

单裂隙花岗岩在应力 - 渗流 - 化学耦合作用下的 试验研究

申林方, 冯夏庭, 潘鹏志, 周 辉

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要: 通过开展单裂隙花岗岩在恒定三轴应力及化学溶液渗透压作用下的试验, 对单裂隙岩石在应力 - 渗流 - 化学耦合环境下的综合响应机制进行研究。结果表明, 单裂隙花岗岩在同时承受三轴压缩荷载及渗透压作用时, 其侧向蠕变变形一直以稳定速率增加, 显示水对裂隙面的物理软化效果, 不同于完整岩石的扩容机制; 应力作用下渗流溶液与裂隙表面矿物发生明显的溶解反应, 其中反映硅铝酸岩矿物溶解的 Al^{3+} 及 SiO_2 浓度随时间递增, 硅铝摩尔浓度比下降。扫描电镜下观察到长石、石英表面溶蚀孔洞及云母溶解后的不完整解理; 随着裂隙接触面上水岩相互作用, 水力开度发生变化。酸性溶液渗流情况下的水力开度降低, 直至稳定; 而蒸馏水渗流情况下的水力开度先增加直至稳定。造成此种不同变化规律是水岩化学反应及水力通道贯通两种因素的相互竞争的结果。对裂隙表面三维激光扫描表明, 反应后裂隙面的 JRC 明显降低, 表面趋于平缓化, 表明应力作用下的溶解反应优先发展于矿物颗粒接触面。

关键词: 岩石力学; 应力 - 渗流 - 化学耦合; 单裂隙面; 花岗岩

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2010)07 - 1379 - 10

EXPERIMENTAL RESEARCH ON MECHANO-HYDRO-CHEMICAL COUPLING OF GRANITE WITH SINGLE FRACTURE

SHEN Linfang, FENG Xiating, PAN Pengzhi, ZHOU Hui

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: Experiments of granite with single fracture under constant triaxial stress and chemical solution seepage are conducted, and the response mechanisms of single fracture rock to mechano-hydro-chemical coupled condition are studied. Experimental results show that when triaxial stress and hydraulic stress are applied to the fracture spontaneously, the lateral creep deformation always increases at a constant rate. These phenomena indicate the softening effect is induced by water, which is different from the volume expansion of intact rock. Obvious dissolution between fracture surface mineral and permeant is observed, for that concentrations of Al^{3+} and SiO_2 of outlet solution increase with time. Meanwhile, according to the SEM graphs, distinct etch holes can be found at feldspar and quartz surface, and muscovite leaves uncompleted cleavage. Aperture changes with the development of water-rock interaction. Under the acid solution seepage, aperture decreases and then becomes stable. While as for distilled water seepage, aperture increases firstly, and then keeps stable. The cause for such difference is the effect competition between chemical reaction and cutting through of permeability channels. Tests of 3D laser scan of fracture surfaces denote that JRC of after-test fracture are smaller than those before test, and

收稿日期: 2010 - 02 - 04; **修回日期:** 2010 - 04 - 26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10872209); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2010CB732006)

作者简介: 申林方(1982 -), 女, 2004年毕业于昆明理工大学土木工程系道路与桥梁专业, 现为博士研究生, 主要从事岩石应力 - 渗流 - 化学耦合方面的研究工作。E-mail: shenlinfang@gmail.com

surfaces become smooth. Such results show the preferential dissolution occurs at mineral interface.

Key words: rock mechanics; mechano-hydro-chemical coupling; single fracture; granite

1 引言

岩体中的节理裂隙在地应力的作用下承受着挤压、剪切等变形, 裂隙面成为应力释放或集中的关键部位, 其性质往往控制着整个岩石结构体的力学稳定性。另一方面, 相对于低渗透性完整岩石本身, 岩体中的裂隙网络通常主导着地下水的运移方向, 是渗流场的主要研究对象。同时, 受控于矿物溶解的表面反应机制, 节理裂隙形成的水岩自由接触面也是地球化学反应的主要发生场所。因此, 裂隙的存在极大的影响了地下岩体力学场的平衡、地下水在渗流场中的运移及地球化学反应的进行。鉴于裂隙面赋存环境的多样性, 对裂隙面在多场耦合作用下演化机制的研究具有重要的基础意义。

X. T. Feng 等^[1~3]开展了化学溶液和单轴压缩作用下预制多裂纹灰岩变形破裂过程的细观力学试验, 及不同化学溶液作用下预制多裂纹的标准砂岩试件破裂试验。研究了化学溶液作用下裂纹扩展长度、宽度变化及裂纹搭接破坏模式的规律。然而目前还没有开展裂纹在长期荷载及化学溶液作用下的特性研究。

对于恒定荷载下岩石的长期变形行为研究, 即蠕变研究已积累了丰富的成果, 但是在蠕变的同时考虑化学因素的影响则相对较少。乔丽苹^[4]开展了不同化学溶液浸泡后的砂岩蠕变试验。崔强^[5]开展了化学溶液流动过程中砂岩的单轴蠕变试验。目前还没有开展化学溶液渗流同时进行的蠕变试验。

已有研究表明, 力学作用会使裂隙面产生压密或是滑移, 由此引起渗透性的变化^[6~9]。同时, 化学反应会使裂隙表面物质发生溶解或沉淀, 将引起渗流通道的改变^[10]。而当外力及渗流同时作用于裂隙面上时, 其渗透性质的变化受到力学作用及化学反应共同控制。但是, 这种综合效应的影响不等同于单个因素分别作用的代数累加, 因为力学与化学这两者之间又存在相互影响。应力作用下的溶解通常称为压溶。压溶会引起矿物在高应力区的溶解及低应力区的沉淀。由此将影响裂隙实际接触面积的变化, 进而改变应力分布及水力开度^[11~13]。然而,

对于裂隙面在同时承受恒定外荷载、渗透压以及化学溶液作用下的各类物理力学性质变化的认识还是不全面的, 并且还没有开展对裂隙面在上述耦合环境下宏观变形性质的研究。另外, 由于通常认为花岗岩具有稳定的化学性质, 因此, 针对于花岗岩力学-化学耦合的研究甚少开展。本文将通过开展单裂隙花岗岩在恒定三轴荷载和恒定化学溶液渗透作用下的试验研究, 分析应力作用下水岩化学反应的特性, 裂隙面上矿物的溶解对水力传导性质的影响及含裂隙面岩体在渗流以及化学反应作用下的蠕变变形特征。通过试验研究以期系统了解耦合环境中岩石及其裂隙面各项性质的改变, 初步揭示其相互作用机制。

2 试验方法

2.1 试样的制备

试验岩样选用我国核废料处置库候选场甘肃北山花岗岩。通过 X 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%)。天然密度为 2.6 g/cm^3 , 孔隙率为 0.63%~0.95%。首先将岩块加工成直径 37.5 mm, 高度 75 mm 的圆柱形试件。通过改良的巴西劈裂法产生一条平行于轴线方向, 贯穿整个试样的人工粗糙裂隙面(见图 1)。

2.2 渗流溶液的配制

该花岗岩的主要矿物成分为长石, 长石类硅酸盐矿物在酸性环境下溶解更为显著。因此, 为了在有限的试验时间内观测到化学反应的进行情况, 并结合北山实际地下水的主要阴阳离子成分^[14], 本试



(a) 完整圆柱形试样



(b) 劈裂后试样



(c) 合拢后试样

图 1 岩样制备

Fig.1 Rock specimen preparation

验配制的渗流溶液为 2L, 0.01 mol/L 的 Na₂SO₄, 并用盐酸调配至 pH = 2。同时, 为了对比上述酸性条件下水岩化学反应对裂隙面的影响程度, 还进行了相同荷载环境下蒸馏水渗流的试验。以酸性溶液作为渗流流体的耦合试验平行开展了 2 个试样的试验, 蒸馏水渗流对比试验进行了一个试样。

2.3 试验设备

试验在由中国科学院武汉岩土力学研究所与法国里尔科技大学合作研制开发的岩石三轴流变仪上进行。该设备在传统流变仪的基础上加入了三轴室温度控制系统及水压加载系统。全部渗流管路为不锈钢制作, 以避免渗流溶液的腐蚀作用。轴向位移及侧向位移分别采用 LVDT 和应变片测量。试验过程中压力, 位移及温度等数据全部由系统自动采集。

图 2 为该流变仪三轴室示意图。

2.4 试验过程

将劈开的岩样合拢后放入特制的橡胶套中包裹好, 再将其安装在三轴室内, 接上位移传感器。合上三轴室, 将围压室充满油。本试验不考虑温度的影响, 因此将三轴室的温度设定为常温 25 °C, 在试验过程中保持恒定。待温度稳定后, 将围压加至 10 MPa, 偏压(即轴压减去围压值)150 MPa, 渗透压 1 MPa, 压力稳定即可。为了对比渗流作用对单裂

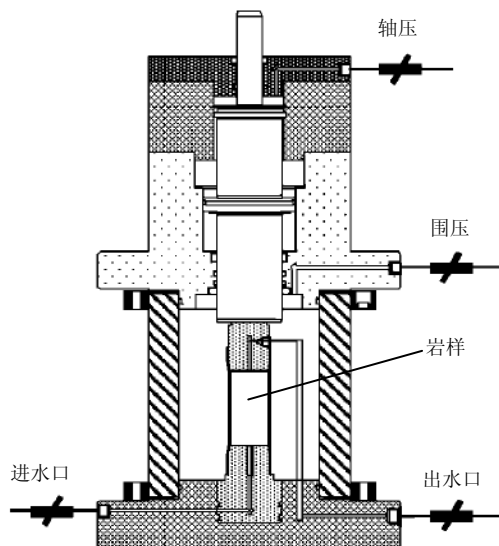


图 2 流变仪三轴室示意图

Fig.2 Sketch of the triaxial core of creep apparatus

隙面岩样变形的影响, 还进行了完整无渗流岩样及干燥无渗流单裂隙面岩样的蠕变试验。表 1 为 3 种工况的试验条件。

表 1 3 种工况的试验条件

Table 1 Three test conditions

试件编号	围压 /MPa	偏压 /MPa	水压 /MPa	渗流溶液	温度 /°C	持续时间 /h
css1	10	150	1	Na ₂ SO ₄	25	3 528
css4	10	150	1	Na ₂ SO ₄	25	1 800
csw1	10	150	1	蒸馏水	25	2 184
csd1	9	150	0	单裂隙无渗流	25	780

注: Na₂SO₄ 溶液的 pH 值均为 2.01mol/L。

详细试验步骤及非系统自动采集的数据收集情况如下:

(1) 蠕变荷载的确定

根据北山地区地应力调查的结果, 其平均水平应力为 10 MPa 左右, 因此将围压确定为 10 MPa。为了确定流变荷载的大小, 在开始耦合试验之前, 对该岩样进行了 10 MPa 围压下的常规三轴试验。结果显示其峰值强度在 250 MPa 附近。为达到发生蠕变变形的荷载水平, 取其峰值强度的 60%, 即 150 MPa 作为本试验的偏应力大小。三轴荷载在整个试验过程中保持不变。

(2) 渗流

本试验系统的溶液渗流方向为从底部向顶部渗透。出口的渗流溶液直接返回水罐中，因此，化学溶液为循环流动经过岩石试件。为了使不易发生化学反应的花岗岩能够在有限的时间内产生较为明显的变化，一方面需要保证溶液与矿物有足够多的接触时间，即渗透速度不能过快，另一方面还需确保渗流的流速在可测量的范围之内。经过多次尝试，将渗透压确定为 1 MPa 较为理想。试验过程中流速的测量方法为称重法，即称量一定时间间隔所流出的水的质量，将其换算成流速。

每隔一段时间收集一小瓶渗流出口水样进行 Al^{3+} 及 SiO_2 的浓度检测。检测设备为多参数水质分析仪。

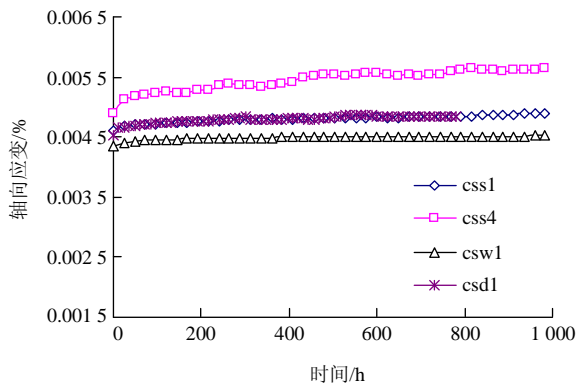
(3) 裂隙表面测试

为了观察到裂隙面在试验前后粗糙程度及矿物形貌的变化情况，裂隙表面测试包括表面三维激光形貌测试及 SEM。表面三维形貌在岩样劈裂之后试验开始之前进行一次，在试验结束后进行一次。而由于 SEM 检测需要破坏裂隙面，所以不可能对同一裂隙面进行试验前后的检测，因此试验之前的测试选用同一岩块上的其他岩样代替，试验之后的测试在做完三维激光形貌扫描后再进行。

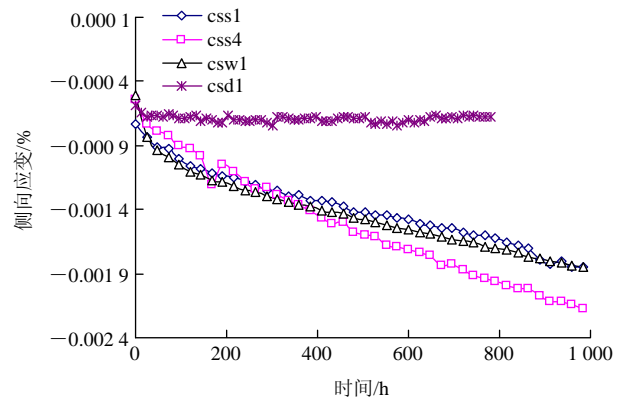
3 试验结果及分析

3.1 单裂隙花岗岩在渗流 - 化学反应作用下的三轴蠕变变形特征

图 3 为轴向应变及侧向应变随时间的变化曲线(由于后期试验曲线变化稳定，因此以前 1 000 h 的情况作为对比)。轴向变形在荷载到达稳定值后，历经较短的一个初始蠕变阶段后，变形速率降低直至进入稳定阶段。



(a) 轴向应变



(b) 侧向应变

图 3 应变随时间的变化曲线

Fig.3 Strain variation curves

从图 3(b)中可知，有无渗流作用时存在明显区别。无渗流岩样的侧向变形基本处于稳定状态，波动范围不大，而有渗流岩样的侧向应变则随时间的推移一直以稳定的速率发展下去，变形没有停止的迹象。这种现象表明了渗透压作用对裂隙面侧向变形的巨大影响。同时，可以发现，以蒸馏水为渗流溶液的变形曲线与以酸性硫酸钠为渗流溶液的变形曲线相差不大，表明裂隙面上的化学反应对岩样整体变形行为影响不大。

从图 3 可知，无论是单裂隙面渗流情况还是无渗流情况的曲线，其轴向应变很快进入稳定蠕变阶段，渗流情况下的侧向变形却一直增长。从岩石力学的角度分析，侧向变形的增长表明体积发生了扩容。扩容通常理解为岩石内部微裂纹的发展及损伤程度的加剧。当扩容接近一定值后，岩石将发生破坏。而本文试验中，尽管侧向变形一直增长，裂隙岩样并没有表现出即将破坏失稳的趋势。同时，无渗流的单裂隙岩样在相同应力状态下的侧向应变没有不断增长，即没有发生扩容的趋势。由此表明，岩石本身并没有产生引起扩容的微裂纹，而是渗流作用导致了侧向变形的差异性。也说明单裂隙面渗流情况下的侧向变形增长与岩石扩容的机制是不同的。

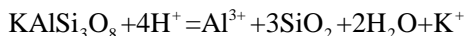
相关资料表明，水对岩石流变性能的影响是非常显著的，例如孙 钧等^[15~17]进行的完整岩石试样在饱水情况下岩石的流变实验，均发现有水的情况下，岩石的流变速率显著增加，含水量对岩石的极限蠕变变形量的影响极为显著，干燥试样和饱和试样两者可以相差 5~6 倍；含水量还将影响岩石达到稳定蠕变阶段的时间，饱和试样进入稳定蠕变阶段的时间要比干燥试样长得多。

对于本文的裂隙花岗岩试样, 施加渗透压后, 水进入到裂隙面, 对裂隙周边岩石基质产生了物理软化作用。水对裂隙面周围基质的软化作用使得在裂隙面法向方向的力学性质产生弱化, 进而使侧向流变形明显增大。这是由于裂隙的存在, 使得水对裂隙花岗岩流变变形的影响具有各向异性的性质, 即水对轴向流变变形的影响较小或者不明显, 而对侧向流变变形的影响较明显。裂隙的存在使得水几乎从裂隙面经过, 裂隙面周围以外的基质仍然是干燥的, 不受水的影响, 因此在轴向方向的流变变形受水的影响较小。如果没有裂隙的存在, 相对于干燥花岗岩, 饱水花岗岩的轴向变形和侧向变形均会比较大, 即水对完整花岗岩流变变形的影响将是各向同性的。

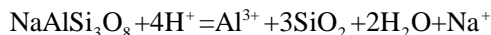
3.2 恒定荷载作用下花岗岩中主要造岩矿物的溶解

通常硅酸盐矿物与酸的反应^[18]可以写成: 硅酸盐矿物+nH⁺→硅±铝+阳离子。由此, 根据北山花岗岩的主要矿物组成, 酸性条件下, 花岗岩中主要矿物长石和石英的溶解反应可写为:

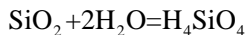
(1) 钾长石:



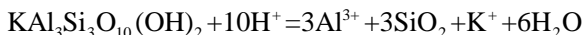
(2) 钠长石:



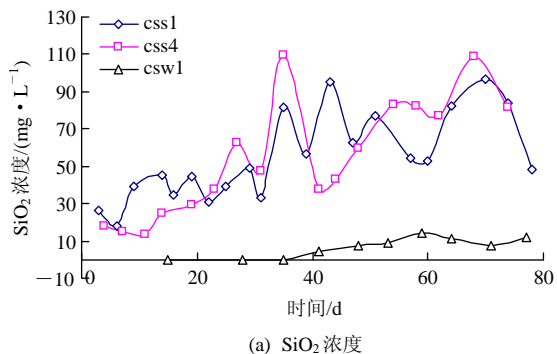
(3) 石英:



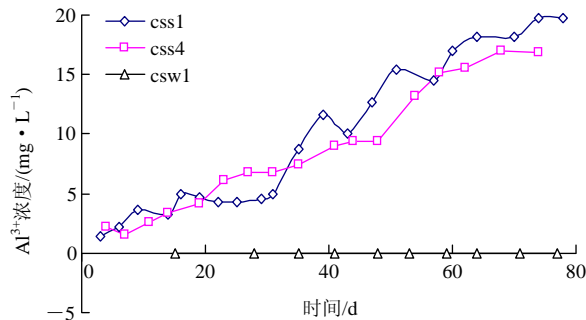
(4) 云母:



通过检测渗流出口水样 Al³⁺ 及 SiO₂ 的浓度可以反映其中矿物的溶解, 见图 4。随着时间的增长, SiO₂ 和 Al³⁺ 的浓度均表现为上升的趋势, 表明了其中硅铝酸盐矿物的溶解。相对于酸性溶液, 蒸馏水渗流溶液在试验开始较长一段时间后才检测到 SiO₂, 但是一直没有发现 Al³⁺ 的存在, 说明石英的溶解为主要化学反应, 长石基本没有发生溶解。



(a) SiO₂ 浓度



(b) Al³⁺ 浓度

图 4 渗流溶液中离子浓度随时间的变化

Fig.4 Concentration variation of particles of outlet fluid

图 5 为酸性溶液作用下渗流溶液中硅铝摩尔浓度比。其比值随时间的变化呈现下降趋势。根据长石的化学式 KAlSi₃O₈, 其中硅铝的原子比为 3 : 1。若发生全等溶解, 水溶液中的硅铝比也应该为 3 : 1。而石英的溶解能够增加溶液中 SiO₂ 的含量。因此, 前期曲线中硅铝的比值大于 3 : 1。随着反应的进行, 硅铝比值经过 3 之后继续下降。云母的化学式为 KA₃Si₃O₁₀(OH)₂, 硅铝的原子比为 1 : 1。表明此时云母也参与了反应。由此增加了溶液中铝离子的含量。因此随着试验的进行, 渗流溶液的硅铝比减小。

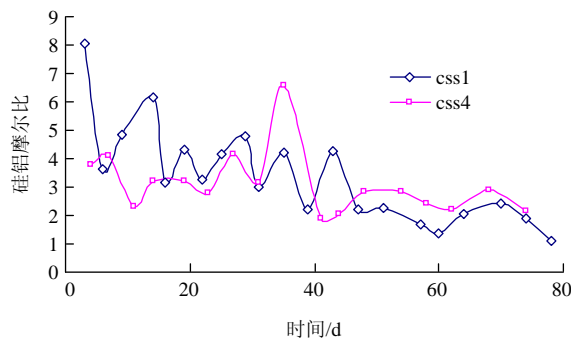


图 5 渗流溶液中硅铝摩尔比随时间的变化

Fig.5 Molar quantity ratio of Si to Al of outlet fluid

为了以更直观的方式验证矿物溶解反应的进行情况, 并观察试验后裂隙面上矿物的形貌变化, 分别对未做试验的岩样及经酸性溶液渗流后的试验岩样裂隙面上矿物进行扫描电镜检测(SEM)。观察可得, 未经历试验的岩样其整体形貌非常致密, 无空洞, 矿物解理形状清晰, 棱角分明, 断口特征明显, 没有风化溶蚀等迹象。经历酸性溶液渗流后的裂隙面上矿物既存在未变化的区域, 也存在变化明显的区域。溶解明显的区域能够看到矿物表面密集的溶蚀孔洞以及由于溶解作用留下的矿物不完整解理。

图 6 为代表性扫描电镜结果图片。图 6(a)~(d)为未经试验的对比岩样(图中称其为新鲜岩样), 图 6(e)~(f)为经历酸性溶液渗流试验后岩样裂隙面上的形貌(图中称为试验岩样)。综合考虑渗流溶液中的硅铝浓度演化及扫描电镜下矿物形貌的变化, 表明, 通常认为在常温下极其稳定的长石、石英及云母发生了明显的溶解现象。

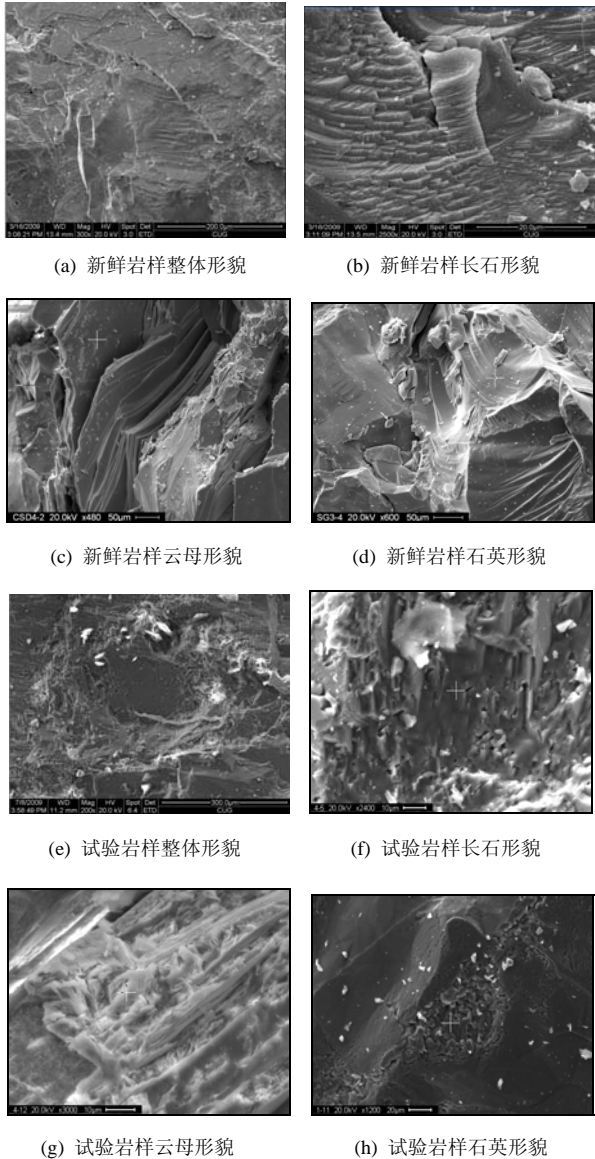


图 6 新鲜岩样与试验后裂隙面表面矿物形貌对比
Fig.6 Mineral surface structure comparison between fresh rock sample and after-test specimen surface

3.3 应力 - 化学耦合环境下裂隙面的渗流特性

将称重法测得渗流出口的流量通过立方定律转换为裂隙面的水力开度:

$$Q = b^3 \frac{Wg}{12\nu} \frac{\Delta H}{L} \quad (1)$$

式中: Q 为流量, b 为水力开度, W 为裂隙宽度, g 为重力加速度, ΔH 为水压差, ν 为运动黏度, L 为裂隙长度。其中常数取值分别为: $W = 0.0375 \text{ m}$, $g = 9.8 \text{ m}^2/\text{s}$, $\nu = 0.897 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}(25^\circ \text{C})$, $L = 0.075 \text{ m}$, $\Delta H = 100 \text{ m}$ (即试验渗透压 1 MPa 换算成水柱高度值)。

从水力开度的变化规律来看(见图 7), 其主要特征为: (1) 酸性溶液渗流的裂隙面水力开度变化的总体特征为一直减小。减小趋势由快到慢, 至基本稳定。(2) 蒸馏水渗流的裂隙面水力开度为缓慢增加, 直至基本稳定。造成这 2 种变化方式的主要原因需要和节 3.2 的矿物溶解情况综合考虑。

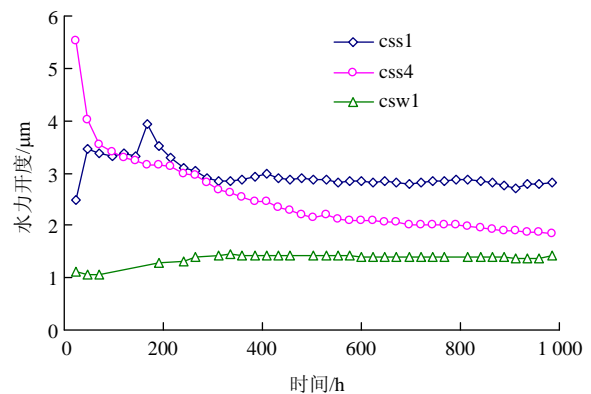


图 7 水力开度变化曲线
Fig.7 Aperture variation curves

图 4 显示, 酸性溶液渗流下, 矿物的溶解反应迅速, 裂隙面上的矿物成分通过流体而被大量携带出来。与此同时, 由于始终处于恒定围压的作用下, 裂隙面上物质的移除使得其被再次压密, 从而导致水力开度减小。随着溶解反应后期速率的减小, 开度变化逐渐趋于稳定。可见, 应力作用下的矿物溶解并没有因为对岩石的腐蚀加剧而增加裂隙的透水性, 这与无应力作用时的溶解是有区别的。相比之下, 蒸馏水对裂隙面矿物的溶解则非常微弱, 尤其在前期, 基本没有溶解反应发生的迹象。因此, 前期水力开度的增加是由于在渗透压作用下裂隙面上渗流通道的持续贯通造成。在此情况下, 溶解作用相对于渗流贯通作用对水力开度的影响而言十分有限。

为了进一步了解应力作用下矿物的溶解对裂隙面形貌的改造及对水力参数的影响, 分别对试验前后的岩样进行了三维表面激光扫描。图 8 为同一岩样同一面在试验前后裂隙表面三维形貌图。从图像

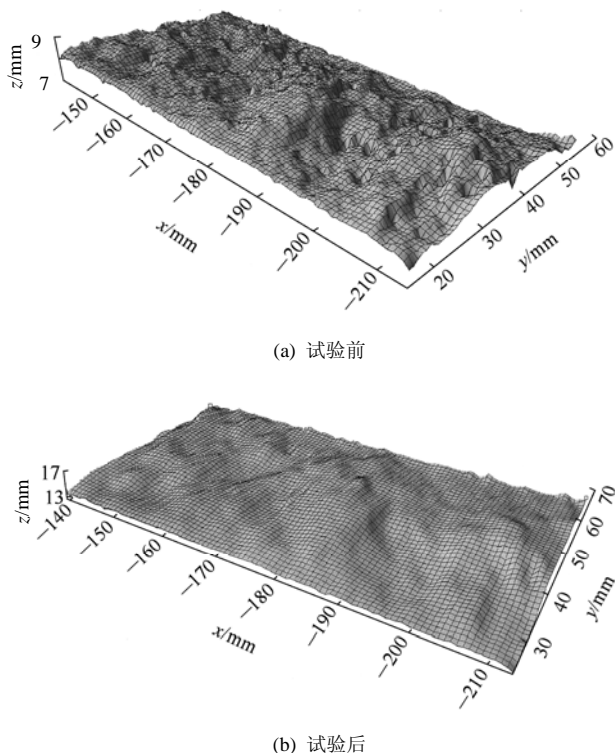


图 8 裂隙表面三维形貌

Fig.8 Oblique view of profiling data of fracture

上可以直观的反映, 试验前表面凹凸不平, 形状粗糙。试验后的裂隙表面高度趋于均匀化, 变得更为平缓。

利用扫描的坐标数据, 进行了在同一网格尺度下裂隙面粗糙度 JRC 的计算, 如图 9 所示, 图中 $css1-1$ 和 $css1-2$ 分别表示同一岩样劈裂成 2 块后所产生的 2 个裂隙面。其他依此类推。整体来看, JRC 在试验后均显著小于试验之前, 减小程度依次为(对应于图 9 中的横坐标编号, 从左向右)42%, 42%, 29%, 30%, 24%和 13%。酸性溶液渗流后的同一试件的 2 个裂隙面, 其粗糙度变化程度相当。

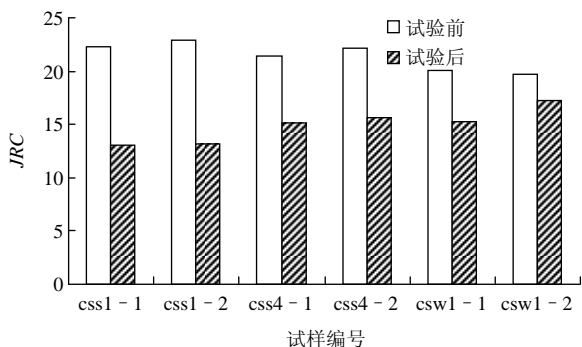


图 9 试验前后裂隙面 JRC 的变化

Fig.9 JRC change for each fracture surface between before test and after test

由于试验持续时间不同, 酸性溶液渗流的 2 个试样变化程度也不同。css1 的持续时间较长, 因此其粗糙度的变化较大。蒸馏水渗流后的两裂隙面变化差异较大。酸性溶液渗流对裂隙面的改造程度明显大于蒸馏水渗流的情况。

综合前述矿物溶解情况, 水力开度及裂隙面几何形貌的变化, 可以初步认识应力作用下单裂隙面的渗流及溶解特征:

(1) 矿物的溶解使得裂隙面粗糙度及水力开度减小, 表明应力作用下溶解反应主要发生于矿物颗粒的接触面上, 而不是流体通道中。溶解反应使得裂隙接触部位的矿物发生质量运移, 削平了表面凸起的部分, 使得粗糙度减小, 接触面积增加, 水力开度减小, 应力作用下接触面溶解模型如图 10 所示。将粗糙的凸起简化为 2 个球形颗粒接触, 应力作用下, 溶解首先从粗糙凸起开始, 随着溶解的进行及溶解物的运移, 球形接触面积增大, 由此还使得裂隙面在法向方向产生了位移, 使得开度闭合了 2Δ 。

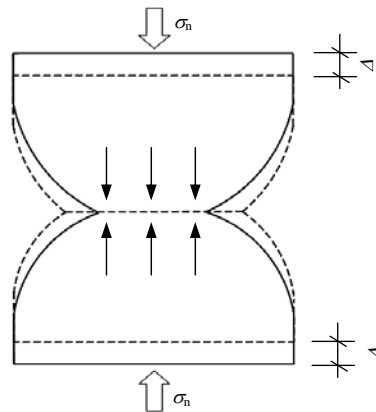


图 10 应力作用下接触面溶解模型

Fig.10 Dissolution model of interface under stress

(2) 由于化学反应对裂隙面的影响, 恒定应力作用下, 粗糙度和水力开度的变化没有表现出正相关的关系, 即越粗糙, 水力开度越大。蒸馏水渗流情况下, 其水力开度增加, 但是粗糙度反而减小。对于酸性溶液渗流情况下, 水力开度减小, 粗糙度也减小。造成这种现象的原因是化学反应的强度差异。从 JRC 的减小显示蒸馏水同样使裂隙面矿物发生溶解, 但是相对于酸性溶液的溶解反应而言, 这种微弱的溶解无法与渗透压下渗流通道的贯通相竞争。可见, 由于裂隙面上化学反应的不同使得水力

性质的变化规律不同。

(3) 同一粗糙度时的水力开度不尽相同。例如酸性溶液渗流情况时的两个试件，其初始粗糙度均为 22 左右，但开始渗流时的开度差别却较大。这是因为，粗糙度相等并不意味着实际裂隙面上的接触情况相同。而即使是同一面积接触率，其连通方式不同也会导致水力开度的差异。因此，面积接触方式是影响水力开度的重要因素。

3.4 应力 - 渗流 - 化学耦合作用下岩石裂隙面的响应机制

由于外界恒定应力的作用，裂隙面上的化学反应以及渗流特性与无应力作用下的响应及机制是不同的。H. D. Yasuhara 等^[19, 20]从压力溶解的角度对应力作用下岩石溶解及渗流特性变化的试验现象进行了解释。本文基于所开展的试验研究及已有文献资料，尝试揭示应力作用下矿物溶解机制及其对岩石裂隙面渗流特征的影响。

无应力作用下的单裂隙面始终处于开放状态(见图 11(a))。流体经过裂隙表面时，水分残留于其上。水气分子在浓度梯度的驱动下不断向内扩张^[21, 22]，与其中的矿物发生溶解反应。反应产物经由渗流通道被带走，则裂隙面会越来越宽。因此，无应力情

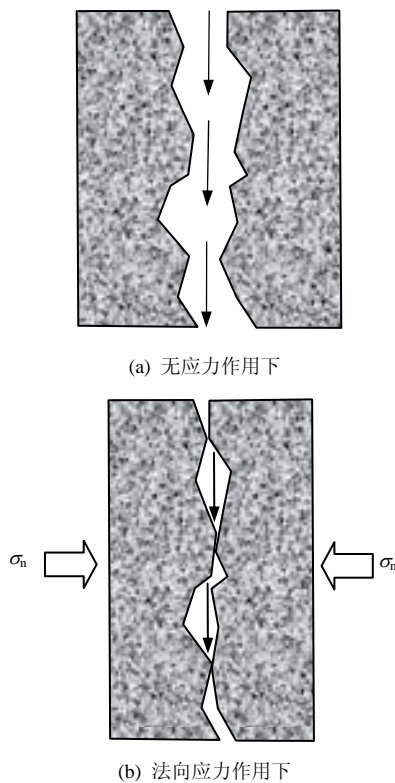


图 11 单裂隙面渗流

Fig.11 Seepage of single fracture

况时的水岩化学作用受控于裂隙表面的对溶液的吸附及水气分子的扩散。化学作用对裂隙面的腐蚀使得其水力开度不断增加。与流体直接接触的裂隙自由面所承受的应力均为流体压力，不存在应力梯度。

恒定法向应力作用下的单裂隙面始终处于闭合状态(见图 11(b))。外界应力使得裂隙面上的一部分面积直接接触，即接触面承受外部荷载。若有流体通过，则临空的自由面承受流体压力。由此裂隙表面形成了局部应力场。受化学势梯度的驱动，应力水平高的区域溶解速度快，反之则慢^[23]。由此造成了接触面上的矿物优先溶解。粗糙裂隙面上的凸起溶解后，接触面积增大。这将会同时对局部应力场及渗流场产生影响。一方面，由于接触面积增大，使得承受外界应力的面积增大，则应力梯度减小。由应力导致的化学势梯度减小，则溶解驱动力减小，溶解速度因此变缓慢。直到应力导致的溶解趋于结束。另一方面，随着接触面积的增大，水力开度减小。同样压力梯度下的流速降低，物质运移速度减慢。使得接触面平缓化过程减慢。图 12 描述了这一循环过程。其中 $\Delta\mu = \sigma V$ 表示应力作用引起的化学势变^[24]，其中 $\Delta\mu$ 为化学势变， σ 为作用于裂隙表面的有效应力， V 为矿物摩尔体积。

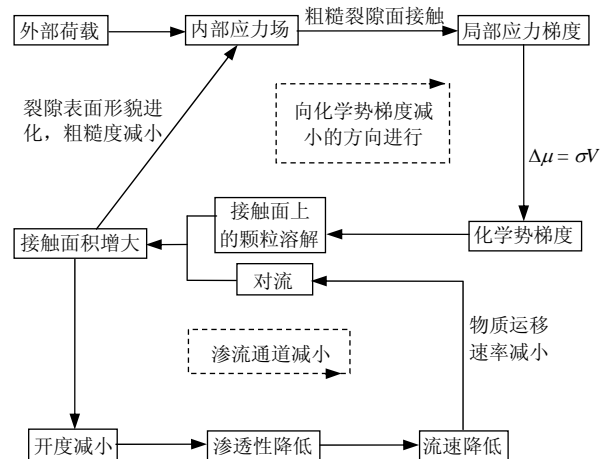


图 12 应力 - 渗流 - 化学耦合作用下单裂隙面的响应机制
Fig.12 Response of single fracture to stress-seepage-chemical coupled condition

3.5 侧向蠕变变形与水力开度的关系

如节 3.1 所述，渗透过程引起试件侧向变形增大。然而，侧向变形的增大并没有使得水力开度也同样增加。对比侧向应变(见图 3(b))与水力开度(见图 7)的变化曲线，得到以下 2 个现象：(1) 侧

向变形一直增大, 而水力开度在经历最初几百小时的变化后逐渐趋于稳定; (2) 侧向变形增大, 水力开度的变化随渗流溶液类型的不同或减小或增大。为此, 侧向蠕变变形量与水力开度变化量列于表 2。

表 2 侧向蠕变变形量与水力开度变化量
Table 2 Variation of lateral deformation and hydraulically aperture

试件编号	侧向变形量/ μm	水力开度变化量/ μm
css1	+38.1	-1.0
css4	+54.0	-3.5
csw1	+38.0	+0.5

注: 水力开度正号表示增大, 负号表示减小; 侧向变形正号表示膨胀。

表 2 表明: 水力开度的变化量远远小于侧向蠕变变形量, 两者的变化量不在同一量级上。

综合上述现象可知, 试验中开度的变化不受侧向变形的影响。当渗流溶液与裂隙面接触时, 化学作用产生的溶解与物理软化作用是同时进行的, 但其对裂隙面的影响程度是不同的。一方面, 由于裂隙面之间的相对约束, 软化作用使得变形向外侧发展。另一方面, 由于裂隙面上花岗岩矿物的溶解, 使得裂隙面内侧发生闭合。然而化学反应速率较慢, 溶解产生的体积变化有限, 则水力开度的变化量较小。由此可知, 侧向变形的增加与水力开度的减小不是相同因素作用的结果。

4 结 论

本文研究了单裂隙花岗岩在恒定应力、渗透压及化学反应共同作用下的综合响应。得到了在该耦合环境下的蠕变变形特征、水岩化学反应特征及水力性质变化特征。在综合考虑力学、化学和渗透等各影响因素的基础上, 对其变化机制及其之间的联系进行了初步阐述。主要结论如下:

(1) 恒定三轴压缩应力状态下, 渗透过程中, 水对裂隙面周边基质产生软化作用, 导致侧向变形持续增加, 特点不同于常规三轴蠕变试验的扩容效应。

(2) 酸性溶液的渗流作用使得裂隙表面的矿物发生溶解。通过对渗流出口溶液成分的测定及对裂隙表面矿物形貌的扫描表明, 酸性溶液对矿物的溶解及对裂隙表面的改造作用是显著的。

(3) 恒定外界应力作用下的溶解反应使得裂隙水力开度减小, 裂隙表面粗糙度减小。表明溶解反应优先发生于颗粒接触面, 具有压力溶解的特征。

(4) 渗流溶液与岩石裂隙面之间存在物理软化溶解作用, 这两种作用对裂隙面法向变形的影响程度不同, 软化作用使得岩石侧向变形增加, 溶解作用使得裂隙面闭合。由于软化的效果更明显, 使得侧向变形比水力开度的变化大一个数量级。

致谢 感谢核工业北京地质研究院王 驹研究员、郭永海研究员、苏 锐研究员在取样过程中给予的大力协助。感谢中国科学院武汉岩土力学研究所刘继光高工, 陈昌炳研究员在试验过程中不可或缺的帮助。感谢中国矿业大学刘红彬教授对三维扫描图像方面的耐心指导。感谢法国里尔科技大学邵建富教授的指导帮助。在此对他们表示衷心感谢!

参考文献(References):

- [1] FENG X T, DING W X. Experimental study of limestone micro-fracturing under a coupled stress, fluid flow and changing chemical environment[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, 44(3): 437 - 448.
- [2] 姚华彦, 冯夏庭, 崔 强, 等. 化学溶液及其水压作用下单裂隙灰岩破裂的细观试验[J]. 岩土力学, 2009, 30(1): 59 - 66.(YAO Huayan, FENG Xiating, CUI Qiang, et al. Meso-mechanical experimental study of meso-fracturing process of limestone under coupled chemical corrosion and water pressure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(1): 59 - 66.(in Chinese))
- [3] 鲁祖德, 丁梧秀, 冯夏庭, 等. 裂隙岩石的应力 - 水流 - 化学耦合作用试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(4): 796 - 804.(LU Zude, DING Wuxiu, FENG Xiating, et al. Experimental study of mechano-hydro-chemical coupling process in cracked rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(4): 796 - 804.(in Chinese))
- [4] 乔丽苹. 砂岩弹塑性及蠕变特性的水物理化学作用效应试验与本构研究[博士学位论文][D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2008.(QIAO Liping. Experimental-theoretical-numerical studies of elasto-plastic and creep property of sandstone with hydro-physico-chemical influencing effects[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2008.(in Chinese))
- [5] 崔 强. 化学溶液流动 - 应力耦合作用下砂岩的孔隙结构演化与蠕变特征研究[博士学位论文][D]. 沈阳: 东北大学, 2008.(CUI Qiang. Study on the evolution of pore structure and creep features of

- sandstone under the coupling action of stress and seepage flow of chemical solution[Ph. D. Thesis][D]. Shenyang: Northeastern University, 2008.(in Chinese))
- [6] 刘继山. 单裂隙受正应力作用时的渗流公式[J]. 水文地质工程地质, 1987, 14(2): 32 - 33.(LIU Jishan. Seepage formulation in a single fracture under normal stress[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1987, 14(2): 32 - 33.(in Chinese))
- [7] 周创兵, 熊文林. 不连续面渗流与变形耦合的机制研究[J]. 水文地质工程地质, 1996, 4(2): 69 - 74.(ZHOU Chuangbing, XIONG Wenlin. On permeability characteristics of rock mass[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1996, 4(2): 69 - 74.(in Chinese))
- [8] 速宝玉, 詹美礼, 赵 坚. 裂隙渗流与应力耦合特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(4): 73 - 77.(SU Baoyu, ZHAN Meili, ZHAO Jian. Experimental researches on fracture permeability characteristics under stress[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(4): 73 - 77.(in Chinese))
- [9] 王 媛. 单裂隙面渗流与应力的耦合特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(1): 83 - 87.(WANG Yuan. Coupling characteristics of stress and fluid flow within a single fracture[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(1): 83 - 87.(in Chinese))
- [10] BRUSH D J. Three-dimensional fluid flow and solute transport in rough-walled fractures[Ph. D. Thesis][D]. Waterloo Canada: University of Waterloo, 2002.
- [11] POLAK A, ELSWORTH D, LIU J S, et al. Spontaneous switching of permeability changes in a limestone fracture with net dissolution[J]. Water Resources Research, 2004, 40(W03502): 1 029 - 1 038.
- [12] YASUHARA H, POLAK A, MITANI Y, et al. Evolution of fracture permeability through fluid-rock reaction under hydrothermal conditions[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2006, 244(1 - 2): 186 - 200.
- [13] MIN K B, RUTQVIST J, ELSWORTH D. Chemically and mechanically mediated influences on the transport and mechanical characteristics of rock fractures[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(1): 80 - 89.
- [14] 郭永海, 王 驹, 吕川河, 等. 高放废物处置库甘肃北山野马泉预选区地下水化学特征及水 - 岩作用模拟[J]. 地学前缘, 2005, 12(4): 117 - 123.(GUO Yonghai, WANG Ju, LU Chuanhe, et al. Chemical characteristics of groundwater and water-rock interaction: modelling of the Yemaquan preselected area for China's high level radioactive waste repository[J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(4): 117 - 123.(in Chinese))
- [15] 孙 钧. 岩土材料流变及其工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.(SUN Jun. Rheology and engineering application of geotechnical material[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999.(in Chinese))
- [16] 朱和华, 叶 斌. 饱水状态下隧道围岩蠕变力学性质的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(12): 1 791 - 1 796.(ZHU Hehua, YE Bin. Experimental study of mechanical properties of rock creep in saturation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(12): 1 791 - 1 796.(in Chinese))
- [17] 刘 雄. 岩石流变学概论[M]. 北京: 地质出版社, 1994.(LIU Xiong. An introduction to rock rheology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994.(in Chinese))
- [18] LASAGA A C. Chemical kinetics of water-rock interactions[J]. Journal of Geophysical Research, 1984, 89(B6): 4 009 - 4 025.
- [19] YASUHARA H, ELSWORTH D, POLAK A. Evolution of permeability in a natural fracture: significant role of pressure solution[J]. Journal of Geophysical Research, 2004, 109(B03204): 1 029 - 1 038.
- [20] LIU J S, SHENG J C, POLAK A, et al. A fully-coupled hydrological-mechanical-chemical model for fracture sealing and preferential opening[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006, 43(1): 23 - 36.
- [21] 徐则民. 斜坡非饱和带低渗透岩石结构体风化前锋扩展过程[J]. 地学前缘, 2008, 15(4): 258 - 268.(XU Zemin. Propagation process of weathering fronts of rock blocks with low permeability in vadose zones of slopes[J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(4): 258 - 268.(in Chinese))
- [22] 徐则民. 温湿气候区结晶岩与碎屑岩腐岩特征及其发育过程[J]. 地学前缘, 2009, 16(3): 364 - 373.(XU Zemin. Characteristics of saprolites formed from crystalline rock and clastic rock in humid climatic regions and their development process[J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(3): 364 - 373.(in Chinese))
- [23] RUTTER E H. Pressure solution in nature, theory and experiment[J]. Journal of Geology Society, 1983, 140(5): 725 - 740.
- [24] VLADISLAV K, BERNHARD S. On the kinetics of elementary processes of pressure solution[J]. Pure and Applied Geophysics, 1998, 152(4): 667 - 683.