

江宗斌,姜谔男,李宏. 水化学腐蚀对板岩损伤力学特性影响试验[J]. 煤炭学报, 2016, 41(S1): 80-87. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2015.0591

Jiang Zongbin, Jiang Annan, Li Hong. Experimental study of hydro-chemical corrosion influence on damage mechanical properties of slate [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(S1): 80-87. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2015.0591

# 水化学腐蚀对板岩损伤力学特性影响试验

江宗斌<sup>1</sup>, 姜谔男<sup>1</sup>, 李宏<sup>2</sup>

(1. 大连海事大学 道桥研究所, 辽宁 大连 116026; 2. 大连理工大学 岩石破裂与失稳研究中心, 辽宁 大连 116026)

**摘要:**海底隧道、地铁等岩体工程的围岩不可避免地遭受水化学腐蚀的影响,这种水-岩作用是影响岩体稳定性的重要因素之一。从宏细观和化学损伤的角度出发,针对大连地铁板岩开展不同水化学溶液(HCl, NaOH, NaCl)的腐蚀试验,测量获得其浸泡过程中的pH值、有效孔隙率、纵波波速的变化规律,以一系列化学反应式初步探讨板岩的水化学腐蚀机制。对比分析了不同溶液下板岩的变形、强度特性和试件破裂形态。基于水化学损伤与纵波波速的经验公式引入水化学损伤变量,进行自编多场耦合有限元程序的岩石弹塑性应力-化学-损伤(MCD)计算模拟验证。结果表明:①板岩受水-岩作用影响,其峰值强度 $\sigma_c$ 、弹性模量 $E$ 均有不同程度劣化;②随浸泡时间增加破裂形态逐渐由脆性转向延性;③岩石参数的损伤程度与有效孔隙率和纵波波速之间有明显的非线性、非单调的关系。

**关键词:**板岩;水-岩作用;化学腐蚀;单轴压缩;损伤;MCD耦合

**中图分类号:**TD315 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2016)S1-0080-08

## Experimental study of hydro-chemical corrosion influence on damage mechanical properties of slate

JIANG Zong-bin<sup>1</sup>, JIANG An-nan<sup>1</sup>, LI Hong<sup>2</sup>

(1. Highway and Bridge Institute, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China; 2. Center of Rock Instability and Seismicity Research, Dalian University of Technology, Dalian 116026, China)

**Abstract:** The mass of subsea tunnel and underground engineering suffer from hydrochemical corrosion inevitably. Water-rock interaction is one of the important factors which influence the stability of rock mass. Corrosion tests with different water chemical solutions (HCl, NaOH, NaCl) were carried out in this paper based on the slate of Dalian Metro from the perspective of micro-macro and chemical damage. The pH value, effective porosity and longitudinal wave velocity were measured in the process of soaking. The preliminary discussions were carried on with a series of chemical formula to analyze the slate's hydrochemistry corrosion mechanism. The deformation characteristics, strength characteristics and fracture morphology of slate under different solutions were comparatively analyzed. Based on the previous experimental formula by experiment between longitudinal wave velocity and hydrochemistry damage, a hydrochemistry damage degree was introduced to carry out a calculation program verification by the independent program of rock elastic-plastic stress-chemical-damage (MCD) more field coupling finite element program. The test results show that: ① The slate's mechanics index include peak intensity ( $\sigma_c$ ) and elastic modulus ( $E$ ), all have different degree of dam-

收稿日期:2015-04-27 修回日期:2015-09-24 责任编辑:常琛

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(3132014326);国家基础研究发展计划(973)资助项目(2011CB013503);辽宁省科学事业公益研究基金资助项目(2013003003)

作者简介:江宗斌(1987—),男,山东济南人,博士研究生。E-mail:jzb1987@126.com。通讯作者:姜谔男(1971—),男,教授,博士。E-mail:jiangannan@163.com

age influenced by water-rock effect; ② The fracture morphology changes from brittle to ductile gradually with the soak time; ③ The damage degree and the effective porosity of rock parameters have non-linear relationship between longitudinal wave velocity.

**Key words:** slate; water-rock interaction; chemical corrosion; uniaxial compression; damage; MCD coupling

赋存在自然界中的岩体由于长期受到地下水或地表水的渗透作用和化学反应,使得岩石内部的微观孔隙结构处于一种动态变化的过程<sup>[1]</sup>,而岩石微观孔隙结构的不断改变是导致岩石宏观物理力学特性改变的主要原因。自然界中滑坡、崩塌、泥石流等工程地质灾害也是受水环境影响所致<sup>[2]</sup>,由于水化学侵蚀造成重大典型工程事故有史上著名的 Vajont 坝肩滑坡与法国 Malpasset 拱坝溃坝事故等。因此,开展水化学腐蚀对岩石力学特性影响效应的研究具有重要意义。许多研究学者在岩石化学腐蚀方面做了大量的研究工作并取得了丰硕的成果。

近年来,针对水-岩作用李鹏等<sup>[3]</sup>开展了水化学对砂岩的抗剪强度特性的影响效应试验研究,提出用孔隙率为水化学损伤度定量分析一些力学参数的损伤演化过程。王伟等<sup>[4]</sup>对砂岩进行了腐蚀试验,研究表明试样质量的变化和化学溶液性质有关,试样相对质量变化存在明显差异。离子成分及 pH 值均对红砂岩力学特性产生较大影响。黄明等<sup>[5]</sup>基于不同 pH 值溶液中软岩的循环崩解试验,得到了不同粒径范围颗粒百分含量随崩解次数的变化关系。重点论述了 pH 值对泥质页岩崩解过程新增表面能的影响规律。邱恩喜等<sup>[6]</sup>研究了不同类型水环境下的作用性状和溶蚀特征,重点从抗压强度、波速等参数的角度分析经历不同作用的含膏红层软岩可溶成分的流失程度及其对环境水的影响。丁梧秀等<sup>[7-8]</sup>针对龙门石窟灰岩的水溶液侵蚀破坏现象,开展不同水化学溶液及冻融耦合下的力学试验,建立化学溶液作用下灰岩侵蚀溶解动力学方程,分析了水化学溶液及冻融耦合作用下的力学损伤特征。在试验基础上,建立水化学溶液及冻融耦合作用下龙门石窟灰岩的侵蚀损伤方程。

上述水-岩作用机制的研究均是围绕工程中常见的砂岩、页岩、灰岩、花岗岩等展开进行的。通过上述研究,基本揭示了水-岩强度弱化的本质,弱化机制也大体明确。但对于板岩的水化学腐蚀研究的不多,特别是板岩在化学溶液中的损伤力学特性鲜见报道。朱珍德<sup>[9]</sup>,杨春和<sup>[10]</sup>等都分别对板岩遇水软化的力学特性进行了研究,并给出了相应的损伤机制。而不同酸碱性溶液下的化学腐蚀对板岩的损伤力学特性还研究欠缺。本试验以大连地铁为工程背景,开

展了板岩在不同化学溶液中的水-岩作用腐蚀试验。着重分析探讨了不同腐蚀条件下板岩的单轴应力-应变曲线和破裂特征。基于前人试验研究得出的水化学损伤与超声波速之间的经验公式给出水化学损伤变量的动态演化规律,进行自编程序岩石弹塑性应力-化学-损伤(MCD)耦合有限元程序的计算模拟验证,并以一系列的化学反应方程式分析其损伤机制。从水化学损伤的角度对富集水隧道的安全施工和稳定性提供理论指导。

大连地铁学苑广场站-海事大学站区间隧道全长 1 249.636 m,场区整体上看东高西低,地面高程 32.09 ~ 3.20 m,东部为剥蚀低丘陵、西部为凌水河阶地,地层为第四系全新统人工堆积层( $Q_4^{pl}$ )、第四系冲洪积层( $Q_4^{al+pl}$ )、第四系上更新统坡洪积层( $Q_3^{dl+pl}$ )、震旦系长岭子组(Zwhc)板岩和震旦系长岭子组(Zwhc)碎裂状板岩,此开挖段盛产板岩(slate)。

## 1 化学腐蚀对岩石微观结构的影响

### 1.1 板岩结构及矿物成分鉴定

试验所用岩石为大连地铁学海区间 3 号竖井节理裂隙板岩,板岩的岩性致密,板状劈理发育,组成的矿物颗粒很细,难以用肉眼鉴别。需要通过电镜扫描和能谱分析(SEM-EDS)对板岩成分和组成进行微观测量。

通过电镜扫描和能谱分析显微图像大致可以看出,板岩的组成成分以  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  为主,板岩为灰黑色板状构造,隐晶质构造。图 1 为岩样腐蚀前后的 SEM 显微图像。图中可以看出经过腐蚀后板岩表面的节理痕迹变浅。

经鉴定,板岩的矿物成份主要为绢云母、绿泥石和石英,还含有少量伊利石、泥质、炭质、碳酸盐、黄铁矿、黑云母等,外观为灰黑色。绢云母为颗粒状,粒径在 35  $\mu m$  左右;绿泥石呈针状、片状,长轴长 50 ~ 80  $\mu m$ ;炭质、泥质等矿物主要分布于黏土矿物排列形成的孔隙中,粒径大小在 30  $\mu m$  左右,在层理面附近分布较少;胶结物中的黏土矿物粒径 10 ~ 30  $\mu m$ ,颗粒之间以孔隙充填式胶结为主。

### 1.2 试样的制备

由于板岩节理性较强,试样钻取过程中发现垂直于节理方向钻取的试样易延节理方向断开,成功率

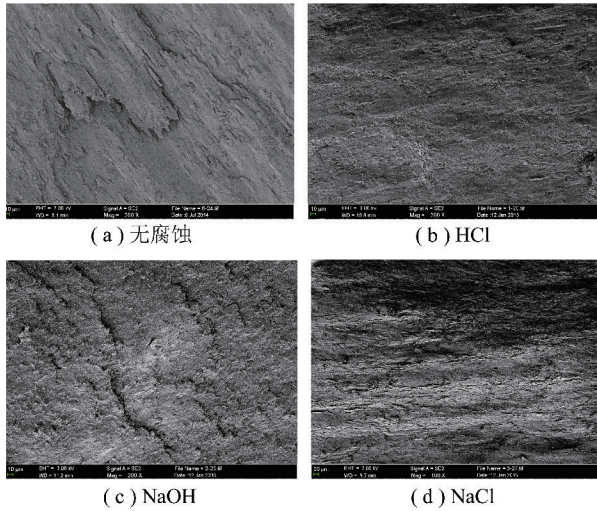


图1 岩样腐蚀180 d前后显微图像

Fig. 1 SEM images of slate before and after corrosion 180 d 低。所以钻取试样的轴向应与节理方向保持平行。

采用姜堰市星光机电厂生产的 ZS-200 型自动取芯机和 SHM-200 双端面磨石机加工制成  $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  的圆柱状标准试样。制样要求按照国际岩石力学学会试验规程加工。钻成的试样共计 38 件,剔除破损、目测差异性较大的试样,选择均一性较好的进行试验,每组取 2 个试样。

### 1.3 腐蚀过程 pH 的变化规律

将试样放入干燥箱内排除水分,在  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  恒温下烘干  $48 \text{ h}^{[11]}$ 。冷却后将每组试样放入各自的溶液环境中,以抽真空法将其强制饱和,即  $\text{pH}=2$  的 HCl 溶液、 $\text{pH}=12$  的 NaOH 溶液和  $\text{pH}=7$  的 NaCl 溶液中,浸泡于 45 L 相应的化学溶液中,并且采用双层塑料薄膜封口后再旋紧盖子进行密封。整个浸泡过程温差变化不大,故不考虑温度对试验的影响。试样分为 4 批,每批浸泡 45 d,总浸泡时长 180 d。

试验计时开始后,采用 PHS-3C 型数显酸度计进行测定,得到各种腐蚀溶液环境下 pH 值随时间的变化规律,如图 2 所示。从图中可以得到如下规律:

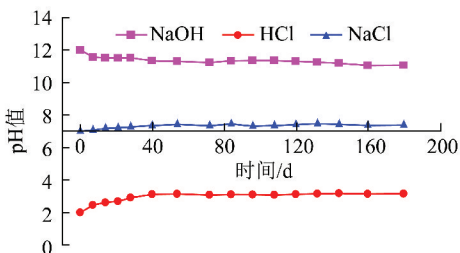


图2 溶液 pH 随时间的变化曲线

Fig. 2 Variation of pH value of solutions with time

(1) 本次试验中,岩样浸泡于酸性环境(初始  $\text{pH}=2$  的 HCl)和碱性环境(初始  $\text{pH}=12$  的 NaOH),

在一系列的水-岩化学作用过程中,腐蚀溶液的 pH 值随着时间的推移逐渐向中性趋近。而溶液本身随着时间的推移呈现出酸碱度自平衡的趋势。

$\text{pH}=7$  的中性溶液 NaCl 的腐蚀环境下,溶液的 pH 值随着腐蚀时间的推移有所增大,即趋于弱碱性。这主要是由于板岩的主要成分发生水解反应后  $\text{H}^+$  逐渐减少,  $\text{OH}^-$  增加而呈弱碱性。

(2) 浸泡初期(前 40 d),酸性和碱性腐蚀溶液环境下的 pH 值变化较显著,之后,水化学溶液 pH 值变化逐步减缓并趋于稳定。表明在封闭系统内水化学作用具有较强的时间依赖性,随着时间推移水化学作用逐渐减弱并最终趋于稳定。

(3) 中性溶液初期(前 40 d) pH 值变化较缓慢,之后 pH 值增加较快,在 40 ~ 180 d 趋于稳定。

### 1.4 有效孔隙率和纵波波速的测定

按照煤和岩石物理力学性质测定方法<sup>[12]</sup> GB/T 23561.5—2009 岩石有效孔隙率(即开口孔隙体积与其总体积之比)的数值等于岩石强制饱和和吸水率的数值。本文通过测定岩石的强制吸水率来确定有效孔隙率。

岩石的超声波波速与其物理、力学参数具有较好的相关性。声波波速是岩体物理、力学特性的综合表征,是评价岩体质量、结构分类以及松动层厚度确定的重要参数。利用声波波速特性研究岩石的损伤、破裂特性,对研究工程岩体破坏及稳定性问题有着十分重要的意义。超声波技术作为一种有效的无损测试手段,可用于研究岩石的构成和内部发育情况。不同岩石以及同种岩石不同状态下的波速都具有较大差异,可以根据岩石或岩样声波波速的差异判断岩石内部的完整性。为了便于对比,本试验只测定其纵波波速。

有效孔隙率和纵波波速的变化均可以反映岩石内部结构的变化,岩石在不同水化学溶液中经历不同腐蚀时间后,各试样的孔隙率和纵波波速的变化情况如图 3,4 所示。图中为浸泡 180 d 内的测试数据,每条曲线的数据均来自 2 个试样的平均值,试样所对应的数据为图中箭头所指示的曲线。

从图 3 中可以看出,所有纵波波速在前 45 d 内变化缓慢,变化率仅占总波速的 0.97%。在之后的 110 d 内纵波波速加速降低,尤其是酸性溶液和碱性溶液中试样的变化幅度较大,分别占总波速的 9.91% 和 6.28%;而 NaCl 溶液中试样的变化相对缓慢,在浸泡至 90 d 左右时,波速变化就已经趋于平衡,波速降低比例占总波速的 4.95%。在后 65 d 的



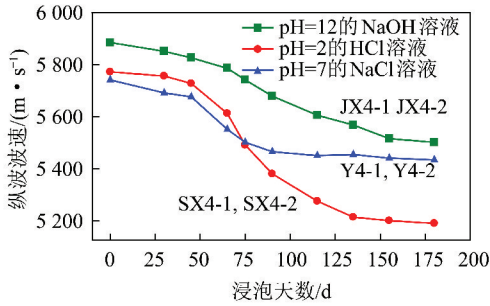


图3 不同浸泡状态条件下试样纵波波速变化曲线  
Fig. 3 Longitudinal wave velocity under different hydrochemical environments

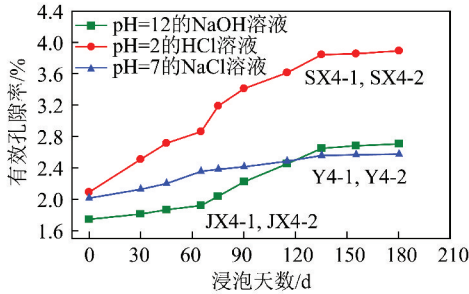


图4 不同浸泡状态条件下试样有效孔隙率变化曲线  
Fig. 4 Test results of porosity under different hydrochemical environments

浸泡过程中,纵波波速已经趋于稳定,略微有所降低。从数据可以看出酸碱盐 3 种溶液对纵波波速具有

不同的影响作用,也寓示着不同化学溶液与板岩之间存在不同程度的水-岩作用。

如图 4 所示,有效孔隙率随着浸泡时间的推移逐渐增大。碱性溶液中的 JX4-1, JX4-2 两个试样在开始段 0 ~ 75 d 的变化相对缓慢,浸泡中间阶段 75 ~ 135 d 变化率加快,之后趋于稳定。酸性 SX4-1, SX4-2 和中性 Y4-1, Y4-2 溶液中的 4 个被监测试样,浸泡至 135 d 的有效孔隙率增长速率较快,且酸性溶液中试样的有效孔隙率增长速率是中性溶液中试样的 3.4 倍。这一监测结果与前文测得“酸性溶液中试样的纵波波速变化幅度大”的结论相对应,说明监测结果的合理性。

### 1.5 板岩水化学损伤机制分析

此板岩的矿物成分主要为绢云母、绿泥石和石英,故本文主要针对这几种矿物成分的溶蚀机制进行分析。

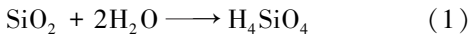
对于本次板岩的水化学反应,主要矿物成分溶蚀反应化学方程式见表 1,为板岩中绢云母和绿泥石的反应方程式。绢云母和绿泥石在 NaCl 溶液中水解产生 OH<sup>-</sup> 致使溶液呈弱碱性,与图 2 测得的 pH 值相吻合。

石英的主要矿物成分为 SiO<sub>2</sub>, 系碱性氧化物,其溶蚀反应方程式如式(1), (2)所示:

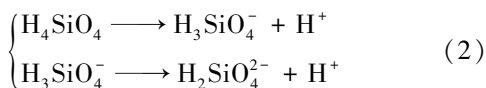
表 1 板岩中绢云母和绿泥石的反应方程式

Table 1 Reaction equations of sericite and chlorite

矿物成分	溶液类型	反应方程式
绢云母	pH=2 的 HCl 溶液	$KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2 + 10H^+ \longrightarrow K^+ + 3Al^{3+} + 3H_4SiO_4$
	pH=7 的 NaCl 溶液	$KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2 + 10H_2O \longrightarrow K^+ + 3Al(OH)_3 + OH^- + 3H_4SiO_4$
	pH=12 的 NaOH 溶液	$KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2 + H_2O + 8OH^- \longrightarrow K^+ + 3Al(OH)_4^- + 3SiO_3^{2-}$
绿泥石	pH=2 的 HCl 溶液	$Mg_5Al_2Si_3O_{10}(OH)_8 + 16H^+ \longrightarrow 5Mg^{2+} + 2Al^{3+} + 3H_4SiO_4 + 6H_2O$
	pH=7 的 NaCl 溶液	$Mg_5Al_2Si_3O_{10}(OH)_8 + 10H_2O \longrightarrow 5Mg^{2+} + 2Al(OH)_3 + 10H_4SiO_4$
	pH=12 的 NaOH 溶液	$Mg_5Al_2Si_3O_{10}(OH)_8 + H_2O + 8OH^- \longrightarrow 5Mg(OH)_2 + 2Al(OH)_4^- + 3SiO_3^{2-}$



SiO<sub>2</sub> 在中性 NaCl 溶液中溶解度很低,当处在碱性溶液中时 SiO<sub>2</sub> 的水化物 H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> 一次离解为 H<sub>3</sub>SiO<sub>4</sub><sup>-</sup> 和 H<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, 化学方程式为



上述化学反应式表明,化学腐蚀主要通过化学溶液和主要矿物质之间的离子交换产生新的生成物溶解于溶液进而改变岩石的有效孔隙率,部分矿物溶蚀产生次生孔隙率。这一系列的物理化学反应改变了岩石的微细观结构,致使岩石水化学损伤,从而引起

纵波波速下降。

## 2 不同腐蚀条件的岩石单轴压缩试验

### 2.1 全应力-应变曲线对比

采用大连海事大学和长春朝阳试验机厂联合研制的 RLW-2000 微机控制高低温岩石三轴流变仪进行单轴压缩试验。在室温下对干燥岩样进行单轴压缩试验按规范<sup>[13]</sup>。每组试验取 2 个试件,采用变形控制加载方式,加载速率为 0.04 mm/min。

图 5 给出了干燥无腐蚀试样和不同化学溶液环境浸泡饱和状态下不同时间的单轴加载试验全应力-应变曲线。图 5 中黑实线所示为未经腐蚀的板

岩干燥试样的加载曲线。此线段体现为明显的脆性特征,轴向承载力在达到最高点时产生骤然破坏并且伴随有清脆的爆裂声,随后进入软化阶段逐渐失去承载力。从图 5(a), (b) 中明显看出,经过 NaOH 和 HCl 溶液腐蚀不同时间后的试样峰值强度  $\sigma_c$  明显降低,弹性模量  $E$  (即全应力-应变曲线线性段斜率的数值)也有所降低。随着腐蚀时间的增加,曲线表现

出明显的延性特征,轴向应变增大,大多数曲线出现二次破坏。而图 5(c) 为 NaCl 中性溶液腐蚀后的试样,其峰值强度  $\sigma_c$  和弹性模量  $E$  总体上呈下降趋势,而经过 45 d NaCl 溶液浸泡后的试样峰值强度  $\sigma_c$  变化不大,且弹性模量  $E$  在轴向应变达到 0.2% 时出现明显转折,这可能与该试样本身物质组成的不均一性有关。

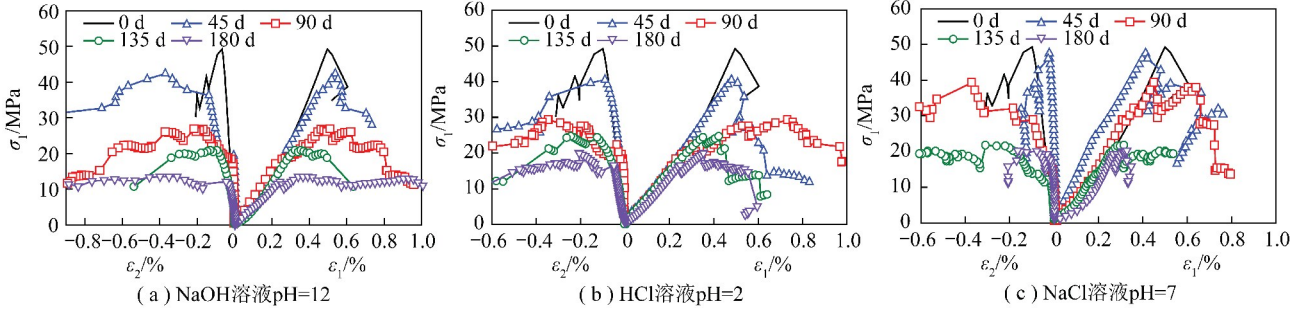


图 5 不同腐蚀条件下的单轴压缩全应力-应变曲线

Fig. 5 Uniaxial compressive stress-strain curves for different corrode environment

经过 HCl, NaOH, NaCl 三种化学溶液腐蚀的试样峰值强度和弹性模量均有不同程度的损伤,且腐蚀时间越长对试样的损伤程度越大。从不同浸泡时间长度岩块的试验曲线容易看出,水-岩作用对岩块峰值强度  $\sigma_c$  造成损伤的剧烈程度表现为先加速后缓和的趋势。

2.2 试样破裂形态对比

不同化学溶液环境浸泡下的岩样受到不同程度

的软化,呈现脆性降低延性增加的趋势。这说明水-岩作用改变了岩石的微细观结构组织。由图 6 中的试样破裂形态图片可以看出,试样在单轴压缩荷载作用下,均呈现出相似的破裂特征,属脆性张拉破坏类型,裂纹方向几乎与荷载方向平行。

干燥试样的裂隙贯通、清晰且裂纹间无黏连,通常只有一条明显裂隙;经过 45 d 浸泡的试样,在主裂纹周围有几条次生裂纹萌生;经过 90 d 浸泡的试样

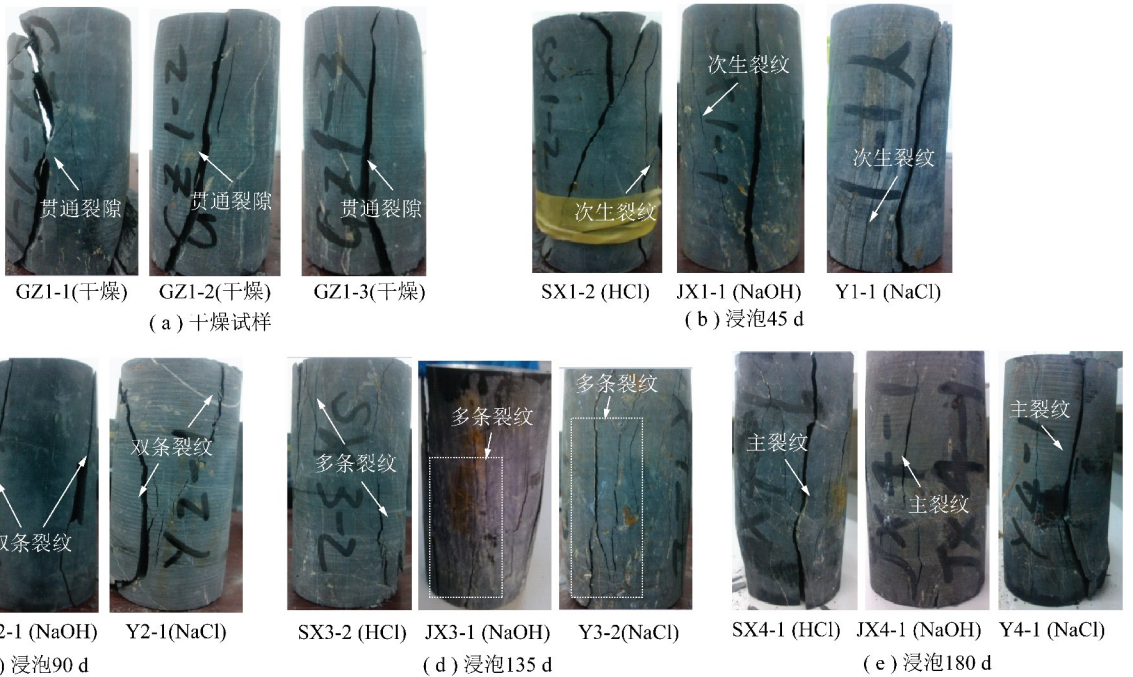


图 6 单轴压缩下板岩试件破裂形态

Fig. 6 Slate specimens fracture morphology under uniaxial compressive

更加明显的呈现出两条或多条裂隙;经过 135 d 浸泡的试样从外观上产生了红色锈蚀的变化,有多条细裂纹萌生且隙间没有明显开裂,与前 3 次试样相比,容易看出本次试验的岩块破坏形态有由脆性向延性转变的趋势;经过 180 d 浸泡的岩样裂隙相对明显且只有一条主裂纹。

### 3 岩石弹塑性应力-化学-损伤耦合模型

#### 3.1 岩石弹塑性应力-化学-损伤 (MCD) 耦合机理

水化学作用改变矿物成分及结构的变化引起其微细观的损伤,而宏观上则体现为力学参数的变化。宏观力学性质的变化是对岩石内部微观结构变化的外在体现,微细观变化是造成岩石损伤的内在根本原因。

在化学溶液腐蚀作用下,岩石的损伤引起材料微观结构的变化和材料受力性能的劣化。根据宏观唯象损伤力学概念,岩石腐蚀损伤变量  $D_c$  可定义为

$$D_c = 1 - \frac{E_{c(t)}}{E_0} \quad (3)$$

式中,  $E_0$  为岩石腐蚀前的初始弹性模量;  $E_{c(t)}$  为岩石腐蚀后的弹性模量。

Lemaitre 提出的应变等价原理,岩石材料内部损伤型本构关系为

$$\sigma = (1 - D_m) E \varepsilon \quad (4)$$

式中,  $E$  为无损材料的弹性模量;  $D_m$  为应力损伤变量。

岩石腐蚀型本构关系为

$$\sigma = (1 - D_m) E_{c(t)} \varepsilon \quad (5)$$

由式(7)和(9)得到用腐蚀和应力损伤变量表示的岩石应力-应变关系为

$$\sigma = (1 - D) E_0 \varepsilon \quad (6)$$

$$D = D_m + D_c - D_m D_c \quad (7)$$

式中,  $D$  为岩石的腐蚀受荷总损伤变量;  $D_m D_c$  为耦合项。

#### 3.2 水化学腐蚀损伤变量的确定及演化

为了更准确的量化描述细观化学损伤,选择合适的损伤变量参数是关键。由于化学溶液对岩石矿物的溶蚀、溶解等作用,引起的岩石细观结构损伤主要表现为岩石结构微孔洞或空隙(孔隙和裂隙)的增加。因此,以空隙率的变化为基础而建立损伤变量,可反映细观结构化学损伤程度,即损伤变量形式<sup>[14]</sup>为

$$D_{t_1} = \frac{n_{t_1} - n_{t_0}}{1 - n_{t_0}} = 1 - \frac{1 - n_{t_1}}{1 - n_{t_0}} \quad (8)$$

式中,  $n_{t_0}$  为岩石  $t_0$  时刻空隙率;  $n_{t_1}$  为化学损伤后岩

石  $t_1$  时刻的空隙率。

试验过程中,孔隙率的测定繁琐、难度较大。由于弹性波波速对空隙的发育状况反应敏感且测定过程快捷、容易实现。微空隙越发达,弹性波波速越小,可得

$$\frac{1}{v_{p(t)}} = \frac{1 - n_t}{v_m} + \frac{n_t}{1 - v_f} \quad (9)$$

式中,  $n_t$  为岩块  $t$  时刻空隙率;  $v_{p(t)}$  为  $t$  时刻岩块测试纵波波速, m/s;  $v_m$  为岩块颗粒骨架纵波, m/s;  $v_f$  为空隙中流体纵波波速, m/s。

由式(2)得

$$n_t = \frac{a}{v_{p(t)}} + b \quad (10)$$

其中,

$$a = \frac{v_m v_f}{v_m - v_f}, b = -\frac{v_f}{v_m - v_f} \quad (11)$$

式(3), (5), (6) 即为化学损伤变量计算公式。损伤变量的计算结果是以  $t_0$  时刻的损伤为基础至  $t_1$  时刻的损伤量。因此,通过式(8), (9), (11) 可以进行任意时间段的化学损伤测量计算。当空隙中流体性质相同时,对岩性相同的岩石,  $a, b$  为常数,此时空隙率  $n_t$  仅为所测岩块纵波波速  $v_{p(t)}$  的函数。

这与实际工程中的岩体处于弱酸弱碱的水化学腐蚀环境很相似,因而上述化学损伤变量计算公式可以用于工程岩体化学腐蚀损伤变量定量计算分析研究<sup>[15]</sup>。

#### 3.3 受荷损伤变量及演化方程

本文考虑应用等效塑性应变  $\bar{\varepsilon}^p$  表征岩石损伤变量的演化过程<sup>[16]</sup>, 试验研究表明:随着  $\bar{\varepsilon}^p$  的增加,损伤逐渐加剧,损伤变量  $D_m$  是  $\bar{\varepsilon}^p$  的非线性函数,可表示成等效塑性应变的指数函数。

等效塑性应变  $\bar{\varepsilon}^p$  的计算如下:

$$\bar{\varepsilon}^p = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_{p1} - \varepsilon_{p2})^2 + (\varepsilon_{p2} - \varepsilon_{p3})^2 + (\varepsilon_{p3} - \varepsilon_{p1})^2} \quad (12)$$

式中,  $\varepsilon_{p1}, \varepsilon_{p2}$  和  $\varepsilon_{p3}$  分别为 3 个主塑性应变。

对应的损伤变量  $D_m$  的演化方程如下:

$$D_m = 1 - \exp[-\kappa(\bar{\varepsilon}^p - \bar{\varepsilon}_0^p)] \quad (13)$$

式中,等效塑性应变阈值  $\bar{\varepsilon}^p = 0$ , 即等效塑性应变产生时有损伤演化;  $\kappa$  为试验所得正常数。

#### 3.4 应力-化学-损伤 (MCD) 耦合模型及验证

建立平面应变有限元模型,模型为计算范围宽  $x$  方向为 50 mm 和高  $y$  方向为 100 mm 的岩石试样。采用四边形单元进行剖分,共划分为 296 个单元和



174个节点。模型左、右两侧面为自由边界,底面施加 $x$ 和 $y$ 双向的位移约束,顶面施加 $x$ 位移约束。在顶面上施加压应力进行分级加载直至破坏,每级荷载 $q=5\text{ MPa}$ 。弹塑性力学参数:容重 $\gamma=26.0\text{ kN/m}^3$ ,弹性模量 $E=58\text{ MPa}$ ,泊松比 $\mu=0.3$ ,黏聚力 $c=0.52\text{ MPa}$ ,内摩擦角 $\varphi=30^\circ$ ,剪胀角 $\phi=30^\circ$ ;力学损伤参数:明显损伤黏聚力 $c_r=50\text{ kPa}$ , $\eta=0.7$ ,损伤参数 $\kappa=20$ 。以上参数的选取从单轴压缩试验中获得。

通过3.1和3.2节所述的耦合机理,化学损伤参数参考文献给出<sup>[17]</sup>,岩块颗粒骨架纵波速 $v_m=6\ 000\text{ m/s}$ ,空隙中流体纵波速 $v_f$ ,本试验为烘干后状态,空隙流体为空气 $v_f=334\text{ m/s}$ 。

应用所编制程序,以经NaOH浸泡溶液中的试样为例进行模拟计算。输入的实际测定所得的不同浸泡时间的纵波波速分别为 $v_{p(0\text{ d})}=5\ 885.21\text{ m/s}$ , $v_{p(45\text{ d})}=5\ 826.44\text{ m/s}$ , $v_{p(90\text{ d})}=5\ 678.74\text{ m/s}$ , $v_{p(135\text{ d})}=5\ 567.91\text{ m/s}$ , $v_{p(180\text{ d})}=5\ 501.2\text{ m/s}$ 。计算获得不同腐蚀时间的单轴压缩全应力-应变曲线如图7所示。

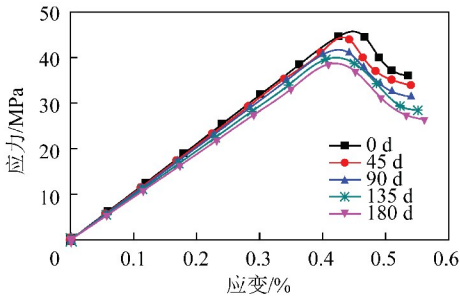


图7 NaOH溶液下不同腐蚀时间的单轴压缩全应力-应变计算曲线

Fig. 7 Under different corrosion time of whole stress-strain calculation curves under uniaxial compression in NaOH solution

计算结果表明,此板岩的单轴压缩试验具有明显的软化特性。无腐蚀试样的峰值强度 $\sigma'_c=44.5\text{ MPa}$ ,此数值与实际试验的峰值强度 $\sigma_c=49.2\text{ MPa}$ 基本吻合。随着浸泡时间的增加,试样的峰值强度 $\sigma_c$ 呈减小趋势,0~90 d的峰值强度减小较为明显,随后随着浸泡时间的增加,其峰值强度减小缓慢,最后趋于稳定。因此可将板岩的水化学腐蚀损伤分为3个阶段:第1阶段为损伤加速阶段,第2阶段为损伤减速阶段,第3阶段为损伤速率趋于停滞阶段。

## 4 结 论

(1)浸泡过程中溶液pH值、板岩有效孔隙率和纵波波速的变化趋势都在一定时间后趋于稳定。标志着板岩的水化学损伤随着时间推移会达到一种相

对平衡。

(2)水化学损伤从微细观上改变了板岩的有效孔隙率,产生次生孔隙率,进而在宏观上影响纵波波速和岩石力学参数的变化。不同酸碱性溶液对板岩的损伤程度不同,酸性环境HCl的浸泡对板岩的有效孔隙率和纵波波速的影响比NaOH和NaCl溶液的明显。

(3)水-岩作用对岩石的峰值强度 $\sigma_c$ 和弹性模量 $E$ 等物理量有不同程度的损伤,且损伤程度随浸泡时间增加而增大。 $\sigma_c$ 的削弱速率自浸泡开始表现为先加速后缓慢的趋势,最后逐渐趋于稳定;单轴压缩试验曲线和破裂形态表明,随着浸泡时间增加岩样逐渐由脆性破坏向延性破坏转变。

(4)采用自主编制程序进行MCD耦合计算验证。以板岩的纵波波速作为水化学损伤变量,与应力损伤耦合,分析其受力、变形特性。结果表明此板岩的损伤特性与试验获得的规律基本相符。研究成果为复杂耦合环境下工程建设提供参考和依据。

## 参考文献:

- [1] 冯夏庭. 岩石破裂过程的化学-应力耦合效应[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [2] 梁卫国, 张传达. 盐水浸泡作用下石膏岩力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(6): 1156-1163.  
Liang Weiguo, Zhang Chuanda. Experimental study of mechanical properties of gypsum saturated in brine [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(6): 1156-1163.
- [3] 李鹏, 刘建. 水化学作用对砂岩抗剪强度特性影响效应研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(2): 380-386.  
Li Peng, Liu Jian. Experimental study for shear strength characteristics of sandstone under water-rock interaction effects [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(2): 380-386.
- [4] 王伟, 刘桃根, 吕军, 等. 水岩化学作用对砂岩力学特性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(S2): 3607-3617.  
Wang Wei, Liu Taogen, Lü Jun, et al. Experimental study of influence of water-rock chemical interaction on mechanical characteristics of sandstone [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(S2): 3607-3617.
- [5] 黄明, 詹金武. 酸碱溶液环境中软岩的崩解试验及能量耗散特征研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(9): 2607-2623.  
Huang Ming, Zhan Jinwu. Disintegration tests and energy dissipation characteristics of soft rock in acid and alkali solution [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(9): 2607-2623.
- [6] 邱恩喜, 康景文, 郑立宁, 等. 成都地区含膏红层软岩溶蚀特性研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(S2): 274-280.  
Qiu Enxi, Kang Jingwen, Zheng Lining, et al. Study of corrosion characters of red-bed soft rock containing saline deposit in Chengdu [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(S2): 274-280.
- [7] 丁梧秀, 徐桃, 王鸿毅, 等. 水化学溶液及冻融耦合作用下灰岩力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(5):

- 979-985.
- Ding Wuxiu, Xu Tao, Wang Hongyi, et al. Experimental study of mechanical property of limestone under coupled chemical solution and freezing-thawing process [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(5): 979-985.
- [8] 丁梧秀, 陈建平, 徐桃, 等. 化学溶液侵蚀下灰岩的力学及化学溶解特性研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(7): 1825-1830.
- Ding Wuxiu, Chen Jianping, Xu Tao, et al. Mechanical and chemical characteristics of limestone during chemical erosion [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(7): 1825-1830.
- [9] 朱珍德, 邢福东, 王思敬. 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(S2): 4739-4743.
- Zhu Zhende, Xing Fudong, Wang Sijing. Analysis on strength softening of argillite underground water by damage mechanics [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(S2): 4739-4743.
- [10] 杨春和, 冒海军. 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): 2090-2098.
- Yang Chunhe, Mao Haijun. Study on variation of microstructure and mechanical properties of water-weakening slates [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(12): 2090-2098.
- [11] 崔强, 冯夏庭, 薛强, 等. 化学腐蚀下砂岩孔隙结构变化的机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(6): 1209-1216.
- Cui Qiang, Feng Xiating, Xue Qiang, et al. Mechanism study of porosity structure change of sandstone under chemical corrosion [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(6): 1209-1216.
- [12] 煤炭科学研究总院开采设计研究分院, 煤炭科学研究总院检测研究分院. 煤和岩石物理力学性质测定方法 GB/T 23561.5—2009[S].
- [13] 长江水利委员会长江科学院. 水利水电工程岩石试验规程(SL264-2001)[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
- [14] 丁梧秀, 冯夏庭. 灰岩细观结构的化学损伤效应及化学损伤定量研究方法探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(8): 1283-1288.
- Ding Wuxiu, Feng Xiating. Study on chemical damage effect and quantitative analysis method of meso-structure of limestone [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(8): 1283-1288.
- [15] 汪亦显, 曹平. 水化学腐蚀下岩石损伤力学效应研究[J]. 南华大学学报, 2009, 23(1): 27-30.
- Wang Yixian, Cao Ping. Study on mechanical damage effect for rock under hydrochemical erosion [J]. Journal of University of South China (Science and Technology), 2009, 23(1): 27-30.
- [16] 贾善坡, 陈卫忠, 于洪丹, 等. 泥岩隧道施工过程中渗流场与应力场全耦合损伤模型研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(1): 19-26.
- Jia Shanpo, Chen Weizhong, Yu Hongdan, et al. Research on seepage-stress coupling damage model of boom clay during tunneling [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(1): 19-26.
- [17] 丁梧秀, 冯夏庭. 灰岩细观结构的化学损伤效应及化学损伤定量研究方法探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(8): 1283-1284.
- Ding Wuxiu, Feng Xiating. Study on chemical damage effect and quantitative analysis method of meso-structure of limestone [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(8): 1283-1284.