

化学腐蚀下灰岩力学效应的试验研究*

丁梧秀 冯夏庭

(中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学重点实验室 武汉 430071)

摘要 结合三轴压缩试验结果,详细分析了不同化学溶液作用下,化学腐蚀对灰岩全应力-应变过程曲线各阶段的影响特征,并对化学溶液的腐蚀影响机理进行分析,获得了不同化学溶液对灰岩变形及强度腐蚀效应的影响规律。

关键词 岩石力学,化学腐蚀,应变腐蚀,强度腐蚀,三轴压缩试验,灰岩

分类号 TU 452, O 69

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2004)21-3571-06

TESTING STUDY ON MECHANICAL EFFECT FOR LIMESTONE UNDER CHEMICAL EROSION

Ding Wuxiu, Feng Xiating

(Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics, Institute of Rock and Soil Mechanics,
The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071 China)

Abstract Based on the results of triaxial compressive test, the effect of different chemical erosion on complete stress-strain process for limestone is analyzed. The influence laws of different chemical solution on deformation and strength erosion of limestone are obtained.

Key words rock mechanics, chemical erosion, strain erosion, strength erosion, triaxial compressive test, limestone

1 引言

岩石是矿物的集合体,其物理力学性质主要取决于岩石矿物成分和颗粒间的联结以及存在于其内部的微裂纹。而化学腐蚀将引起岩石矿物成分和结构的改变,这些改变更易发生在微裂隙存在处,从而引起岩石物理力学性质的改变,对岩土工程的长期稳定性产生威胁。由于水化学溶液在岩体工程中存在的广泛性,因此,研究化学溶液对岩石变形及强度的腐蚀效应具有重要工程意义,也是当前岩石力学研究的前沿性课题之一。

化学腐蚀对岩石物理力学性质的影响,近年来亦受到国内外研究者的重视,并取得了许多成果^[1~20]。对于受不同化学溶液腐蚀后岩石各阶段的变形腐蚀效应的研究尚很少,作者结合三轴压缩试验结果,在前人研究的基础上,对不同化学溶液腐蚀后岩石的变形及强度特性进行进一步探索。

2 试验材料与方法

2.1 岩石结构及矿物成分

试验所用岩块为水布垭灰岩,矿物成分鉴定为含泥灰质白云岩,自形晶粒结构、生物碎屑结构。

2003年3月10日收到初稿,2003年4月8日收到修改稿。

* 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412708)和国家自然科学基金(10072073)资助课题。

作者 丁梧秀 简介:女,1970年生,1997年于兰州大学获水文地质与工程地质专业硕士学位,现为中国科学院武汉岩土力学研究所博士研究生,主要从事岩土工程方面的教学及研究工作。E-mail: d-w-x@263.net。

岩石主要由菱形粒状的白云石及分布其间的微粒方解石、水云母、石英及生物碎屑等矿物组成。白云石呈自形菱面体状，粒度为 0.01~0.17 mm，多数为 0.1 mm。方解石呈他形粒状，粒度为 0.01~0.05 mm。水云母呈显微鳞片状，粒度为 0.005~0.02 mm。钙质生物碎屑主要为腕足类。石英呈他形粒状，粒度为 0.01~0.05 mm，有的产于腕足类贝壳中。炭质呈质点状及渲染状，常和粘土矿物伴生。主要矿物成分的含量为白云石 69%，方解石 18%，水云母 5%，石英 1%，生物碎屑 5%。结构图像如图 1 所示。

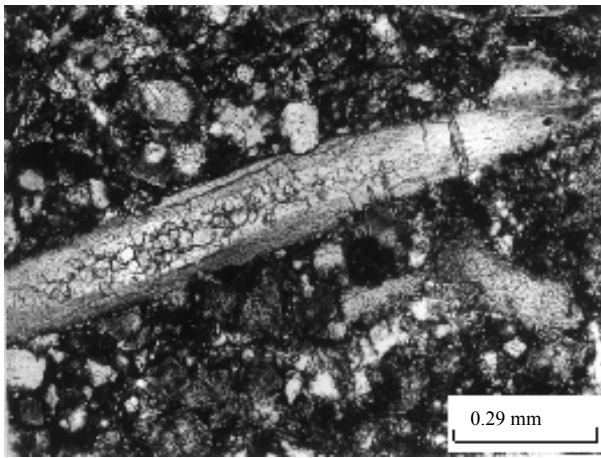


图 1 灰岩结构图像

Fig.1 Microscope image of limestone

2.2 试件制备

试件为用同一岩块制备的 $L = 100 \text{ mm}$ ， $\phi = 50 \text{ mm}$ 的圆柱形标准试件。对其抽真空 8 h，进行烘干处理后浸泡于表 1 所示化学溶液及蒸馏水(pH = 7)、黄河水(pH = 8.3)中至饱和，各浸泡溶液均为 500 mL。试件密封浸泡时间 150 d。试验温度为室温，整个浸泡过程中温差并不大。

2.3 化学溶液

试验所配制化学溶液如表 1 所示。

表 1 化学溶液

Table 1 Chemical solutions

成分	浓度 / mol · L ⁻¹	pH 值			
NaCl	0.01	2,	7,	9,	12
CaCl ₂	0.01	9			
NaHCO ₃	0.01	9			

3 试验结果及分析

本次试验为常规三轴压缩试验(围压 5 MPa，加载速率 0.01 mm/s)，试验在武汉长江科学院岩基所 RMT-150 电液伺服岩石力学试验机上进行，试验结果及分析如下。

3.1 三轴压缩试验结果

三轴压缩试验结果如图 2~4(为以下分析方便，试验曲线分开给出)和表 2 所示。

3.2 化学腐蚀对灰岩变形特性的影响及机理分析

岩石(体)变形特性及规律，可以通过应力(σ)-应变(ϵ)关系曲线及有关变形指标获得。与自然状态相比，化学腐蚀后应力-应变曲线，主要受化学溶液对岩石材料腐蚀强度的影响。对于腐蚀后一直处于饱和状态的岩石，其应力-应变曲线还应考虑孔隙水压的影响。综合图 2~4，并结合图 5，具体分析如下。

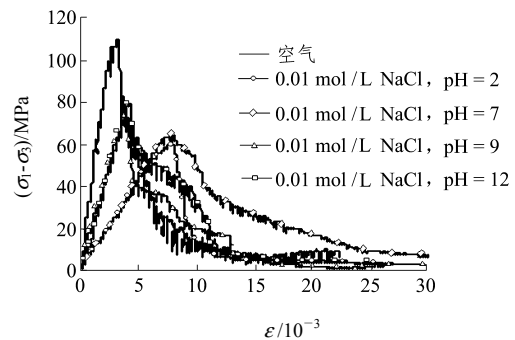


图 2 0.01 mol/L NaCl, pH 值分别为 2, 7, 9, 12 及自然状态下灰岩三轴压缩应力-应变曲线

Fig.2 Triaxial compressive stress-strain curves for limestone in air and NaCl solution with pH values of 2, 7, 9, 12 respectively and the ionic strength of 0.01 mol/L

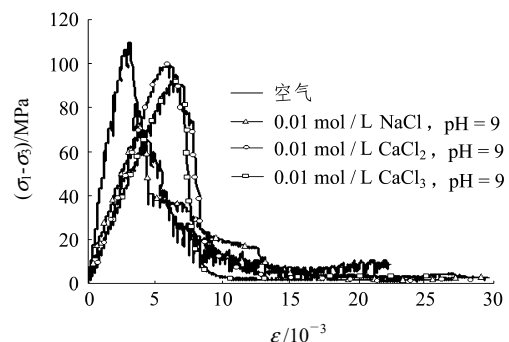


图 3 0.01 mol/L NaCl, CaCl₂, NaHCO₃, pH 值均为 9 及自然状态下灰岩三轴压缩应力-应变曲线

Fig.3 Triaxial compressive stress-strain curves for limestone in air and NaCl, CaCl₂, NaHCO₃ solution with pH value of 9 and the ionic strength of 0.01 mol/L

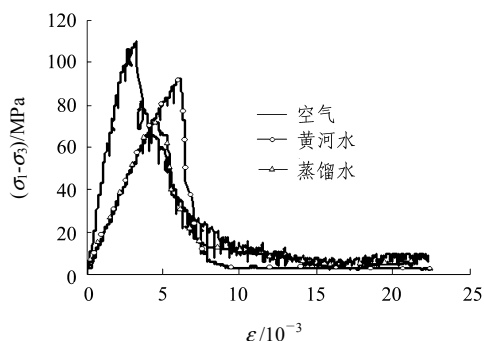


图 4 蒸馏水、黄河水及自然状态下灰岩三轴压缩应力-应变曲线

Fig.4 Triaxial compressive stress-strain curves for limestone in air and saturated with distilled water and Yellow river water

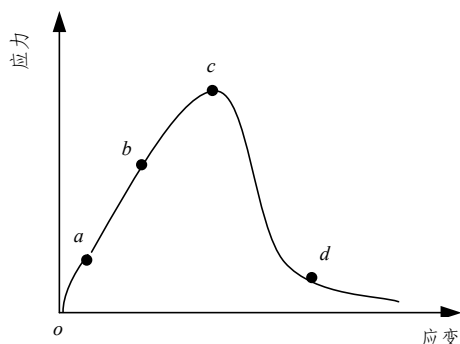


图 5 化学腐蚀下应力-应变分析曲线

Fig.5 Analytical curve of stress-strain under chemical erosion

(1) *oa* 段: 曲线方程 $\sigma = f(\sigma', \mu, \epsilon)$, 其中 σ' 为有效应力, μ 为孔隙水压力。

根据岩石饱和程度及其可压缩性、岩石孔隙度及其连通状况和边界排水条件等, 可分为 3 种情况:

① 以微裂隙压密为主阶段: 曲线形式如图 6 所示, $d\sigma/d\epsilon$ 随应力增加递增, $\frac{d^2\sigma}{d\epsilon^2} > 0$ 。

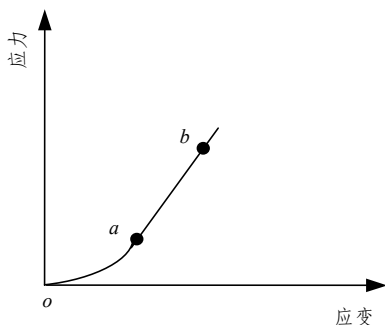


图 6 微裂隙压密为主的应力-应变曲线初始段

Fig.6 Initial stage of stress-strain caused mainly by micro-fracture compression

当岩石本身或化学腐蚀后孔隙发育且饱和程度小, 同时边界排水条件良好时, *oa* 段为该种类型。变形主要为微裂隙压密所致。

② 以岩石质点空间格架弹性调整为主阶段: 曲线形式如图 7 所示, $\frac{d\sigma}{d\epsilon} = k(k \text{ 为常数})$, $\frac{d^2\sigma}{d\epsilon^2} = 0$, 即应力-应变为直线关系。

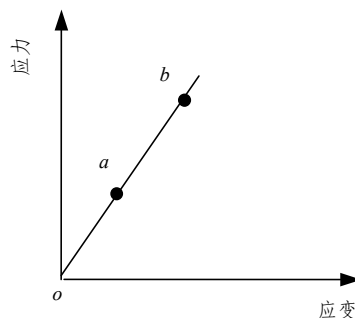


图 7 弹性变形为主的应力-应变曲线初始段

Fig.7 Initial stage of stress-strain caused mainly by elastic deformation

当岩石致密且化学腐蚀后引起的孔隙很小或孔隙被化学反应物充填, 基本上不存在孔隙水时, *oa* 段为该种类型。 $d\sigma/d\epsilon$ 大小反映了化学溶液对岩石的软化程度, 变形主要为矿物颗粒间相对位置的调整所引起。

图 2 中曲线 NaCl(pH=9), NaCl(pH=12), 图 3 中曲线 NaCl(pH=9), CaCl₂(pH=9), NaHCO₃(pH=9), 图 4 中曲线黄河水等属于图 7 这种类型。此次试验所用岩石为灰岩, 矿物主要成分为 CaCO₃, CaMg(CO₃)₂ 等, 故对于 CaCl₂(pH=9), NaHCO₃(pH=9) 以及黄河水等化学溶液, 由于同离子效应, 将阻止矿物溶解以致产生沉淀; 对于碱性溶液亦有助于阻止矿物溶解。上述作用使化学溶液腐蚀后的岩石试件不可能产生较大的孔隙。所以应力-应变曲线不存在微裂隙压密段和下述的孔隙水压力作用段。

③ 以水压力作用为主阶段: 曲线形式如图 5 中 *oa* 段所示。 $d\sigma/d\epsilon$ 随应力增加递减, $\frac{d^2\sigma}{d\epsilon^2} < 0$ 。

当岩石本身或由于化学腐蚀引起孔隙发育且完全饱和, 同时边界排水条件较差时, *oa* 段为该种类型。该段变形亦主要由矿物颗粒间相对位置调整引起, 变形大小取决于孔隙水压力大小及化学溶液对岩石软化程度。 $\left. \frac{d\sigma}{d\epsilon} \right|_{\epsilon \rightarrow 0}$ 值(初始模量)主要取决于孔隙水压力大小。

图 2 中曲线 NaCl(pH = 2), NaCl(pH = 7), 图 4 中曲线蒸馏水等属这种类型。其主要由于化学溶液对灰岩的溶解作用, 引起孔隙增加所致。

(2) *ab* 段: 弹性变形段, 曲线方程 $\sigma = f(\sigma', \mu, \epsilon)$, $\frac{d\sigma}{d\epsilon} = k$ (k 为常数), $\frac{d^2\sigma}{d\epsilon^2} = 0$, 应力-应变关系为直线。此处, k 值即为弹性模量。该段主要为弹性压缩变形, 孔隙水压力变化速率亦为常数, 即直线关系^[20]。

通过同一岩块经不同化学溶液浸泡后的应力-应变曲线可以发现, k 值大小反映了化学溶液对岩石材料的软化程度。 k 值越小, 岩石受化学溶液软化程度越大。分析图 2~4 及表 2, 可以看出化学溶液腐蚀后各曲线 k 值均有较大降低。与自然状态相比较: 0.01 mol/L NaCl(pH=2)作用下 k 值降低最多, 降低 80.3%; 0.01 mol/L CaCl₂(pH = 9)作用下 k 值降低最少, 降低 54.6%; 其余降低在 80.3%~54.6% 范围内, 见表 2。文[8, 10]通过试验及数值模拟, 证实了仅有水压力作用的应力-应变曲线在无水压应力-应变曲线之上, 图 8 为文[8]有水压及无水压下的单轴压缩应力-应变曲线。由图 8 知, 未受化学溶液软化的岩石, 仅在孔隙水压力作用下 k 值较自然状态值要大, 因此, 表征化学溶液对岩石软化强度的实际 k 值要比表 2 各值更小。

分析表明, 强酸环境(0.01 mol/L NaCl, pH = 2)及中性环境(0.01 mol/L NaCl, pH = 7)对灰岩腐蚀软化程度最大; 其余各溶液对灰岩均有较大软化作用, 但软化程度相差不大。强酸对灰岩具有较强的软化作用, 原因是灰岩为碱性材料; 而中性环境的 0.01 mol/L NaCl 溶液亦具有较强的软化作用, 同为

中性环境的蒸馏水的软化作用则比其要小, 说明化学溶液对岩石的软化作用, 除与 pH 值有关外, 水化学成分与 pH 值组合关系的影响亦很重要。

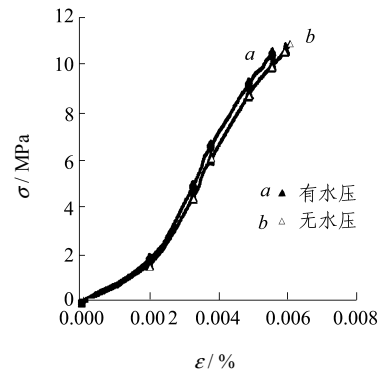


图 8 应力-应变关系曲线^[8]
Fig.8 Stress-strain curves^[8]

(3) *bc* 段: 曲线方程 $\sigma = f(\sigma', \mu, \epsilon)$, $d\sigma/d\epsilon$ 随应力增加递减, $\frac{d^2\sigma}{d\epsilon^2} < 0$ 。变形主要由微裂隙发育、扩展、贯通引起。

分析图 2~4 可知, 各曲线的屈服点不明显, 除强酸 0.01 mol/L NaCl, pH = 2 溶液浸泡的试件, 其余化学溶液浸泡后试件随着破裂的发展很快达到峰值。该过程与岩石腐蚀后微观结构变化、孔隙水压力作用及岩石软化程度有关, 其中微观结构的腐蚀对该过程影响最大。孔隙水压力在该段表现为非线性增大至最大值后, 随着微裂隙扩展又逐渐降低, 至破坏点时急剧下降^[20]。比较自然状态曲线和化学溶液浸泡后各曲线, 软化作用对该段曲线形式即破裂发生、发展过程均有影响, 但影响不是很大。比较软化程度相近的 0.01 mol/L NaCl, pH = 2 和

表 2 三轴压缩试验及计算结果表

Table 2 Tested and calculated results of triaxial compression

试件编号	水化学环境	峰值强度 σ_c / MPa	峰值轴向应变 $/ 10^{-3}$	k $/ \text{GPa}$	$\frac{\sigma_{c自然} - \sigma_c}{\sigma_{c自然}}$	$\frac{k_{自然} - k}{k_{自然}}$
1	0.01 mol/L NaCl(pH = 2)	59.368	7.905	8.873	0.459	0.803
2	0.01 mol/L NaCl(pH = 7)	64.175	7.752	8.906	0.415	0.802
3	0.01 mol/L NaCl(pH = 9)	71.320	3.955	18.968	0.350	0.579
4	0.01 mol/L NaCl(pH = 12)	79.115	4.165	20.217	0.278	0.551
5	0.01 mol/L CaCl ₂ (pH = 9)	99.430	6.200	20.475	0.093	0.546
6	0.01 mol/L NaHCO ₃ (pH = 9)	92.271	6.759	14.832	0.158	0.671
7	黄河水(pH = 8.3)	92.106	6.111	17.050	0.160	0.622
8	蒸馏水(pH = 7)	71.580	4.566	17.023	0.347	0.622
9	自然状态	109.643	3.200	45.081	0	0

注: k 值为峰值强度前曲线直线段轴向应力与应变比值, 即图 5 中 *ab* 段 $d\sigma/d\epsilon$ 值。

0.01 mol/L NaCl, pH = 7 曲线, 化学腐蚀对微观结构的改变对该段曲线形式影响很明显, 强酸 0.01 mol/L NaCl, pH = 2 溶液对岩石微结构腐蚀作用较大, 因此, 应变速率较大。

由图 2~4 各曲线及表 2 亦可以看出, 化学溶液浸泡后各试件破坏应变(即表 2 中峰值轴向应变)均大于自然状态, 说明化学溶液对岩石的应变腐蚀作用明显。而由图 8 知, 仅在孔隙水影响下, 破坏应变小于自然状态。因此, 化学溶液对岩石的实际应变腐蚀作用比表 2 中各值还要大。化学溶液浸泡后破坏应变增大, 主要由化学溶液对岩石软化作用引起。由上述分析知, 0.01 mol/L NaCl 溶液, pH 值分别为 2 和 7 时对岩石软化程度较大, 而由表 2 可以看出, 它们相应的破坏应变值亦较大。

化学溶液对岩石强度的腐蚀效应分析见节 3.3。

(4) *cd* 段: 即峰值后阶段, 曲线方程 $\sigma = f(\epsilon)$ 。化学溶液浸泡后岩石在该段曲线形式类似自然状态。即曲线呈近乎垂直下降或垂直下降一阶段后变形才开始较快发展, 应力降较大。随着裂隙的扩展、贯通, 至破坏点时孔隙水压力已降为很小, 因此, 破坏后阶段孔隙水压力影响已不明显。

该段破坏方式主要为非稳定脆性破坏。说明岩石受化学溶液浸泡腐蚀后, 岩性有所软化, 但并没有改变其脆性破坏性质。图 2 中的受 0.01 mol/L NaCl, pH = 7 溶液腐蚀的岩石曲线则具有呈稳定破坏趋势, 表现出岩性软化特性。*d* 点为岩石残余应力, 由图 2~4 可以看出, 自然状态下残余应力比化学溶液浸泡后各曲线残余应力稍高一点, 但相差不大。

3.3 灰岩强度(应力)腐蚀效应及机理分析

3.3.1 化学溶液对岩石峰值强度腐蚀效应

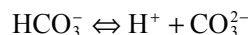
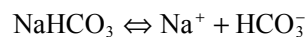
由图 2~4 及表 2 可知, 与自然状态下岩石试件峰值强度相比较, 经化学溶液浸泡后的所有岩石试件峰值强度均有所下降: 其中以 0.01 mol/L NaCl, pH = 2 即强酸腐蚀降低最多, 降低了 45.9%; 以 0.01 mol/L CaCl₂, pH = 9 腐蚀降低最少, 降低了 9.3%。其余化学溶液腐蚀下试件峰值强度降低程度各不相同。

3.3.2 不同化学成分对岩石峰值强度腐蚀效应

由图 3 可以看出, 不同化学成分对岩石峰值强度影响显著: 编号为 3, 5, 6 的 3 种溶液, 其浓度、pH 值均相同, 但由其浸泡的岩石试件峰值强度与自然状态相比, 分别降低了 35.0%, 9.3%, 15.8%。

即浓度、pH 值均相同时, CaCl₂ 溶液使岩石峰值强度降低较小, 其次为 NaHCO₃ 溶液, 降低较大者为 NaCl 溶液。

浓度、pH 值均相同时, CaCl₂, NaHCO₃ 溶液由于同离子效应, 对岩石腐蚀作用较小, 因此, 浸泡后岩石强度比 NaCl 溶液浸泡后强度大。对于 CaCl₂, NaHCO₃ 溶液对岩石强度的腐蚀, 由下述化学反应:



使 NaHCO₃ 溶液与岩石间化学反应的同离子效应弱化, 因此, 用 CaCl₂ 溶液浸泡后岩石强度大于 NaHCO₃ 溶液浸泡后岩石强度。

3.3.3 pH 值对岩石峰值强度腐蚀效应

化学成分、浓度均相同时, pH 值越小, 峰值强度降低越大(如图 2 所示)。试验中编号为 1, 2, 3, 4 的 0.01 mol/L NaCl 溶液, pH 值为 2, 7, 9, 12 时, 峰值强度与自然状态相比, 分别降低了 45.9%, 41.5%, 35.0%, 27.8%。由图 9 曲线斜率变化还可以看出, 0.01 mol/L NaCl 溶液, pH 值在中性至弱碱范围内时, 灰岩峰值强度对 pH 值最敏感。

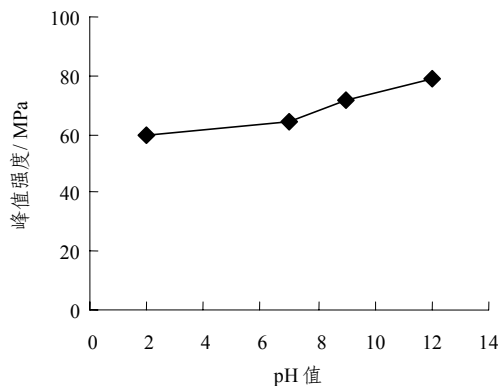


图 9 三轴压缩灰岩 pH 值与峰值强度关系

Fig.9 Peak strength vs. pH value for limestone under triaxial compression

试验中所用岩石材料为碱性材料, 因此, pH 值越小即酸性越强, 对岩石腐蚀越大, 相应强度降低越大。pH 值在中性至弱碱范围内时, 对峰值强度影响最敏感, 说明在弱碱范围内, 腐蚀作用即可受到较大缓解。至强碱时, 强度虽然进一步增加(即腐蚀作用进一步减小), 但增加速率较小。

3.3.4 同一水化学环境下不同岩石腐蚀效应

文[7]中试验结果为化学溶液的 pH 值偏离中性越多, 其腐蚀效应越大; 而当化学溶液的 pH = 7(中

性)时,其影响相对减小。应该注意的是文[7]中的研究对象是砂岩。对于文中试验对象灰岩而言,化学溶液 pH 值的腐蚀效应则是 pH 值越大,其腐蚀效应越小(如图 9 所示)。即同一水化学环境对不同岩石的腐蚀效应不同。

4 结 论

化学溶液对灰岩强度(应力)、应变腐蚀效应明显,不同化学溶液腐蚀效应不同。主要表现在于:

(1) 三轴压缩应力-应变曲线的 k 值(弹性模量)反映了岩石的软化程度, k 值越小,岩石受化学溶液软化作用越大。

(2) 化学溶液软化作用对岩石破裂发生、发展、贯通阶段(图 5 中曲线 bc 段)的影响不大,而化学溶液对岩石微结构的腐蚀作用对该阶段影响则较大。

(3) 化学溶液对岩石的软化作用,是应变腐蚀的主要原因。软化作用越强,破坏应变越大。

(4) 灰岩峰值后破坏方式仍为脆性破坏,化学溶液对岩石虽有软化作用,但软化程度还不足以改变其脆性破坏方式。

(5) 化学溶液对岩石强度(应力)腐蚀效应表现为化学溶液浸泡后,岩石强度均有所下降:浓度、pH 值均相同时,化学溶液对岩石强度腐蚀程度受化学成分影响明显;而浓度、化学成分相同时,pH 值的变化对强度腐蚀效应亦很明显;在相同化学环境下,不同岩石的强度腐蚀效应、规律不同。

(6) pH 值在中性至弱碱范围内变化时,对灰岩峰值强度影响最敏感。

(7) 化学腐蚀下,应力-应变曲线初始段(图 5 中 oa 段)形状受化学腐蚀程度、岩石结构、饱和程度、边界条件等影响明显。应力-应变曲线初始段主要有 3 种形式: $d\sigma/d\varepsilon$ 随应力增加递增, $\frac{d^2\sigma}{d\varepsilon^2} > 0$;

$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = k(k \text{ 为常数}), \frac{d^2\sigma}{d\varepsilon^2} = 0$; $d\sigma/d\varepsilon$ 随应力增加递减, $\frac{d^2\sigma}{d\varepsilon^2} < 0$ 。

拟另文专述化学腐蚀机理、本构关系等内容。

参 考 文 献

1 陈四利,冯夏庭,李邵军. 岩石单轴抗压强度与破裂特征的化学腐蚀效应[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(4): 547~551

2 冯夏庭,王川婴,陈四利. 受环境侵蚀的岩石细观破裂过程试验与实时观测[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(7): 935~939

3 汤连生,张鹏程,王思敬. 水-岩化学作用之岩石断裂力学效应的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(6): 822~827

4 汤连生,张鹏程,王思敬. 水-岩化学作用的岩石宏观力学效应试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4): 526~531

5 汤连生,王思敬. 岩石水化学损伤的机理及量化方法探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(3): 314~319

6 Jing Zhengzi, Kimio Watanabe, Jonathan Willis-Richards, et al. A 3D water/rock chemical interaction model for prediction of HDR/HWR geothermal reservoir performance[J]. Geothermics, 2002, 31(1): 1~28

7 陈四利,冯夏庭,李邵军. 化学腐蚀对黄河小浪底砂岩力学特性的影响[J]. 岩土力学, 2002, 23(3): 284~287

8 简 浩,李术才,朱维申等. 含裂隙水脆性材料单轴压缩 CT 分析[J]. 岩土力学, 2002, 23(5): 587~591

9 周翠英,彭泽英,尚 伟等. 论岩土工程中水-岩相互作用研究的焦点问题——特殊软岩的力学变异性[J]. 岩土力学, 2002, 23(1): 124~128

10 杨天鸿,唐春安,冯启言. 孔隙水压作用下岩样加载破坏过程的数值模拟[J]. 岩土力学, 2001, 22(4): 378~382

11 王泳嘉,冯夏庭. 化学环境侵蚀下的岩石破裂特性——第二部分: 时间分形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(5): 551~556

12 谭卓英,刘文静,闭历平等. 岩石强度损伤及其环境效应实验模拟研究[J]. 中国矿业, 2001, 10(4): 49~53

13 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

14 谭卓英,刘文静,闭历平等. 酸化环境下岩石强度弱化效应的实验模拟研究[A]. 见: 中国岩石力学与工程学会. 第六次全国岩石力学与工程学术会议论文集[C]. 北京: 中国科学技术出版社, 2000, 243~246

15 汤连生,张鹏程. 水化学损伤对岩石弹性模量的影响[J]. 中山大学学报, 2000, 39(5): 126~128

16 朱珍德,胡 定. 裂隙水压力对岩体强度的影响[J]. 岩土力学, 2000, 21(1): 64~67

17 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

18 赖户政宏, Venkata S, Vutukuri, et al. 岩石强度に及ぼす化学添加物の効果[A]. 见: 岩の力学 98[C]. [s. l.]: 岩の力学連合会, 1998, 201~210

19 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

20 托鲁基安 Y S, 贾德 W R, 罗 R F 等. 岩石与矿物的物理性质[M]. 单家增,李继亮译. 北京: 石油工业出版社, 1990