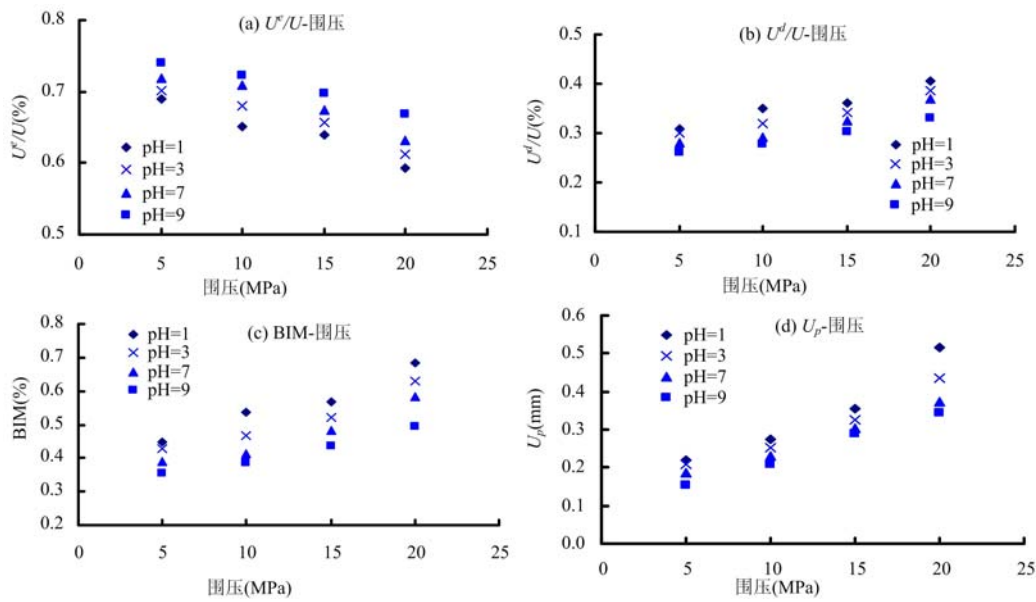


图 11 0.01mol/L Na_2SO_4 pH=1, 3, 7, 9 时, 砂岩试样 U^e/U 、 U^d/U 、BIM、 U_p 与围压的关系图

Fig. 11 Curves of U^e/U , U^d/U , BIM, U_p -confining pressure under 0.01mol/L Na_2SO_4 of pH=1, 3, 7, 9

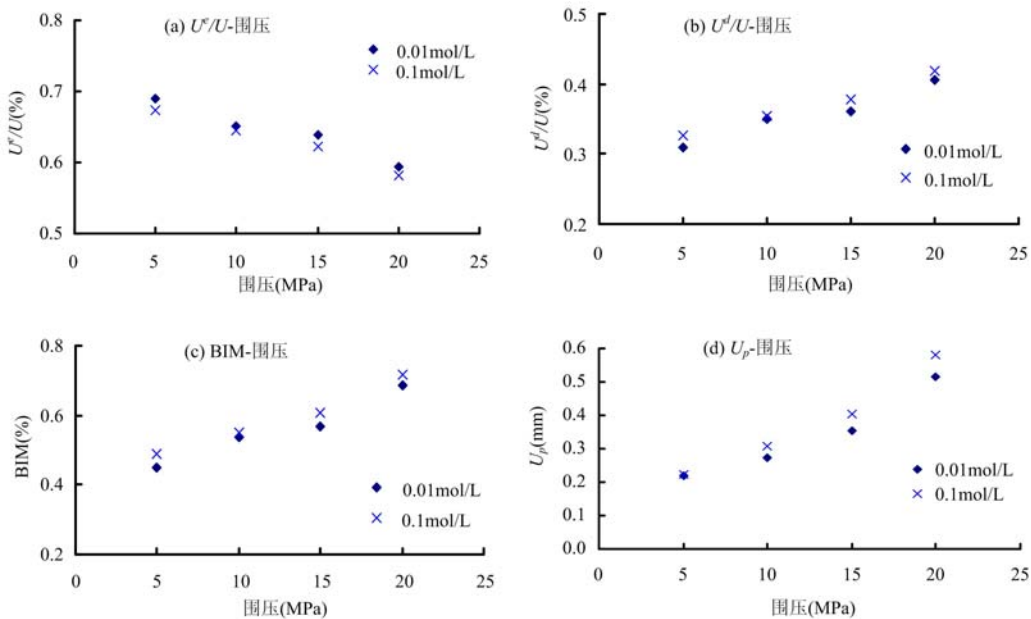


图 12 0.01mol/L、0.1mol/L Na_2SO_4 溶液 pH=1.0 时, 砂岩试样 U^e/U 、 U^d/U 、BIM、 U_p 与围压的关系图

Fig. 12 Curves of U^e/U , U^d/U , BIM, U_p -confining pressure under 0.01mol/L, 0.1mol/L Na_2SO_4 of pH=1.0

3.4 浓度对三轴压缩能量特征与损伤机制的影响

由表 2 和图 8 可知, 相同的围压下, 随着溶液浓度的增加, 砂岩试样峰值处各部分应变能均呈现不同程度的降低, 同时, 随着围压的增大, 试样三轴压缩时吸收的应变能 U 、可释放弹性应变能 U^e 和耗散能 U^d 均相应增加。由图 12 可知, 不同浓度条件下, 砂岩试样的 U^e/U 与围压呈现负相关性, 而 U^d/U 与围压却呈现正相关性; 随着围压的增大, 试样加载过程中吸收的耗散能增加的速率大于相应的可释放弹性应变能, 引起 BIM 值呈现不同程度的增加, 即试样的塑形变形量越大, 并且浓度越大, 试样的 BIM 值越大, 试样峰值前产生的平均塑形变形量越大, 这与图 12(d) 试验结果相一致。这主要是由于: 在其他条件相同的情况下, 溶液的 SO_4^{2-} 离子浓度越大, 对砂岩试样的腐蚀作用越强, 引起其内部微细观结构的化学损伤越严重, 导致试样在加载过程中所耗散的能量越大, 而其可释放弹性应变能却呈现不同程度的降低, 使得 BIM 有所增大, 即试样的塑形变形量越大; 相同条件下, 围压越高, 砂岩试样的塑形变形

量越大,试样的耗散能也随着增加。

3.5 化学成分对三轴压缩能量特征与损伤机制的影响

由表 2 可知,相同的围压水平, SO_4^{2-} 离子下砂岩试样峰值处各部分应变能比 HCO_3^- 离子对应的应变能小;中性环境下, SO_4^{2-} 离子试样峰值处各部分应变能却比纯蒸馏水对应的应变能小一些,同时,随着围压的增大,砂岩试样三轴压缩时吸收的应变能 U 、可释放弹性应变能 U^e 和耗散能 U^d 均相应增加。

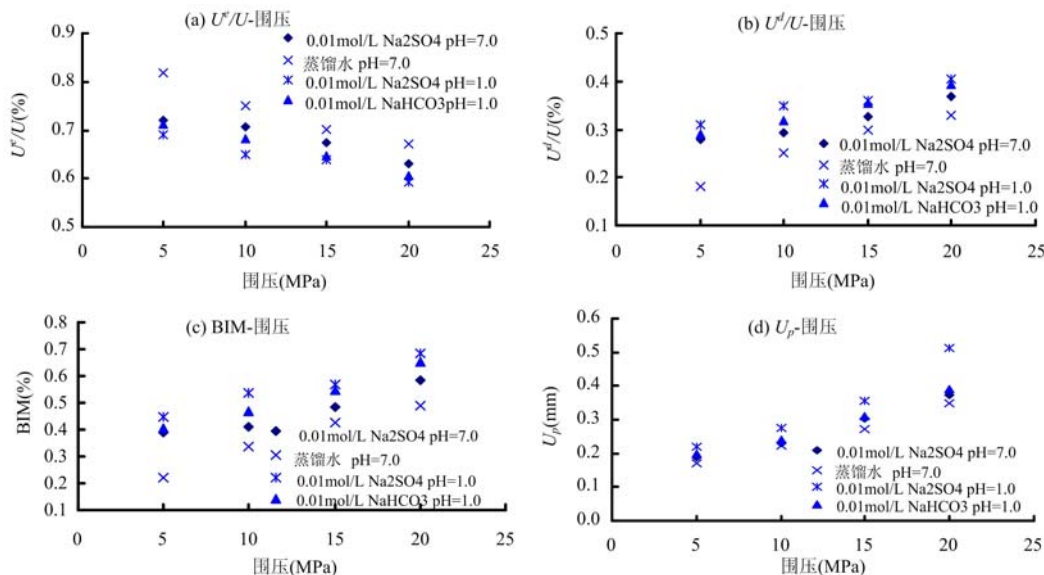


图 13 0.01mol/L Na_2SO_4 pH=1.0、 NaHCO_3 pH=1.0、 Na_2SO_4 pH=7.0 和蒸馏水,砂岩试样 U^e/U 、 U^d/U 、BIM、 U_p 与围压的关系曲线图

Fig. 13 Curves of U^e/U , U^d/U , BIM, U_p -confining pressure under 0.01mol/L Na_2SO_4 pH=1.0, NaHCO_3 pH=1.0, Na_2SO_4 pH=7.0 and distilled water

结合第 2 节三轴压缩试验结果可知,不同化学成分的溶液对砂岩试样的腐蚀作用不同,相同条件下, SO_4^{2-} 离子对砂岩试样的腐蚀作用相对于 HCO_3^- 离子大一些;中性水化学环境对砂岩试样也存在一定的腐蚀作用, SO_4^{2-} 离子砂岩试样腐蚀作用比纯蒸馏水大一些。相同条件下,离子成分对砂岩试样腐蚀作用越大,试样在加载过程中所耗散的能量越大,即试样的 U^d/U 值有所增加,而 U^e/U 却有不同程度的降低,引起 BIM 值呈现不同程度的增加,试样加载过程中产生的塑形变形量越大,这与图 13 试验结果相一致。

4 结论

(1) 水化学溶液对砂岩试样的峰值强度和峰值应变的影响显著,经化学腐蚀后试样的强度特征与抗变形能力均呈现不同程度的劣化。与单轴压缩下腐蚀后砂岩试样的峰值应变大于自然状态的不同,相同围压条件下,化学腐蚀后砂岩试样的峰值应变却小于自然状态,这可能是由于围压和化学溶液共同作用的结果。

(2) 利用 Coulomb 准则来表达自然状态及化学腐蚀后试样的峰值强度与围压之间的关系是比较合适的,自然状态下砂岩试样的峰值强度对围压的敏感性相对于腐蚀后试样的更加显著;砂岩试样的似软化系数与围压之间呈现负相关性,同时,其降低速率也随着围压的增加而降低。

(3) 化学溶液腐蚀后试样吸收的应变能和可释放弹性应变能及其增加速率均小于自然状态下的试样;围压与试样峰值应力处各部分应变能之间存在正线性相关性,这说明:水化学溶液下,围压对试样吸收的应变能、储存能量极限有明显的影响。

(4) 三轴压缩过程中砂岩试样峰值前吸收的能量绝大部分是以 U^e 形式储存下来的,而化学腐蚀后砂岩试样以 U^e 形式储存下来的能量占其总吸收的应变能的百分比却有所下降,同时,围压与试样 U^e/U 值之间呈负相关性,而与 U^d/U 却存在正相关性,BIM 值呈现不同程度的增加,试样的脆性减弱延性

增强,即塑形变形量增加。这较好地解释了煤矿等地下工程通过给岩层中注水来防止冲击地压的机制。

(5) 试样的塑形变形量与耗散能之间具有良好的线性特征,相同条件下,围压越高,砂岩试样的塑形变形量越大,塑形变形量越大,试样需要耗散的耗散能就越大。

(6) 溶液的化学成分对砂岩试样各部分应变能有显著的影响。相同条件下, SO_4^{2-} 离子对砂岩试样各部分应变能的影响作用大于 HCO_3^- 离子;中性环境对砂岩试样各部分应变能也存在一定的影响。

参考文献:

- [1] Mikhalyuk A V, Zakharov V V. Dissipation of dynamic-loading energy in quasi-elastic deformation processes in rocks[J]. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 1997, 38(2):312—318.
- [2] 胡柳青,李夕兵,赵伏军. 冲击载荷作用下岩石破裂损伤的耗能规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(增2):2304—2308(HU Liuqing, LI Xibing, ZHAO Fujun. Study on energy consumption in fracture and damage of rock induced by impact loadings [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(supp. 2):2304—2308 (in Chinese))
- [3] Steffler E D, Epstein J S, Conley E G. Energy partitioning for a crack under remote shear and compression[J]. International journal of fracture, 2003, 120:563—580.
- [4] 高文学,刘运通. 冲击载荷作用下岩石损伤的能量耗散[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11):1777—1780 (GAO Wenxue, LIU Yuntong. Energy dissipation of rock damage under impact loading [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11):1777—1780 (in Chinese))
- [5] Sujathal V, Kishen C. Energy release rate due to friction at bi-material interface in dams [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2003(7):793—800.
- [6] 尤明庆,华安增. 岩石试样破坏过程的能量分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(6):778—781 (YOU Mingqing, HUA Anzeng. Energy analysis on failure process of rock specimens [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(6):778—781 (in Chinese))
- [7] 谢和平,鞠杨,黎李云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17):3003—3010 (XIE Heping, JU Yang, LI Liyun. Criteria for strength and structural failure of rocks based on energy dissipation and energy release principles [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17):3003—3010 (in Chinese))
- [8] 杨圣奇,徐卫亚,苏承东. 岩样单轴压缩变性破坏与能量特征研究[J]. 固体力学学报, 2006, 27(2):213—216 (YANG Shengqi, XU Weiya, SU Chengdong. Study on the deformation failure and energy properties of rock specimen in uniaxial compression[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2006, 27(2):213—216 (in Chinese))
- [9] 杨圣奇,徐卫亚,苏承东. 大理岩三轴压缩变形破坏与能量特征研究[J]. 工程力学, 2007, 24(1):136—141 (YANG Shengqi, XU Weiya, SU Chengdong. Study on the deformation failure and energy properties of marble specimen in triaxial compression[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(1):136—141 (in Chinese))
- [10] 黄达,谭清,黄润秋. 高应力强卸荷条件下大理岩损伤破裂的应变能转化过程机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(12):2483—2493 (HUANG Da, TAN Qing, HUANG Runqiu. Mechanism of strain energy conversion process for Marble damage and fracture under high stress and rapid unloading [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(12):2483—2493 (in Chinese))
- [11] 许国安,牛双建,靖洪文等. 砂岩加卸载条件下能耗特征试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(12):3611—3617 (XU Guoan, NIU Shuangjian, JING Hongwen, et al. Experimental study of energy features of sandstone under loading and unloading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(12):3611—3617 (in Chinese))
- [12] Aubertin M, Gille E, Simon R. On the use of the brittleness index modified (BIM) to estimate the post-peak behavior of rock[C]//Proceedings of the 1st North American Rock Mechanics Symposium. Rotterdam: A. A. Balkema, 1994:945—952.
- [13] 苏承东,张振华. 大理岩三轴压缩的塑形变形量与能量特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2):273—280 (SU Chengdong, ZHANG Zhenhua. Analysis of plastic deformation and energy property of marble under pseudo-triaxial compression [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(2):273—280 (in Chinese))
- [14] Feng X T, Chen S L, Li S J. Effects of water chemistry on micro cracking and compressive strength of granite[J].

- International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(4):557–568.
- [15] Feng X T, Ding W X, Zhang D X. Multi-crack interaction in limestone subject to stress and flow of chemical solutions[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 46(1):159–171.
- [16] Solecki R, Conant R J. Advanced mechanics of materials [M]. London: Oxford University Press, 2003:74–82.
- [17] 朱敏, 邓华锋, 周时 等. 水岩作用下砂岩断裂韧度及抗拉强度的试验研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2012, 34(5): 34–38 (ZHU Min, DENG Huafeng, ZHOU Shi, et al. Experimental research on fracture toughness and tensile strength of sandstone under water-rock interaction [J]. Journal of China Three Gorges University(Natural Sciences), 2012, 34(5):34–38 (in Chinese))
- [18] Chen Y, Cao Ping, Chen R. Effect of water-rock interaction on the morphology of a rock surface[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010, 47:816–822.

Experimental Study of Mechanical Properties and Energy Mechanism of Sandstone Subjected to Chemical Erosion and Tri-Axial Compression

HAN Tie-lin^{1,2}, CHEN Yun-sheng^{1,2}, SHI Jun-ping²

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China)

Abstract: In order to study the influence of different chemical solution on mechanical properties and energy mechanism of sandstone, the sandstone samples were corroded by different water chemical solutions first. Conventional tri-axial compression experiment was carried out for samples subjected chemical erosion and in saturated state and samples in natural state respectively by using WDT-1500 multi-functional material testing machine. Experimental results show that the strength and anti-deformation ability of sandstone exhibit different deterioration degrees after chemical erosion. The peak strain of sandstone specimens subjected to chemical corrosion is less than that in natural state and under the same confining pressure, which is different from uni-axial compression. This could be the result of a combined effect of confining pressure and chemical solution. There is a negative correlation between the similar softening coefficient and confining pressure of sandstone specimens, at the same time, its reduction rate decreases along with the confining pressure increase. Most pre-peak absorbed energy of sandstone specimens is stored in the form of the elastic strain energy U^e , but after chemical erosion, for total absorbed strain energy, the percentage of that part of energy stored in sandstone specimen in the form of U^e decreases; there is a negative correlation between confining pressure and the elastic strain energy/strain energy, but a positive correlation between confining pressure and the dissipation energy/strain energy. Revised rock brittleness index values increase at different degrees, the brittleness of specimens decreases and its ductility enhances, namely the plastic deformation increases. Plastic deformation of sandstone specimens has a good linear relationship with dissipation energy. The effect of pH value, concentration and chemical composition of solution on strain energy at corresponding peak stress positions is significant.

Keywords: calcareous sandstone; chemical erosion; mechanical properties; energy characteristics; dissipation energy; peak strain; pre-peak plastic deformation