酸性溶液对砂岩动态力学特性的影响及细观损伤机制研究*

冯江江[1],康志强[2,3],孙永亮[1],马延崑[1],郝明铧[1]

(1.煤科(山西)技术研究院有限公司, 山西 吕梁市 033000;
2.华北理工大学 矿业工程学院, 河北 唐山市 063200;
3.河北省矿业开发与安全技术重点实验室, 河北 唐山市 063200)

摘要:为研究化学溶液腐蚀对砂岩动态冲击压缩力学特性的影响,以蒸馏水及pH分别为5和3的HCl溶液加速腐蚀后的红砂岩为研究对象,进行5种不同冲击气压下的动态压缩试验,探究化学溶液的腐蚀作用对砂岩动态力学参数、破碎能耗及破坏形态的影响。利用XRD和SEM揭示了化学溶液对砂岩的腐蚀过程及劣化机制,并通过盒维数法定量表征了化学溶液腐蚀前后微观分形维数的变化规律。结果表明:酸性环境下砂岩中的白云母和斜长石会转化成石英和软质高岭石,胶结物被溶蚀,颗粒间的接触方式发生改变,导致砂岩微观结构分形维数和损伤率随溶液酸性增加而上升;在酸性溶液作用下,矿物颗粒刚度降低,结构松散,力学性能劣化。以应变率58.06 s^{-1}为例,随溶液酸度增强,动态应力峰值降幅分别为17.27%、39.83%、49.63%,动态峰值应变增幅分别为13.04%、31.30%、38.26%。腐蚀后砂岩宏观破碎加剧、耗能比下降、分形维数升高,破坏形式由张拉向剪切转变。该研究系统揭示了化学腐蚀对砂岩动态力学行为的影响机制,为酸性环境下岩体工程的稳定性评估提供了参考。

关键词:化学溶液;微观结构;分形维数;动态力学参数;损伤率
中图分类号:TD313 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)02-0175-12

Study on the Influence of Acid Solution on Dynamic Mechanical Properties and Meso-Scale Damage Mechanism of Sandstone

FENG Jiangjiang[1], *KANG Zhiqiang*[2,3], *SUN Yongliang*[1], *MA Yankun*[1], *HAO Minghua*[1]

(1.Coal Science (Shanxi) Technology Research Institute Co., Ltd., Lvliang, Shanxi 033000, China;
2.College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063200, China;
3.Key Laboratory of Mining Development and Safety Technology of Hebei Province, Tangshan, Hebei 063200, China)

Abstract: To investigate the effect of chemical solution corrosion on the dynamic impact compression mechanical properties of sandstone, red sandstone accelerated by distilled water and HCl solution with pH of 5 and 3 were used as the research objects. Dynamic compression tests were conducted under five different impact pressures to explore the influence of chemical solution corrosion on the dynamic mechanical parameters, crushing energy consumption, and failure mode of sandstone. The corrosion process and degradation mechanism of sandstone by chemical solutions were revealed using XRD and SEM, and the variation of micro fractal dimension before and after chemical solution corrosion was quantitatively characterized by box-counting method. The results indicate that in acidic environments, muscovite and plagioclase in sandstone will transform into quartz and soft kaolinite, and the cement will be dissolved. The contact mode among particles will change, resulting in an increase in the fractal dimension and damage rate of sandstone microstructure with the increase of solution acidity. Under the action of acidic solution, the stiffness of mineral particles decreases, the structure is loose, and the mechanical properties deteriorate. Taking the strain rate of 58.06 s^{-1} as an example, as the acidity of the solution increases, the peak dynamic stress decreases by 17.27%, 39.83% and 49.63%, respectively, and the dynamic peak strain increases by 13.04%, 31.30% and 38.26%, respectively. After corrosion, the macroscopic fragmentation of sandstone intensifies, the energy consumption ratio decreases, the fractal dimension increases, and the failure mode changes from tension to shear. This research system reveals the mechanism of the influence of chemical corrosion on the dynamic mechanical behavior of sandstone, providing a reference for the stability assessment of rock engineering in acidic environments.

Key words: Chemical solution, Microstructure, Fractal dimension, Dynamic mechanical parameter, Damage rate

---

* **收稿日期**:2025-02-27
基金项目:国家自然科学基金项目(51904105);吕梁市重点研发项目(2025SHFZ01);煤科院科技发展基金新产品新工艺项目(2025CG-SXY-01)
作者简介:冯江江(1998—),男,山西长治人,硕士研究生,主要从事矿山岩石力学研究工作。E-mail:2363988140@qq.com

0 引言

岩石是由颗粒或晶体相互胶结形成的集合体,其内部存在大量初始微裂纹和缺陷。当环境中存在酸性介质时[1-2],这些介质会渗透进岩石孔隙与缺陷中,并与矿物晶体或胶结材料发生不同程度的溶解和溶蚀作用,进而重塑岩石的孔隙结构,对其产生不可逆的损伤。

有关研究表明[3-4],岩石在化学溶液中的变质主要体现在两方面:一是岩体中的可溶性氧化物在水化学溶液中以极低的速率发生可逆溶解;二是酸性溶液中的 H^+ 与岩体中多种矿物成分发生反应,这是岩石化学腐蚀的主要原因,会引起岩石物理力学性能的劣化,进而影响岩石的变形和强度特性。由于酸性环境在岩土工程中广泛存在,因此针对酸性溶液成分、pH 及腐蚀时间等因素对岩石微观结构及力学性能影响的研究尤为重要。FENG 等[5]通过对砂岩进行酸性腐蚀试验,研究了腐蚀时间对砂岩变形和强度特性的影响,基于溶液中离子含量随时间的变化规律,揭示了酸性溶液对岩石力学性能的劣化机理。LI 等[6]通过单轴压缩试验、核磁共振和扫描电镜(SEM)观测,获得了不同酸性条件下砂岩试样的宏观力学性质和微观结构变化,探讨了酸-荷载耦合的损伤机理。陈四利等[7]基于岩石细观加载仪,对酸性腐蚀下单压缩试验的灰岩进行实时监测,获得单轴压缩过程中腐蚀岩石裂纹扩展的显微和全场图像,总结了灰岩在酸性腐蚀下的细观破裂特征和腐蚀机理。CRUNDWELL[8]则揭示了不同矿物中金属-氧键合能的相对大小和断裂机制,定义了溶解速率与 H^+ 和 OH^- 浓度之间的指数关系。

此外,化学溶液腐蚀后还可能承受钻孔、爆破开挖等动荷载作用,使得岩石在高应变率下的动态响应与静态响应具有显著差异。为探究岩石的动态力学响应规律,不少学者基于霍普金森压杆(SHPB)开展了一系列试验研究。GONG 等[9-10]、QIN 等[11]利用 SHPB 研究了砂岩在预应力作用下动静组合加载的动态抗拉与抗压特性。李晓锋等[12]采用 SHPB 对 3 种不同岩石材料进行强冲击试验,并结合离散元数值模拟,发现应变率变化会导致岩石类材料的动态强度发生改变。张亚宾等[13]研究了石灰石在不同应变率冲击荷载下的动态抗压强度,结果表明,岩石的动态抗压强度随应变率的增加呈指数上升趋势,能量耗散也随应变率呈线性增加。

上述研究表明,化学溶液的腐蚀会引起岩石力学性能的劣化及内部结构变化,但以下两方面仍有待完善:(1)目前关于水-岩相互作用对岩石力学特性影响的研究主要集中于单轴和三轴压缩试验,对岩石的动态力学特性的研究并不充分;(2)酸性溶液对砂岩的腐蚀及劣化机制尚未完全明确。因此,本文以河北唐山地区红砂岩为研究对象,制备了 3 种不同 pH 溶液加速腐蚀的试样,通过 SHPB 装置在 5 种不同冲击气压下进行动态力学试验,从宏观角度探究化学溶液对砂岩动态强度、变形、耗能比及分形维数的影响规律;并结合 X 射线衍射(XDR)和扫描电镜(SEM)等手段,定量分析了酸性溶液对砂岩矿物组成含量、微观表面形貌及微观结构分形维数的影响,从微观角度解释了化学溶液对砂岩的劣化机制。

1 试验概况

1.1 材料与试样制备

试验所用砂岩试样取自河北省唐山市某矿区。XRD 分析结果表明,砂岩试样由石英(52.7%)、长石(33.4%)、白云母(7.6%)、高岭石(5.1%)和赤铁矿(1.2%)组成。将整块砂岩运至实验室,根据 ISRM 建议,将其加工成 Φ25 mm×50 mm 的标准圆柱形岩石试样,样品直径误差<0.3 mm,上下两端平行度<0.05 mm,并确保试样轴线垂直于试样两端平面。为降低试验数据的离散性,剔除了纵波波速差异较大的试样。最终用于试验样品的纵波波速范围为 2 358~2 660 m/s,密度范围为 2.18~2.31 g/cm^3。

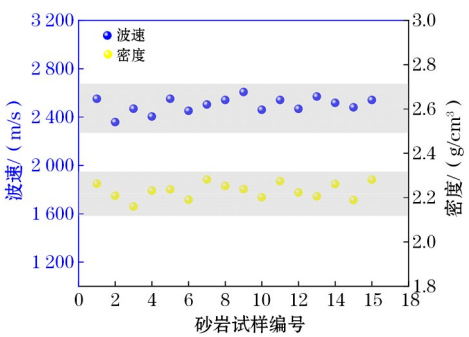


图 1 试样波速与密度

Fig.1 Wave velocity and density of specimen

1.2 化学溶液腐蚀处理

为探究酸性溶液对砂岩试样动态力学特性的影响,本研究配置了 pH 为 3 和 5 的 HCl 溶液,用于浸泡砂岩试样;同时设置了 pH 为 7 的蒸馏水浸泡及保持自然状态下的两组试样作为试验对照组。试验采用强酸加速腐蚀替代实际弱酸长期腐蚀过程[14],以实验室条件模拟岩石长期处于弱酸侵蚀环境。经测定,酸性溶液中的 H^+ 浓度一般在 25~30 d 内趋于稳

定，因此设定 30 d 为一个腐蚀周期，每个周期结束后更换一次溶液，确保溶液成分与 pH 保持不变。整个腐蚀过程持续 150 d，直至溶液中不再出现肉眼可见的絮状物或气泡为止。为防止空气中 CO_2 对酸性溶液 pH 造成干扰，试验采用烧杯浸泡试样，并使用塑料薄膜对烧杯口进行密封处理。

1.3　试验设备与试验方法

为探究腐蚀后砂岩的矿物组成及微观结构特征，本研究采用 X 射线衍射（XRD）和扫描电镜（SEM）对试样进行分析。随后使用霍普金森压杆对其进行动态冲击试验，以获取其动态力学特性。具体试验流程如图 2 所示。

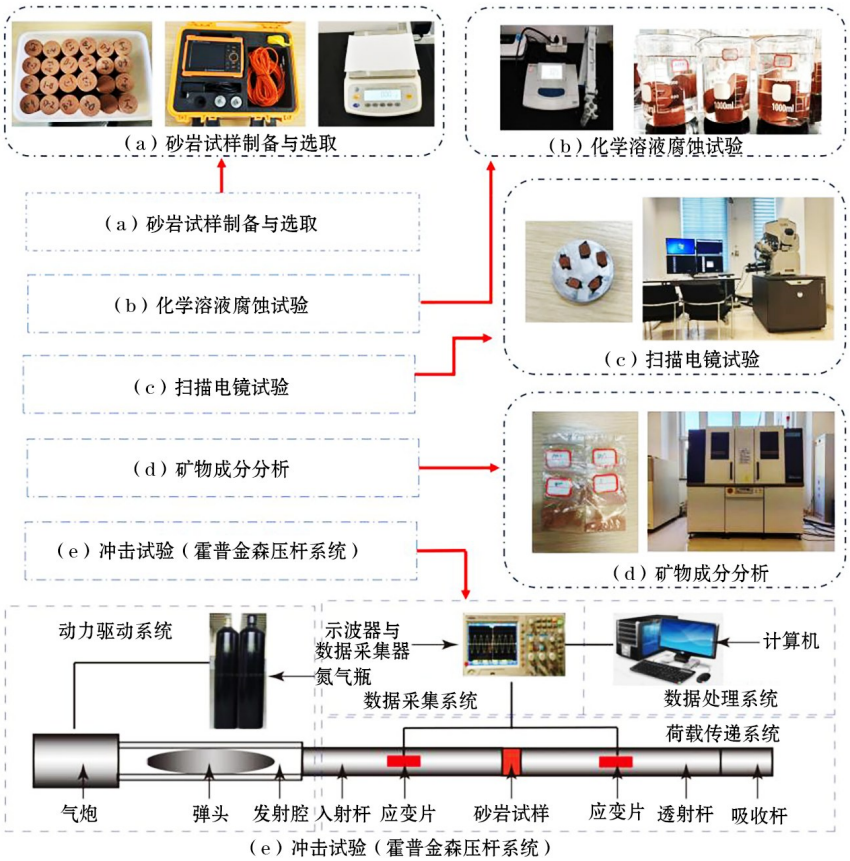


图 2　试验流程

Fig.2　Test process

为分析不同溶液腐蚀后砂岩矿物成分的变化规律与相对含量，使用 D/MAX2500PC 型 X 射线衍射仪对不同腐蚀程度的砂岩试样进行 XDR 试验分析，包括全岩矿物组成分析和黏土矿物组成分析。扫描电镜（SEM）在岩石力学领域已经广泛使用，通过设置不同放大倍数来观测岩石孔隙结构和不同矿物特征，真实反映腐蚀后岩石的微观形态。本试验使用聚焦离子束场发射扫描电子显微镜进行 SEM 试验。

SHPB 试验采用分离式水平霍普金森压杆，该系统由动力驱动系统、荷载传递系统、数据采集系统和数据处理系统 4 部分组成。试验开始前，在试样两端涂抹凡士林，降低端部效应。应力均匀性验证结果如图 3 所示。

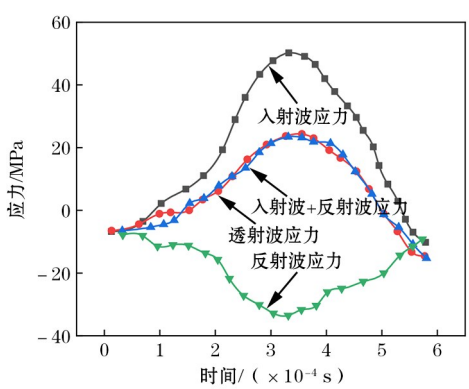


图 3　应力均匀性验证结果

Fig.3　Verification results of stress uniformity

由图 3 可知，入射波应力与反射波应力之和与透射波应力图形吻合较好，表明试件在加载过程中满足

动态应力平衡条件。随后,对溶液加速腐蚀的砂岩试样进行动态力学试验,冲击气压分别设置为 0.20 MPa、0.25 MPa、0.30 MPa、0.35 MPa、0.40 MPa,共 5 种工况,对应的应变率分别为 58.06 s^{-1}、77.85 s^{-1}、108.40 s^{-1}、151.84 s^{-1}、191.65 s^{-1}。试验结束后,采用式(1)所描述的三波法[17]计算试样在冲击过程中应力 σ、应变 ε 及应变率 $\dot{\varepsilon}$ 随时间的变化情况。

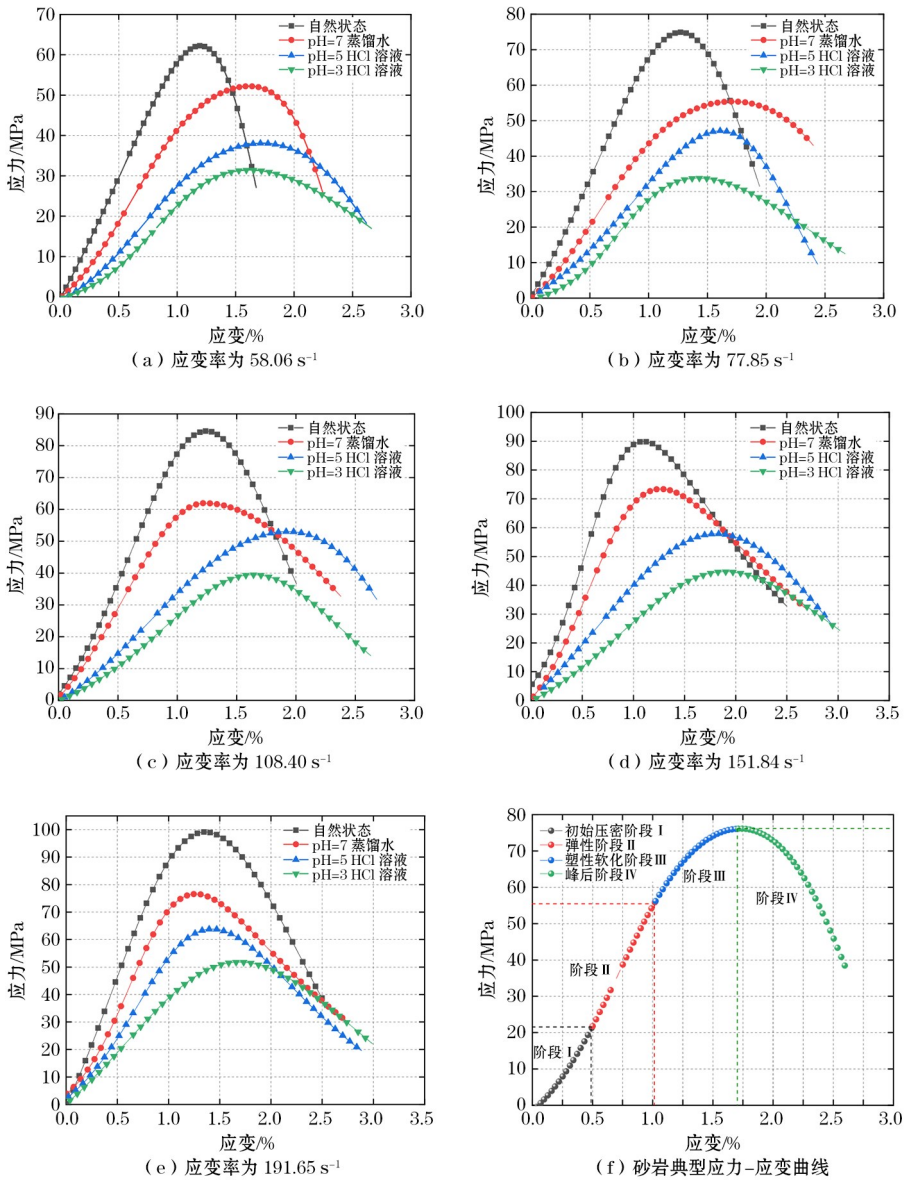
$$\begin{cases}\sigma=\dfrac{A}{2A_0}E_0[\varepsilon_I(t)+\varepsilon_R(t)+\varepsilon_T(t)]\\ \varepsilon=\dfrac{u_1-u_2}{L}=\dfrac{C}{L}\displaystyle\int_0^t[\varepsilon_I(t)-\varepsilon_R(t)-\varepsilon_T(t)]\mathrm{d}t\\ \dot{\varepsilon}=\dfrac{C}{L}[\varepsilon_I(t)-\varepsilon_R(t)-\varepsilon_T(t)]\end{cases}\quad(1)$$

式中:A 为杆件截面面积;A_0 为试件截面面积;E_0、C、L 分别为弹性杆的弹性模量、一维弹性纵波速度和试件的长度;下标 I、R 和 T 分别是应变采集系统记录的入射波、反射波和透射波。

2 腐蚀岩样动态响应结果分析

2.1 动态应力-应变曲线特征

基于分离式霍普金森压杆(SHPB)试验结果,得到了砂岩试样在 5 种不同冲击气压下的动态应力-应变曲线,如图 4 所示。图 4(f)为砂岩试样的典型应力-应变曲线。在不同应变率条件下,砂岩的动态抗压应力-应变曲线呈现出初始压密阶段、弹性阶段、塑性软化阶段和峰后阶段 4 个阶段。



(a) 应变率为 58.06 s^{-1}　(b) 应变率为 77.85 s^{-1}

(c) 应变率为 108.40 s^{-1}　(d) 应变率为 151.84 s^{-1}

(e) 应变率为 191.65 s^{-1}　(f) 砂岩典型应力-应变曲线

图 4 动态应力-应变曲线

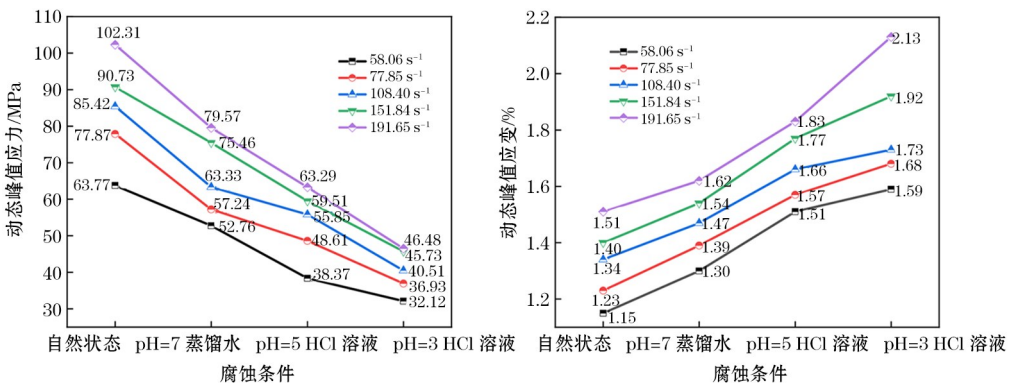
Fig.4 Dynamic stress-strain curves

阶段Ⅰ:初始压密阶段,此阶段由于砂岩试件初始状态下存在许多微裂纹,在冲击载荷的作用下,微裂纹逐渐闭合。阶段Ⅱ:弹性阶段,此阶段应力波在试件中反复传播并逐渐实现应力和应变的均匀分布,原始裂隙逐渐闭合,弹性能量不断增加,试件处于弹性变形状态。阶段Ⅲ:塑性软化阶段,随着岩石试件内部能量的不断积累,原有裂隙开始扩展并伴随新生裂隙产生,试件的变形以塑性变形为主,且裂隙迅速扩展。阶段Ⅳ:峰后阶段,裂纹贯通导致试件达到其最大抗压强度后,强度开始下降,裂纹进一步贯通并加剧试样的最终破坏。

2.2 腐蚀后砂岩动态力学特性

图 5(a)、图 5(b)分别展示了不同应变率下砂岩试样的动态峰值应力与动态峰值应变。从图 5(a)可以看出,随着溶液 pH 的降低,砂岩试样动态峰值应力总体呈下降趋势。以应变率 58.06 s^{-1} 为例,与自然状态试样相比,蒸馏水浸泡后的砂岩试样动态峰值应力降低了 11.01 MPa,降幅为 17.27%;经 pH=5 的 HCl 溶液腐蚀后,应力降低了 25.40 MPa,降幅为 39.83%;经 pH=3 的 HCl 溶液腐蚀后,应力降低了 31.65 MPa,降幅为 49.63%。由图 5(b)可知,砂岩试样的动态峰值应变随溶液酸度增强而显著增大,表现出明显的正相关关系。以应变率 58.06 s^{-1} 为例,随着溶液酸度增强,砂岩动态峰值应变的增幅依次为 13.04%、31.30%、38.26%。

上述结果表明,化学溶液腐蚀会劣化砂岩试样的动态力学特性,具体表现为:酸性环境会降低砂岩的承载能力,导致其动态峰值应力下降。同时,化学溶液浸泡使砂岩内部孔隙结构趋于松散,更容易发生塑性变形和破坏,从而使动态峰值应变增大。



(a) 砂岩试样的动态峰值应力　　(b) 砂岩试样的动态峰值应变

图 5　不同情况下砂岩峰值应力和峰值应变

Fig.5　Peak stress and peak strain of sandstone under different conditions

2.3 腐蚀后砂岩能量耗散规律

SHPB 试验系统中的入射能 W_I、反射能 W_R 及透射能 W_T 的计算公式[15] 如下:

$$\begin{cases} W_I = E_0 C A_0 \int_0^t \varepsilon_I^2(t)\,\mathrm{d}t \\ W_R = E_0 C A_0 \int_0^t \varepsilon_R^2(t)\,\mathrm{d}t \\ W_T = E_0 C A_0 \int_0^t \varepsilon_T^2(t)\,\mathrm{d}t \end{cases} \tag{2}$$

试验前,在杆件与砂岩试样的接触面涂抹凡士林以减小摩擦效应。根据能量守恒定律,假设入射波的能量完全转化为反射波和透射波的能量及试件的力学响应,对花岗岩试样所做的功等于其所吸收的能量。因此,砂岩试样在冲击过程中的耗散能 W_d 可近似表示为吸收的能量[16]:

$$W_d = W_I - (W_R + W_T) \tag{3}$$

表 1 列出了不同腐蚀条件下砂岩试样在不同应变率下的各部分能量值。为研究化学溶液对砂岩能量耗散规律的影响,引入耗能比 η 来衡量岩样破碎过程中吸收能量的能力:

$$\eta = \frac{W_d}{W_I} \times 100\% \tag{4}$$

表 1　砂岩冲击过程中各部分能量

Table 1　Energy of each part of sandstone in the impact process

腐蚀条件	应变率/ s^{-1}	入射能 W_I/ J	反射能 W_R/ J	透射能 W_T/ J	耗散能 W_d/ J	耗能比 η/ %
自然状态	58.06	67.83	8.69	30.45	28.69	42.30
	77.85	93.54	7.02	42.81	43.71	46.73
	108.40	147.05	14.96	53.34	78.75	53.56
	151.84	188.73	15.25	67.93	105.55	55.93
	191.65	231.65	16.58	82.71	132.36	57.14
pH=7 蒸馏水	58.06	73.46	10.43	33.52	29.51	40.17
	77.85	104.57	11.13	45.67	47.77	45.68
	108.40	153.85	6.77	68.54	78.54	51.05
	151.84	194.31	21.63	67.43	105.25	54.17
	191.65	245.26	19.62	88.69	136.95	55.84

续表

腐蚀条件	应变率/s^{-1}	入射能 W_I/J	反射能 W_R/J	透射能 W_T/J	耗散能 W_d/J	耗能比 η/%
pH=5 HCl 溶液	58.06	77.39	10.07	41.38	25.94	33.52
	77.85	107.64	18.71	45.93	43.00	39.95
	108.40	158.45	19.65	66.82	71.98	45.43
	151.84	199.83	31.09	73.57	95.17	47.63
	191.65	250.60	24.65	103.24	122.71	48.97
pH=3 HCl 溶液	58.06	79.33	11.04	48.76	19.53	24.62
	77.85	109.64	19.28	59.37	30.99	28.27
	108.40	161.42	36.22	73.49	51.71	32.03
	151.84	203.58	48.42	86.27	68.89	33.84
	191.65	246.35	46.69	108.81	90.85	36.88

图 6 为不同溶液腐蚀后砂岩的平均耗能比。由图 6 可知,随着溶液 pH 降低,各应变率下砂岩试样的耗能比均出现不同程度的下降。以 pH=3 的 HCl 溶液腐蚀为例,随着应变率的增加,耗能比 η 增幅分别为 14.83%、34.75%、30.10%、49.80%。这是由于随着酸性溶液的腐蚀,砂岩试样受到一定程度的劣化,导致动态荷载作用下岩样更容易破碎。因此在动态荷载作用下,砂岩试样仅需吸收较少能量即可发生破碎,从而表现出耗能比下降的情况。

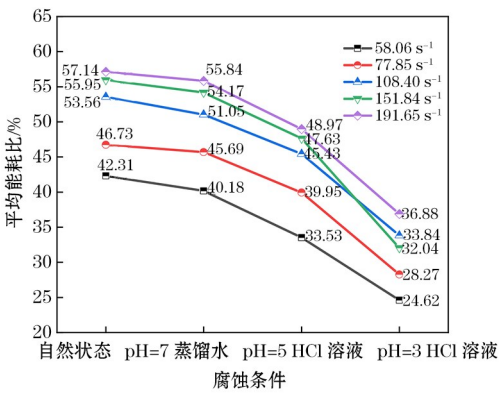


图 6 砂岩平均耗能比

Fig.6 Average energy dissipation ratio of sandstone

2.4 腐蚀后砂岩宏观破坏规律

在岩石动态力学试验中,试样破坏后的破碎特征是评估岩石破坏程度的重要依据。这一特征主要受冲击荷载条件与岩石微观结构共同影响。因此,通过观察砂岩宏观破坏特征可以直观地分析化学溶液的腐蚀作用对砂岩试样破坏模式的影响。

图 7 展示了砂岩试样的破坏形态。由图 7 可知,随着溶液腐蚀程度的加剧,砂岩试样破坏产生的碎块数量增多,且破碎程度也相应增大,其破坏形态由柱状变为锥状,说明随着溶液腐蚀增强,破坏模式呈现出从张拉破坏向剪切破坏过渡的趋势。

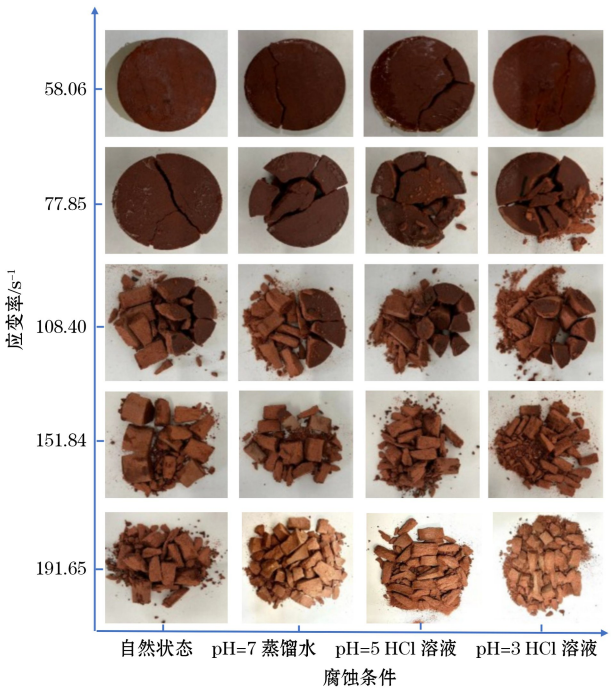


图 7 不同腐蚀程度和应变率下砂岩的破坏特征

Fig.7 Failure characteristics of sandstone under different corrosion degrees and strain rates

引入分形维数 D 定量描述化学溶液对砂岩试样破坏程度的影响。使用块度-质量法计算试样碎块的分形维数。将碎块分成 8 个粒径范围,分别为 ≤1.0 mm、1.0~2.5 mm、2.5~5.0 mm、5.0~10.0 mm、10.0~20.0 mm、20.0~25.0 mm、25.0~31.5 mm、≥31.5 mm。将碎块进行烘干处理后,使用分级筛对其进行筛分,并称取每级筛孔上破碎岩样的质量。通过式(5)[17]计算分形维数。

$$D=3-\frac{\ln\dfrac{M_R}{M}}{\ln R} \tag{5}$$

式中:M_R 为尺寸小于 R 的碎块质量;M 为试样总质量;R 为筛孔尺寸。

图 8 展示了不同腐蚀程度下砂岩试样的分形维数。从图 8 可以看出,不同应变率下,砂岩试样的分形维数均随溶液酸度增加而变大,且增幅随化学溶液酸度呈先增大后减小的变化趋势。以应变率 108.40 s^{-1} 为例,蒸馏水浸泡后,砂岩的分形维数增幅为 21.01%,pH=5 的 HCl 溶液浸泡后,砂岩的分形维数增幅为 40.97%,pH=3 的 HCl 溶液浸泡后,砂岩的分形维数增幅为 15.76%。这说明水对砂岩存在劣化作用,但其影响程度明显弱于 HCl 溶液。这是因为在常规条件下,蒸馏水和砂岩之间并不会出现明显的化学反

应，但蒸馏水会使砂岩中的氧化物等胶结物质发生水解，从而弱化砂岩结构的稳定性；HCl 溶液属于一种强酸，在与砂岩反应过程中，溶液中的 H^+ 会溶解构成砂岩的碱性矿物，或与其发生化学反应，使砂岩结构稳定性变差，且反应发生的剧烈程度与 H^+ 呈正相关。因此，随着化学溶液酸性的增强，砂岩在冲击荷载作用下的破碎分形维数呈逐渐增大的趋势。

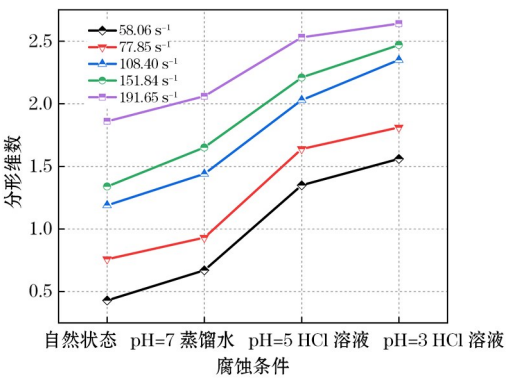


图 8　砂岩试样分形维数随溶液 pH 及应变率的变化

Fig.8　Variation of fractal dimension of sandstone samples with solution pH and strain rate

3　矿物成分变化及劣化机制

3.1　矿物成分(XRD)及质量分数变化规律

图 9 为经不同 pH 溶液加速腐蚀后砂岩试样的 XRD 谱图。

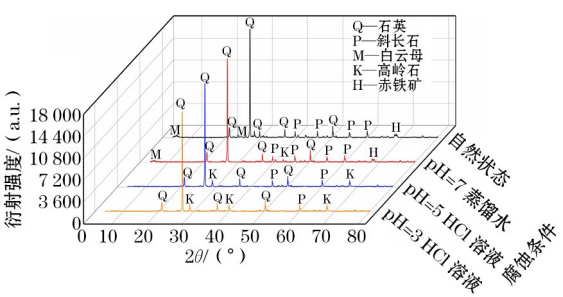


图 9　不同溶液浸泡后砂岩试样的 XRD 谱图

Fig.9　XRD patterns of sandstone samples after immersion in different solutions

从图 9 可以看出，试验所用砂岩试样由大量石英，少量斜长石、白云母、高岭石和赤铁矿组成，经过不同 pH 溶液加速浸泡后，衍射峰值出现明显差异。表 2 列出了不同溶液浸泡后试样的矿物组成及其质量分数。由表 2 可知，经过 pH＝7 的蒸馏水浸泡后，石英、斜长石等主要矿物颗粒的质量分数较自然状态下有小幅增高，前者增长 1.6 个百分点，后者增长 1.3 个百分点；而白云母、高岭石、赤铁矿的质量分数则分别下降 1.9，0.8，0.2 个百分点。这是由于砂岩试样中的赤铁矿等氧化物在水中发生简单水解反应所致。经过 HCl 溶液加速腐蚀后，砂岩试样中石英、高岭石含量增加，白云母、斜长石含量明显降低。这是因为溶液中的 H^+ 与白云母、斜长石发生化学反应生成质地松软的高岭石和石英。石英几乎不与 HCl 溶液发生反应，且反应程度与 H^+ 浓度成正比，从而导致不同 pH 溶液浸泡后砂岩试样 XRD 谱图中矿物成分呈现上述变化趋势。

表 2　不同溶液浸泡后砂岩试样矿物组成及质量分数

Table 2　Mineral composition and mass fraction of sandstone samples after immersion in different solutions　%

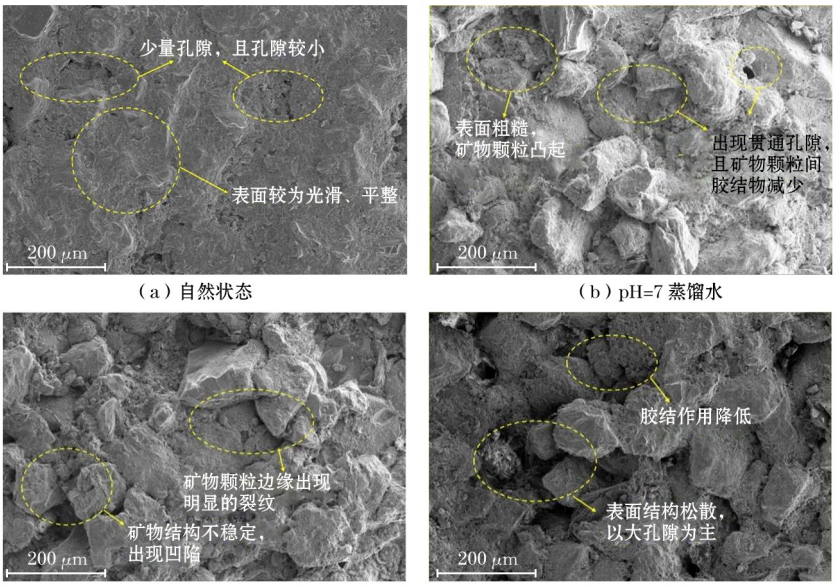
腐蚀条件	石英	斜长石	白云母	高岭石	赤铁矿
自然状态	52.7	33.4	7.6	5.1	1.2
pH＝7 蒸馏水	54.3	34.7	5.7	4.3	1.0
pH＝5 HCl 溶液	60.2	19.3	3.2	17.3	—
pH＝3 HCl 溶液	66.7	10.4	2.5	20.4	—

3.2　扫描电镜(SEM)试验分析

3.2.1　砂岩 SEM 图像形貌特征

在外力作用下，砂岩的力学特性受其矿物颗粒间胶结特征的直接影响。胶结特征包含了砂岩颗粒胶结处的接触特性、胶结程度等。除胶结特性外，矿物颗粒自身的刚度也对砂岩力学行为具有重要作用。为探究化学溶液对砂岩试样的劣化机制，采用扫描电镜(SEM)观察不同溶液浸泡后砂岩试样的演化过程。分别观测 500 倍、1 000 倍、2 000 倍下砂岩的 SEM 图像，以获取不同溶液腐蚀后砂岩试样内部矿物颗粒胶结特征、结构细节和表面形貌特征。

图 10 为 500 倍下砂岩试样的 SEM 图像。从图 10(a)可以看出，自然状态下砂岩试样以矿物颗粒和胶结物质为基本骨架。颗粒被胶结物均匀包裹，表面致密，仅存在少量初始孔隙和微裂纹。矿物颗粒间主要为咬合接触。经过蒸馏水浸泡后，胶结物因水解作用发生明显溶蚀，矿物颗粒显露突出。颗粒间的接触以面面接触、胶结接触为主。pH＝5 的 HCl 溶液腐蚀后，胶结物与酸性溶液发生化学反应，生成物以离子形式溶入溶液，导致孔隙结构发育，连通性增强。矿物颗粒接触方式转为孔隙接触。pH＝3 的 HCl 溶液对砂岩的劣化机制与前者相似，不同的是 H^+ 浓度的增加会引起劣化程度加剧，导致孔隙连通度增加，并出现矿物颗粒间的空腔现象，因此其接触方式以孔隙接触、点点接触为主。由此可见，化学溶液对砂岩的劣化作用之一是通过改变颗粒骨架的接触方式，降低胶结程度。在力学试验过程中，矿物颗粒间因无法充分接触而易发生滑移与错动，直接导致砂岩强度下降。化学溶液作用引起的颗粒接触模型示意如图 11 所示。



（a）自然状态　（b）pH=7 蒸馏水

（c）pH=5 HCl 溶液　（d）pH=3 HCl 溶液

图 10　500 倍下砂岩试样的 SEM 图像

Fig.10　SEM images of sandstone samples under 500 times

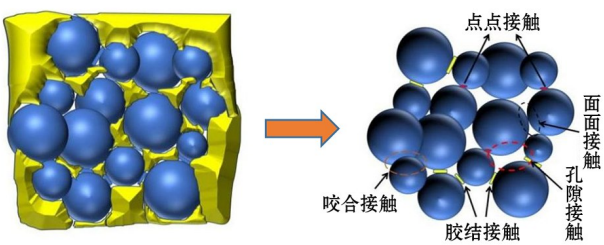
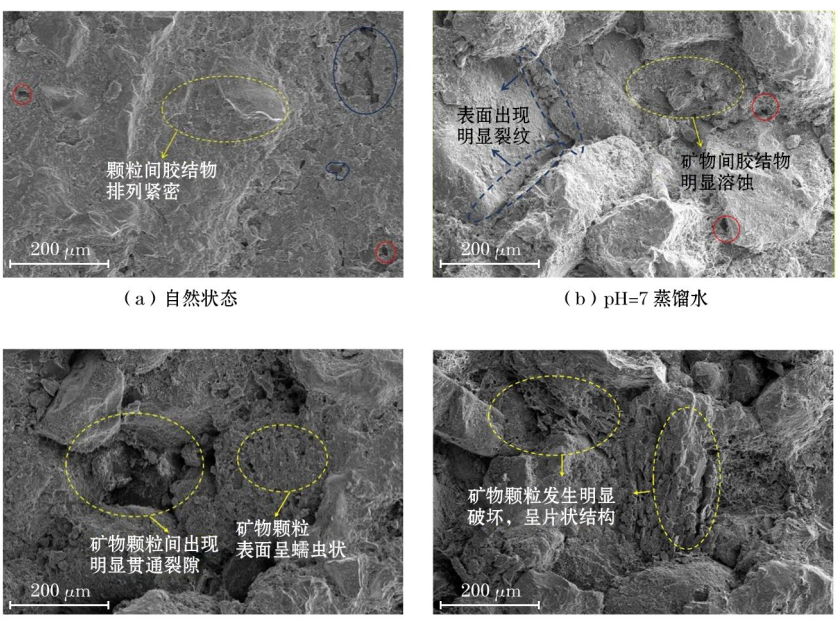


图 11　颗粒接触模型示意

Fig.11　Schematic diagram of particle contact model

图 12 为 1 000 倍下砂岩试样的 SEM 图像。自然状态下颗粒间胶结物均匀填充于颗粒间隙，形成较为完整的联结结构，仅存在局部小面积的不规则孔隙与空洞。蒸馏水浸泡后，颗粒间胶结物出现明显的溶蚀现象，表现为结构松散，颗粒轮廓呈蠕虫状，且颗粒边界处出现明显裂纹。pH＝5 的 HCl 溶液腐蚀后，胶结物腐蚀严重，与自然状态相比，出现明显的空腔区和大孔隙区域。pH＝3 的 HCl 溶液腐蚀后，胶结物基本失去联结作用，矿物颗粒明显凸出，并存在大量空腔区域。



（a）自然状态　（b）pH=7 蒸馏水

（c）pH=5 HCl 溶液　（d）pH=3 HCl 溶液

图 12　1 000 倍下砂岩试样的 SEM 图像

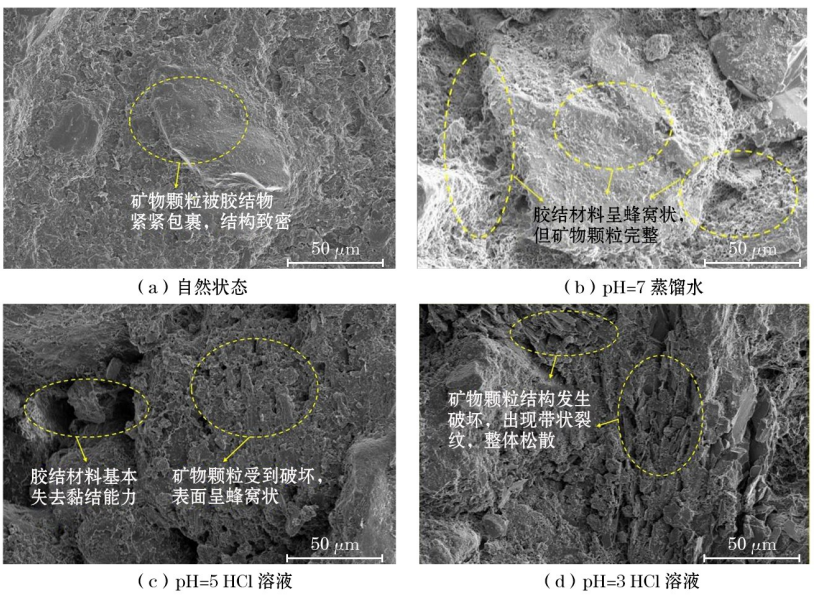
Fig.12　SEM images of sandstone samples under 1 000 times

图 13 为 2 000 倍下砂岩试样的 SEM 图像。自然状态下,矿物颗粒平整光滑,说明本身刚度较好;蒸馏水浸泡也不会引起颗粒结构本身发生物相变化。值得注意的是,经过不同 pH 的 HCl 溶液腐蚀后,矿物颗粒形貌发生明显变化,表现为失去原有的平整度,甚至颗粒表面呈蜂窝状破坏。这说明化学溶液的腐蚀对颗粒刚度造成一定程度的破坏。

3.2.2 微观结构分形维数变化规律

分形维数在表征固体表面微观结构的不规则性及其复杂程度方面已有了广泛应用,可将其应用于定量表征不同 pH 化学溶液浸泡后砂岩试样的损伤演化规律。根据分形理论,挑选合适的扫描电镜照片,使用 Adobe Photoshop 软件对照片进行灰度处理,并选择合适的阈值将其进行二值化处理,利用 MATLAB 软件进行盒维数法计算其分形维数,选用边长为 δ 的盒子覆盖孔隙表面,并统计完全覆盖二值图像所需的网格数 $N(\delta)$,盒子的边长 δ 根据照片大小自动选择,最大为 1/2,最小为 1/1 024。图 14 展示了盒维数法计算孔隙分形维数的流程,微观结构分形维数 D_S 计算公式见式(6),其值等于拟合曲线的斜率。选取放大 500 倍的 SEM 图像中的 12 个数据点进行分形维数的拟合计算,结果如图 5 所示。

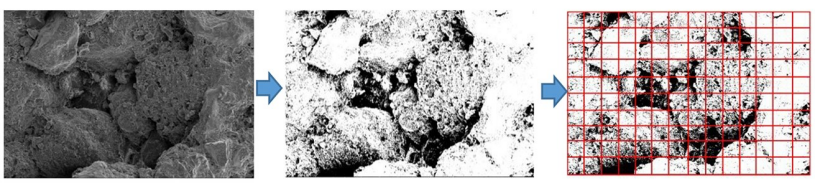
$$D_S=-\lim_{\delta\to 0}\frac{\ln N(\delta)}{\ln\delta} \tag{6}$$



(a) 自然状态　(b) pH=7 蒸馏水　(c) pH=5 HCl 溶液　(d) pH=3 HCl 溶液

图 13　2 000 倍下砂岩试样的 SEM 图像

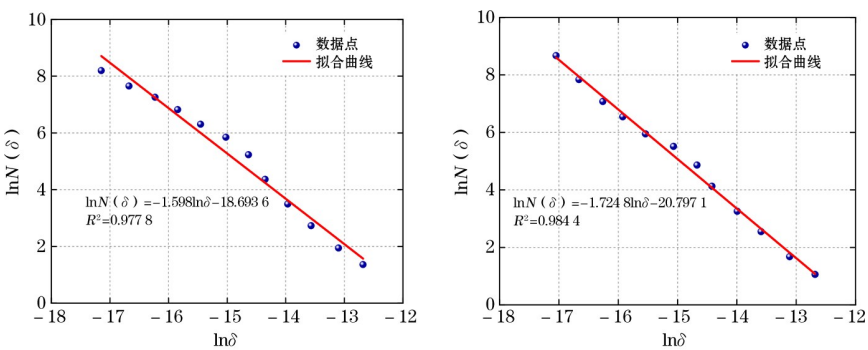
Fig.13　SEM images of sandstone samples under 2 000 times



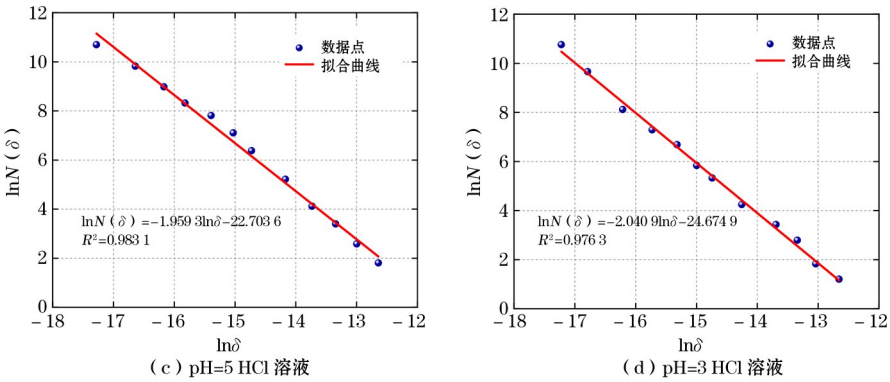
(a) 原始图像　(b) 二值化处理　(c) 盒维数法方格划分

图 14　盒维数法计算流程

Fig.14　Calculation flowchart of the box-counting dimension method



(a) 自然状态　(b) pH=7 蒸馏水



(c) pH=5 HCl 溶液　　(d) pH=3 HCl 溶液

图 15　SEM 图像微观结构分形维数拟合结果

Fig.15　Fitting results of fractal dimension for SEM image microstructure

为定量描述化学溶液对砂岩试样的损伤作用，利用差分法对不同状态(自然、蒸馏水浸泡及不同 pH 酸性溶液腐蚀)下砂岩试样的微观结构分形维数进行分析，并定义损伤率 d_s 以衡量不同 pH 化学溶液对砂岩试样的损伤程度，计算方法见式(7)。

$$d_s=\frac{\Delta D}{D_0}=\frac{D_S-D_0}{D_0} \tag{7}$$

式中：d_s 为损伤率，%；D_0 为自然状态下砂岩试样表面的微观结构分形维数；D_S 为不同溶液浸泡后砂岩试样表面的微观结构分形维数。

砂岩试样经过不同溶液浸泡后，表面分形维数拟合结果和损伤率的变化规律见表 3 和图 16。由图 16 可知，随着溶液 pH 降低，砂岩试样微观结构分形维数和损伤率逐渐增加。这说明化学溶液的浸泡会导致砂岩表面孔隙结构更为复杂，且其复杂程度与溶液酸度呈正相关关系。基于表面分形维数分析得出的结论与上述 SEM 图像形貌特征相符，说明盒维数法适用于定量描述砂岩试样经溶液腐蚀作用下的损伤演化规律。

表 3　微观结构分形维数拟合结果

Table 3　Fitting results of fractal dimension for microstructure

腐蚀条件	微观结构分形维数 D_S	微观结构拟合函数	拟合度 R^2	损伤率 d_s/%
自然状态	−1.598 0	$\ln N(\delta)=-1.598\ 0\ln\delta-18.693\ 6$	0.977 8	—
pH=7 蒸馏水	−1.724 8	$\ln N(\delta)=-1.724\ 8\ln\delta-20.797\ 1$	0.984 4	7.935 0
pH=5 HCl 溶液	−1.959 3	$\ln N(\delta)=-1.959\ 3\ln\delta-22.703\ 6$	0.983 1	22.609 5
pH=3 HCl 溶液	−2.040 9	$\ln N(\delta)=-2.040\ 9\ln\delta-24.674\ 9$	0.976 3	27.715 9

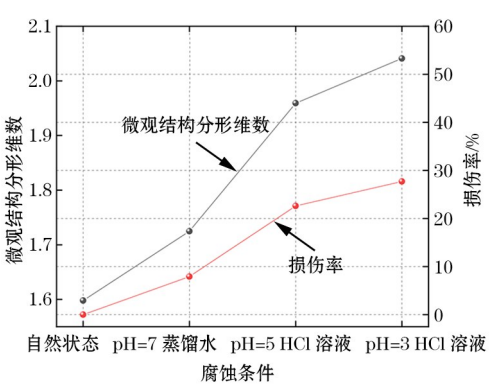


图 16　SEM 图像分形维数与损伤率

Fig.16　Fractal dimension and damage rate of SEM images

4　讨论

砂岩试样在 HCl 溶液中浸泡后发生劣化的主要原因为酸性溶液中的 H^+ 使填充在石英颗粒周围的白云母、斜长石和赤铁矿等胶结成分和矿物颗粒转化为离子态游离于溶液中，或进一步反应生成 SiO_2 和高岭石。新生成的 SiO_2 在酸性溶液中可逆向转化为 H_4SiO_4，并呈无定形态分布于孔隙中。化学溶液腐蚀过程结束后，对砂岩试样进行烘干，新生成的 SiO_2 以粉末状存在于微观颗粒表面，增加了砂岩试样微观结构的不均匀性。因此，在反应过程中，砂岩初始结构遭到破坏，形成微孔洞等缺陷，主要表现为矿物颗粒间接触方式发生明显变化。在 SHPB 动态力学试验过程中，试样内部出现应力集中，导致力学性能明显弱化，其宏观力学弱化趋势以及破碎特征定量计算得出的宏观分形维数变化规律与 SEM 图像微观分形维数所得出的损伤率变化趋势一致。

根据能量守恒定律，岩石在冲击荷载作用下所吸收的耗散能主要转化为 3 种形式：(1)微裂纹萌

生、扩展和贯通产生的断裂损伤能;(2)导致岩屑飞溅的动能;(3)热能等其他形式的耗散量。一般来说,在高应变率加载条件下,热能等耗散能可忽略不计。已有研究表明,造成岩屑飞溅的动能仅占岩石吸收总能量的 5%左右,而裂纹扩展和断裂损伤所需的能量占比超过 95%。因此,可近似认为,岩石吸收的能量全部用于裂纹的萌生、扩展和贯通,即吸收能量近似等于耗散能。因此,化学腐蚀对耗能比影响的主要原因是:微观上化学腐蚀引起砂岩微裂纹、孔隙萌生和矿物结构的变化导致砂岩在宏观破坏过程中,裂纹扩展与成核所需能量降低。因此,在动态加载时,试样只吸收较少能量即可发生破坏,表现为耗散能下降。

另外,由图 17 酸-岩反应概化模型[18]可知,腐蚀后试样可以分为残物区和未反应区,残物区内腐蚀程度严重,出现不均匀区。当应力波到达试件端部时,残物区由于应力集中最先被破坏。而未反应区的腐蚀程度较轻,试样主要通过中心开裂和边缘破碎的方式发生破坏,从而导致不同试样的破坏形式出现差异,且分形维数显著增大。

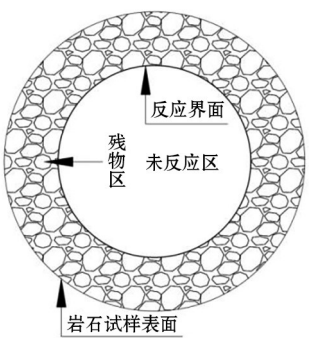


图 17 酸-岩反应概化模型

Fig.17 Generalized model of acid-rock reaction

5 结论

本文通过开展不同 pH 溶液腐蚀后砂岩在不同应变率下的动态压缩试验,结合 X 射线衍射与 SEM 扫描电镜分析,探究化学溶液对砂岩劣化机制和动态力学性能的影响,得出以下结论。

(1) 化学溶液腐蚀会导致砂岩动态峰值应力降低,动态峰值应变增大。以应变率为 58.06 s^{-1} 为例,随着溶液酸性增强,砂岩动态峰值应力降幅分别为 17.27%、39.83%、49.63%;动态峰值应变随溶液酸度增加而增大,增幅分别为 13.04%、31.30%、38.26%。随着化学溶液酸度的提高,砂岩孔隙结构复杂化,冲击荷载下砂岩试样更容易破碎,裂纹扩展过程所耗散的能量减少,因而耗能比下降。表征试样破碎程度的分形维数随溶液酸度增加呈逐渐增大的趋势。

(2) XRD 和 SEM 的测试结果表明,蒸馏水会与砂岩胶结物质中的赤铁矿等碱性氧化物发生简单水解反应;HCl 溶液会与砂岩中的斜长石和云母分别生成高岭石和 SiO_2,导致两种主要矿物颗粒表面呈蠕虫状,颗粒刚度降低,同时溶解了主要矿物颗粒间的胶结物质,改变了原始颗粒接触方式。

(3) 砂岩微观结构分形维数和损伤率随化学溶液酸度的增加而增加,分形维数增量分别为 0.126 8,0.361 3, 0.442 9;损伤率分别为 7.935 0%、22.609 5%、27.715 9%。这说明化学溶液侵蚀会导致砂岩表面孔隙结构更为复杂,研究结果与 SEM 形貌特征相符,表明盒维数法适用于定量描述砂岩试样经溶液腐蚀后的损伤演化规律。

参考文献(References):

[1] 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 Yongsheng, ZOU Jiayu, WU Qiulan, et al. Properties of layered composite rock under chemical corrosion[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2019,41(2):128-134.

[2] 马涛,丁梧秀,王鸿毅,等.酸性水化学溶液侵蚀下不同矿物成分含量灰岩溶解特性及力学特性研究[J].岩土工程学报,2021,43(8):1550-1557.
MA Tao, DING Wuxiu, WANG Hongyi, et al. Dissolution characteristics and mechanical properties of limestone with different mineral composition contents eroded by acid chemical solution[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2021,43(8):1550-1557.

[3] 苗子臻,李曙光,霍润科,等.受酸腐蚀砂岩力学特性及其统计损伤本构模型[J].铁道学报,2023,45(1):141-149.
MIAO Zizhen, LI Shuguang, HUO Runke, et al. Mechanical properties and statistical damage constitutive model of acid-corroded sandstone[J]. Journal of Railway Science,2023,45(1):141-149.

[4] 丁凡,霍润科,李曙光,等.酸性环境下砂岩溶质运移的数学模型及其解析解[J].长江科学院院报,2020,37(11):89-95.
DING Fan, HUO Runke, LI Shuguang, et al. Mathematical model and analytical solution of solute transport in sandstone under acidic environment[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2020,37(11):89-95.

[5] FENG Xiating, WANG Gang, ZHANG Xiwei, et al. Experimental method for direct shear tests of hard rock under both normal stress and lateral stress[J]. International Journal of Geomechanics,2021,21(3):93-98.

[6] LI Ying, ZHANG Nan ,WANG Jingyu , et al.Construction of high-voltage aqueous Zn-MnO_2 batteries based on polar small-molecule organic acid-induced MnO_2/Mn^{2+} reactions [J]. Chemical Engineering Journal,2025,507:160415.

[7] 陈四利,冯夏庭,李邵军.岩石单轴抗压强度与破裂特征的化学腐蚀效应[J].岩石力学与工程学报,2003(4):547-551.
CHEN Sili, FENG Xiating, LI Shaojun. Eeffects of chemical erosion on uniaxial compressive strength and meso-fracturing behaviors of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2003(4):547-551.

[8] CRUNDWELL F K. The impact of light on understanding the mechanism of dissolution and leaching of sphalerite (ZnS), pyrite (FeS_2) and chalcopyrite ($CuFeS_2$)[J]. Minerals Engineering,2021,161:106728.

[9] GONG Fengqiang, NI Yuxin, JIA Hangyu. Effects of specimen size on linear energy storage and dissipation laws of red sandstone under uniaxial compression[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment,2022,81(9):183-191.

[10] GONG Fengqiang, WANG Yunliang, WANG Qi. Peak-strength strain energy storage index for evaluating coal burst liability based on the linear energy storage law[J]. Geohazard Mechanics,2023,1(2):153-161.

[11] QIN Shuo, WANG Ren, SHI Wanzhong, et al. Intragranular fractures within tight sandstone reservoirs in the Hangjinqi area, northern Ordos Basin, China: Morphology, intensity and controlling factors[J]. Geoenergy Science and Engineering,2023,231:212376.

[12] 李晓锋.强冲击荷载下岩石材料断裂及破碎机制研究[J].岩石力学与工程学报,2021,40(2):432-437.
LI Xiaofeng. Research on rock fracturing and fragmentation subject to intensive impact loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2021,40(2):432-437.

[13] 张亚宾,周建,艾蕊,等.冲击载荷下石灰石力学特性与能耗规律研究[J].工程爆破,2022,28(2):15-20.
ZHANG Yabin, ZHOU Jian, AI Rui, et al. Study on mechanical properties and energy consumption law of limestone under impact load[J]. Engineering Blasting,2022,28(2):15-20.

[14] 宫凤强,王进,李夕兵.岩石压缩特性的率效应与动态增强因子统一模型[J].岩石力学与工程学报,2018,37(7):1586-1595.
GONG Fengqiang, WANG Jin, LI Xibing. The rate effect of compression characteristics and a unified model of dynamic increasing factor for rock materials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2018,37(7):1586-1595.

[15] 廖志毅,朱建波,唐春安.高地应力作用下岩石和地下硐室的动态力学行为和响应[J].岩土工程学报,2016,38(增刊2):260-265.
LIAO Zhiyi, ZHU Jianbo, TANG Chun'an. Dynamic behavior and response of rock and underground openings subjected to high initial stresses[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2016,38(Suppl.2):260-265.

[16] 赵建宇,刘鑫,胡智航,等.岩石冲击破碎块度分形与能量耗散特征研究[J].有色金属工程,2022,12(12):100-108.
ZHAO Jianyu, LIU Xin, HU Zhihang, et al. Study on fractal and energy dissipation characteristics of rock impact fragmentation[J]. Nonferrous Metals Engineering,2022,12(12):100-108.

[17] 余永强,张文龙,范利丹,等.冲击荷载下煤系砂岩应变率效应及能量耗散特征[J].煤炭学报,2021,46(7):2281-2293.
YU Yongqiang, ZHANG Wenlong, FAN Lidan, et al. Strain rate effect and energy dissipation characteristics of sandstone in coal measures under impact loading[J]. Journal of China Coal Society,2021,46(7):2281-2293.

[18] 霍润科,熊爱华,李曙光,等.受酸腐蚀砂岩的物理化学性质及反应动力学模型研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2020,36(5):893-902.
HUO Runke, XIONG Aihua, LI Shuguang, et al. Physico-chemical properties and reaction kinetic model of acid-corroded sandstone[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science Edition),2020,36(5):893-902.