

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.057



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



酸性腐蚀花岗岩冲击荷载能量演化试验研究

于天煜, 周小平

(武汉大学土木建筑工程学院, 武汉 430072)

摘要: 化学腐蚀可以对岩体力学性能产生劣化作用, 实际工程中的岩体也往往面临钻爆开挖、机械破岩等动态冲击荷载, 而岩体的破坏本质上是能量的吸收与耗散过程, 研究化学腐蚀后岩体承受冲击荷载作用时的能量演化具有重要的现实意义。利用分离式霍普金森压杆(SHPB)测试系统对两种不同pH值(3和5)的 KHSO_4 溶液浸泡后的花岗岩试样进行动态冲击试验, 设定腐蚀时间为30、60 d, 另设一组无腐蚀过程的原状试样作为对照, 考察0.15 MPa气室压力下酸性环境腐蚀后花岗岩的能量演化效应, 得到试样的动态应力-应变曲线、峰值应力、峰值应变、能量吸收率随环境pH值和腐蚀时间的变化规律。结果表明, 随着溶液pH值的降低和腐蚀时间的增长, 动态应力-应变曲线的非线性段被压缩, 峰值应力和峰值应变都在降低。在pH值为3的溶液中腐蚀60 d后, 试样的能量吸收率从37.39%上升到52.11%, 表明随着化学腐蚀的增强, 花岗岩强度降低, 变形能力变差, 应力波在其内部传播时消耗掉了更多的能量, 试样更易破坏。

关键词: 花岗岩; 化学腐蚀; 分离式霍普金森压杆; 峰值应力; 能量吸收率

中图分类号: TU458 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2024)06-0044-07

Experimental study on energy evolution of granite after acid corrosion under impact loading

YU Tianyu, ZHOU Xiaoping

(School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, P. R. China)

Abstract: Chemical corrosion has a degrading effect on the mechanical properties of rock masses. The rock masses in engineering practice is generally facing dynamic impact loading such as drill burst excavation and mechanical rock breaking, moreover, the destruction of rock is essentially a process of energy absorption and dissipation. Therefore, it is of great practical significance to study the energy evolution of corroded rock under impact loading. Dynamic impact tests were conducted on granite specimens after soaking in KHSO_4 solutions at 2 different pH values (3 and 5) using the Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) system. Corrosion time was set to 30 and 60 days, and another set of specimens without corrosion was set up as control group, in order to investigate the energy evolution of granite after acidic corrosion under air chamber pressures of 0.15 MPa. The change laws of dynamic stress-strain curve, peak stress, peak strain, and energy absorption rate with pH value

收稿日期: 2023-03-27

基金项目: 国家自然科学基金(52027814、51839009、42207193); 中央高校基本科研业务费(2042021kf0058)

作者简介: 于天煜(1998-), 男, 主要从事岩石化学腐蚀研究, E-mail: ytyvlade@163.com。

周小平(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: xiao_ping_zhou@126.com。

Received: 2023-03-27

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (Nos. 52027814, 51839009, 42207193); The Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2042021kf0058)

Author brief: YU Tianyu (1998-), main research interest: chemical corrosion of rock, E-mail: ytyvlade@163.com.

ZHOU Xiaoping (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: xiao_ping_zhou@126.com.

and corrosion time were given. It was found that with the decrease of pH value and the increase of corrosion time, the nonlinear stage of dynamic stress-strain curve was compressed, the peak stress and peak strain decreasing. Moreover, the energy absorption rate increased from 37.39% to 52.11% after 60 days of corrosion in solutions of pH=3, indicating that with increase of chemical corrosion, the strength of granite decreased, the deformation ability becoming worse, stress waves consuming more energy as they propagate through the interior of samples and the specimens were more easily damaged.

Keywords: granite; chemical corrosion; SHPB test; peak stress; energy absorption rate

岩体赋存于含有大量离子之水-化学溶液中,如 F^- 、 CO_3^{2-} 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 等,加上人类丰富的生产生活活动向自然界中排放的大量化学试剂经过溶解后参与到地球圈层的水循环过程,最终导致岩体周围的水体酸度大大增强。现代岩石力学理论表明,水-化学溶液对岩体的作用不能用有效应力原理解释^[1-3],水-岩之间存在复杂的相互作用关系,这种关系往往是缓慢发生而且大多是不可逆的,化学腐蚀过程会改变岩石内部的原生承压结构,从而对岩石的力学性能产生较大幅度的劣化作用^[4]。近年来,关于水-岩相互作用和岩石化学腐蚀作用机理的相关研究越来越受到学界关注。

苗胜军等^[5]借助扫描电镜与电子能谱技术分析了解酸性化学腐蚀环境对花岗岩的影响效果,并借助离子色谱检测和X射线荧光分析的手段给出了花岗岩酸性环境中的水-岩相互作用化学损伤机理;周倩等^[6]测量了化学腐蚀后花岗岩试样的静力学性能,发现随着pH值的降低和腐蚀时间的延长,弹性模量和峰值应力都在降低;王苏然等^[7]发现在pH<5的溶液中腐蚀时间超过90 d后,花岗岩试样的单轴压缩强度有一定程度回升,推测是由于 SiO_2 悬液脱水后对于损伤缺陷起到了一定的填补、胶结作用;刘小平等^[8]指出,硫酸溶液与石灰岩试样进行反应,生成的 $CaSO_4$ 晶体附着在岩石表面,并造成了纵波波速、单轴抗压强度和弹性模量随着时间的延长出现了下降-上升-下降的规律;王伟等^[9]研究了碱性和中性环境下花岗岩化学腐蚀的劣化作用,结果表明,花岗岩的内黏聚力随着浸泡溶液的pH值增加而增加,而内摩擦角随着pH值增加而减少,并进一步分析了化学溶液对花岗岩强度的腐蚀机理。陈四利等^[10]利用CT识别技术对化学腐蚀下的砂岩进行了三轴加载全过程的即时扫描,建立了基于化学腐蚀影响和CT计数的损伤本构模型;张峰瑞等^[11]考察了化学腐蚀和冻融循环共同作用后的蠕变特性,指出损伤程度影响依次为HCl溶液>NaOH溶液>NaCl溶液;陈有量等^[12]建立了化学腐蚀-力耦合模型,并对水化学作用后的岩石进行了三轴压缩试验,试验结果与模型吻合度较好;韩铁林等^[13]计

算了化学腐蚀下钙质砂岩的能量演化,指出试样的耗散能随着化学腐蚀时间的增加而增加;廖健等^[14]考察了弱酸腐蚀后的灰岩试样,认为酸性环境腐蚀导致的矿物成分和内部结构改变是其力学性质改变的根本原因。上述研究大多停留在对于化学腐蚀岩石的损伤机制和静力学参数进行分析。然而,工程实际中的岩体也会承受冲击荷载作用,如钻爆开挖、机械破岩等。动力学荷载作用下岩体的响应机理与静力学下低应变率的响应机理有很大不同,因此,考察化学腐蚀后岩体的动力学性能劣化程度有十分现实的工程意义。

在冲击荷载作用下,岩石内部裂纹增加、扩展、贯通,这一系列过程都伴随着能量的吸收与消耗。能量耗散会导致岩石内部缺陷的不断演化,导致宏观层面岩石动态力学性能的改变。因此,试样动态破坏过程中的吸收能占比是衡量岩石动态力学性能的重要参数。吕晓聪等^[15]指出,在冲击荷载作用下,砂岩的能量吸收率随着应变率的增加而提高,随围压的增加而减小。然而,针对化学腐蚀作用对岩体能量吸收率的影响的研究还鲜有见诸文献。

笔者利用分离式霍普金森压杆(Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB)对受过60 d酸性环境腐蚀后花岗岩试样的动力学性能进行研究,给出峰值强度、峰值应力和能量吸收率的劣化程度,为建立水-化学腐蚀环境下花岗岩的损伤本构模型和相关工程实践提供数据资料。

1 花岗岩腐蚀及冲击试验

1.1 试样制备

在SHPB试验中,试样的尺寸设计应能够体现系统整体的尺寸匹配要求。假定试样均匀变形,在高应变率的试验条件下,试样质点的纵向和径向惯性会造成应力-应变曲线的试验误差。美国金属学会(ASM)推荐的长径比为0.5~1.0,笔者选择的长径比为0.5。为了尽可能减少试样与SHPB杆端面积的不匹配,试样尺寸与杆端尺寸一致,直径为50 mm,得到试样长度为25 mm。对试样两端进行打磨,保证平行度小于0.02 mm,平整度小于0.05 mm。加

工好的花岗岩试样如图1所示。经过XRD岩样成分分析,试样的矿物成分含量为:石英25.4%、钾长石25.4%、钠长石36.5%、白云母11.8%,并另有少量方解石0.5%和绿泥石0.4%。

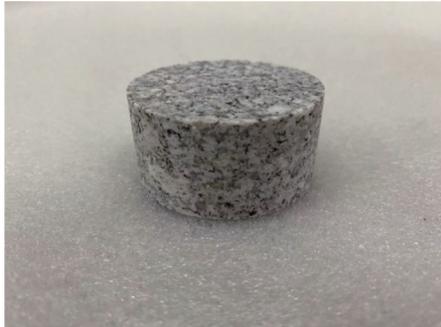


图1 典型试样

Fig. 1 Typical sample

1.2 化学腐蚀

根据中华人民共和国生态环境部公布的《2020中国生态环境状况公报》,全年降水的pH值年均范围为4.39~8.43,其中,主要的阴离子为硫酸根,当量浓度比例达到18.2%。据此,选用的腐蚀试剂为 KHSO_4 的水溶液,由99%的 KHSO_4 固体溶解于水得到。配置成pH值为3和5两种酸度,分别腐蚀30、60 d,并另设一组无腐蚀的完好花岗岩试样进行对比。之后将试样放入配置好的腐蚀液中,随着反应的进行,溶液会逐渐向中性靠近,使得后续腐蚀效果较差。因此,为了更好观察花岗岩试样在给定酸度下的腐蚀效果,每72 h对溶液的pH值进行测量,并对pH值、实验室温度、实验室湿度进行记录,记录完毕后重新加入固体溶剂,使得溶液达到预设的pH值(3和5)。结果显示,整个腐蚀过程中,实验室的温度稳定在 $13\text{ }^\circ\text{C}\sim 24\text{ }^\circ\text{C}$ 之间,湿度稳定在55%~70%之间,可以近似认为环境处于恒温恒湿状态。

1.3 动态冲击试验

试验采用的SHPB测试装置见图2。该设备由激发系统、杆件系统、信号采集系统和数据处理系统4部分组成。激发系统包括提供压力的气室和弹头,杆件系统由入射杆、透射杆和一个缓冲杆组成,信号采集系统为分别贴于入射杆和透射杆上的应变片,应变片与数据输出电路以半桥对臂的方式进行连接。弹头及3个杆件的材料均为高强度40铬钢,试样与杆件的直径均为50 mm,杆件参数如下:动态弹性模量 E_d 为250 GPa、密度为 7784 kg/m^3 、弹性波波速 C_e 为5667 m/s。设定冲击气压为0.15 MPa;又因为动力学试验离散性较大,而且试验具有一次

性,因此每种冲击条件下设置3个平行试样进行结论统计。



图2 SHPB测试装置

Fig. 2 SHPB testing apparatus

经过激发装置释放气室压力后,弹头撞击入射杆并形成应力波,即入射波(incident wave, i)。当入射波沿着前进方向以一维进行传播时,在与试样接触的瞬间,因为杆件和花岗岩试样的波阻抗存在较大差距,一部分应力波继续向前传播至透射杆,形成透射波(transmitted wave, t),在透射杆中形成的应变由透射杆应变片的电压变化计算得到;另一部分应力波沿着相反的方向返回入射杆,即反射波(reflected wave, r),入射波和反射波在入射杆中形成的应变均由入射杆应变片的电压变化计算得到。当杆件的直径不太大时,一维传播的假设可以得到自动满足。当试样中的应力、应变沿着长度方向均匀分布时,试样中的应变可以直接用试样两端的位移差求得,此假定为均匀性假定。冲击荷载直接作用会形成矩形波,使得试样在应力波上升时间内难以达到应力平衡,应力不满足均匀分布的假定。为使均匀性假定得到满足,采用直径10 mm、厚度1 mm的超轻黏土进行波形整形。该材料塑性较好,通过其塑性变形来有效地平缓加载波的上升。试验时将其粘贴于入射杆撞击端的中心位置,如图3所示。整形后的结果如图4所示,缓慢上升的半正弦信号表明整形效果较好,且入射端应力(入射+



图3 超轻黏土用于波形整形

Fig. 3 Ultra-light clay used for wave shaping

反射)与透射杆应力契合良好,可以认为应力平衡状态达成,均匀性假定得到满足。另一方面,为了减轻端面摩擦效应,在试样两端面涂抹适量凡士林进行润滑和固定。

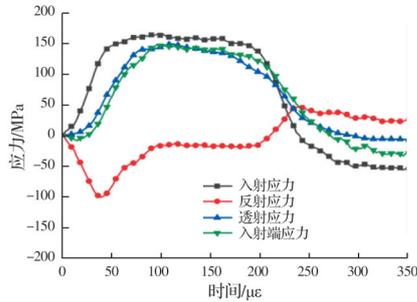


图 4 应力平衡示意图

Fig. 4 Schematic diagram of stress equilibrium

试样的应变为两杆之间的位移差,根据弹性波的线性叠加原理,试样的应变、应变率和应力分别为

$$\epsilon(t) = \frac{C_e}{l_s} \int [\epsilon_i(t) - \epsilon_r(t) - \epsilon_t(t)] dt \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon}(t) = \frac{C_e}{l_s} [\dot{\epsilon}_i(t) - \dot{\epsilon}_r(t) - \dot{\epsilon}_t(t)] \quad (2)$$

$$\sigma(t) = \frac{AE_d}{2A_s} [\epsilon_i(t) + \epsilon_r(t) + \epsilon_t(t)] \quad (3)$$

式中: C_e 为弹性波波速; E_d 为杆件的动态弹性模量; l_s 为试样的长度; A_s 为试样的横截面面积; $\epsilon_i(t)$ 、 $\epsilon_r(t)$ 和 $\epsilon_t(t)$ 分别为入射波、反射波和透射波各自在杆件中形成的应变,由应变片的实时电压计算而来,故三者均为时间 t 的函数。

图 5 为根据式(2)计算得到的应变率-时间曲线,即试样的应变率为曲线中近似平缓段的平均值,本研究中为 30.6 s^{-1} ,时间区间为 $100 \sim 200 \mu\text{s}$ 。

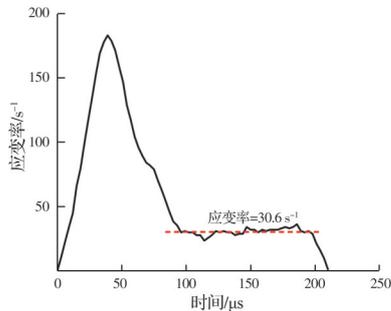


图 5 应变率-时间曲线

Fig. 5 Strain rate-time curve

2 动力学试验结果

2.1 动态应力-应变曲线

根据式(1)和式(3)绘制不同 pH 环境化学腐蚀后试样的动态应力-应变曲线。图 6、图 7 分别给出的是弱酸性的 pH 值为 5 环境下和强酸性的 pH 值为

3 环境下试样腐蚀 30、60 d 后的动态应力-应变曲线。图 6 中, pH 值为 5 条件下的腐蚀程度较低, 3 条动态应力-应变曲线在初始上升阶段基本重合, 之后随着腐蚀时间的增加, 曲线达到峰值前的硬化阶段被缩短, 试样的峰值应力和峰值应变都在降低。图 7 中, pH 值为 3 环境下腐蚀 30 d 后, 红色线与黑色线在初始上升阶段基本重合, 说明此时腐蚀效果依然较差; 然而 60 d 后, 腐蚀对试样的动态应力-应变曲线产生了较大影响, 蓝色线在硬化阶段的模量明显降低, 试样的峰值应力和峰值应变均有下降。

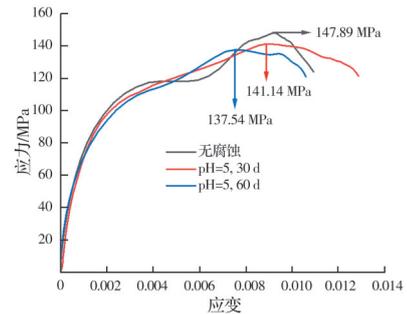


图 6 pH 值为 5 环境下试样动态应力-应变曲线
Fig. 6 Dynamic stress-strain curves of samples under pH=5

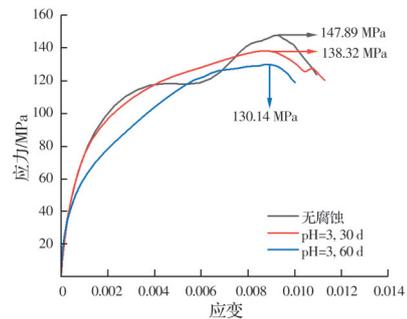


图 7 pH 值为 3 环境下试样动态应力-应变曲线
Fig. 7 Dynamic stress-strain curves of samples under pH=3

2.2 峰值应力

图 8 为两种环境下试样的峰值应力随时间的变化规律, 其中空心点代表试验测得的峰值应力, 实心点代表试验测得峰值应力的平均值。

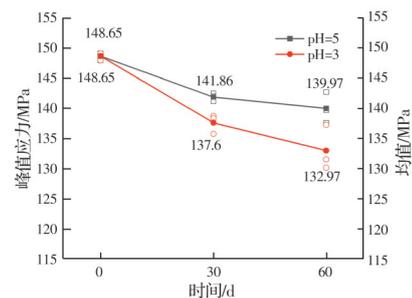


图 8 峰值应力随腐蚀时长和 pH 值的变化

Fig. 8 Variation of peak stress with corrosion time and pH value

从图 8 可以看出:

1) pH 值为 5 环境中的试样在同样的冲击荷载作用下, 30 d 后, 试样的平均峰值应力从 148.65 MPa 下降到 141.86 MPa, 降幅为 4.57%, 60 d 后, 试样的平均峰值应力从 148.65 MPa 下降到了 139.97 MPa, 降幅为 5.84%;

2) pH 值为 3 环境中的试样在同样的冲击荷载作用下, 30 d 后, 试样的平均峰值应力从 148.65 MPa 下降到 137.60 MPa, 降幅为 7.43%, 60 d 后, 试样的平均峰值应力从 148.65 MPa 下降到 132.97 MPa, 降幅为 10.55%。

由试验结果可得, 对于同一 pH 值环境下的花岗岩试样, 其峰值应力随着腐蚀天数的增加而降低; 对于腐蚀时间相同的花岗岩试样, 在酸性环境范围内, 其峰值应力随 pH 值的下降而降低。

2.3 峰值应变

图 9 为两种环境下试样的峰值应变随时间的变化规律, 其中空心点代表试验测得的峰值应变, 实心点代表试验测得峰值应变的平均值。

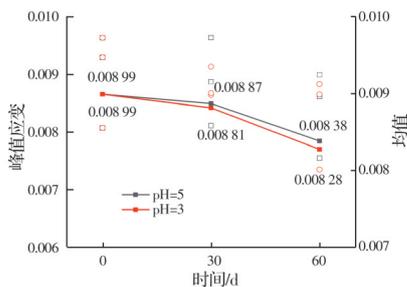


图 9 峰值应变随腐蚀时长和 pH 值的变化

Fig. 9 Variation of peak strain with corrosion time and pH value

从图 9 可知:

1) 在同样的冲击荷载作用下, pH 值为 5 环境中的试样 30 d 后试样的平均峰值应变从 0.00899 下降到 0.00887, 降幅为 1.33%, 60 d 后试样的平均峰值应变从 0.00899 下降到 0.00838, 降幅为 6.79%;

2) 在同样的冲击荷载作用下, pH 值为 3 环境中的试样 30 d 后试样的平均峰值应变从 0.00899 下降到 0.00881, 降幅为 2.00%, 60 d 后试样的平均峰值应变从 0.00899 下降到 0.00828, 降幅为 7.90%。

由试验结果可得, 对于同一 pH 值环境下的花岗岩试样, 其峰值应变随着腐蚀天数的增加而降低; 对于腐蚀时间相同的花岗岩试样, 在酸性环境范围内, 其峰值应变随 pH 值的下降而降低。

2.4 能量演化

在 SHPB 测试中, 试样两个端面均涂抹凡士林进行润滑, 因此, 在整个应力波传播过程中摩擦做功导致的能量损失可以忽略不计。根据能量守恒原

理, 弹头给予系统的入射能 (incident energy, W_{in}) 用于 3 种途径: 对试样做功、透射能 (transmitted energy, W_{tr}) 和反射能 (reflected energy, W_{re})。另试样做功为 U , 该值等于应力波在试样内部传播过程中耗散掉的能量, 宏观上也等于试样在整个破碎过程中的能量吸收值 (absorbed energy, W_{ab}), 故也称吸收能或耗散能。则有

$$U = W_{ab} = W_{in} - W_{tr} - W_{re} \quad (4)$$

当一维应力波假定和均匀性假定都被满足时, 根据弹性波理论, 式 (4) 中等号右端的 3 个能量数值各自计算式为

$$W_{in}(t) = \frac{AC_e}{E_d} \int \sigma_i(t) dt \quad (5)$$

$$W_{tr}(t) = \frac{AC_e}{E_d} \int \sigma_t(t) dt \quad (6)$$

$$W_{re}(t) = \frac{AC_e}{E_d} \int \sigma_r(t) dt \quad (7)$$

式中: A 、 C_e 和 E_d 分别为杆件的面积、弹性波波速和杆件的动态弹性模量; $\sigma_i(t)$ 、 $\sigma_r(t)$ 和 $\sigma_t(t)$ 分别为入射波、反射波和透射波在杆件中形成的应力, 均为时间 t 的函数。

图 10 为一典型试样的能量计算结果, SHPB 试验中的能量演化过程包括 3 个阶段^[16]。压实阶段 (阶段 I): 试样被压缩, 裂缝闭合; 能量累积阶段 (阶段 II): 能量以线性规律上升, 说明试样内部开始吸收能量并用于裂缝扩展和断裂形成; 平稳阶段 (阶段 III): 试样各个能量数值不再随着时间进程发生明显变化, 说明试样已经破坏, 能量的演化过程已经结束。试验结果得到的实际数值均为平稳阶段的能量值。如图 10 所示的试样, 其入射能为 256.67 J, 反射能为 24.83 J, 透射能为 115.97 J, 则吸收能为 $256.67 \text{ J} - 24.83 \text{ J} - 115.97 \text{ J} = 115.87 \text{ J}$ 。

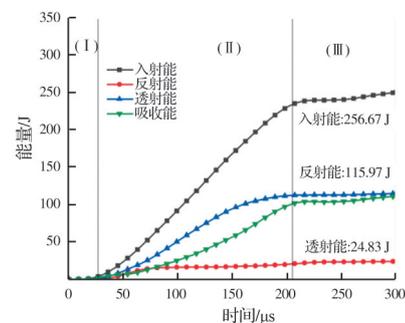


图 10 SHPB 测试中的典型能量演化

Fig. 10 Typical energy evolution in SHPB testing

理论上, 入射能的大小仅与气室压力有关, 但因为实际的试验操作过程中偶然误差不可避免, 包括弹头在轨道中滑动时摩擦力做功、波形整形器放置位置不会每次都严格一致等, 均会导致同样气

室压力下试样计算后得到的入射能有细微差别,因此,使用吸收能在入射能中的占比表征试样能量吸收情况,要比直接使用吸收能的绝对数值更有参考价值。即能量吸收率 η

$$\eta = \frac{W_{ab}}{W_{in}} \times 100\% \quad (8)$$

图11为两种环境下试样的能量吸收率随时间的变化规律,其中空心点代表试验测得的能量吸收率,实心点代表试验测得能量吸收率的平均值。

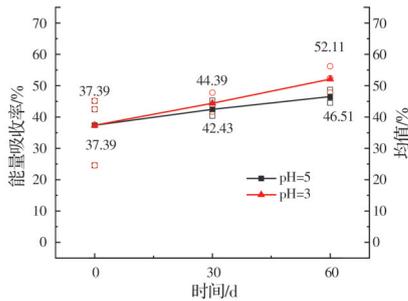


图11 能量吸收率随时间的变化

Fig. 11 Variation of energy absorption rate with time

从图11可知:

1)在同样的冲击荷载作用下,pH值为5环境中的试样30 d后,试样的平均能量吸收率从37.39%上升到42.43%,60 d后试样的平均能量吸收率从37.39%上升到46.51%;

2)在同样的冲击荷载作用下,pH值为3环境中的试样30 d后,试样的平均能量吸收率从37.39%上升到了44.39%,60 d后,试样的平均能量吸收率从37.39%上升到52.11%。

由试验结果可得,对于同一pH值环境下的花岗岩试样,能量吸收率随着腐蚀天数的增加而升高;对于腐蚀时间相同的花岗岩试样,在酸性环境范围内,其能量吸收率随pH值的下降而升高。

3 结论

利用SHPB测试系统,考察了受到pH值为3和pH值为5两种环境下腐蚀30、60 d后花岗岩试样的动力学性能,试验得到了动态应力-应变曲线,关注了峰值应力、峰值应变和能量吸收率的变化。得到以下主要结论:

1)随着腐蚀时间增长,试样动态应力-应变曲线的非线性硬化阶段逐渐缩短,峰值应力和峰值应变都在降低,试样的脆性变强。

2)矿物参与反应生成离子溶解于溶液中,造成内部结构的破坏,峰值应力随着腐蚀时间增长而下降,随着环境pH值下降而下降;峰值应变随着腐蚀时间增长而下降。

3)能量吸收率随着腐蚀时间增长而上升,随着

环境pH值下降而上升,可以认为是化学损伤使得应力波传播路径更加复杂,从而导致能量耗散增加。

参考文献

- [1] WIEDERHORN S M. A chemical interpretation of static fatigue [J]. Journal of the American Ceramic Society, 1972, 55(2): 81-85.
- [2] ANDERSON O L, GREW P C. Stress corrosion theory of crack propagation with applications to geophysics [J]. Reviews of Geophysics, 1977, 15(1): 77.
- [3] ATKINSON B K, MEREDITH P G. Stress corrosion cracking of quartz: A note on the influence of chemical environment [J]. Tectonophysics, 1981, 77(1/2): 1-11.
- [4] 刘永胜, 邹家宇, 吴秋兰, 等. 化学腐蚀作用下层状复合岩石的性能研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2019, 41(2): 128-134.
LIU Y S, ZOU J Y, WU Q L, et al. Properties of layered composite rock under chemical corrosion [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2019, 41(2): 128-134. (in Chinese)
- [5] 苗胜军, 蔡美峰, 冀东, 等. 酸性化学溶液作用下花岗岩损伤时效特征与机理[J]. 煤炭学报, 2016, 41(5): 1137-1144.
MIAO S J, CAI M F, JI D, et al. Aging features and mechanism of Granite's damage under the action of acidic chemical solutions [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(5): 1137-1144. (in Chinese)
- [6] 周倩, 陈有亮. 酸性溶液腐蚀后花岗岩力学特性试验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(1): 225-231.
ZHOU Q, CHEN Y L. The experimental study on mechanical properties of granite after acid solution corrosion [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018, 29(1): 225-231. (in Chinese)
- [7] 王苏然, 陈有亮, 周倩, 等. 酸性溶液化学腐蚀作用下花岗岩单轴压缩力学性能试验[J]. 地质学刊, 2018, 42(4): 686-693.
WANG S R, CHEN Y L, ZHOU Q, et al. Tests on mechanical properties of granite under uniaxial compression subjected to chemical corrosion of acidic solution [J]. Journal of Geology, 2018, 42(4): 686-693. (in Chinese)
- [8] 刘小平, 陈星明, 刘传举, 等. 酸性条件下岩石力学特性试验研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2021, 73(5): 113-118.
LIU X P, CHEN X M, LIU C J, et al. Experimental study on mechanical properties of rocks under acidic conditions [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2021, 73(5): 113-118. (in Chinese)
- [9] 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.
- WANG W, LIU T G, LI X H, et al. Mechanical behaviour of granite in triaxial compression under chemical corrosion [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2015, 46(10): 3801-3807. (in Chinese)
- [10] 陈四利, 冯夏庭, 周辉. 化学腐蚀下砂岩三轴细观损伤机理及损伤变量分析[J]. *岩土力学*, 2004, 25(9): 1363-1367.
- CHEN S L, FENG X T, ZHOU H. Study on triaxial meso-failure mechanism and damage variables of sandstone under chemical erosion [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(9): 1363-1367. (in Chinese)
- [11] 张峰瑞, 姜谔男, 江宗斌, 等. 化学腐蚀-冻融综合作用下岩石损伤蠕变特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2019, 40(10): 3879-3888.
- ZHANG F R, JIANG A N, JIANG Z B, et al. Experimental study of damage and creep property of rock under coupled chemical corrosion and freeze-thaw cycle [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(10): 3879-3888. (in Chinese)
- [12] 陈有亮, 陈奇键, 肖鹏, 等. 岩石化学腐蚀-围压损伤本构模型与离散元模拟研究[J]. *固体力学学报*, 2022, 43(6): 703-715.
- CHEN Y L, CHEN Q J, XIAO P, et al. Study on constitutive model and discrete element simulation of rock chemical corrosion-confining pressure damage [J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2022, 43(6): 703-715. (in Chinese)
- [13] 韩铁林, 师俊平, 陈蕴生, 等. 水化学作用下钙质砂岩力学特性的劣化及能量机制试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(Sup2): 3793-3804.
- HAN T L, SHI J P, CHEN Y S, et al. Experimental study of mechanical properties and energy mechanism of calcareous sandstone subjected to water chemistry [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(Sup2): 3793-3804. (in Chinese)
- [14] 廖健, 赵延林, 刘强, 等. 酸化学腐蚀下灰岩剪切强度特性试验研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2020, 37(3): 639-646.
- LIAO J, ZHAO Y L, LIU Q, et al. Experimental study on shear strength characteristics of limestone under acidizing corrosion [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2020, 37(3): 639-646. (in Chinese)
- [15] 吕晓聪, 许金余, 赵德辉, 等. 冲击荷载循环作用下砂岩动态力学性能的围压效应研究[J]. *工程力学*, 2011, 28(1): 138-144.
- LV X C, XU J Y, ZHAO D H, et al. Research on confining pressure effect of sandstone dynamic mechanical performance under the cyclical impact loadings [J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 28(1): 138-144. (in Chinese)
- [16] WU H, DAI B, CHENG L, et al. Experimental study of dynamic mechanical response and energy dissipation of rock having a circular opening under impact loading [J]. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 2021, 38(2): 1111-1124.

(编辑 胡玲)