

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.166



开放科学(资源服务)标识码(OSID):



受酸腐蚀砂岩的损伤特性和分析模型

霍润科¹, 王龙飞¹, 李曙光², 丁凡¹, 王国杰¹, 秋添¹

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院; 陕西省岩土与地下空间工程重点实验室, 西安 710055;

2. 中铁二十局集团有限公司 博士后科研工作站; 高原隧道施工技术及装备研发中心, 西安 710016)

摘要:为研究受酸腐蚀砂岩的微细观结构与宏观力学参数之间的相关性,基于物性试验及单轴力学试验,对受不同 pH 值盐酸腐蚀不同阶段的砂岩质量和力学参数进行实时监测,借助电镜图像处理技术,得到腐蚀砂岩孔隙结构特征参数,计算其孔隙分形维数,基于 Lemaitre 应变等效原理,建立了基于孔隙率的化学损伤变量,推导出砂岩的本构模型。结果表明:pH 值为 1、3 的盐酸和 pH 值为 7 的蒸馏水浸泡 180 d 的砂岩质量分别损失 1.22%、1.08%、0.57%,单轴抗压强度分别降低了 52.93%、41.91%、27.11%,具有明显的时间效应;受酸腐蚀砂岩平均孔径随着腐蚀时间逐渐增加,孔隙分形维数整体呈增加趋势,砂岩的宏观力学参数劣化程度与砂岩质量损失率、微观孔隙率具有相关性,通过强度计算与试验结果对比分析,验证了模型的合理性。

关键词:砂岩;酸腐蚀;损伤变量;本构模型

中图分类号:TU443

文献标志码:A

文章编号:2096-6717(2022)01-0001-09

Characteristics and analytical model of acid-corroded sandstone

HUO Runke¹, WANG Longfei¹, LI Shuguang², DING Fan¹, WANG Guojie¹, QIU Tian¹

(1. School of Civil Engineering; Key Laboratory of Geotechnical and Underground Space Engineering, Shaanxi Province,

Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, P. R. China; 2. Post-doctoral Research Workstation;

R & D Center of Plateau Tunnel Construction Technology and Equipment, China Railway

20th Bureau Group Co., Ltd., Xi'an 710016, P. R. China)

Abstract: To study the relationship between the microstructure and the macroscopic mechanical parameters of the acid-corroded sandstone, the mechanical parameters of sandstone corroded by hydrochloric acid were examined based on the physical property testing and the uniaxial mechanical testing. The characteristic parameters and the fractal dimension of the pore structure were obtained via SEM-EDS. The chemical damage variable based on porosity was established and the constitutive model of the corroded sandstone was derived based on the extended Lemaitre strain equivalence principle. The results show that the mass loss of

收稿日期:2020-07-27

基金项目:中国博士后科学基金(2020M673525);国家自然科学基金(41172237);中铁二十局集团有限公司 2020 年度科技研发项目(YF2020SD01A)

作者简介:霍润科(1963-),男,教授,博士生导师,主要从事隧道与地下工程、环境岩土工程研究,E-mail: huorkdq@xauat.edu.cn.

Received:2020-07-27

Foundation items:Project Funded by China Postdoctoral Science Foundation(No. 2020M673525);National Natural Science Foundation of China (No. 41172237); Project funded by China Railway 20th Bureau Group Co. Ltd. (No. YF2020SD01A)

Author brief:HUO Runke (1963-), professor, doctoral supervisor, main research interests: tunnel in underground engineering, environmental geotechnical engineering, E-mail: huorkdq@xauat.edu.cn.

sandstone immersed in hydrochloric acid at $\text{pH}=1, 3$ and distilled water with $\text{pH}=7$ for 180 days increased by 1.22%, 1.08%, and 0.57%, respectively. The uniaxial compressive strength decreased by 51.93%, 41.91%, and 27.11%, respectively. It has obvious tempo effect. The average pore size and the fractal dimension of pores of the acid corroded sandstone increase with the corrosion time; The macroscopic mechanical parameter deterioration degree of sandstone is correlated with the mass loss rate and the microscopic porosity of sandstone. The Feasibility of the proposed model is validated via the numerical and laboratory testing results.

Keywords: sandstone; acid corrosion; damage variable; constitutive model

近年来,大气环境污染带来的酸雨作用使得水工建筑物腐蚀问题日益凸显,酸雨腐蚀的累积效应使得砂岩矿物成分和微观结构构造发生变化,最终导致其宏观力学性能劣化,引发不良工程效应。众多学者针对岩石受酸腐蚀展开了大量研究。卢毅^[1]等采用室内快速模拟实验方法对酸性土壤腐蚀混凝土材料的温度效应开展了试验研究。陈四利等^[2-4]开展了不同化学溶液腐蚀下砂岩单轴压缩破裂过程的细观力学试验,探讨了浓度、pH 值及化学溶液对砂岩力学特性的影响,分析了化学溶液的腐蚀作用对岩石细观破裂特征的影响。邓华锋等^[5]对水岩作用后的砂岩进行了卸荷力学试验,并对干湿循环后砂岩的 SEM 图片进行分析,阐明了砂岩腐蚀机理。Åkesson 等^[6-7]通过花岗岩扫描电镜试验分析了其颗粒相关的特征参数;Wu 等^[8]通过光学电镜和扫描电镜对砂岩进行了加载过程中的扫描试验,分析了裂纹分布和应变之间的关系。黄宏伟等^[9]对泥岩遇水软化后的细观结构和矿物成分进行分析,发现软岩软化崩解是因为泥岩内部结构遭到破坏。韩铁林等^[10]通过砂岩在两种不同盐溶液中浸泡后的三轴压缩试验,对比分析了受不同 pH 值、浓度和化学成分的化学溶液腐蚀后砂岩的微细观结构特征、变形及其强度特性。霍润科等^[11-14]通过酸性环境下室内的长期加速腐蚀试验,得到受酸腐蚀砂岩及砂浆的物理、化学及力学特性的演化规律,建立了酸溶液中砂岩的本构模型关系,推导了基于 CT 数的受酸腐蚀砂岩的损伤变量,揭示了酸性环境下砂岩的腐蚀机理。Li 等^[15-17]基于腐蚀砂岩的 CT 数推导了受酸腐蚀砂岩双峰型损伤的损伤变量,为构建受酸腐蚀砂岩的统计损伤本构模型提供了依据。徐艳玲等^[18]通过对砂岩渗透性能微观图像分形进行分析,使用 IPP 图像处理软件较好地解决了繁琐的求取分形维数的难题。Yang 等^[19]基于扫描电镜的干湿循环对岩石微观结构的影响,利用 IPP 软件的统计功能对扫描电镜图像进行分析,有效评估干湿循

环作用下微观孔隙结构的累积损伤过程。目前的研究主要集中在化学腐蚀对岩石宏观和微观结构特征、变形强度等方面,单轴条件下大多基于 CT 数建立损伤变量,而基于孔隙率变化的概化损伤本构模型尚不多见。

采用 pH 值为 1、3 的盐酸和 pH 值为 7 的蒸馏水模拟室内加速腐蚀试验,通过对不同阶段受腐蚀砂岩的质量损失率、孔隙率、单轴抗压强度试验和扫描电镜分析,利用电镜图像处理技术提取了不同阶段、不同 pH 值腐蚀砂岩的各种孔隙参数,计算其分形维数,依据 Lemaitre 等效应变原理推导出孔隙率与损伤变量之间的关系式,并建立基于孔隙率的损伤本构方程。

1 试验材料与方法

1.1 岩样选取

试验岩样取自陕西某水利工程,为保证岩样矿物成分和结构的均匀性,所有岩样取自同一块岩体。经薄片鉴定,砂岩碎屑主要含有石英、长石、黑云母、绿泥石、硅质岩屑等矿物成分,各成分含量如表 1 所示。该砂岩为细砂状不等粒结构,碎屑物粒径尺寸 0.05~0.45 mm,颗粒形状以棱角-次棱角状为主,少量出现次圆状,磨圆度差。颗粒之间以线状或点状接触、孔隙式钙质胶结为主。将岩石从现场取回后,根据岩石力学规范要求,将岩石加工成 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的圆柱体标准岩样,岩样上下端面平行度和侧面垂直度均满足规范要求,如图 1(b)所示。除去具有缺陷的试样,试验前测试岩样波速,并将波速离散性大的试件剔除。

表 1 砂岩组成成分及其含量

Table 1 Composition and content of sandstone					%
石英	长石	方解石	云母	绿泥石	
58	11	5	3	1	
硅质岩屑	灰岩岩屑	胶结物	黏土质	重矿物	
6	2	7	3	偶见	

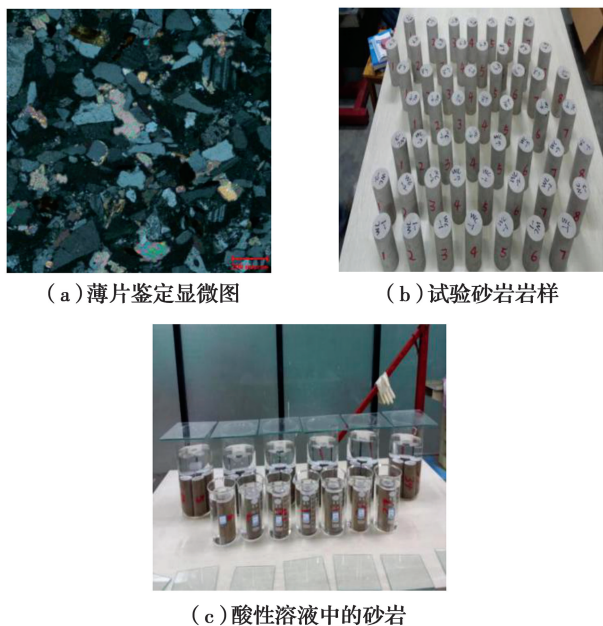


图 1 砂岩岩样薄片鉴定显微图及试验选用的砂岩岩样
 Fig. 1 Micrographs for identification of sandstone samples and selected sandstone samples in the test

1.2 试验方案

采用浓度为 96% 的浓盐酸与蒸馏水按比例配置成 pH 值为 1 和 3 的盐酸溶液及 pH 值为 7 的蒸馏水溶液模拟水化学环境,为加快腐蚀速度,每个阶段(30 d)重新配置一次溶液,共计 6 个阶段。将初始密度及纵波波速相近的砂岩岩样进行分组,每 3 个岩样一组,共分 23 组,预留一组备用。试验过程中定期测量干、湿岩样的质量并计算孔隙率;在自然状态(0 d)、第 3 阶段(90 d)、第 6 阶段(180 d)结束时进行单轴压缩试验和电镜扫描试验(每次所取区域均为岩样腐蚀区),获取每组岩样的单轴抗压强度和微观结构图。电镜扫描实验前,按照扫描电子显微镜对试验样品的要求,将岩样加工成约 10 mm×10 mm×5 mm 的薄片,用吹气球清除切取好的薄片表面碎屑,处理后的薄片固定在电子显微镜的载物台上,将全部空气抽出,岩样的距离和放大的倍数等调节完毕后开始操作。

1.3 试验仪器

选用上海仪电科学仪器股份有限公司生产的雷磁 PHS-3C 酸度计测定溶液的 pH 值;烘箱型号是 WGL-30B,控温范围为室温 5~300 °C;称重仪器为 JA12002 型号电子天平,分度值为 0.01 g;单轴压缩试验在西安科技大学 MTS 实验室完成。试验采用 0.05 mm/s 的静态加载速率指标进行单轴抗压强度

试验。SEM 试验采用捷克 Tescan 场发射扫描电镜,放大倍数采用 5 000 倍,可用于地质样品的孔隙类型、孔隙结构、矿物类型和结构等超高分辨观察。

2 试验结果及分析

2.1 化学腐蚀作用下砂岩微区形貌变化

选取不同 pH 值盐酸溶液在不同腐蚀阶段的岩样 SEM 图像,对其微观孔隙及胶结方式进行观察分析。扫描结果见图 2~图 4(放大倍数均为 5 000 倍)。

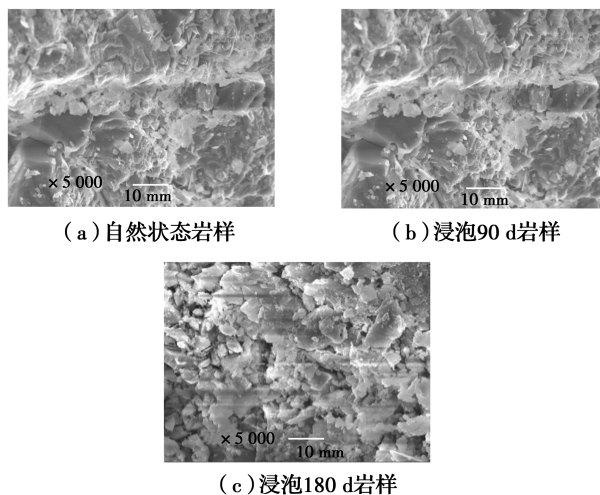


图 2 pH 值为 1 的 HCl 溶液浸泡岩样各阶段扫描电镜图像
 Fig. 2 SEM images of HCl solution soaked rock samples with pH=1 at each stage

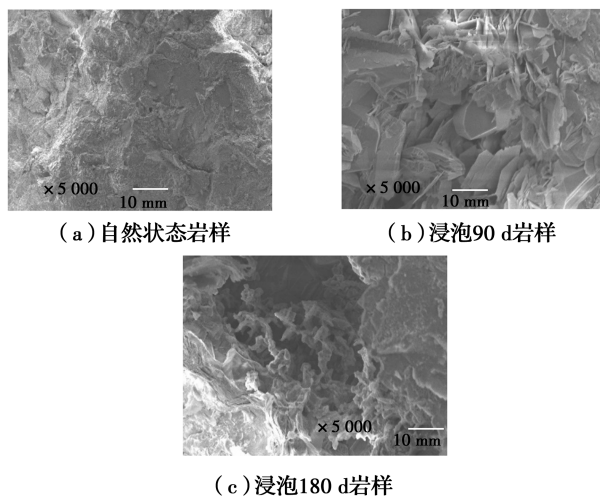


图 3 pH 值为 3 的 HCl 溶液浸泡岩样各阶段扫描电镜图像
 Fig. 3 SEM images of HCl solution soaked rock samples with pH=3 at each stage

如图 2(a)所示,自然状态下试件表面的微观结构表现出较好的均质性和致密性,从颗粒形态来看,

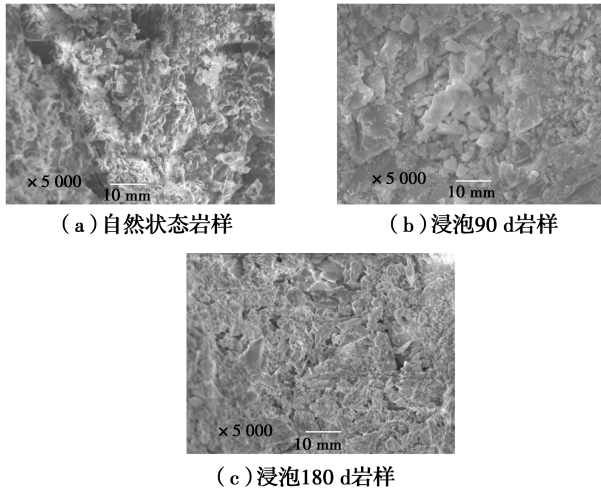


图 4 pH 值为 7 的蒸馏水浸泡岩样各阶段扫描电镜图像
Fig. 4 SEM images of rock samples soaked in distilled water with pH=7 at each stage

砂岩的矿物晶体大多是不规则的片状或块状,颗粒排列致密,被胶结物紧紧包裹,晶体颗粒大小不均,矿物表面较光滑。从孔隙形态来看,颗粒之间排列较为致密,较大的孔隙或裂隙几乎观察不到,孔隙零星分布,连通性差,宏观上反映出砂岩的物理力学性能较好。

岩样经 pH 值为 1 的盐酸浸泡 90 d 后,对比自然状态,岩样矿物颗粒表面由整齐致密状变为无序状,颗粒形态逐渐由片状、层状演变为絮凝状,然后逐渐变为浑浊状。180 d 后,与自然状态相比,岩石的微观结构发生明显变化,细小孔隙数量增加,小孔隙逐渐扩张贯通为较大孔隙,并出现堆积重叠现象。颗粒形态也由清晰、整齐的边缘向松散质地转变,孔隙度不断增加。对比同一阶段 pH 值为 3 的盐酸腐蚀试件,发现其在 180 d 颗粒形态由片状、层状演变为絮凝状、无序状的较 pH 值为 1 的盐酸腐蚀岩样中的少,且比较模糊。

岩样经 pH 值为 7 的水浸泡 90 d 后,对比自然状态岩样的细观结构,矿物颗粒比较致密,晶体颗粒略变圆润,孔隙结构变化不明显。180 d 后,岩样晶体颗粒形状变得不规则,颗粒变小、变疏松,孔隙渐渐增多、孔径增大、孔隙面积增大。

2.2 酸性溶液中砂岩岩样的质量损失率变化

定义质量损失率 A 为岩样受酸腐蚀后的质量损失量与其初始质量的比值,计算公式为

$$A = \frac{M_{n_0} - M_{n_t}}{M_{n_0}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: M_{n_0} 、 M_{n_t} 分别为自然状态下岩样质量和浸泡 t 时间烘干岩样质量, g。

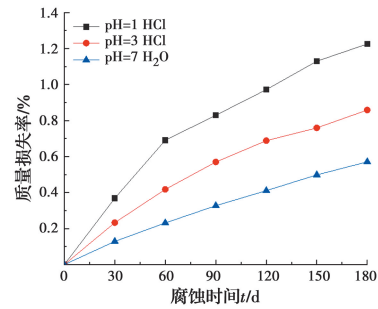


图 5 不同 pH 值浸泡溶液下岩样相对质量损失率变化图
Fig. 5 Variation diagram of relative mass loss rate of rock samples under immersion solutions with different pH values

质量损失率曲线可以反映酸、岩相互作用的程度,从图 5 可以看出:1)随着腐蚀时间的延长,经水化学溶液浸泡的岩样质量损失率呈增加趋势。2)在相同时间内, pH 值为 1 的盐酸腐蚀砂岩质量损失率大于 pH 值为 3 的盐酸,且均大于 pH 值为 7 的蒸馏水腐蚀的砂岩质量损失率。pH 值越小,氢离子浓度越高,溶液中岩样的矿物组分溶解越多,质量损失率越大。其中,30~90 d 内 pH 值为 1、3 的盐酸与 pH 值为 7 的蒸馏水中的岩样质量损失率分别增加 0.461%、0.337% 和 0.198%。3)质量损失率增长幅度变化均呈先增大后减小趋势,其中 pH 值为 1、3 的盐酸和 pH 值为 7 的蒸馏水浸泡的岩样质量损失变化率在 30 d 时分别达到最大值 0.322%、0.185% 和 0.102%。30 d 以后,质量损失率的增加幅度逐渐减小,可见,砂岩与酸液的化学反应具有明显时间效应,浸泡初始阶段以酸性溶液扩散作用为主,反应主要集中在岩样的外表面,岩样表面产生许多气泡,并伴随有沉淀物生成,随着反应时间的延长,酸液浓度逐渐降低,渗透路径加长,反应生成的胶结物起到阻碍作用,水化学反应速率开始降低,最终趋于稳定。

2.3 酸腐蚀砂岩微细观结构定量分析

采用 IPP 图像处理技术对受盐酸腐蚀砂岩孔隙特性进行分析。测量之前,需要对图像进行预处理,包括亮度和对比度调节、过滤降噪处理等,图像处理过程如图 6 所示。过滤操作完成后,对图像进行阈值分割以区别孔隙和岩石矿物颗粒,经图像分割后,SEM 图像由原来的灰度图变为只有 0 和 255 两个灰度值的二值图,如图 7 所示。采取多次尝试及对

比分析,通过选取不同的阈值对 SEM 图像进行分割,最终确定受酸腐蚀后岩样放大 5 000 倍的 SEM 图为合适的分割阈值范围。

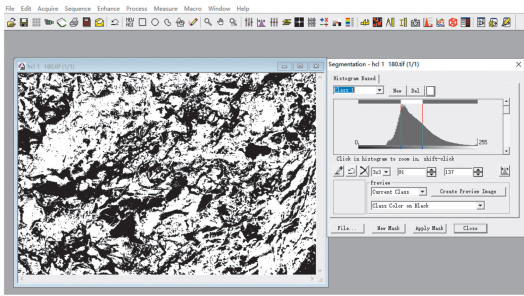
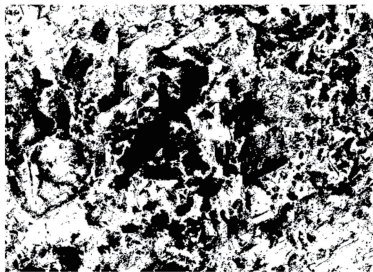
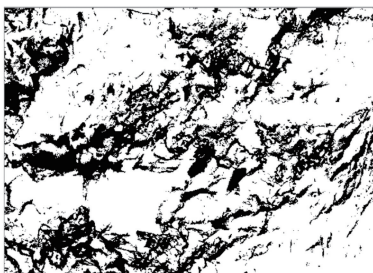


图 6 SEM 图像的处理过程

Fig. 6 SEM image processing process



(a) pH值为1的HCl腐蚀180 d



(b) pH值为3的HCl腐蚀180 d

图 7 pH 值为 1、3 的 HCl 腐蚀 180 d 后岩样的 SEM 二值图

Fig. 7 SEM binary-value diagrams of rock samples after 180 days of HCl corrosion at pH=1 and pH=3

为了分析砂岩受酸腐蚀的孔隙特征,利用 IPP 图像处理软件对 SEM 图像进行处理,绘制其孔隙平均孔径随腐蚀时间变化的关系曲线,如图 8 所示。

从图 8 可以看出,在不同 pH 值溶液中,受酸腐蚀砂岩平均孔径呈增大趋势,90 d 之后平均孔径的增加幅度降低,相同时间段 pH 值为 1 的盐酸腐蚀岩样的孔隙平均孔径增幅较 pH 值为 3 的盐酸、pH 值为 7 的蒸馏水大。原因是 pH 越小氢离子浓度越大,酸反应越剧烈,生成物剥落较多,砂岩微裂隙贯通,使砂岩的孔隙率和平均孔径增大。其中,pH 值为 1、3 的盐酸和 pH 值为 7 的蒸馏水浸泡结束后,

平均孔径较自然状态分别增大 59.6%、49.4%、37.3%。

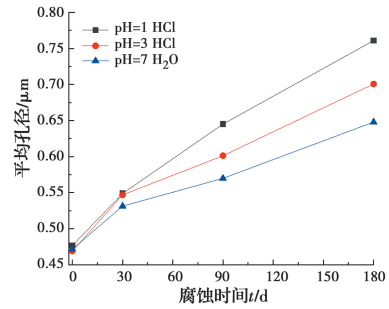


图 8 孔隙平均孔径随腐蚀时间变化

Fig. 8 The average pore size varies with the corrosion time

岩石作为一种非均质、各向异性材料,其内部孔隙和矿物颗粒分布尤为复杂。为了更好地分析孔隙结构的变化特征,运用分形理论计算得到的分形维数进行了定量研究。分形维数值越大,孔隙在材料内的空间分布越复杂,孔隙的结构越不规则。对每个岩样的多张 SEM 图像进行孔隙分形维数计算,以统计分析酸性环境下砂岩孔隙的特征,从而判断砂岩的腐蚀程度。分形维数的计算方法较多,如盒计法、周长面积法、步长法等。采用等效周长面积法计算受盐酸腐蚀砂岩的分形维数,其计算公式为

$$\ln P = F/2 \cdot \ln A + C \quad (2)$$

式中:C 为常数;F 为面积周长法分形维数;A 为测量对象的面积;P 为对应测量对象的周长。分形值在 1~2 之间。F 值越大,孔隙在材料内的空间分布越复杂,孔隙的结构越不规则。

图 9 为 pH 值为 1 的盐酸溶液在不同时段岩样孔隙面积和周长的双对数拟合直线。由图可知,受酸腐蚀岩样 SEM 图像中微观孔隙面积和周长的离散点数据具有很好的对数线性关系,表明受酸腐蚀砂岩微观结构的分形状态。由图 9(a)~(c)可以得到图中散点的分布密度和数值大小呈增加趋势,散点的分布即为酸腐蚀砂岩孔隙增加的数量和孔径的大小,说明随着腐蚀时间的延长,砂岩的孔隙数量和孔径大小逐渐增加;散点分布密度随横坐标值的增大而减小,也说明酸腐蚀砂岩的时效性明显。在不同 pH 值盐酸腐蚀的不同时段,岩样孔隙结构的分形维数如图 10 所示,受盐酸腐蚀砂岩具有分形特征,其分形维数在 1.61~1.69 之间。相同浸泡条件下,岩样分形维数随浸泡时间的延长逐渐增大,随溶液 pH 值的增大而减小。

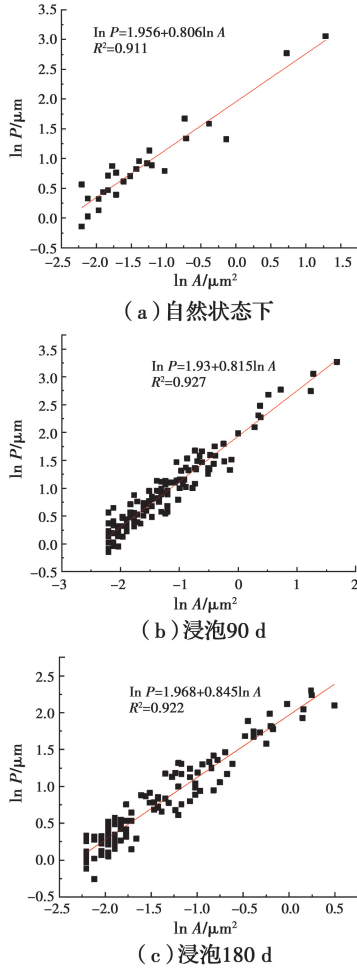


图9 各阶段周长面积拟合

Fig. 9 Perimeter area fitting of each stage

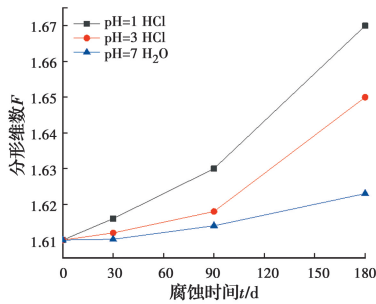


图10 分形维数随时间的变化

Fig. 10 Fractal dimension changes with time

3 酸腐蚀砂岩的本构模型

3.1 模型建立

为了分析砂岩孔隙变化对其力学性质的影响,建立受酸腐蚀砂岩本构模型^[20],为此作如下假定:

1) 砂岩由微单元组成,可简化为孔隙、未损伤和损伤3部分组成。轴向应力仅由未损伤部分承担,如图11所示,黑色部分为损伤部分,空白部分为孔

隙,灰格部分为未损伤部分,对应的作用面积分别为 A_1 、 A_0 、 A_2 。

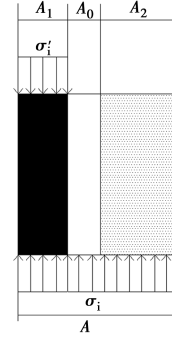


图11 酸腐蚀砂岩单元微观受力简化模型

Fig. 11 Simplified microscopic stress model of acid corroded sandstone element

2) 设含孔隙岩石所受名义应力为 σ_i , 其作用面积为 A , 未损伤部分材料所受有效应力为 σ' , 其作用面积为 A_1 , n 为孔隙率。

基于 Lemaitre 等效应变原理有

$$\sigma_i A = \sigma'_i A_1 \quad (3)$$

$$\frac{\sigma_i}{\sigma'_i} = \frac{A_1}{A} = \frac{A - A_0}{A} \times \frac{A_1}{A_1 + A_2} = (1 - n) \times (1 - D) \quad (4)$$

$$D = 1 - \frac{\sigma_i}{\sigma'_i (1 - n)} \quad (5)$$

基于 Weibull 分布函数, 得到微元体强度统计分布所表示的砂岩损伤变量

$$D = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\epsilon}{x_0} \right)^m \right] \quad (6)$$

由几何边界条件, 可得

$$m = \frac{1}{\ln(E \epsilon_p / \sigma_p)} \quad (7)$$

$$x_0 = \epsilon_p / (1/m)^{\frac{1}{m}} \quad (8)$$

为了使岩石弹性阶段与实际相符, 引入初始应变损伤阈值 k_0 (由沿着岩样弹性阶段应力-应变曲线向应变轴上延长的截距确定)。

结合酸腐蚀后砂岩实际应力-应变曲线, 可得

$$m' = \frac{1}{\ln(E(\epsilon_p - k_0) / \sigma_p)} \quad (9)$$

考虑受荷载作用时各部分的变形协调关系得

$$\epsilon_i = \epsilon'_i \quad (10)$$

ϵ_i 与式(6)中 ϵ 均为名义轴向应变, 为了与图12符号保持一致, 用 σ 代替 σ_i , 结合式(5)与式(6)可以得出砂岩损伤本构模型

$$\sigma = E(\varepsilon - k_0)(1 - n) \exp \left[-\frac{1}{m'} \left(\frac{\varepsilon - k_0}{\varepsilon_p - k_0} \right)^{m'} \right] \quad (11)$$

3.2 模型的验证

受酸腐蚀砂岩物理力学参数如表 2 所示。

表 2 酸腐蚀砂岩物理力学参数表

Table 2 Physical and mechanical parameters of acid corroded sandstone

浸泡溶液	初始弹性模量	腐蚀时间	峰值点应力	峰值点轴向应变	形状参数 m'	孔隙率 $n/\%$
	E/GPa	t/d	σ/MPa	$\varepsilon_p/10^{-3}$		
pH 值为 1 的 HCl	25.2	30	55.21	8.32	0.87	3.014
	25.2	90	48.92	11.13	0.59	4.95
	25.2	180	41.83	12.24	0.39	5.16
pH 值为 3 的 HCl	25.2	30	63.54	7.81	1.01	2.95
	25.2	90	56.55	11.21	0.64	4.74
	25.2	180	51.51	12.51	0.54	4.86
pH 值为 7 的 H ₂ O	25.2	30	80.03	7.85	1.19	2.49
	25.2	90	70.01	10.23	0.83	3.12
	25.2	180	65.04	11.44	0.71	3.78

将表 2 所得模型参数代入公式(11),即可得到模型的应力-应变曲线,将其与试验曲线进行对比分析,结果如图 12 所示。

由图 12 可以得出:

1) pH 值为 1、3 的 HCl 及 pH 值为 7 的 H₂O 分别腐蚀 30、90、180 d,相对误差最大值分别为 7.2%、6.47%、5.71%,试验与理论数值较吻合,相对误差较小,基于孔隙率建立的损伤本构曲线与试验曲线吻合较好,从而验证了损伤本构模型能够较好地反映酸腐蚀砂岩的劣化损伤效应。

2) 受酸腐蚀强度曲线变化趋势具有一致性, pH 值为 1、3 的 HCl 及 pH 值为 7 的 H₂O 腐蚀砂岩的抗压强度理论曲线斜率均在 30 d 时最大,强度较自然岩样分别降低了 37.8%、36.3%、13.3%。30~90 d 斜率逐渐减小,强度较上一阶段分别降低了 16.4%、11.1%、12.5%。90~180 d 斜率最小并趋于稳定,强度较上一阶段分别降低了 9.3%、8.91%、7.1%。这表明酸腐蚀砂岩具有明显的时间效应。综上所述,砂岩受盐酸腐蚀实质是岩石孔隙增多,孔隙率增大,质量显著减少,砂岩结构变得疏松,强度降低,说明单轴抗压强度的降低与孔隙率的

增大具有较好的相关性。

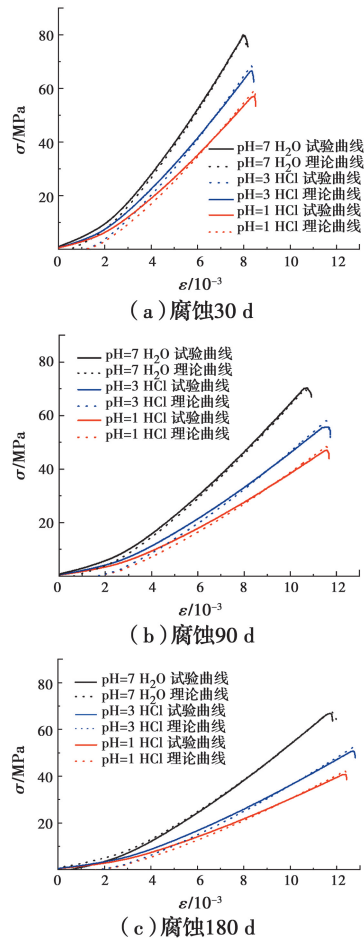


图 12 受酸腐蚀砂岩各阶段单轴压缩应力-应变曲线试验值与理论值

Fig. 12 Test and theoretical values of uniaxial compression stress-strain curve at each stage of acid corroded sandstone

4 结论

基于受酸腐蚀砂岩的单轴压缩试验和扫描电镜图像分析,研究了不同 pH 值盐酸加速腐蚀试验后砂岩力学性能和微观结构特征,得到如下结论:

1) 砂岩腐蚀试验和力学试验发现,经 pH 值为 1、3 的盐酸溶液和 pH 值为 7 的蒸馏水浸泡 180 d 后,砂岩的质量损失率分别减少了 1.22%、1.08%、0.57%,单轴抗压强度分别降低了 52.93%、41.91%、27.11%,说明砂岩腐蚀过程具有明显的时间效应,单轴抗压强度的降低与孔隙率的增大具有较好的相关性。

2) 通过腐蚀砂岩的扫描电镜图像分析得到:随着腐蚀时间的延长,相对于自然状态,腐蚀后砂岩微

观结构发生明显变化,小孔隙逐渐扩张贯通形成较大孔隙,颗粒形态也由清晰整齐边缘向松散质地转化,砂岩的孔隙数量、孔径大小、分形维数随腐蚀时间的延长逐渐增大,随溶液 pH 值增大而减小。

3)提出基于孔隙率变化的化学损伤变量,推导了受酸腐蚀砂岩的损伤本构模型,通过试验与理论结果的对比分析,验证了模型的合理性。

参考文献:

- [1] 卢毅,施斌,刘瑾,等. 城市热岛效应下浅层土中混凝土的酸腐蚀试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2011, 31(3): 241-246, 274.
LU Y, SHI B, LIU J, et al. Laboratory study on urban heat island effect on the acid corrosion of concrete in superficial soil layers [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2011, 31(3): 241-246, 274. (in Chinese)
- [2] 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, 296.
CHEN S L, FENG X T, LI S J. The effects of chemical erosion on mechanical behaviors of Xiaolangdi sandstone [J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(3): 284-287, 296. (in Chinese)
- [3] 陈四利,冯夏庭,李邵军. 化学腐蚀下三峡花岗岩的破裂特征[J]. 岩土力学, 2003, 24(5): 817-821.
CHEN S L, FENG X T, LI S J. The fracturing behaviors of Three Gorges granite under chemical erosion [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(5): 817-821. (in Chinese)
- [4] 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.
FENG X T, WANG C Y, CHEN S L. Testing study and real-time observation of rock meso-cracking process under chemical erosion [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(7): 935-939. (in Chinese)
- [5] 邓华锋,张恒宾,李建林,等. 水-岩作用对砂岩卸荷力学特性及微观结构的影响[J]. 岩土力学, 2018, 39(7): 2344-2352.
DENG H F, ZHANG H B, LI J L, et al. Effect of water-rock interaction on unloading mechanical properties and microstructure of sandstone [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(7): 2344-2352. (in Chinese)
- [6] ÅKESSON U, LINDQVIST J, GÖRANSSON M, et al. Relationship between texture and mechanical properties of granites, central Sweden, by use of image-analysing techniques [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2001, 60(4): 277-284.
- [7] ÅKESSON U, STIGH J, LINDQVIST J E, et al. The influence of foliation on the fragility of granitic rocks, image analysis and quantitative microscopy [J]. Engineering Geology, 2003, 68(3/4): 275-288.
- [8] WU X Y, BAUD P, WONG T F. Micromechanics of compressive failure and spatial evolution of anisotropic damage in Darley Dale sandstone [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(1/2): 143-160.
- [9] 黄宏伟,车平. 泥岩遇水软化微观机理研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2007, 35(7): 866-870.
HUANG H W, CHE P. Research on micro-mechanism of softening and argillitization of mudstone [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2007, 35(7): 866-870. (in Chinese)
- [10] 韩铁林,陈蕴生,师俊平,等. 水化学腐蚀对砂岩力学特性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(Sup2): 3064-3072.
HAN T L, CHEN Y S, SHI J P, et al. Experimental study of mechanical characteristics of sandstone subjected to hydrochemical erosion [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(Sup2): 3064-3072. (in Chinese)
- [11] 霍润科. 酸性环境下砂浆、砂岩材料的受酸腐蚀过程及其基本特性劣化规律的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 647.
HUO R K. Experimental research on progressive and deteriorative characteristics of sandstone and mortar subjected to hydrochloric acid corrosion [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 647. (in Chinese)
- [12] 霍润科,韩飞,李曙光,等. 受酸腐蚀砂岩物理化学及力学性质的试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2019, 51(1): 21-26.
HUO R K, HAN F, LI S G, et al. Experimental study on physicochemical and mechanical properties of acid-corroded sandstone [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition),

- 2019, 51(1): 21-26. (in Chinese)
- [13] HUO R K, LI S G, HAN F, et al. CT analysis on mesoscopic structure of sandstone under acidic environment [J]. Indian Journal of Geo-Marine Sciences, 2018, 47(5), 962-971.
- [14] HUO R K, LI S G, DING Y. Experimental study on physicochemical and mechanical properties of mortar subjected to acid corrosion [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2018, 2018: 1-11.
- [15] LI S G, HUO R K, WANG B, et al. Experimental study on physicomaterial properties of sandstone under acidic environment [J]. Advances in Civil Engineering, 2018, 2018: 1-15.
- [16] LI S G, HUO R K, YOSHIKI F, et al. Effect of acid-temperature-pressure on the damage characteristics of sandstone [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2019, 122: 104079.
- [17] LI S G, WU Y M, HUO R K, et al. Mechanical properties of acid-corroded sandstone under uniaxial compression [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020: 1-14.
- [18] 徐艳玲, 徐斌, 尹尚先. 砂岩渗透性能微观图像分形分析[J]. 工程勘察, 2014, 42(6): 45-49.
- XU Y L, XU B, YIN S X. Analysis on the permeability of sandstone with fractal theory [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2014, 42(6): 45-49. (in Chinese)
- [19] YANG X J, WANG J M, ZHU C, et al. Effect of wetting and drying cycles on microstructure of rock based on SEM [J]. Environmental Earth Sciences, 2019, 78(6): 183.
- [20] 曹文贵, 李翔, 刘峰. 裂隙化岩体应变软化损伤本构模型探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(12): 2488-2494.
- CAO W G, LI X, LIU F. Discussion on strain softening damage constitutive model for fissured rock mass [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(12): 2488-2494. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)