

文章编号: 1000-7598-(2003) 05-0817-05

化学腐蚀下三峡花岗岩的破裂特征

陈四利^{1, 2}, 冯夏庭^{1, 3}, 李邵军³

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110006; 2. 沈阳工业大学 建筑工程学院, 辽宁 沈阳 110023;
3. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘 要: 进行了在化学腐蚀下的花岗岩单轴压缩破裂试验, 利用数字显微观测系统对其实时观测。探讨了不同浓度、不同 pH 值和不同化学溶液对花岗岩表面的腐蚀以及力学特性的影响, 分析了在化学腐蚀下花岗岩的破裂行为, 给出了荷载-位移变化曲线和对应的显微图像以及各种试件的破裂特征示意图。

关 键 词: 岩石; 化学腐蚀; 破裂特征; 显微图像

中图分类号: TU 458 **文献标识码:** A

The fracturing behaviors of Three Gorges granite under chemical erosion

CHEN Si-li^{1, 2}, FENG Xia-ting^{1, 3}, LI Shao-jun³

(1. Institute of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110006, China; 2. Department of Civil Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110023, China; 3. Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics, Institute of Rock and Soil Mechanics, China Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: An experiment of rock fracturing process is conducted under uniaxial compression in order to investigate the behaviors of rock fracturing under chemical erosion. The meso-fracturing process of rock is real-time observed using the microscope and the digital color camera. The effects of rock surfaces and mechanical behaviors are studied under different ionic strengths, values of pH and chemical solutions. The fracturing behaviors of rock under chemical erosion are analyzed. The load-displacement curves, the corresponding micro-images and the schematic diagrams of specimens after failure are obtained.

Key words: rock; chemical erosion; fracturing behaviors; micro-images

1 前 言

影响岩石破坏的因素很多, 其周围环境的影响是其中重要因素之一。由于岩石处在各种复杂的工程环境中, 不同的环境条件对其影响是不同的。在各种环境条件中, 特别是水中含不同酸碱性的化学溶液对岩石的腐蚀作用更大, 因为, 各种化学溶液对岩石产生的腐蚀作用, 将改变岩石的微细观结构, 使其宏观力学特性发生变化。岩石处在空气中, 或遭受水和不同化学溶液等环境的腐蚀作用, 并使其力学性能改变的现象称为化学腐蚀。在坝基、边坡、隧道等众多与水相关的岩石工程中, 研究岩石在化学腐蚀下的破裂机理是至关重要的, 已引起科学工作者的重视。例如, 湿润条件下的破坏韧性值比干

燥条件下的要低, 裂纹扩展速度加快^[1]; 文献[2]通过试验研究了 HCl 和 NaOH 溶液对石英的裂隙扩展速率、应力强度因子和应力强度系数的影响; 文献[3]探讨了水对花岗岩时效变形的影响; 文献[4]分析了环境对断裂韧性的影响, 另外, 一些研究者对含水岩石的强度^[5, 6]进行了实验研究, 但是, 上述文献几乎尚未涉及到化学腐蚀过程中的岩石细观破裂机理及内部损伤动态演化过程的研究。文献[7, 8]进行了化学腐蚀下的花岗岩破裂过程的双抗扭声发射试验。因此, 需要就此进行深入而系统地研究。

国内外众多的大型岩石工程(如正在建设中的三峡水利工程等)都正在并将长期经受水化学的腐蚀作用, 由于这种腐蚀作用的影响, 岩石工程的各种变形和稳定性特征就更为特殊和复杂。因此, 分

收稿日期: 2002-04-09

基金项目: 国家自然科学基金(No. 10072073), 教育部高等学校优秀青年教师与科研奖励计划和霍英东教育基金资助项目(No. 71048)

作者简介: 陈四利, 男, 1959 年生, 博士, 副教授, 主要从事建筑工程和岩石力学与工程方面的研究与教学工作。

析岩石在化学腐蚀作用下的损伤机理,为更准确地评估和计算坝基、边坡、隧道等众多与水相关的岩石工程的安全性和稳定性提供有效的技术参数,具有重要的工程意义。为了说明化学腐蚀对岩石力学特性的影响,本文着重探讨了各种环境(水、不同化学溶液、不同浓度及不同 pH 值等)对三峡花岗岩的腐蚀以及试件的破裂特征,分析了其破裂机理,得到了荷载-位移曲线以及相对应的岩石细观破裂过程的显微图像。有关各种环境的化学腐蚀对岩石力学特性的影响参见文献[9~11],而岩石内部损伤演化的定量分析以及岩石破裂过程的数值模拟等将另文专述。

2 材料与方法

2.1 岩石试件

岩样为采自长江三峡水利枢纽工程永久船闸处角闪斜长花岗岩。该岩石主要由斜长石、石英及角闪石组成。斜长石呈半自形板柱状,均有绢云母化及绿帘石化。石英呈它形粒状,角闪石呈半自形柱状。颗粒之间比较平直或弯曲状紧密镶嵌。其主要矿物成分含量为:斜长石 65 %, 石英 20 %, 角闪石 8 %~9 %及钾长石≤5 %,还有少量的绢云母、绿帘石、磷灰石、榍石及磁铁矿等。其显微结构图像如图 1 所示。

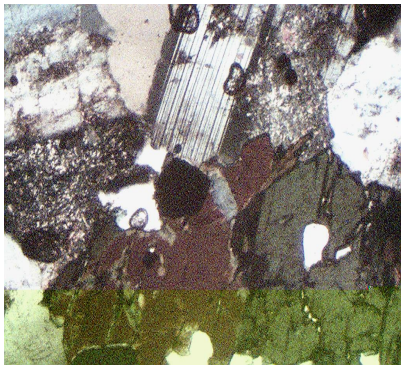


图 1 花岗岩显微结构图
Fig. 1 Micro-image of structure of granite

岩样是在同一均匀的岩芯上经过细心切磨,制成了 30 mm×15 mm×3 mm 的矩形板,试件中间有 1 个 φ3 mm 的圆孔。

2.2 化学溶液的配制

根据三峡库区水质量的实际情况,同时,为了分析和探讨不同化学溶液、不同浓度及不同 pH 值对花岗岩特性的影响,配制了如下溶液。

表 1 化学溶液的配制					
Table 1 Preparation of chemical solution					
溶液	浓度 /mol·L ⁻¹	pH 值			
NaCl	0.01	2	7	9	12
	1.0			9	
	3.0			9	
CaCl ₂	0.01	2	7	9	12
	1.0			9	
	3.0			9	
NaHCO ₃	0.01	2	7	9	12
	1.0			9	

2.3 试验方法

(1) 试件的制备 为了研究不同化学溶液、不同浓度以及不同 pH 值的作用导致花岗岩力学特性的差异性,将加工的试件进行抽真空及干燥处理后,分别浸泡在上述的各种化学溶液、蒸馏水(pH = 7)和取自长江三峡坝区水(pH = 7.6)中,试件均浸泡 120 d。

(2) 加载 试验是在中科院武汉岩土力学所研制的岩石细观加载仪^[12]上进行的。岩石试件是被固定在 2 个刚性压头之间进行单轴压缩试验。为了模拟岩石现场的环境,在已有加载装置上又设计了一个盛水槽,使试件在整个试验过程中均可浸没在水槽中。加载时,其荷载和压缩量均由数字在监视器上显示,其试件加载方式如图 2 所示。

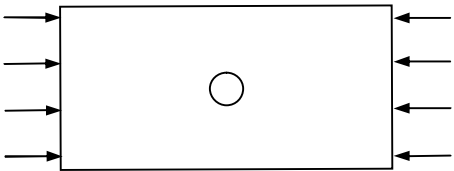


图 2 加载方向
Fig. 2 Direction of loading

(3) 观测与记录 利用裂纹扩展过程的数字视频观测系统,对试件的上表面的裂纹扩展过程进行局部显微图像监测,另外,对显微观测的表面以及与其相垂直表面的裂纹扩展全过程进行全场监测。试验时,多方位的摄像信号通过视频分配器将图像传送给不同的监视器,这样,试件在荷载作用下的表面变化情况均可由监视器来观察,同时,对裂纹扩展过程的图像可进行计算机实时采集,而且,由摄像机全程摄下多方位的试验过程,保证试件局部显微图像和 2 个表面的动态扩展全过程可以全部观测与记录下来。

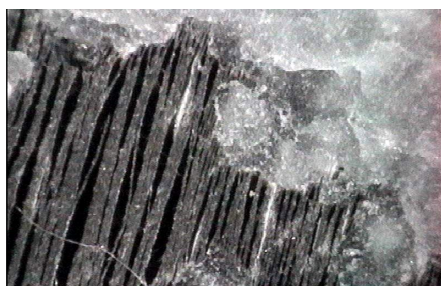
3 试验结果与分析

3.1 化学腐蚀后的表面特征

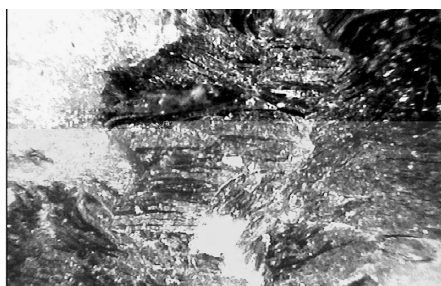
岩石经受各种环境的化学腐蚀后,其表面留下了不同程度的腐蚀痕迹。通过显微镜观测可知,不同的岩石矿物其腐蚀程度是不同的,腐蚀较为严重的深色矿物(如角闪石和绿帘石等),其试件表面出现了凹凸不平的微小浅坑或有细小裂纹,由图3可看出,在(放大50倍),在0.01 mol/L CaCl_2 , pH = 2; 1.0 mol/L NaHCO_3 , pH = 9 和 3.0 mol/L NaCl , pH = 9 的几种溶液中试样表面均有不同程度的化学腐蚀。



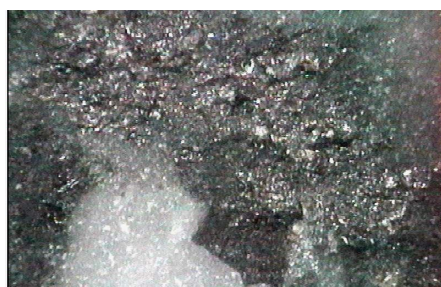
(a) 长江水



(b) 0.01 mol/L CaCl_2 , pH = 2



(c) 1.0 mol/L NaHCO_3 , pH = 9



(d) 3.0 mol/L NaCl , pH = 9

图3 在化学腐蚀下的试件表面损伤显微镜

Fig. 3 Photomicrographs of specimen's surface damage under chemical erosion

3.2 岩石破坏特征与方式

单轴压缩条件下,岩石试件在各种环境中的破坏特征与方式基本上是相同的,本文观测到的裂纹起裂及扩展方向几乎与荷载方向平行或成很小的夹角。裂纹起裂并开始扩展时,属于张开型的,并没有明显的剪切现象,而且,主裂纹的扩展几乎没有产生明显的分叉现象,试件最后出现宏观上断裂破坏。图4为各种试件即将破碎时试件表面裂纹的示意图。

3.3 岩石破裂的全过程

岩石破裂的实质是岩石在受力过程中微裂纹的萌生、扩展直至裂纹连通的结果,是岩石微细观结构变形破坏的积累的宏观反映。因此,如何观测和记录岩石的破裂过程,具有重要的意义。本文利用所设计的数字视频观测试验系统观测和记录到了试件破裂的全过程,仅以 pH = 9,浓度为 1.0 mol/L 的 CaCl_2 溶液为例,当荷载缓慢增加并达到 1.8 kN 时,试件的变形量突然加大(并停止加载),此时,在孔边出现微小裂纹,而荷载也随着降低;当荷载和压缩量趋于稳定后,继续加载,当荷载达到峰值 2.5 kN 后(停止加载),裂纹快速扩展并贯通,形成主要裂纹,试件以非常快的速度破碎。荷载与位移量的曲线以及对应的试件破裂全过程的即时显微图片如图5所示。

3.4 岩石破裂机理的初步分析

岩石在各种化学溶液的腐蚀下,其矿物成分与各种溶液发生了各种如溶解作用、水解作用和碳酸化作用等化学作用,并导致岩石的强度等力学特性不同程度的改变,而这种体现在宏观上的改变是与其微细观结构的改变紧密相关的。由于岩石是一种特殊的复杂固体介质,是由颗粒或晶体相互胶结在一起的集合体,岩石内部特别是颗粒或晶体之间存在着大量的初始微裂纹和缺陷,这样,化学溶液在岩石的空隙中渗透并与矿物颗粒或晶体发生不同的化学反应,使岩石遭受损伤破坏。而且,岩石中有很多矿物也能溶解于水,如 K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 等氯化物和碳酸盐以及 Fe^{3+} , Al^{3+} 等氧化物和硅酸盐,因此,岩石受到化学作用后,易溶的矿物随水流失,而难溶矿物则残留原地,同时,岩石中孔隙增加,岩石变得松散脆弱。由于试验配制的化学溶液有酸性($\text{pH} \leq 7$),碱性($\text{pH} > 7$)和中性($\text{pH} = 7$),使各种造岩矿物与水中的 H^+ 和 OH^- 离子发生化学反应,如矿物中的 K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 等阳离子很容易与溶液中的 OH^- 离子结合,使原矿物被分解破坏并形成一些新矿物,例如,钾长石和钠长石,

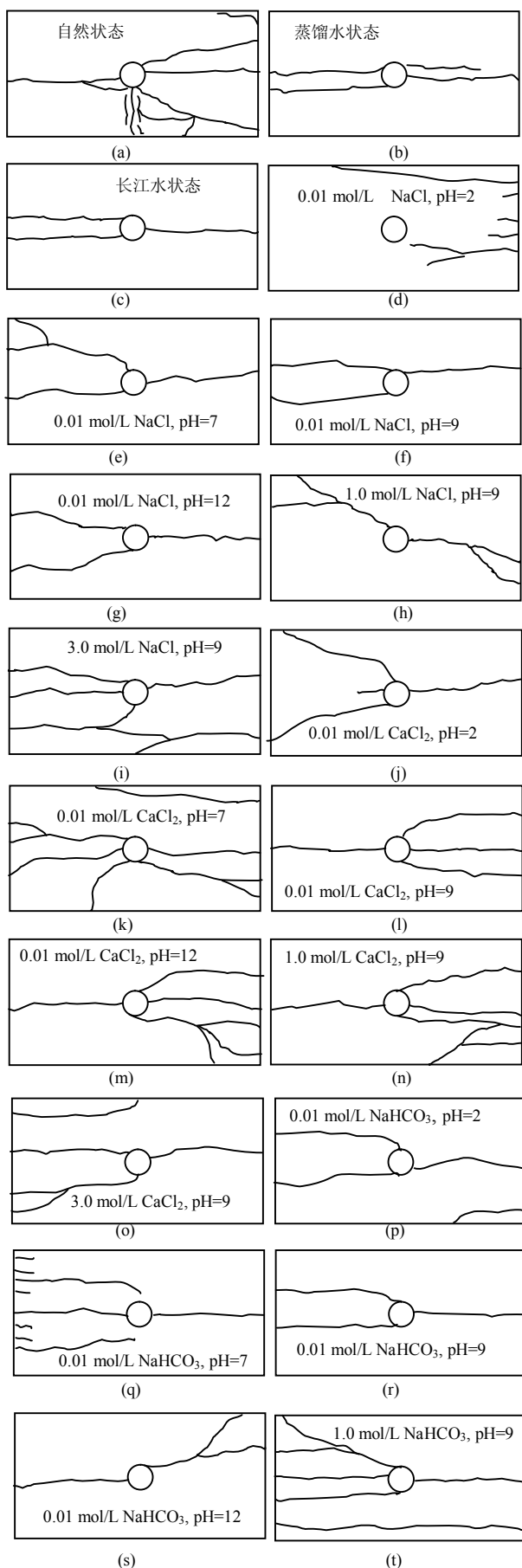
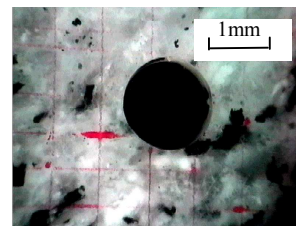
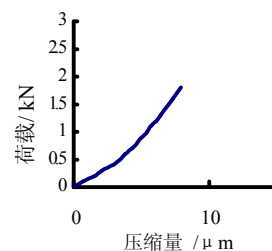


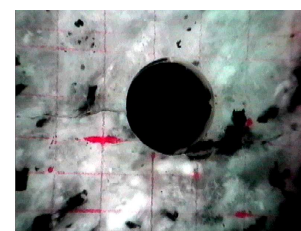
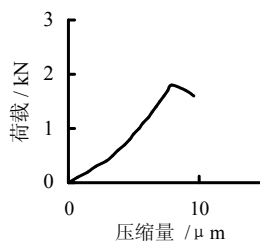
图 4 试件破裂示意图

Fig. 4 Schematic diagrams of cracks for granite specimens

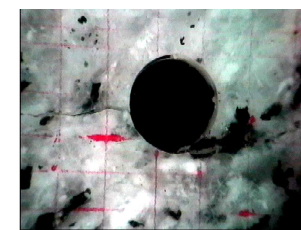
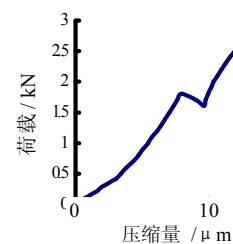
在水解作用下, 将分别形成随水流失的 KOH (K^+ 与 OH^- 结合) 和 NaOH (Na^+ 与 OH^- 结合) 溶液以及 SiO_2 胶体和残留原地的高岭石。如此的化学作用, 不仅破坏了岩石颗粒或晶体间的连接, 而且破坏了颗粒或晶体。从图 3 可以明显地看出岩石受化学环境腐蚀后的损伤痕迹。这样, 岩石的内聚力和内摩擦角等强度指标发生变化, 致使岩石在宏观上表现出程度不同的强度降低。



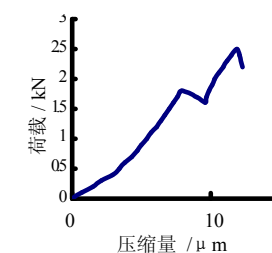
(a)



(b)



(c)



(d)

图 5 试件破裂过程的显微图像

Fig. 5 Photomicrographs of meso-fracturing process for granite specimen

4 结 语

通过本文的试验分析可知, 化学腐蚀是影响岩石力学特性不可忽视的重要因素之一, 相关的结论如下:

(1) 岩石经受各种环境的化学腐蚀后, 通过显微镜观测可知, 不同的岩石矿物其腐蚀程度是不同的, 其表面出现了凹凸不平的微小浅坑或细小裂纹, 这表明, 不同的化学腐蚀其表面产生了不同程度的腐蚀痕迹。

(2) 试件在单轴压缩条件下, 均属脆性断裂破坏类型, 其各种环境下的破坏特征与方式基本是相同的, 本文观测到的裂纹起裂及扩展方向与荷载方向平行或成很小的夹角。裂纹起裂并开始扩展时, 属于张开型的, 并没有明显的剪切现象, 而且, 主裂纹的扩展几乎没有产生明显的分叉现象, 试件最后出现为宏观的断裂破坏。

(3) 不同浓度、不同 pH 值及不同化学溶液的腐蚀对三峡花岗岩力学特性的影响是明显的, 化学腐蚀这个外在因素, 致使岩石力学特性发生了改变, 而岩石的成因、结构、微小裂隙、吸水性、胶结物的性质、矿物成分及均匀性等物理性质的差异, 也是促使岩石破裂的内在因素。有关岩石内部损伤演化过程的定量分析以及岩石破裂过程的数值模拟等将另文专述。

参 考 文 献

- [1] Dunning J, Douglas B, Miller M, McDonald S. The role of the chemical environment in frictional deformation: stress corrosion cracking and comminution[J]. *Pageoph*, 1994, 143(1, 2, 3): 151—178.
- [2] Atkinson B K, Meredith P G. Stress corrosion cracking of quartz: a note on the influence of chemical environment [J]. *Tectonophysics*, 1981, 77: 1—11.
- [3] Lajtai E Z, Schmidtke R H, Bielus L P. The effect of water on the time-dependent deformation and fracture of water a granite[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. Abstr, 1987, 24(4): 247—255.
- [4] Karfakis MG, Askram M. Effects of chemical solutions on rock fracturing[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. Abstr. 1993, 37(7): 1 253—1 259.
- [5] 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.
- [6] 孙钧, 胡玉银. 三峡工程饱水花岗岩抗拉强度时效特性研究[J]. *同济大学学报*, 1997, 25 (2): 127—134.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Xia-ting Feng, Si-li Chen, Shao-jun Li. Effects of water chemistry on micro-cracking and compressive strength of granite[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2001, 38(4): 557—568.
- [11] 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.
- [12] 葛修润, 李延芥, 张梅英, 等. 适用于岩石力学细观实验研究的加载仪[J]. *岩土力学*, 2000, 21(3): 289—293.

香港大学李焯芬副校长受聘武汉岩土力学研究所名誉教授

2003年7月8日, 武汉岩土力学研究所聘请香港大学副校长李焯芬为名誉教授仪式及学术报告会在武汉岩土力学研究所三楼会议室举行。会议由武汉岩土力学研究所副所长(主持工作)冯夏庭教授主持。聘任仪式上, 冯夏庭教授对李教授的简历(包括香港大学副校长、国际岩石力学学会会场地选择中构造稳定性委员会主席等)及获得的成就(在岩石力学、环境岩土工程、土力学、地质灾害防治、基础工程、计算力学等方面发表了150篇学术论文, 其中72篇杂志论文、5Keynote lectures、15个特邀报告等)做了详尽的介绍, 并向李焯芬教授颁发了聘书。