

# 酸性溶液腐蚀后花岗岩力学特性试验研究

周倩, 陈有亮

(上海理工大学, 上海 200093)

**摘要:** 以福建省安南市水头镇花岗岩为研究对象,研究了花岗岩在不同酸性溶液( $\text{pH}=1$ ,  $\text{pH}=3$ ,  $\text{pH}=5$ )中浸泡不同时间(30d, 60d, 90d)后单轴压缩下的基本力学特性。使用扫描电子显微镜(SEM)观察破坏后的花岗岩矿物形貌,并对破坏后的花岗岩进行X射线衍射(XRD)分析其衍射图谱获得试样成分。探讨化学溶液腐蚀后的花岗岩微观破坏情况。试验结果表明:化学腐蚀后的花岗岩物理力学特性均发生不同程度的劣化,随着pH值的减小,花岗岩试块杨氏模量减小,峰值应力减小;随着腐蚀时间的增加,试块杨氏模量减小,峰值应力减小。观察SEM图像得知,随着腐蚀时间和溶液酸性的增大,花岗岩矿物晶体之间的连接变弱。

**关键词:** 花岗岩; 岩石力学; 酸性溶液; 力学性能; 矿物特性

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)01-0225-07

## The experimental study on mechanical properties of granite after acid solution corrosion

ZHOU Qian, CHEN Youliang

(University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** Taking the granite in Shuitou Town, Annan City, Fujian Province as the research object, the physical and mechanical properties of granite in different acid solutions ( $\text{pH}=1$ ,  $\text{pH}=3$ ,  $\text{pH}=5$ ) under different immersion time (30d, 60d, 90d) were analyzed under uniaxial compression. The morphology of the damaged granite sample is observed by using scanning electron microscope and the constituent of the damaged granite samples are detected by using X-ray diffraction. The microscopic damage of granite after chemical solution corrosion is discussed. The results show that the physical and mechanical properties have degradation after chemical corrosion. With the decrease of the PH value of chemical solution, Young's modulus and peak stress of granite decline. With the increase of chemical corrosion time, Young's modulus and peak stress of granite decline. The connection of minerals in granite decreases with the increase of the immersion time and elevated PH value by observing SEM pictures.

**Key words:** granite; rock mechanics; acid solution; mechanical property; mineral characteristics

## 1 研究背景

随着经济的发展,工业和生活污水、酸雨等对工程结构腐蚀现象日益加剧对工程建筑质量的要求也越来越高,建筑防腐蚀性能受到更多关注。国内外许多学者研究了岩石在化学溶液腐蚀下的物理力学性质。陈有亮等<sup>[1-3]</sup>通过研究花岗岩在不同化学溶液(水、NaOH溶液、 $\text{HNO}_3$ 溶液)中浸泡并进行冻融循环的力学性能,分析了花岗岩在不同化学溶液中

溶蚀及经历不同冻融循环次数后,在单轴压缩作用下基本力学性能的变化规律;通过定义损伤变量,定量分析了花岗岩的损伤程度。王伟等<sup>[4]</sup>利用岩石三轴测试系统对3种不同pH化学溶液浸泡后的花岗岩进行三轴压缩试验,探讨不同pH化学溶液对花岗岩力学特性的腐蚀效应,获得不同化学溶液对花岗岩强度和变形特性的影响规律。丁梧秀等<sup>[5-8]</sup>通过不同化学溶液侵蚀不同时间下灰岩的力学试验及分析,获得不同化学溶液侵蚀下龙门石窟灰岩强

收稿日期:2017-09-04; 修回日期:2017-11-14

基金项目:上海市自然科学基金项目(14ZR1428200)

作者简介:周倩(1993-),女,安徽宣城人,硕士研究生,研究方向为岩土工程。

度损伤特性,建立化学溶液作用下灰岩单轴抗压强度随时间的侵蚀损伤方程。杨金保等<sup>[9]</sup>通过单裂隙花岗岩在恒定三轴压应力及化学溶液渗透作用下的试验,研究了单裂隙花岗岩在应力-化学溶液渗透条件下的开度演化规律。岳汉威等<sup>[10]</sup>运用冲击求压法研究了花岗岩、大理石在质量分数为 6% 的盐酸溶液中压入深度-冲击荷载关系、损伤半径-拉应力关系以及接触损伤的规律。虽然国内外目前对岩石酸性腐蚀后的特性研究取得了一定的成果<sup>[11-15]</sup>,但是关于对酸性溶液破坏后的岩石微观破坏研究报告尚少见。

本文通过研究花岗岩在不同 pH 值的酸性溶液 (pH = 1、3、5) 中浸泡不同时间 ( $t = 30、60、90\text{d}$ ) 后的力学特性及微观破坏。分析了花岗岩在不同酸性溶液中溶蚀后杨氏模量的改变,以及单轴压缩作用下单轴抗压强度和应力应变关系。使用扫描电子显微镜 (SEM) 观察破坏后的花岗岩微观形态。通过对破坏后的花岗岩进行 X 射线衍射 (XRD), 获得试样成分,从矿物成分角度分析花岗岩的变化情况。这一研究成果为酸雨影响下的地区岩石工程的建设提供了理论支撑。

## 1 试验介绍及方案设计

### 1.1 试样制作

试验所用花岗岩试样取自福建省安南市水头镇,整体呈现灰白色,其中夹杂黑色颗粒。在自然状态下平均密度为  $2\,700\text{ kg/m}^3$ , 平均纵波波速为  $4\,086\text{ m/s}$ 。通过 X 射线衍射分析得到其主要矿物

成分及质量百分含量分别为:长石 52% ~ 59%, 石英:24% ~ 30%, 云母:17% ~ 20%。长石呈板柱状, 石英呈柱状、块状晶簇。花岗岩的物理参数如下表 1 所示。

表 1 花岗岩物理参数

| 天然<br>密度 $\rho/$<br>( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) | 饱和<br>密度 $\rho_{\text{sat}}/$<br>( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) | 含水<br>饱和<br>量/% | 纵波<br>波速/<br>( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) | 弹性<br>模量/<br>GPa |
|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-----------------|-------------------------------------------------|------------------|
| 2.7                                                     | 2.712                                                                | 0.237           | 4068                                            | 53.5             |

单轴压缩试验试样根据 ISRM (International Society for Rock Mechanics) 建议标准制成  $\Phi 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$  的圆柱体,分别放在 pH 值为 1、3、5 的酸性溶液中浸泡 30、60、90d,其中参照组不做任何处理。每组 5 个,共 50 个。

### 1.2 试验设备

试验中所用的杨氏模量和纵波波速测试为 V-METER III 型超声脉冲速度测试仪,测试精度为:  $0.1\text{ }\mu\text{s}$ 。单轴压缩试验选用西安力创材料检测技术有限公司生产的微机控制刚性伺服三轴压力试验机,其最大荷载为 2000 kN,轴向负荷精度为  $\pm 1\%$ 。X 射线衍射分析 (XRD) 采用德国 BRUKER 公司的 D8Advance 型射线衍射仪,采用连续扫描方式对试样粉末进行扫描。扫描电子显微镜 (scanning electron microscope) 是由 TESCAN 提供的 VEGA-3SBH 型场发射扫描电子显微镜,用来观察样品的表面形貌。试验设备见图 1 所示。



(a) 超声波脉冲速度测试仪



(b) 三轴压力机



(c) X 射线衍射分析仪

图 1 测试仪器

### 1.3 试验方法

1.3.1 花岗岩浸泡试验 对试样进行分组编号并测量初始弹性模量和纵波波速,再将试块分别放入 pH = 1、3、5 的  $\text{HNO}_3$  溶液中,浸泡 30、60、90 d。浸泡相应时间后,分别取出试样置于室外静置 48 h,再

测量试样腐蚀后的弹性模量及纵波波速。

1.3.2 单轴压缩试验 单轴压缩试验每组试件 5 个,包括参照组在内共 10 组试件,50 个试样。利用微机控制刚性伺服三轴压力试验机对处理后的花岗岩试件进行单轴压缩试验。试验采用压力控制方

式,以加压速度为 0.5 kN/s 沿轴向施加轴向荷载,直至试样破坏,试验系统自动采集试验数据。

**1.3.3 XRD 及 SEM 试验** 将单轴压缩试验结束后的碎块进行处理,加工成碎屑和碎块。对碎屑进行 XRD 分析、对碎块进行 SEM 观察,观察和分析破坏后的花岗岩成分和形态的改变情况。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 宏观破坏形态分析

图 2 为花岗岩在单轴压缩试验中破坏模式,主要呈现 3 种主要破坏形式:剪切滑移破坏、柱状劈裂破坏和圆锥形破坏。图 2(a)为剪切滑移破坏,这种破坏主要是因为花岗岩矿物颗粒间的剪切滑移的累

计效果,最终由量变发展成质变,进而在宏观上表现为整个花岗岩试块的剪切滑移,最终形成剪切滑移破坏。图 2(b)为柱状劈裂破坏,这主要是因为试块的两端面不平行使得沿着轴线产生剪力,出现平行试块轴线的垂直裂缝,进而发生柱状劈裂破坏。图 2(c)为圆锥破坏模式,这种破坏形态是由于岩石两端面与试验机相接触时存在较大的摩擦力,这种摩擦力使得试块断面部分形成了一个箍的作用(端部效应),这种作用随着其与承压板距离的增加而减弱使得试块出现拉应力,进而出现圆锥形破坏。在本次试验中,主要以柱状劈裂破坏为主(30 个/50 个),其次是圆锥形破坏(14 个/50 个),最后是剪切滑移破坏(6 个/50 个)。



(a) 剪切滑移破坏



(b) 柱状劈裂破坏



(c) 圆锥形破坏

图 2 花岗岩典型破坏模式

### 2.2 应力应变曲线

花岗岩在不同 pH 值的  $\text{HNO}_3$  溶液中经过不同的浸泡时间后进行单轴压缩试验,应力应变曲线如图 3 所示,规律大致相似,都经历了 4 个阶段:压密阶段、弹性阶段、塑性阶段及破坏后阶段,区别在于达到各阶段所需要的应变不同。其中,图 3(a)为 pH=3.0 时,不同浸泡天数对花岗岩应力应变曲线的影响,可以看出浸泡天数对花岗岩的单轴抗压强度影响较为明显。图 3(b)为浸泡 90 d 时,不同 pH 值对花岗岩应力应变曲线的影响,可以看出不同 pH 值对花岗岩的单轴抗压强度影响较小。

### 2.3 杨氏模量和纵波波速

杨氏模量是描述固体材料抵抗形变能力和物体弹性变形难易程度的物理量。图 4(a)为自然状态、不同 pH 值的  $\text{HNO}_3$  化学溶液及不同浸泡天数腐蚀后采用超声脉冲速度测试仪测出花岗岩的杨氏模量,其中任意一点为每组试样的平均值。相同 pH 值时,随着浸泡天数的增长,杨氏模量逐渐变小,呈线性下降;相同浸泡天数下,溶液中 pH 值越小,试块的平均杨氏模量也越小,这主要是因为溶液酸性

越大,会加剧对花岗岩的腐蚀,进而造成损伤劣化。弹性波在岩体中的传播速度与动弹性模量及泊松比直接相关,有助于理解花岗岩的动力特性。图 4(b)为自然状态、不同 pH 值的  $\text{HNO}_3$  化学溶液及不同浸泡天数腐蚀后采用超声脉冲速度测试仪测出花岗岩的纵波波速。不同 pH 值溶液浸泡的花岗岩的纵波波速随着浸泡时间增长变化规律基本一致,先增大达到峰值后减小。相同 pH 值时,30 d 的浸泡时间内, $\text{HNO}_3$  溶液对花岗岩纵波波速影响较小,而浸泡时间 30~60 d,花岗岩的纵波波速有很大的提高;超过 60 d 后, $\text{HNO}_3$  溶液反而降低了花岗岩的纵波波速。

### 2.4 峰值应力和峰值应变

单轴抗压强度(峰值应力)作为岩石的最简单受力状态下的最常见的指标之一,研究其受到酸性溶液影响后的变化规律具有重要意义。如图 5 所示,是对花岗岩进行单轴压缩得到的不同 pH 值溶液浸泡下的峰值应力和峰值应变。由图 5(a)可知,当浸泡时间为 0~60 d 时,3 种 pH 值溶液下花岗岩的峰值应力都有一定的削弱,但超过 60 d 时,峰值应力都出现了

一定的回升。同一浸泡时间内不同 pH 值溶液下花岗岩的峰值应力相差不大,影响有限。峰值应变为花岗岩试块在单轴抗压试验中达到破坏前的最大应变<sup>[2]</sup>。由图 5(b)可知,当浸泡时间为 0~60 d 时, pH 值为 1.0 和 3.0 的峰值应变随浸泡时间变化规律较

为相似,先减小后有一定的回升,这可能是因为花岗岩试块在酸性溶液作用下,随着损伤劣化的加剧,试块内部裂纹和孔洞增多,造成岩石脆性增加、应力应变曲线压密区减小,从而峰值应变减小。

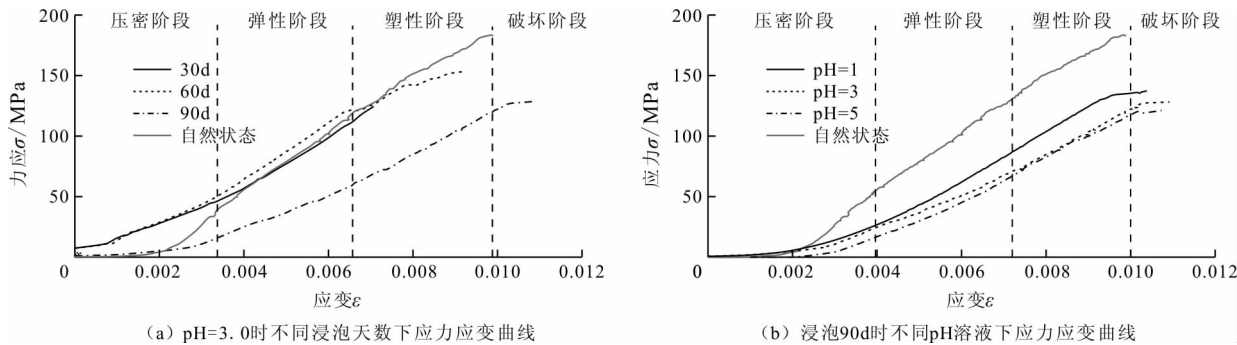


图 3 不同处理条件下的花岗岩试样的应力应变曲线

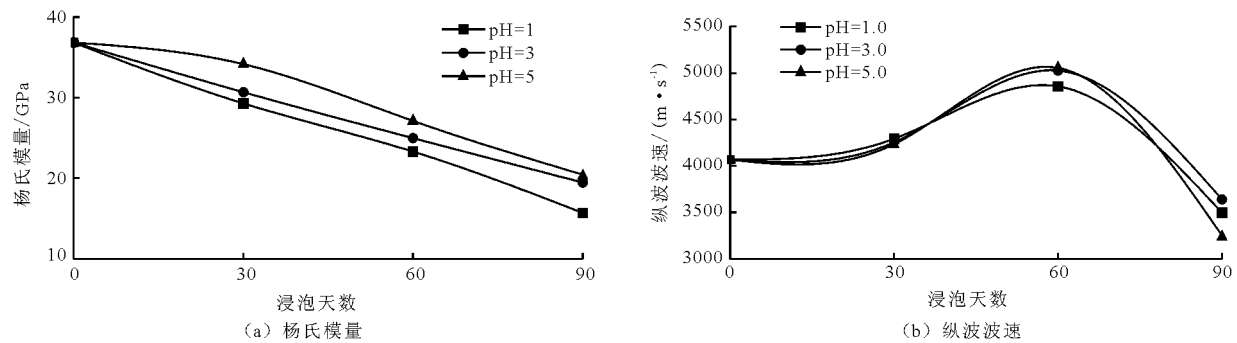


图 4 不同处理条件下的花岗岩试样的杨氏模量及纵波波速

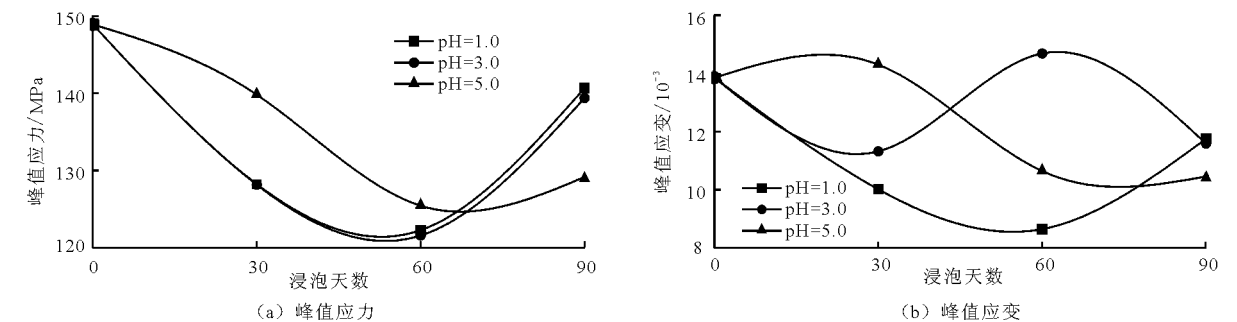


图 5 不同处理条件下的花岗岩试样的峰值应力及峰值应变

2.5 XRD 矿物成份及机理分析

试验前,对花岗岩样品常温下的矿物组成进行了测试,如表 2 所示,其中主要成分包括钙长石 (Anorthite)、钠长石 (Albite)、铁云母 (Fluorannite)、金云母 (Phlogopite)、黑云母 (Biotite) 和石英 (Quartz)。结果表明花岗岩中的主要的三大矿物分别是长石、云母、石英。试验后,对腐蚀后的试样进行 XRD 分析,发现花岗岩中的三大矿物成分在酸性溶液腐蚀前后无明显变化,如图 6 所示。需要说明

的是,在 X 射线衍射谱图中,衍射峰越细越高,结构越完整,结晶度越大。不难看出经历酸性溶液腐蚀后,花岗岩矿物结晶度减弱,随着 pH 值越小,结晶度越小;随着腐蚀时间越长,结晶效果越差。

| 表 2 花岗岩矿物组成成分 |       |       |     |     |     | %    |
|---------------|-------|-------|-----|-----|-----|------|
| 长石            | 云母    | 石英    | 钾长石 | 高岭石 | 角闪石 | 未知成分 |
| 45~50         | 25~30 | 15~20 | 3~5 | 2   | 2   | 1    |

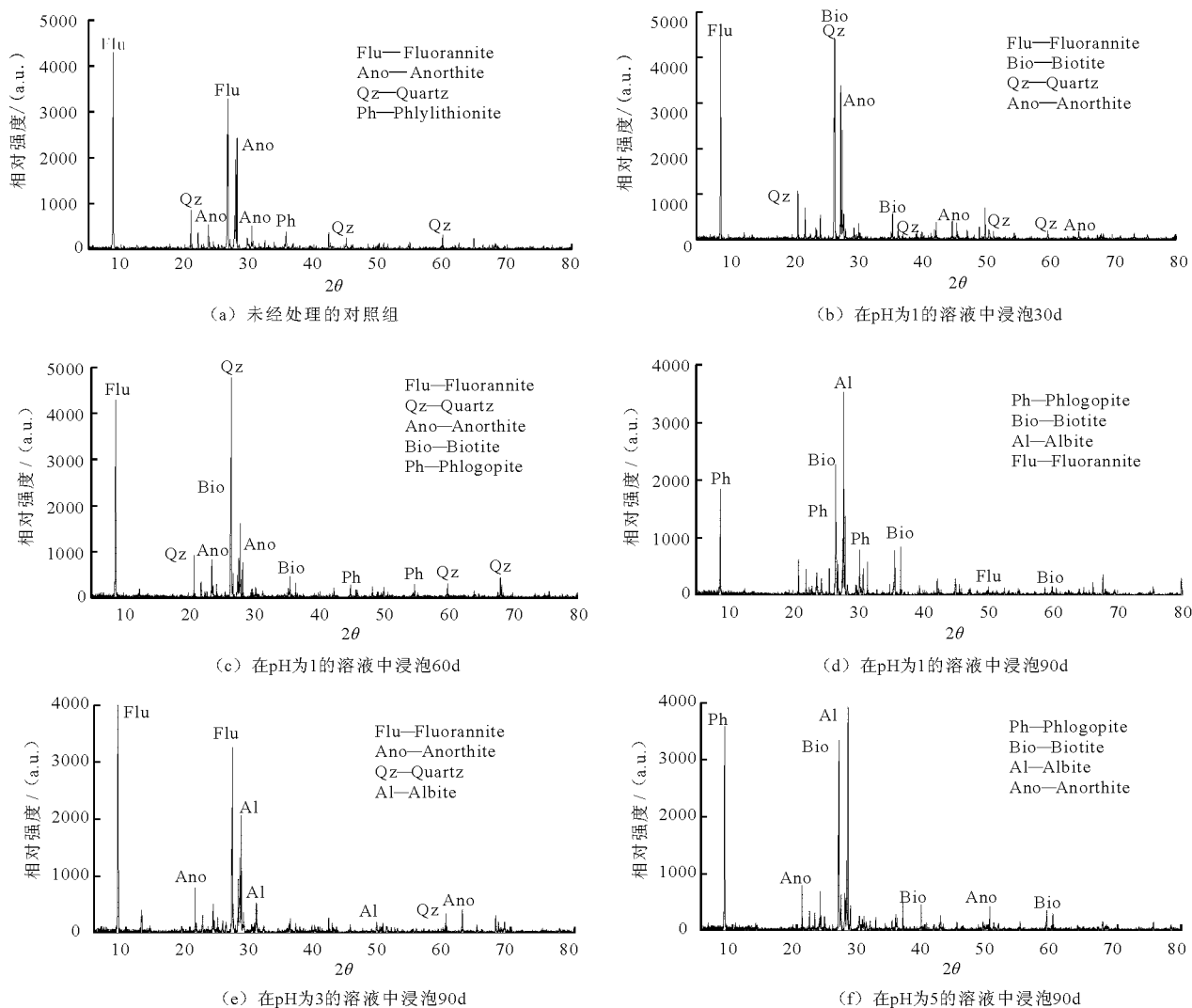
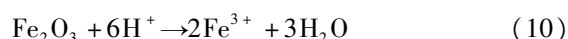
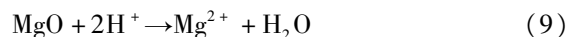
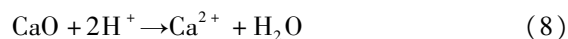
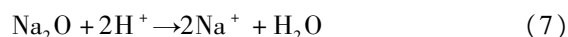
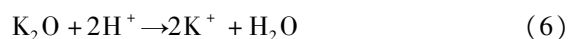
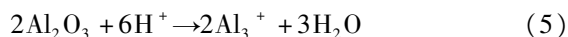
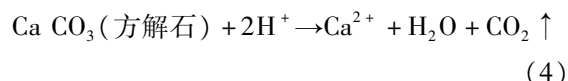
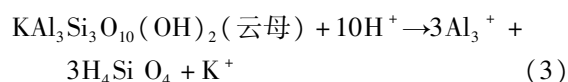
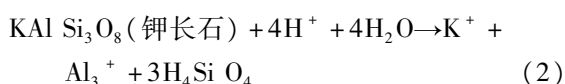
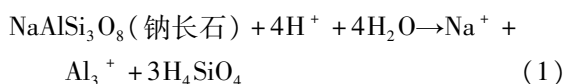


图6 不同处理条件下的花岗岩试样衍射图

岩石大多数是由多种矿物成分组成,本文通过花岗岩试样中所含的主要矿物成分进行化学机理分析。石英、钾长石(正长石或微斜长石分子)、钠长石分子式分别以  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$  及  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$  表示;钙长石分子式为  $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ,方解石的分子式为  $\text{CaCO}_3$ ,云母的分子式为  $\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ;其他矿物的主要分子式为:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{FeO}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$  和  $\text{MnO}$  等。岩石中的部分矿物在溶液中发生化学反应,改变了岩石的微细观结构,故化学反应是影响化学溶液中岩石物理力学性能的最主要因素。花岗岩在  $\text{HNO}_3$  溶液中主要发生以下反应<sup>[1]</sup>:



由以上化学反应可知,在  $\text{HNO}_3$  溶液中,花岗岩会发生多种化学反应。随着岩石在化学溶液中浸泡的时间增加,生成物在水溶液中多以离子状态存在,使岩石内部孔隙增大,岩石的损伤逐渐加剧;随着  $\text{HNO}_3$  溶液中 pH 的增大,化学反应更加剧烈,但也

有可能生成  $\text{Al}_2\text{O}_3$  + 保护膜, 反而减缓了腐蚀。当然,  $\text{HNO}_3$  溶蚀花岗岩也可能与酸性溶液的温度和压力密切相关, 这有待进一步研究。

## 2.6 SEM 细观破坏形态及机理分析

为了更直观地研究矿物溶解反应的进行情况, 并且观察经不同酸性溶液腐蚀后的花岗岩裂隙面上矿物的形貌变化, 对试验后的花岗岩试样进行扫描电镜检测 (SEM), 如图 7 和图 8 所示。

通过具有一定代表性的扫描电镜的图样观察可得, 经历酸性溶液腐蚀后, 花岗岩表面出现了不同程

度的空洞和坑蚀。图 7 为保持浸泡时间为 90 d 时不同 pH 溶液腐蚀下的扫描电镜图, 由图 7 可知, 随着 pH 值的减小和浸泡天数的增加, 矿物表面的空洞和坑蚀逐渐加深。图 8 为 pH = 3.0 的  $\text{HNO}_3$  溶液在不同浸泡天数的扫描电镜图, 由图 8 可知, 随着浸泡天数的不断增加, 矿物表面从光滑的解理面慢慢过渡为表面光滑, 最终出现斑斑点点的凸起表面, 表面更为粗糙, 这在一定程度上解释了图 5(a) 中提到的峰值应力反而增加的机理, 且与岳汉威等<sup>[10]</sup>的研究结果一致。

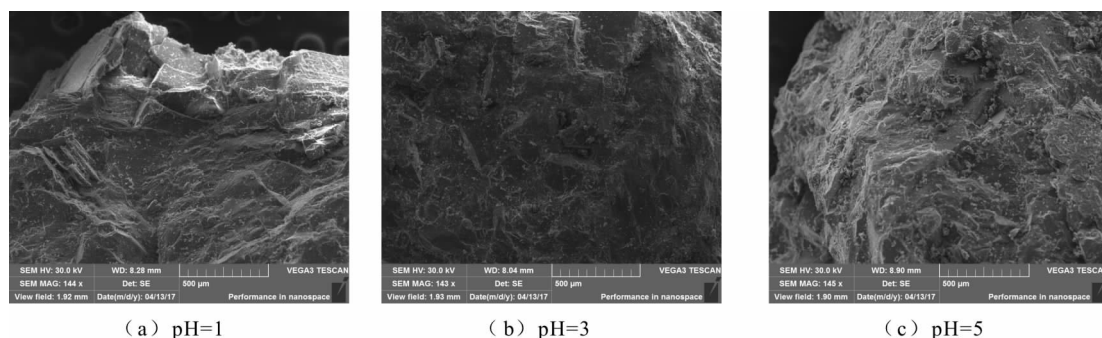


图 7 不同 pH 溶液腐蚀下的扫描电镜图

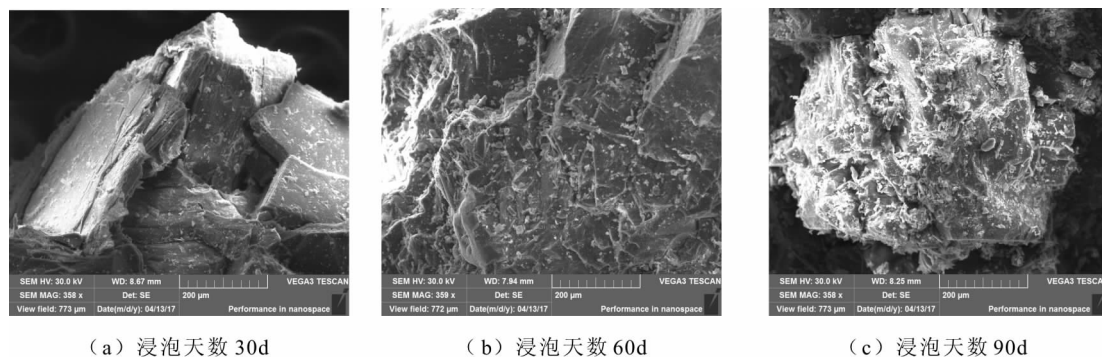


图 8 不同浸泡天数的扫描电镜图

## 3 结 论

本文通过对在不同 pH 值的  $\text{HNO}_3$  溶液 (pH 为 1、3、5) 中浸泡不同天数 (30、60、90d) 的花岗岩力学特性试验和微观化学机理研究, 可以得出以下结论:

(1) 花岗岩在不同 pH 值的酸性溶液中浸泡后, 随着 pH 值减小, 酸性增加, 花岗岩的杨氏模量减小, 抗压强度减小, 峰值应力减小。

(2) 花岗岩在相同 pH 值的酸性溶液中浸泡不同天数后, 随着浸泡天数的增加, 腐蚀性增强, 花岗岩的物理力学特性损伤加剧, 花岗岩的杨氏模量减小, 抗压强度减小, 峰值应力减小。

(3) 花岗岩试样在酸性溶液腐蚀后, 表面出现

了不同程度的空洞和坑蚀, pH 值减小、浸泡天数增加, 矿物表面的空洞和坑蚀逐渐明显。通过对腐蚀后的花岗岩试样进行 XRD 分析, 腐蚀后和腐蚀前的矿物没有明显变化, 但矿物的晶体形态发生了改变。

本文的研究成果及相应的结论对受到工业和生活污水、酸雨等影响的工程结构及相关建筑防腐规范的完善具有一定的参考价值。然而, 当前的单轴试验无法考虑围压和化学腐蚀的耦合效应, 建议开展三轴试验进一步完善。

## 参考文献:

- [1] 陈有亮, 王 朋, 张学伟, 等. 花岗岩在化学溶蚀和冻融循环后的力学性能试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(12): 2226 - 2235.

- [2] 陈有亮,代明星,索晓航,等. 酸性与高温环境下花岗岩力学性能试验研究[J]. 力学季刊,2013,34(1):49-53.
- [3] CHEN Youliang, WANG Suran, NI Jing, et al. An experimental study of the mechanical properties of granite after high temperature exposure based on mineral characteristics [J]. Engineering Geology, 2017,220:234-242.
- [4] 王伟,刘桃根,李雪浩,等. 化学腐蚀下花岗岩三轴压缩力学特性试验[J]. 中南大学学报(自然科学版),2015,46(10):3801-3807.
- [5] 丁梧秀,冯夏庭. 渗透环境下化学腐蚀裂隙岩石破坏过程的CT试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(9):1865-1873.
- [6] 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.
- [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.
- [8] 丁梧秀,冯夏庭. 化学腐蚀下裂隙岩石的损伤效应及断裂准则研究[J]. 岩土工程学报,2009,31(6):899-904.
- [9] 杨金保,冯夏庭,潘鹏志,等. 三轴压应力-化学溶液渗透作用下单裂隙花岗岩裂隙开度演化[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(9):1869-1878.
- [10] 岳汉威,马振珠,包亦望. 酸腐蚀作用对岩石的接触变形和损伤的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版),2011,42(5):1282-1289.
- [11] TAKARLI M, PRINCE W, SIDDIQUE R. Damage in granite under heating & cooling cycles and water freeze-thaw condition[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008,45(7):1164-1175.
- [12] 韩铁林,师俊平,陈蕴生. 砂岩在化学腐蚀和冻融循环共同作用下力学特征劣化的试验研究[J]. 水利学报,2016,47(5):644-655.
- [13] 刘建,李鹏,乔丽萍,等. 砂岩蠕变特性的水物理化学作用效应试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(12):2540-2550.
- [14] 李鹏,刘建,李国和,等. 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.
- [15] 许江,吴慧,程立朝,等. 酸性条件下砂岩剪切破坏特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(S2):3897-3903.

(上接第224页)

- [2] BLASER H D, SCHERER O J. Simultaneous transport of solutes and water under transient unsaturated flow conditions[J]. Water Resources Research, 1973,9(4):975-986.
- [3] NIXON J F, LEM G. Creep and strength testing of frozen saline fine grained soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1984,21(3):518-529.
- [4] 石兆旭,李斌,金应春. 硫酸盐渍土膨胀规律及影响因素的试验分析[J]. 西安公路学院学报,1994,14(2):15-21.
- [5] 邓友生,周成林. 硫酸钠溶液的盐胀与冻胀[J]. 冰川冻土,2009,31(5):920-924.
- [6] 高江平,吴家惠,杨荣尚. 硫酸盐渍土盐胀特性各影响因素间交互作用规律的分析[J]. 中国公路学报,1997,10(1):10-15.
- [7] 牛玺荣,高江平. 综合考虑盐胀和冻胀时硫酸盐渍土体积变化关系式的建立[J]. 岩土工程学报,2015,37(4):755-760.
- [8] 文桃,米海珍,马连生,等. 硫酸钠盐渍土击实特性与压实度评价试验研究[J]. 岩土力学,2016,36(12):3455-3462+3471.
- [9] 万旭升,赖远明. 硫酸钠溶液和硫酸钠盐渍土的冻结温度及盐晶析出试验研究[J]. 岩土工程学报,2013,35(11):2090-2096.
- [10] 王宁,王清,霍珍生,等. 盐分与压实度对盐渍土起始冻胀含水率的影响[J]. 工程地质学报,2016,24(5):951-958.
- [11] 王海涛,张远芳,成峰,等. 冻融循环作用下盐渍土抗剪强度变化规律研究[J]. 地下空间与工程学报,2016,12(5):1271-1276.
- [12] 石群,张远芳,李炎,等. 罗布泊天然盐渍土冻融循环条件下水盐迁移规律[J]. 工程勘察,2016,44(4):1-4+10.
- [13] 包卫星,李志农. 喀什地区不同盐渍土冻融变形特性试验[J]. 长安大学学报(自然科学版),2008,28(2):26-30.
- [14] 包卫星,杨晓华,谢永利. 天然盐渍土冻融循环时水盐迁移规律及强度变化试验研究[J]. 工程地质学报,2006,14(3):380-385.
- [15] 中华人民共和国交通部公路科学研究院. JTG E40-2007 公路土工试验规程[S]. 北京:人民交通出版社,2007.
- [16] 张莎莎,谢永利,杨晓华,等. 典型天然粗粒盐渍土盐胀微观机制分析[J]. 岩土力学,2010,31(1):123-127.