

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20210902005

化学及干湿循环作用下泥灰岩损伤劣化特性分析*

王林峰¹, 程平^{1,2}, 夏万春¹, 唐宁¹

(1. 重庆交通大学山区公路水运交通地质减灾重庆市高校市级重点实验室, 重庆 400074;
2. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要: 库岸岩质边坡底部受水的化学腐蚀及水位变化形成的干湿循环影响,其强度远低于一般岩体。泥灰岩作为一种强度较差的特殊岩体,更易受到地质、水文等因素的联合破坏。对三峡库区巫山段常见的泥灰岩进行化学溶液浸泡及干湿循环作用,开展单轴压缩试验、直剪试验、电镜扫描试验、数值模拟,并采用 PSO-BP 神经网络对抗剪强度参数进行预测。研究表明:泥灰岩在化学及干湿循环作用后的受力变形经历着裂纹起裂-扩展-延伸-破坏四个阶段,破坏时的裂纹扩展路径呈现多向发展的趋势;岩石的单轴抗压强度、内摩擦角、黏聚力在酸性增强及干湿循环次数增加后都有明显下降,这主要与其内部结构、矿物组成有关,干湿循环作用下的热胀冷缩及化学作用下的腐蚀,加剧了泥灰岩内部裂隙扩展、孔隙增大;PSO-BP 神经网络能较好地预测泥灰岩抗剪强度参数在不同 pH 值、不同干湿循环次数下的值,误差较小,可将该方法运用到类似案例分析中。

关键词: 化学腐蚀;干湿循环;泥灰岩;劣化;PSO-BP

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)05-0976-10

Analysis of Damage and Deterioration Characteristics of Marl under Chemical and Dry-wetting Cycles

WANG Linfeng¹, CHENG Ping^{1,2}, XIA Wanchun¹, TANG Ning¹

(1. Key Laboratory of Geological Hazards Mitigation for Mountainous Highway and Waterway, Chongqing Municipal Education Commission, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironmental Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The strength of reservoir bank rock slopes is much lower than that of general rock mass due to the chemical corrosion of water and the dry-wet cycle caused by the change of water levels. As a kind of special rock mass with poor strength, argillaceous limestone is more easily damaged due to geological and hydrological factors. The common argillaceous limestone in the Wushan section of the Three Gorges Reservoir area was soaked in chemical solution and subjected to dry-wetting cycles. Uniaxial compression tests, direct shear tests, scanning electron microscope tests and numerical simulations were carried out, and PSO-BP neural network was used to predict the shear strength param-

* 收稿日期:2021-09-02;修回日期:2022-04-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51678097)、重庆市自然科学基金面上项目(cstc2020jcyj-msxmX0218)、重庆市教委科学技术研究项目(KJQN201800706)资助

作者简介:王林峰(1983—),男,教授,博导。主要从事从事地质灾害减灾理论与技术研究。

E-mail: wanglinfeng@cqjtu.edu.cn

通讯作者:程平(1994—),男,博士研究生。主要从事山区航道地质安全控制理论与技术研究。E-mail:2302080303@qq.com

ters. The results show that the mechanical deformation of argillaceous limestone after chemical and wetting-drying cycles experiences four stages, including crack initiation, crack propagation, crack extension and failure. The crack propagation path during failure shows a trend of multi-direction development. The uniaxial compressive strength, internal friction angle and cohesion of the rock decrease obviously with the increase of acidity and dry-wet cycles, which are mainly related to the internal structure and mineral composition. Thermal expansion and cold contraction under the action of wetting and drying cycles and corrosion under the action of chemical aggravate the crack expansion and pore enlargement in marl. PSO-BP neural network can better predict the shear strength parameters of argillite limestone under different pH values and different wetting and drying cycles, and the error is small. So this method can be applied to similar case analysis.

Keywords: chemical etching; dry-wet circulation; argillaceous limestone; degradation; PSO-BP

引言

我国西南地区江河众多,水资源丰富,水的化学腐蚀对岩石的损伤劣化较为明显,它不仅可以软化岩体基座,同时岩石中的化学物质与水发生反应,降低了岩石的力学强度。水位的不断涨落对岩体产生干湿循环作用,加速危岩整体失稳破坏。因此,如何准确掌握岩石在化学及干湿循环联合作用下的破坏机制,从而为危岩治理和灾害防治提供理论参考,其研究具有重要的工程价值。

水流的化学腐蚀对危岩体的裂化有着重要的影响。研究表明,岩体基座受到水化学腐蚀作用后,岩体内部微观结构将发生变化,裂隙扩展且裂纹增多,岩体强度力学参数降低^[1-2]。Mohtarami Ehsan等^[3]基于扩展有限单元法分析了不同pH值条件下岩石断裂特征,揭示了化学作用对岩石的破坏规律。廖浩浩等^[4]将砂岩置于pH值为3、7、12的溶液浸泡后再进行冻融循环,开展单轴试验和三点弯曲试验研究其力学特性。梁越等^[5]通过室内模型试验,分析了泥岩在干湿循环作用下的崩解特性。冯晓伟等^[6]基于三轴蠕变试验,配置不同浓度的水化学溶液后对红泥灰岩进行浸泡,分析了红泥灰岩在试验过程中的应力应变变化规律。S.Y. Xie等^[7-8]将岩石和水泥类试验材料置于化学溶液中浸泡一定时间,再进行三轴压缩和声波检测试验,结果表明化学腐蚀会降低材料的力学强度,材料的孔隙率也会增加。蒋明镜等^[9]基于离散单元分析方法(DEM)模拟岩石受到水软化—化学风化两个因素联合作用下的单轴压缩试验,揭示了岩石在水软化—化学风化作用下的强度变化规律。王永亮

等^[10]基于层理性岩石的水化作用和连续损伤特性,揭示了岩石的非均匀性和水化学作用对岩体应力应变的重要影响。王伟等^[11]考虑酸性化学溶液和浸泡时间的影响,研究了不同水化学环境侵蚀作用对砂板岩试样的相对质量、变形和强度特性的影响规律。袁璞等^[12]研究了砂岩在干湿循环作用下pH值对其力学特性的影响。王灿等^[13]针对三峡库区消落带水位的往复变化,分析并预测了岩石在干湿循环后的劣化规律。王章琼等^[14]研究了酸雨及干湿循环作用下红砂岩的崩解特性,对其崩解过程做了分段说明,揭示了红砂岩在酸性作用下的崩解机制。陈小婷等^[15]针对三峡库区水位的周期性变化,分析了由水位变动引起的干湿循环作用下危岩基座岩体不断软化的过程,揭示了岩石强度劣化,危岩失稳破坏机理,为三峡库区危岩治理提供了有力的理论指导。

通过以上分析发现,化学腐蚀和干湿循环对岩体的强度、变形和破坏有着较大的影响,泥灰岩作为一种特殊岩体广泛存在于三峡库区巫山段,尤其在岩体基座部分,常年的水环境和干湿循环作用导致其强度不断劣化,严重威胁岩体的安全。综上所述,开展泥灰岩在化学及干湿循环作用下的试验研究,可及时掌握泥灰岩特性,为库区灾害防治提供可靠的理论参考。

1 试验方案

1.1 岩样制备

试验所用的泥灰岩与三峡库区巫峡段类似,其主要成分和大致含量为方解石(45.6%)、白云岩(1.24%)、石英(2.24%)、伊利石(28.24%)、蒙脱石

(22.13%)、其他矿物(0.55%),常出现在石灰岩和黏土岩之间的过渡区,属于沉积岩的一种^[16]。颗粒直径一般在0.05~2 mm,通常含有含硅、钙、黏土和氧化铁等物质,表现为淡褐色。试验岩样采用水钻法获取,根据规程制成50 mm×100 mm的圆柱体(图1)。

根据试验规程,所有加工的试件应具有代表性,其精度需要满足两端面不平行度控制在±0.05 mm以内,沿试件高度直径误差控制在±0.3 mm以内,断面垂直轴线偏差控制在±0.25°以内。

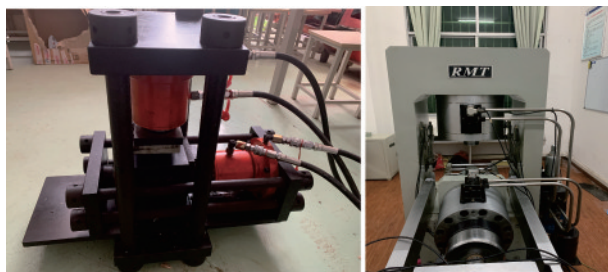


图1 岩样制取与标准岩样

Fig.1 Rock sample preparation and standard rock samples

1.2 试验设备

本试验主要用到多功能岩土力学试验仪(图2(a))和RMT-150C岩石力学试验系统(图2(b))。多功能岩土力学试验仪采用液压手动泵加压,其垂直千斤顶最大出力为500 kN,最大行程为60 mm,分辨率为600 N,活塞接触面积为122.72 cm²;其水平千斤顶最大出力为300 kN,最大行程为60 mm,分辨率为500 N,活塞接触面积为78.54 cm²。RMT-150 C岩石力学试验系统是一种数字控制的电液伺服试验机,垂直液压缸最大出力1 000 kN,活塞行程50 mm;加载速率0.01~100 kN/s;变形速率0.000 1~1 mm/s;基本波形有斜波、正弦波、三角波、方波;最大围压为50 MPa;围压速率0.001~1 MPa/s;工作油温为15~35℃。



(a) 多功能岩土力学试验仪 (b) 岩石力学试验系统

图2 直剪和单轴试验仪器

Fig.2 Direct shear and uniaxial test instruments

1.3 试验过程

配置pH值=3、5、7的水化学溶液^[17],将养护箱内的试样放入溶液中自由吸水24 h,然后放入烘箱中干燥24 h,此为一次干湿循环(图3),试验设计干湿循环次数1、3、6、10、15次^[18],每次干湿循环结束后,采用电子秤称取岩石质量。



(a) 化学浸泡 (b) 烘干试样

图3 化学溶液浸泡及烘干岩样

Fig.3 Soak and dry rock samples with chemical solutions

称取岩样重量,称量时精确到0.01 g。采用公式(1)计算泥灰岩的吸水率^[19],采用公式(2)计算泥灰岩质量溶解速率^[20]。

$$w = \frac{m_0 - m_s}{m_s} \times 100\% \quad (1)$$

$$ZRT = \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad (2)$$

式中, w 为吸水率; m_0 为浸水48 h后试件质量(g); m_s 为烘干的试件质量(g); ZRT 表示岩石溶解质量增加率(g/次); Δm 表示岩石溶蚀质量变化量(g); Δt 为干湿循环次数(次)。

为研究经化学溶液浸泡及高温作用的干湿循环对泥灰岩物理力学性质的影响,探寻强度参数劣化规律,将进行0、1、3、6、10、15次干湿循环后的岩样进行单轴压缩试验和直剪试验(图4)。



(a) 单轴压缩试验 (b) 直剪试验

图4 单轴压缩与直剪试验

Fig.4 Uniaxial compression and direct shear tests

剪切荷载按照 100 N/s 的方式进行加载,直剪试验所得结果按照式(3)、式(4)处理,通过绘制剪应力和正应力曲线拟合求得抗剪强度参数。

$$\sigma = \frac{(I_{\sigma} - I_{\sigma 0})S_v + G}{S_j} \quad (3)$$

式中, σ 为正应力(MPa); I_{σ} 为垂向油缸压力表预定值(MPa); $I_{\sigma 0}$ 为垂向油缸压力表初值(MPa); S_v 为垂向油缸活塞面积(m²); G 为试样盖板、滚珠轴承的总重(kN); S_j 表示剪切面面积(m²)。

$$\tau = \frac{(I_{\tau} - I_{\tau 0})S_h}{S_j} \quad (4)$$

式中, τ 为剪应力(MPa); I_{τ} 为剪切油缸压力表预定值(MPa); $I_{\tau 0}$ 为剪切油缸压力表初值(MPa); S_h 为剪切向油缸活塞面积(m²); S_j 为剪切面面积(m²)。

2 结果分析

2.1 吸水和溶蚀速率

通过试验,泥灰岩采用自然吸水方式测定的吸水率为 0.4%。泥灰岩的溶解速率在 pH 为 3、5、7 时分别为 0.629 g/次、0.447 g/次、0.271 g/次,干湿循环 15 次后,泥灰岩试样质量分别减少了 9.43 g、6.71 g、4.07 g,强酸对泥灰岩的溶蚀要大于弱酸。泥灰岩与酸的反应,都是不断消耗 H⁺ 的过程(式 5)。

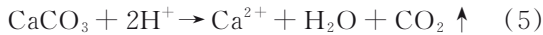


图 5 给出了泥灰岩质量衰减规律,对泥灰岩的质量衰减进行预测分析,拟合公式为:

$$m_3 = -0.24n + 461.91, R^2 = 0.99 \quad (6)$$

$$m_5 = -0.31n + 464.21, R^2 = 0.97 \quad (7)$$

$$m_7 = -0.14n + 462.70, R^2 = 0.98 \quad (8)$$

式中, m_i 为不同 pH 值下的岩石质量; n 为干湿循环次数。

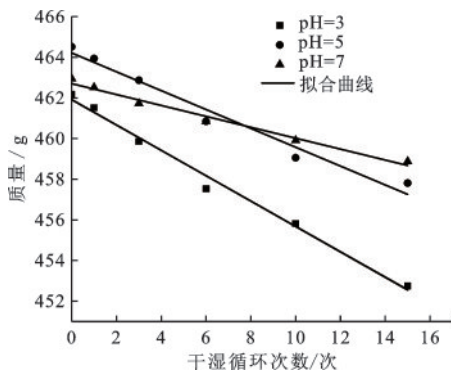


图 5 泥灰岩质量变化规律

Fig.5 Variation of marl quality

2.2 强度特性与破坏特征

由图 6 及泥灰岩在单轴压缩时的应变曲线可知,当浸泡泥灰岩的溶液 pH 值相同时,随着干湿循环次数的增加,泥灰岩的破碎程度较高,有的甚至

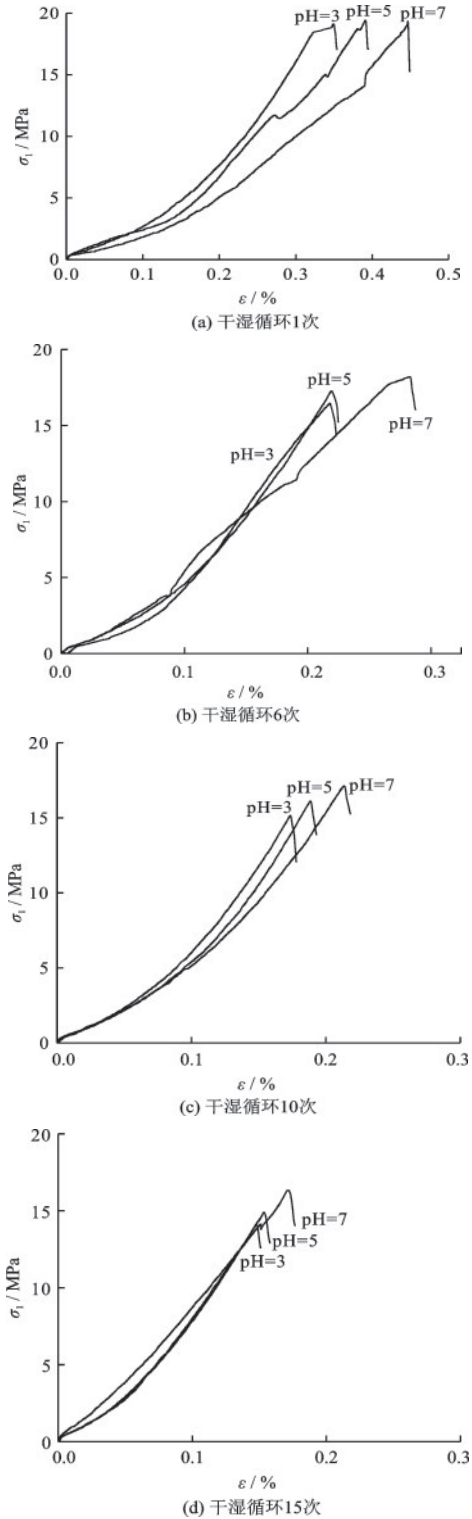


图 6 泥灰岩单轴压缩时的应力应变曲线

Fig.6 Stress-strain curves of marl under uniaxial compression

崩解产生碎小岩块。当pH=3时,泥灰岩在化学浸泡下干湿循环1、3、6、10、15次后和其抗压强度天然强度相比分别降低了4.49%、11.07%、17.66%、23.99%、29.53%。当pH为3、5、7时,以干湿循环6次和15次为例,泥灰岩抗压强度比天然状态下分别降低了17.66%、13.82%、9.03%和29.53%、25.49%、18.45%。泥灰岩单轴抗压强度衰减较大,这也表明泥灰岩更易受到化学溶液的腐蚀,由于强度降低,其破坏形式也多样化,分析崩解后的小岩块可以发现,泥灰岩具有一定的泥质含量,在三峡库区,泥灰岩大量存在于危岩体基座,容易被腐蚀风化形成松散土颗粒,危岩稳定性减弱,容易出现滑塌等危岩失稳灾害。

岩石的抗剪强度是岩石重要的强度指标之一,它能反应岩石在抵抗剪切破坏时所展现的最大能力。泥灰岩由于其特殊的矿物质成分,更容易被荷载、化学等因素作用,从而加速其破坏。采用多功能岩土力学试验仪进行试验,分别在不同的垂向荷载作用下,施加剪切荷载进行剪切。求得泥灰岩在化学浸泡及干湿循环后的抗剪强度参数变化规律如图7所示。试验表明,随着干湿循环次数的增加,

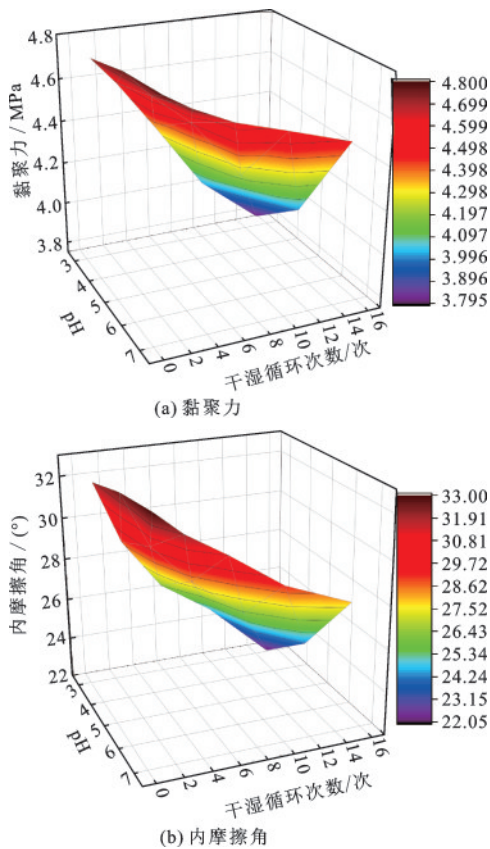


图7 泥灰岩抗剪强度参数变化规律

Fig.7 Variation of shear strength parameters of marl

在15次干湿循环后,pH为3、5、7的溶液浸泡下,泥灰岩黏聚力分别降低了22.13%、17.83%、8.00%,前6次循环中,平均每次的降低率为1.81%、1.26%、0.79%,后9次循环中,平均每次的降低率为1.40%、1.23%、0.38%。泥灰岩内摩擦角在15次干湿循环后分别降低了33.68%、27.07%、15.91%,前6次循环中,平均每次的降低率为3.42%、2.55%、1.22%,后9次循环中,平均每次的降低率为1.84%、1.54%、1.03%。泥灰岩的黏聚力和内摩擦角在前6次衰减过程中平均每次的降低率快于后9次。

为了探究泥灰岩在化学及干湿循环后的破坏特征,将单轴压缩室内试验和基于PFC的三轴压缩数值模拟结果选取部分岩样为例联合分析,由图8可知,泥灰岩在破坏时其裂纹较多,岩样大多数呈现剪切破坏,沿剪切裂纹两侧会出现多条裂纹,由于岩样内部物质分布的不均匀,泥灰岩与酸反应后各部分强度降低也不同,因此裂纹分布也有所不同。总体而言,泥灰岩两端最先受压破坏,尤其是岩体上部最先出现裂纹,破坏时岩样上部裂纹也明显多于下部分。泥灰岩更易吸收酸溶液,与溶液发生反应,泥灰岩结构相对疏松,内部孔隙较多,水分

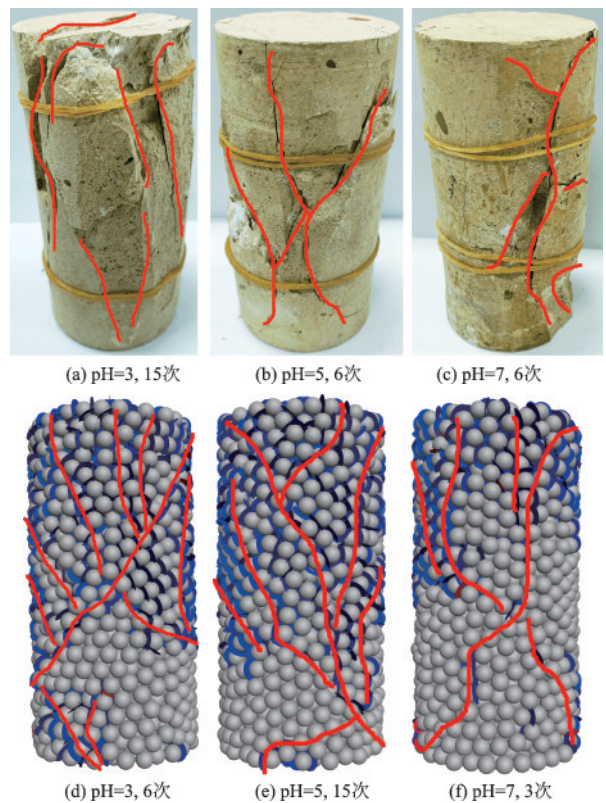


图8 泥灰岩破坏特征

Fig.8 Failure characteristics of marl

子更易进入。酸性越强,泥灰岩的破坏越明显,压剪混合破坏同样占据主导地位。但次生裂纹扩展路径并不统一,呈现多样性。泥灰岩的破坏同样经历着起裂-扩展-延伸-破坏的过程。

2.3 泥灰岩化学损伤分区

根据单轴压缩和数值模拟试验结果,得到化学作用后岩石的不同破坏形式,结合试验现象可将化学浸泡及干湿循环后在应力作用下的岩石破坏区域分为^[21]易损脱落区、损伤扰动区、无损密实区,如图9所示。

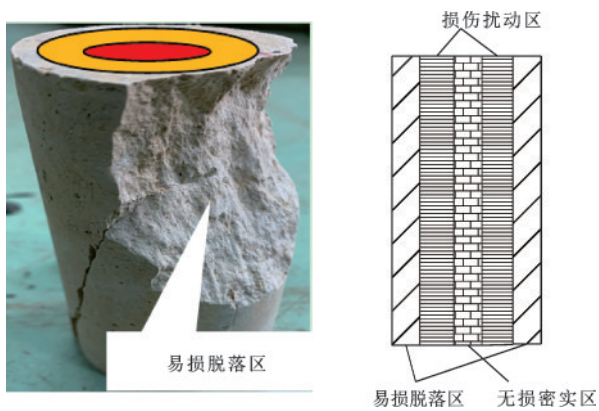


图9 泥灰岩化学损伤分区

Fig.9 Chemical damage zoning of marl

2.3.1 易损脱落区

易损脱落区主要为岩样试件的表面层,环形厚度大约为6~10 mm,该区域在轻微外力作用后,表层岩体发生剥落。从化学腐蚀的角度分析,该区域的岩样与化学溶液反应较充分,其物质几乎均与酸发生了反应。易损脱落区已不具备充当岩体受力骨架的部分。

2.3.2 损伤扰动区

损伤扰动区厚度大约为10 mm,与易损脱落区紧密相连,由于岩石具有较好的致密性,酸性较弱或腐蚀时间较短时无法对岩石内部造成较大损害,该区域由于在外围受到易损脱落区保护,损伤相对较小,其胶结物质只有部分与化学溶液发生反应,该区域的化学损伤是渐变的,远离反应面的部分反应越小,该区域可以作为岩体受力骨架的一部分,但不能承受较大荷载。若岩样本身强度低,致密性差,损伤扰动区就会只占较小一部分。

2.3.3 无损密实区

无损密实区几乎不产生化学反应,该区域位于岩样的最中心。由于受到易损脱落区和损伤扰动区岩体保护,化学溶液很难与该区域岩石反应,其强度等力学性质几乎不受破坏,因此该区域是岩体主要的受力骨架。

2.4 泥灰岩破坏特征微观分析

泥灰岩在化学侵蚀后,岩体内部不断衍生多条微观裂纹,裂纹扩展并延伸。采用扫描电镜(SEM)对泥灰岩内部裂纹的扩展规律、形态变化等微观特征进行分析。

试验采用5 000倍的放大倍数对泥灰岩在酸性溶液浸泡和干湿循环后的样片进行扫描,对比不同工况下的岩样形态及其内部微观结构(图10)。

由图10可以看出,泥灰岩在微观结构上排列较为疏松,整体较为破碎,由许多形状不规则的颗粒组成,颗粒粗糙但粒径较小,化学腐蚀后,颗粒棱角磨损,颗粒之间孔隙增大,由于部分物质与酸反应,孔隙的大小也逐渐变大。干湿循环次数越多,岩石内部受损越明显,无论是孔隙还是裂纹长度和条数

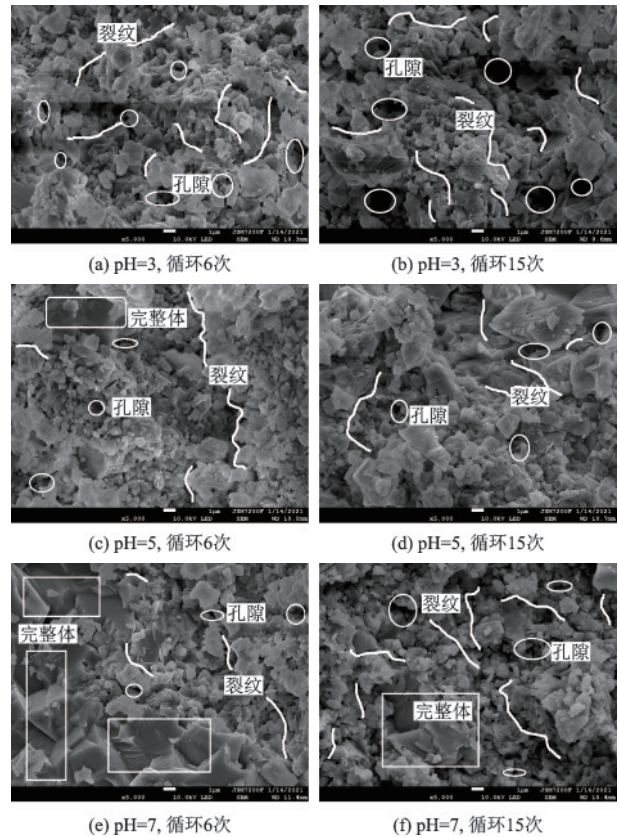


图10 泥灰岩扫描试验结果

Fig.10 Scanning electron microscopy test results of marl

都有所增加,原生裂纹增长且不断衍生出次生裂纹,这也表明干湿循环使岩石体积发生不断地热胀冷缩,破坏了原岩结构,加剧了泥灰岩损伤。中性条件下泥灰岩还具有较完整的结构,岩石内部密实程度较好,这也表明这种状态下的泥灰岩强度最高,而酸性越强,泥灰岩所含有的晶体矿物被溶蚀,岩石结构变为疏松,抵抗外界荷载的能力也就降低,其力学特性则减弱。

3 泥灰岩强度特性劣化分析

大量研究表明,泥灰岩的力学强度比灰岩弱,在不同的地质环境中差别更加明显,三峡库区峡江段泥灰岩受复杂水环境的影响,强度差异大。

本文采用公式(9)、(10)计算得到泥灰岩单轴抗压强度、黏聚力、内摩擦角的劣化度,通过拟合劣化度来分析泥灰岩的强度劣化规律。

$$S_n = \frac{|T - T_n|}{T} \times 100\% \quad (9)$$

式中, S_n 表示总体的劣化程度(%); T 表示初始状态下岩石强度参数; T_n 表示干湿循环 n 次后岩石参数。

$$Y_n = \frac{S_n}{t_n} \quad (10)$$

式中, Y_n 表示平均每次干湿循环的劣化程度(%); t_n 表示干湿循环次数。

由图11~13可知,泥灰岩强度参数的劣化在反应初期较快,随着岩石化学物质的消耗,劣化程度逐渐减缓,曲线斜率也逐渐减小,这也表明岩体强度参数劣化也相对减小。化学溶液浸泡和干湿循环对泥灰岩的单轴抗压强度影响最大,其次是黏聚力和内摩擦角。

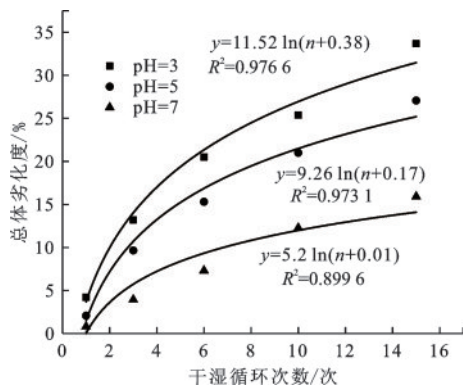


图11 内摩擦角劣化度

Fig.11 Degradation of internal friction angles

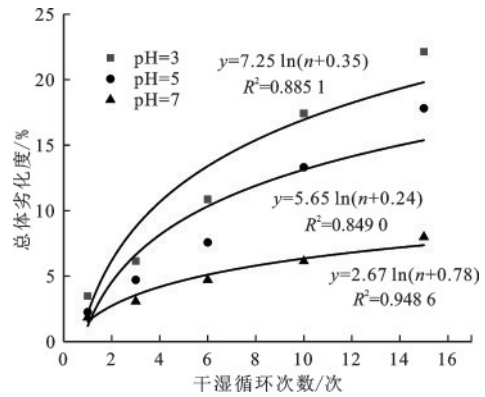


图12 黏聚力劣化度

Fig.12 Degradation of cohesion

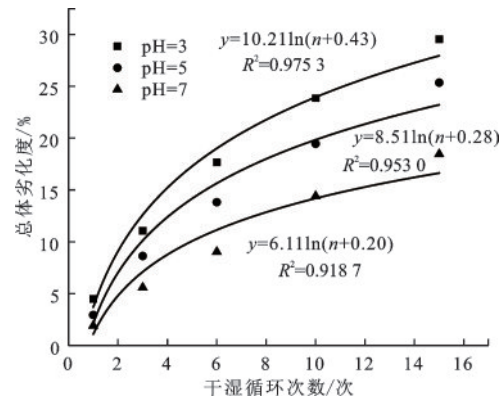


图13 单轴抗压强度劣化度

Fig.13 Degradation of uniaxial compressive strength

4 泥灰岩强度衰减预测分析

为了更好地对泥灰岩在水化学、干湿循环后的抗剪强度参数劣化趋势进行分析,采用粒子群优化BP神经网络算法(PSO-BP神经网络)建立抗剪强度参数劣化预测模型,BP神经网络又称误差逆向传播算法,1974年由美国P.J. Werbos^[22]博士提出的,其结构形式如图14所示。粒子群优化算法是1995年美国学者J. Kennedy等^[23]所提出的一种智能仿生算法。粒子群优化可避免BP神经网络算法收敛较慢,且容易出现局部极值的特点,同时还能提高神经网络的学习能力和收敛速度。

粒子群优化BP神经网络算法的步骤如下^[24]:

(1)选择特征值pH和循环次数为输入特征值,选择抗剪强度参数为输出值。按照3:1比例随机划分训练集和测试集。

(2)确定神经元输入层、隐含层和输出层网络结构。

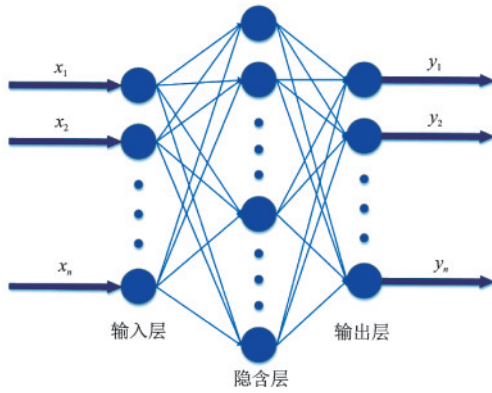


图 14 BP 神经网络结构

Fig.14 Structure of BP neural network

(3)初始化神经元的权值和阈值,一般为-1到1之间得随机数。确定神经元参数中迭代次数 200 次,学习率 0.2,误差 $0.1e-5$,输入神经元 2,隐含层神经元 5,输出神经元 1。

(4)初始化粒子群,设置粒子群参数中迭代次数 200 次,种群数量 15,最大更新速度 0.9,最小更新速度 0.4。

(5)开始神经网络训练,采用式(11)、式(12)计算粒子适应度,同时采用公式(13)、(14)对调整后的粒子群位置及速度进行更新。

$$I_i = \sum_j (Y_{i,j} - y_{i,j})^2 \quad (11)$$

$$I_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i \quad (12)$$

$$v_{id}^{t+1} = \omega v_{id}^t + c_1 r_1 (p_{id}^t - x_{id}^t) + c_2 r_2 (p_{id}^t - x_{id}^t) \quad (13)$$

$$x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + v_{id}^{t+1} \quad (14)$$

式中, $Y_{i,j}$ 、 $y_{i,j}$ 分别为第 i 个样本的第 j 个理想输出值、实际输出值; m 为粒子数 $m=1, 2, \dots, M$, M 为粒子种群规模; n 为样本数; v_{id}^t 、 p_{id}^t 、 x_{id}^t 为 t 时刻第 i 个粒子在第 d 维空间的速度、最优位置、位置; v_{id}^{t+1} 、 x_{id}^{t+1} 为 $t+1$ 时刻第 i 个粒子在第 d 维空间的速度、最优位置; r_1 、 r_2 为 $(0, 1)$ 区间上的随机数; c_1 、 c_2 为学习因子; ω 反应粒子对当前速度继承的程度,表示惯性权重。

(6)采用公式(15)计算粒子群优化算法的误差。根据计算结果,若误差满足要求,则终止优化,输出优化后的权值和阈值;若不满足要求,则重复第四步继续优化,直到误差满足要求。

$$E_{\text{RMS}} = \frac{\sum_{i=1}^k f(p_g^i)}{k} \quad (15)$$

式中, $f(p_g^i)$ 为第 i 次迭代后所得的全局最优适应度; k 为粒子群优化算法的当前进化次数。

(7)通过 PSO 寻优确定 BP 神经网络的最优权值和阈值,代入到测试集中利用网络预测得到预测值。同时对预测结果进行评价,判断模型预测精度。

由图 15 可以看出,泥灰岩的黏聚力和内摩擦角预测后分别为 $\text{RMSE}=0.0057$ 、 $R^2=0.9998$ 和 $\text{RMSE}=0.0173$ 、 $R^2=0.9983$ 。预测值和实际值虽然存在误差,这可能是由于样本数量不够多导致的结果,但曲线规律基本一致,这说明粒子群优化神经网络算法可以较好地预测泥灰岩在不同 pH 值和干湿循环次数后的黏聚力和内摩擦角。说明该方法具有较好的可靠性和实用性。粒子群优化算法和 BP 神经网络相结合,相互弥补了两者的缺点,提高了收敛速度和预测准确度,该方法可用在类似工程中对参数的预测分析。

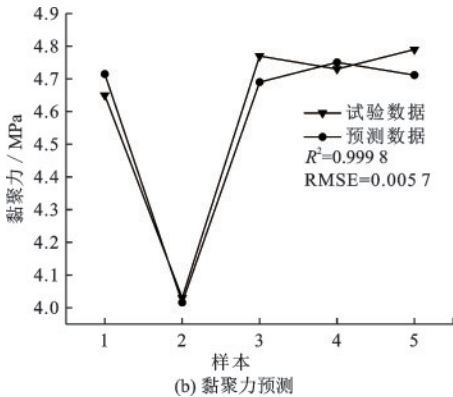
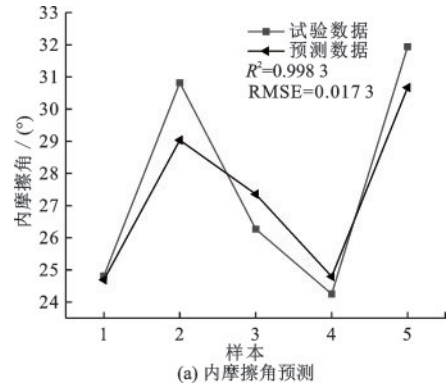


图 15 PSO-BP 神经网络预测结果

Fig.15 Prediction results of PSO-BP neural network

5 结论

以三峡库区巫山段常见的泥灰岩为研究对象,开展化学浸泡和干湿循环后的单轴压缩、直剪、电镜扫描等试验,分析了泥灰岩强度衰减规律,并对

抗剪强度参数做了预测。主要结论如下:

(1)酸性越强、干湿循环次数越多,泥灰岩破碎程度越大,破坏时的完整性降低。在pH分别为3、5、7的溶液浸泡下,泥灰岩在15次干湿循环后,黏聚力分别降低了22.13%,17.83%,8.00%,内摩擦角分别降低了33.68%,27.07%,15.91%。

(2)泥灰岩的破坏过程经历着裂纹起裂-扩展-延伸-破坏4个阶段,裂纹扩展路径呈现多向发展。荷载作用于泥灰岩各个部分,其内部颗粒再次相互挤压,颗粒棱角被磨平,这也导致岩石强度降低。同时,泥灰岩内部具有软泥状物质,降低了其强度。

(3)扫描电镜揭示了泥灰岩内部结构、裂纹扩展、孔隙演化的变化规律,同时将岩石破坏过程分为易损脱落区、损伤扰动区、无损密实区,可较好地反应岩石破坏特点。

(4)基于粒子群优化BP神经网络算法(PSO-BP神经网络)建立抗剪强度参数劣化预测模型。通过误差分析泥灰岩的黏聚力和内摩擦角预测后分别为 $RMSE=0.0057$ 、 $R^2=0.9998$ 和 $RMSE=0.0173$ 、 $R^2=0.9983$ 。结果表明PSO-BP神经网络能较好地对参数进行预测,预测值与试验所得值规律一致,可较好地将该方法用于工程实践。

参考文献:

- [1] Poulsen B A, Shen B, Williams C D J, et al. Strength reduction on saturation of coal and coal measures rocks with implications for coal pillar strength [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 71: 41-52.
- [2] Tobias S R, Linda L, Jesus C, et al. Changes in porosity, permeability, water retention curve and reactive surface area during carbonate rock dissolution [J]. Chemical Geology, 2015, 403(18): 86-98.
- [3] Mohtarami Ehsan, Baghbanan Alireza, Eftekhari Mosleh, et al. Investigating of chemical effects on rock fracturing using extended finite element method [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2017, 89 (12) : 110-126.
- [4] 廖浩浩, 陈有亮, 李诗铭, 等. 化学溶蚀及冻融循环作用下砂岩的力学特性研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2020, 40(6): 1009-1017.
- Liao H H, Chen Y L, Li S M, et al. Mechanical properties of sandstone under freeze-thaw cycling and chemi-

cal corrosion [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40 (6) : 1009-1017. (in Chinese)

- [5] 梁越, 孙志伟, 袁野, 等. 干湿循环作用下泥岩颗粒料崩解试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(6): 911-917.
- Liang Y, Sun Z W, Yuan Y, et al. Experimental study on disintegration of mudstone particles under wet and dry cycling [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(6): 911-917. (in Chinese)
- [6] 冯晓伟, 王伟, 王如宾, 等. 考虑水化学损伤的砂岩流变损伤本构模型[J]. 岩土力学, 2018, 39(9): 3340-3354.
- Feng X W, Wang W, Wang R B, et al. A rheological damage model of sandstone under water-rock chemical interaction [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39 (9): 3340-3354. (in Chinese)
- [7] Xie S Y, Shao J F, Xu W Y. Influences of chemical degradation on mechanical behaviour of a limestone [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2011, 48(5): 741-747.
- [8] Yurtdas I, Xie S Y, Burlion N, et al. Influence of chemical degradation on mechanical behavior of a petroleum cement paste [J]. Cement & Concrete Research, 2011, 41(4): 412-421.
- [9] 蒋明镜, 张鹏, 廖兆文. 考虑水软化-化学风化作用的岩石单轴压缩试验离散元模拟[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2017, 15(2): 89-95.
- Jiang M J, Zhang P, Liao Z W. DEM numerical simulation of rock under the influence of water softening and chemical weathering and chemical weathering in uniaxial compression test [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2017, 15 (2): 89-95. (in Chinese)
- [10] 王永亮, 庄茁, 柳占立, 等. 横观各向同性岩石力学-化学-损伤耦合有限元分析[J]. 工程力学, 2017, 34 (9): 102-109.
- Wang Y L, Zhuang Z, Liu Z L, et al. Finite element analysis of transversely isotropic rock with mechanical-chemical-damage coupling [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(9): 102-109. (in Chinese)
- [11] 王伟, 李雪浩, 朱其志, 等. 水化学腐蚀对砂板岩力学性能影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(9): 2559-2566.
- Wang W, Li X H, Zhu Q Z, et al. Experimental study of mechanical characteristics of sandy slate under chemical corrosion [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38 (9): 2559-2566. (in Chinese)

- [12] 袁璞, 步鹤, 位宁宁. 干湿循环下 pH 值对砂岩静态单轴力学特性的影[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(7): 2232-2239.
Yu P, Bu H, Wei N N. Effect of pH value on static uniaxial mechanical properties of sandstone under dry-wet cycle [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(7): 2232-2239. (in Chinese)
- [13] 王灿, 田酬, 刘波, 等. 三峡库区神农溪段消落带岩体劣化对地质灾害的影响[J]. 资源环境与工程, 2020, 34(4): 550-553.
Wang C, Tian C, Liu B, et al. The effect of rock mass deterioration on geological disasters in the subsidence zone of shennongxi section in the Three Gorges Reservoir area [J]. Resources Environment & Engineering, 2020, 34(4): 550-553. (in Chinese)
- [14] 王章琼, 刘晓菲, 黄敏. 模拟酸雨干湿循环条件下红砂岩的崩解特性[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(4): 140-145.
Wang Z Q, Liu X F, Huang M. Characteristics of red sandstone's disintegration under dry-wet cycle by simulated acid rain [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(4): 140-145. (in Chinese)
- [15] 陈小婷, 王健, 黄波林, 等. 库水位变动条件下柱状危岩体变形破坏机理[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(2): 9-18.
Chen X T, Wang J, Huang B L. et al. Deformation and failure mechanism of pillar-shaped dangerous rock mass under reservoir's water level fluctuation [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(2): 9-18. (in Chinese)
- [16] 张化晋. 酸雨-高温交替作用对泥灰岩物理力学特性的影响研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2021.
Zhang H J. Study on the effects of acid rain-high temperature alternation on physical and mechanical properties of marl [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2021.(in Chinese)
- [17] 曾庆森. 水化学环境对砂岩断裂韧度影响的试验研究[D]. 重庆:重庆大学, 2015.
Zeng Q S. Experimental study on water chemical environment effect on the fracture toughness of sandstone [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015. (in Chinese)
- [18] 袁文. 酸碱环境干湿循环作用下砂岩强度劣化规律及化学作用机制研究[D]. 重庆:重庆大学, 2017.
Yuan W. Strength deterioration and chemical mechanism of sandstone under dry-wet cycles in acid and alkali environment [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.(in Chinese)
- [19] 吴姜. 岩石力学试验指导[M]. 贵阳:贵州大学出版社, 2015.
Wu J. Rock mechanics test instruction [M]. Guiyang: Guizhou University Press, 2015.(in Chinese)
- [20] 刘海燕, 李增学, 吕大炜. 泥灰岩的细观溶蚀过程分析[J]. 人民长江, 2009, 40(11): 60-62.
Liu H Y, Li Z X, Lyu D W, et al. Analysis of mesoscopic dissolution process of marl [J]. Yangzi River, 2009, 40(11): 60-62. (in Chinese)
- [21] 刘杰, 李建林, 孙旭曙, 等. 岩质边坡变形稳定性研究[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2015.
Liu J, Li J L, Sun X S, et al. Study on deformation stability of rock slope [M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2015.(in Chinese)
- [22] Werbos P J. Beyond regression: New tools for prediction and analysis in the behavioral sciences [M]. Massachusetts: Harvard University, 1974.
- [23] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization [C]//Icnn95-international Conference on Neural Networks. [S.l.]:IEEE, 1995.
- [24] 刘贺, 张弘强, 刘斌. 基于粒子群优化神经网络算法的深基坑变形预测方法[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2014, 44(5): 1609-1614.
Liu H, Zhang H Q, Liu B. A prediction method for the deformation of deep foundation pit based on the particle swarm optimization neural network [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2014, 44(5): 1609-1614. (in Chinese)

(本文责编: 池莹莹)