



## 酸性溶浸液作用下砾岩物理化学及三轴压缩性质研究

杨朋 华心祝 刘啸 韩炎 李琛

### 引用本文：

杨朋, 华心祝, 刘啸, 等. 酸性溶浸液作用下砾岩物理化学及三轴压缩性质研究[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(10): 97–111.  
YANG Peng, HUA Xinzhu, LIU Xiao. Investigation of physicochemical and triaxial compressive properties of conglomerate in acidic leachate[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(10): 97–111.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2025-0427>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 冻融受荷砂岩力学性能劣化与统计损伤模型研究

Study on deterioration of mechanical properties and statistical damage model of freeze–thaw loaded sandstone  
煤炭科学技术. 2024, 52(5): 84–91 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0693>

##### 准噶尔盆地中生代“下煤上铀”地层结构的沉积机理

Sedimentary mechanism analysis of “Lower Coal and Upper Uranium” strata structure in Junggar Basin, Northern China  
煤炭科学技术. 2023, 51(12): 52–64 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0786>

##### 弱胶结巨厚砂砾岩含水层离层突水机制研究

Study on separated layer water burst mechanism for weakly cemented giant thick glutenite  
煤炭科学技术. 2024, 52(2): 209–218 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1681>

##### 煤基石墨烯量子点的制备与理化性质研究进展

Research progress on preparation and physicochemical properties of coal-based graphene quantum dots  
煤炭科学技术. 2023, 51(8): 279–294 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-0659>

##### 冻融荷载共同作用下砂岩损伤力学特性

Damage mechanical properties of sandstone under combined action of freeze–thaw and load  
煤炭科学技术. 2024, 52(12): 94–104 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1691>

##### 巨厚砾岩顶板地面井酸化压裂卸压减冲技术研究

Study on technology of acid fracturing pressure relief and coal burst reduction in surface wells with extremely thick conglomerate roof  
煤炭科学技术. 2025, 53(9): 308–318 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0896>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

杨朋,华心祝,刘啸,等.酸性溶浸液作用下砾岩物理化学及三轴压缩性质研究[J].煤炭科学技术,2025,53(10):97-111.

YANG Peng, HUA Xinzhu, LIU Xiao, et al. Investigation of physicochemical and triaxial compressive properties of conglomerate in acidic leachate[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(10): 97-111.

## 酸性溶浸液作用下砾岩物理化学及三轴压缩性质研究

杨朋<sup>1</sup>,华心祝<sup>2</sup>,刘啸<sup>3</sup>,韩炎<sup>2</sup>,李琛<sup>2</sup>

(1.安徽理工大学 煤炭安全精准开采国家地方联合工程研究中心,安徽淮南 232001;2.安徽理工大学 矿业工程学院,安徽淮南 232001;3.中煤科工集团沈阳研究院有限公司 煤矿安全技术国家重点实验室,辽宁沈阳 110000)

**摘要:**地浸开采过程中溶浸液的渗流作用可能导致隔水层力学性能劣化,进而影响煤铀共采的安全性。以内蒙古地区侏罗系直罗组砾岩隔水层为研究对象,探讨其在酸浸环境下的物理化学性质及力学劣化机制。利用电子秤和原子吸收分光光度计测定砾岩在硫酸溶液中质量和金属阳离子浓度变化规律,利用XRD(X-ray Diffraction)和SEM(Scanning Electron Microscope)分析酸蚀作用下砾岩矿物成分和微观结构随浸泡时间的变化特征。开展三轴压缩试验,研究不同浸泡时间下砾岩的力学响应,分析峰值应力、弹性模量、轴向应变及耗散能密度等参数的变化规律,基于相关性分析量化各参数之间的相关性。结果表明:砾岩质量随酸蚀时间呈现先增加后减少的非线性变化特征,溶液中金属阳离子浓度与质量变化趋势一致,其中 $\text{Ca}^{2+}$ 质量浓度最高,说明方解石与硫酸的化学反应是导致砾岩力学性质劣化的重要原因。酸蚀作用使砾岩胶结物逐渐溶解,内部裂纹扩展,孔隙增多,引起岩石微观结构变化。砾岩峰值强度、弹性模量及屈服应力在浸泡初期(1 d)短暂提升后逐步下降,浸泡20 d后峰值强度较自然状态下降26.69%,且峰值体积应变显著降低。峰后耗散能变化率曲线随着浸泡时间变化逐渐平稳,表明试件的破坏模式随浸泡时间由脆性向延性转变。峰值应力、弹性模量与总应变能密度呈极强正相关(相关性系数 $r>0.8$ ),而金属阳离子浓度可作为砾岩力学性质劣化的表征参数。

**关键词:**砂岩型铀矿;砾岩隔水层;酸蚀作用;物理化学性质;力学劣化机制

中图分类号:TD807 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2025)10-0097-15

### Investigation of physicochemical and triaxial compressive properties of conglomerate in acidic leachate

YANG Peng<sup>1</sup>, HUA Xinzhu<sup>2</sup>, LIU Xiao<sup>3</sup>, HAN Yan<sup>2</sup>, LI Chen<sup>2</sup>

(1. Joint National-Local Engineering Research Center for Safe and Precise Coal Mining, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. School of Mining Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 3. State Key Laboratory of Coal Mine Safety Technology, CCTEG Shenyang Research Institute, Shenyang 110000, China)

**Abstract:** The seepage effect of leaching solution in the process of in-situ leaching mining may lead to the deterioration of the mechanical properties of the aquifuge, and affect the safety of coal uranium co-mining. Taking the conglomerate aquifuge of Jurassic Zhiluo Formation in Inner Mongolia as the research object, the physicochemical properties and mechanical deterioration mechanism under acid leaching environment were discussed. The mass and metal cation concentration of tometer. The variation characteristics of mineral composition and microstructure conglomerate in sulfuric acid solution were measured by electronic balance and atomic absorption spectrophotometer of conglomerate with immersion time were analyzed by XRD and SEM. Triaxial compression tests were carried out to study the mechanical response of conglomerate under different immersion time. The evolution laws of parameters such as peak stress, elastic modulus, axial strain and dissipation energy density were analyzed. The coupling relationship between mechanical parameters and physicochemical parameters was quantified based on correlation analysis. The results show that the mass of conglomerate first increases and then decreases with the acid etching time. The concentration of metal cations in the solution is consistent with the mass change trend, and the concentration of  $\text{Ca}^{2+}$  is

收稿日期:2025-03-27 策划编辑:朱恩光 责任编辑:陈思成 DOI: 10.12438/cst.2025-0427

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(52304126);煤炭安全精准开采国家地方联合工程研究中心开放基金资助项目(EC2023028)

作者简介:杨朋(1991—),男,安徽淮南人,讲师,硕士生导师,博士。E-mail: [pyang@aust.edu.cn](mailto:pyang@aust.edu.cn)

the highest, indicating that the chemical reaction between calcite and sulfuric acid is an important factor leading to the deterioration of mechanical properties of conglomerate. Acid corrosion gradually dissolves the conglomerate cement, expands the internal fractures, and increases the pores, resulting in changes in the rock microstructure. The peak stress, elastic modulus and yield stress of the conglomerate increased briefly in the initial stage (1 d) and then gradually decreased. After 20 days of immersion, the peak stress decreased by 26.69% compared with the natural state, and the peak volumetric strain decreased significantly, indicating that the specimen changed from brittle failure to ductile failure mode. The growth rate of dissipative energy density in the post-peak stage presents the characteristics of “slow-fast-slow”, and the failure process of the specimen is more gentle under the action of long-time acid leaching. The peak stress, elastic modulus and total strain energy density have a strong positive correlation ( $r>0.8$ ), and the metal cation concentration can be used as a characterization parameter for the deterioration of mechanical properties of conglomerate.

**Key words:** sandstone type uranium deposit; conglomerate aquifuge; acid etching; physicochemical properties; mechanical deterioration

## 0 引言

砂岩型铀矿在我国分布广泛,占铀矿资源的43%<sup>[1]</sup>。对于疏松砂岩型铀矿多采用原地浸出开采(简称地浸开采),通过地面钻孔将溶浸液注入含矿含水层,在化学反应之后,将含铀浸出液提升至地面进行提取<sup>[2]</sup>。内蒙古、新疆等地赋存有大量砂岩型铀矿,成矿时期为侏罗系中统直罗组。铀矿下部90~150 m处赋存有3-1煤层,平均厚度3.36 m。在铀矿床直罗组下段底部形成砾岩、泥砾岩层,岩石固结程度较高,该岩层组厚度大(40~100 m),连续性好,渗透性较差<sup>[3-5]</sup>。铀矿床开采过程中,溶浸液在渗流场作用下腐蚀砾岩,降低岩石承载能力,在下位采动影响下可能导致隔水层破断进而造成放射性物质进入回采工作面。因此,煤铀叠置区砾岩隔水层在溶浸液腐蚀作用下力学性质是保证煤铀共采安全的关键问题。

在煤铀协同开采研究领域,袁亮<sup>[6]</sup>提出了煤及共伴生资源精准开采的科学问题与对策。黄炳香等<sup>[7-8]</sup>、赵兴龙等<sup>[9]</sup>对煤系伴生矿产协同开发进行了研究,针对煤铝分区错时协调开采进行了相似模拟试验,系统阐述了煤铝分区错时协调开采的过程及现象,分析了该过程中的规律性及参数合理性。曾晟等<sup>[10]</sup>提出了煤铀协同开采的理论模型。张通等<sup>[3-5]</sup>则从宏观岩层运动和化学溶液运移的角度开展了纳沟岭矿煤铀协同开采的相关研究。已有研究成果为煤铀协同开采提供了理论依据,但关于酸蚀作用下砾岩隔水层性质劣化的研究还有待深入。砾岩隔水层在酸蚀及采动耦合作用下物理化学及力学性质对于保障煤铀协同开采安全具有重要意义,开展酸浸环境下砾岩物理化学与强度衰减规律研究具有较高的学术价值和应用前景。

岩石由多种矿物组成,内部存在裂隙、孔洞及界面等初始损伤结构。在化学溶液作用下,矿物溶蚀,导致损伤加剧,岩石强度显著劣化<sup>[11-12]</sup>。国内外学

者对不同工程背景下岩石在化学腐蚀方面做了大量研究工作。在单一化学腐蚀研究方面,酸雨环境下砂岩的强度特征具有显著的时间效应,裂隙分形维数逐渐增加<sup>[13-14]</sup>,阳离子在浸泡初期溶蚀速率最大<sup>[15-16]</sup>。陈卫昌等<sup>[17]</sup>开展了硫酸型酸雨加速侵蚀石灰岩的研究,发现酸雨淋蚀会剥离岩石表层,内部新鲜岩石与酸雨持续反应。何春明等<sup>[18]</sup>对不同酸液影响下的灰岩力学性质研究发现,凝胶酸在岩芯内部形成大量酸蚀孔洞,而变黏酸以均匀溶蚀为主。付丽<sup>[19]</sup>研究发现层状灰岩倾角使试样力学性质劣化存在明显的各向异性特征。廖健等<sup>[20]</sup>得到了灰岩随着浸泡时间和pH的减小,其抗剪强度呈现降低趋势。丁梧秀等<sup>[21]</sup>研究了水化学溶液和冻融耦合作用下灰岩力学性质,发现水化学溶液和循环冻融耦合下灰岩损伤程度更大。对酸浸环境碱性溶液环境下,临界应力强度因子是暴露时间的函数<sup>[22]</sup>。VAZQUEZ等<sup>[23]</sup>从重量、颜色、粗糙度及微观结构角度系统研究了不同成分和质地的岩石暴露于4种强酸性气体下的演化规律,分析了与酸蚀程度的关系。单纯化学腐蚀下,完整岩体的腐蚀原因主要是岩石颗粒骨架力学性质劣化及内部孔隙增大,裂隙岩石是由于断裂应力降低及裂隙增大<sup>[24]</sup>。在化学腐蚀与应力路径、温度场耦合作用下岩石力学响应机制方面,化学腐蚀与冻融循环作用下花岗岩和砂岩的力学特性会产生损伤<sup>[25]</sup>,温度与化学介质对裂隙岩石渗透率会产生影响<sup>[26]</sup>,花岗岩、砂岩和大理岩在温度场与化学场共同作用下的物理化学与力学性质不同,岩石矿物成分在多场作用下的响应机制不同<sup>[27]</sup>。针对砾岩的研究中,发现砾岩具有典型的非均匀性特征,矿物颗粒和孔隙结构对岩石性质影响巨大<sup>[28]</sup>,西域砾岩具有低强度、易变形、孔隙率低和水敏性大的特点<sup>[29]</sup>,在经过浓盐酸和蒸馏水体积比为1:1配置后的盐酸溶液浸泡后发现小于0.075 mm粒径损失量大<sup>[30]</sup>。不同工程背景下岩石在化学腐蚀作用下的研究成果较为丰富,但是关于煤铀协同开采背景下

砾岩在硫酸腐蚀下的物理化学和力学性质研究有待深入。由于砾岩与砂岩、碳酸盐岩、花岗岩、大理岩等致密岩石在均质性方面的较大差异<sup>[31]</sup>, 力学响应机制存在差异。砾岩作为一种典型的非均质岩石, 涉及化学腐蚀的研究较少, 有必要开展硫酸蚀下砾岩物理化学和力学性质研究。

笔者以煤铀叠置区地浸采铀过程中砾岩隔水层为研究对象, 重点探讨砾岩在酸蚀环境下的时效特征。测定砾岩试件质量及溶液中金属阳离子浓度的变化规律, 分析酸蚀砾岩应力-应变关系, 研究其在不同腐蚀时间的宏细观结构及矿物成分变化, 并探讨岩石受载破坏过程中能量演化特征。利用相关系数矩阵分析弹性模量、峰值应力、峰值应变及能量密度等参数之间的相关性。最终, 阐明煤铀共采条件下砾岩隔水层在酸蚀作用下的物理化学及三轴压缩力学性质, 以期为地浸采铀过程中隔水层稳定性评估及工程优化提供理论支持。

## 1 煤铀开采砾岩隔水层酸蚀效应

地浸是常见的铀矿开采方式, 通过注液井将溶浸液注入含矿含水层, 在渗流场中, 溶浸液与铀矿床中的有用成分接触、反应, 形成含铀可溶性化合物, 然后被抽液井抽出在地面进行处理得到铀。常见的酸法浸出采用硫酸、硝酸、盐酸等, 硝酸价格昂贵、选择性差, 硝酸根离子容易对地下水造成污染且难以处理, 盐酸腐蚀性强, 材料设备的防腐问题难以解

决, 但是由于硫酸具有较强的浸出能力, 同时价格低廉, 设备材料腐蚀问题容易解决等优势。因此, 目前酸法地浸广泛采用硫酸作为溶浸液<sup>[2]</sup>。

针对内蒙古和新疆等地区砂岩型铀矿赋存条件为研究背景, 以直罗组下部砾岩隔水层为研究对象(图1)。在溶浸液通过过滤器进入矿层后, 硫酸在渗流场中运动, 除与铀矿石反应外, 也会向四周发生对流和扩散。溶浸液在渗流场中向砾岩运动, 岩石中的矿物成分与硫酸发生化学反应, 增加损伤, 渗透性增强, 造成砾岩隔水层强度衰减, 承载能力降低<sup>[11-12]</sup>。当下位工作面回采时, 采空区顶板冒落, 原先稳定的上覆砾岩隔水层在酸蚀作用下如果发生破断, 腐蚀溶液可能会向下继续腐蚀顶板岩层, 发生连锁反应, 最终造成含放射性物质的水体进入工作面, 引发重大安全生产事故。可见, 地浸开采后砾岩隔水层在酸蚀作用下的力学性质是工作面正常回采的关键。

## 2 试验设计

### 2.1 试件及试验装置

开展侏罗系直罗组下部砾岩在  $H_2SO_4$  腐蚀下三轴压缩试验研究。砾岩试件取自露头, 制作成标准圆柱体, 直径 50 mm、高度 100 mm。砾岩由砾石和胶结物组成, 具有典型的非均匀性特征。按照文献[32]对砾岩的分类标准, 本试验砾岩为多级颗粒支撑结构砾岩(图2)。为降低砾岩内部初始损伤差异对

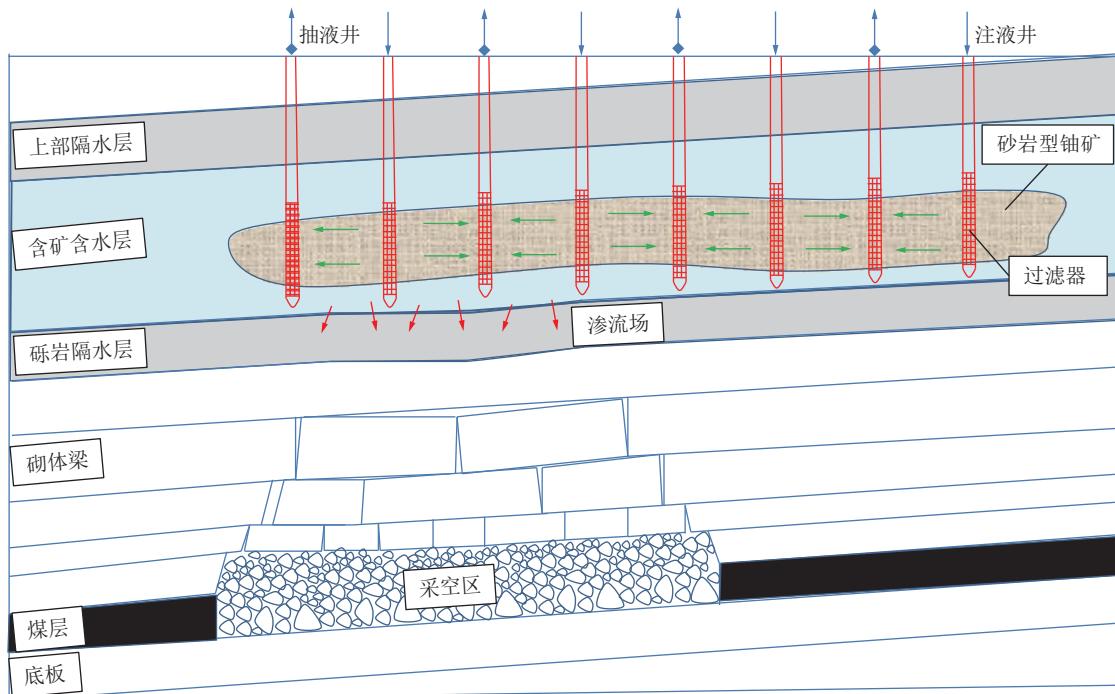


图1 地浸开采酸蚀效应示意

Fig.1 Schematic diagram of acid corrosion effect under in-situ leaching mining

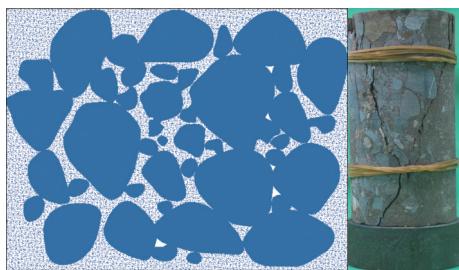


图2 多级颗粒支撑砾岩  
Fig.2 Multistage grain supported conglomerate

试验结果的影响,首先测量试件质量,剔除质量过大、过小的试件,再进行纵波波速测定。

酸化后浸出液的pH为1.5~2.5<sup>[33]</sup>,为此,试验采用pH=1的H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>对试件进行酸化处理。浸泡时间为1、10、15和20 d,并设置自然状态下作为对照组,每组试件为3个。三轴压缩试验在TYJ-1500M岩石力学试验机开展,试验设置轴向位移加载速度为0.01 mm/s。试验机压缩模块可提供最大压力为1 500 kN,轴向位移量程为±5 mm,分辨率为0.2 μm。依据邻近矿区地应力测试结果,围压设置为3 MPa。

## 2.2 试验思路和方案

以不同浸泡时间砾岩三轴压缩试验为核心,研究试件质量变化规律,通过XRD(X-ray Diffraction)

测得砾岩在酸蚀过程中矿物成分变化,利用原子吸收分光光度计测量溶液中Ca<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>浓度变化,结合SEM(Scanning Electron Microscope)探究酸蚀砾岩的微观结构变化,揭示酸浸泡下砾岩腐蚀机制。基于三轴压缩试验结果,分析强度、应变能密度、弹性模量和耗散能密度等变化规律。应用相关系数理论建立各参数的相关系数矩阵,得到参数间的相关性。最终掌握H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>腐蚀下砾岩试件随浸泡时间的物理化学性质及三轴压缩力学性质。

## 3 物理化学性质

### 3.1 质量变化规律

为研究酸蚀作用下砾岩质量变化规律,将自然状态砾岩试件的质量记作0 d的质量,之后每隔2 d进行质量测定。基于Python编程对测试数据进行多项式回归。为防止出现过拟合问题,采用岭正则化,也就是在目标函数中加入正则项,该方法可有效减小模型参数<sup>[34]</sup>。图3为正则项中不同惩罚因子时试件质量随浸泡时间的散点和拟合曲线。可以看出,随着惩罚因子 $\alpha$ 增大,拟合曲线更加光滑,模型更加简单。不同惩罚因子对应不同的回归模型,为确定最终拟合表达式,绘制图4所示岭迹线图,即多项式系数随惩罚因子变化曲线。

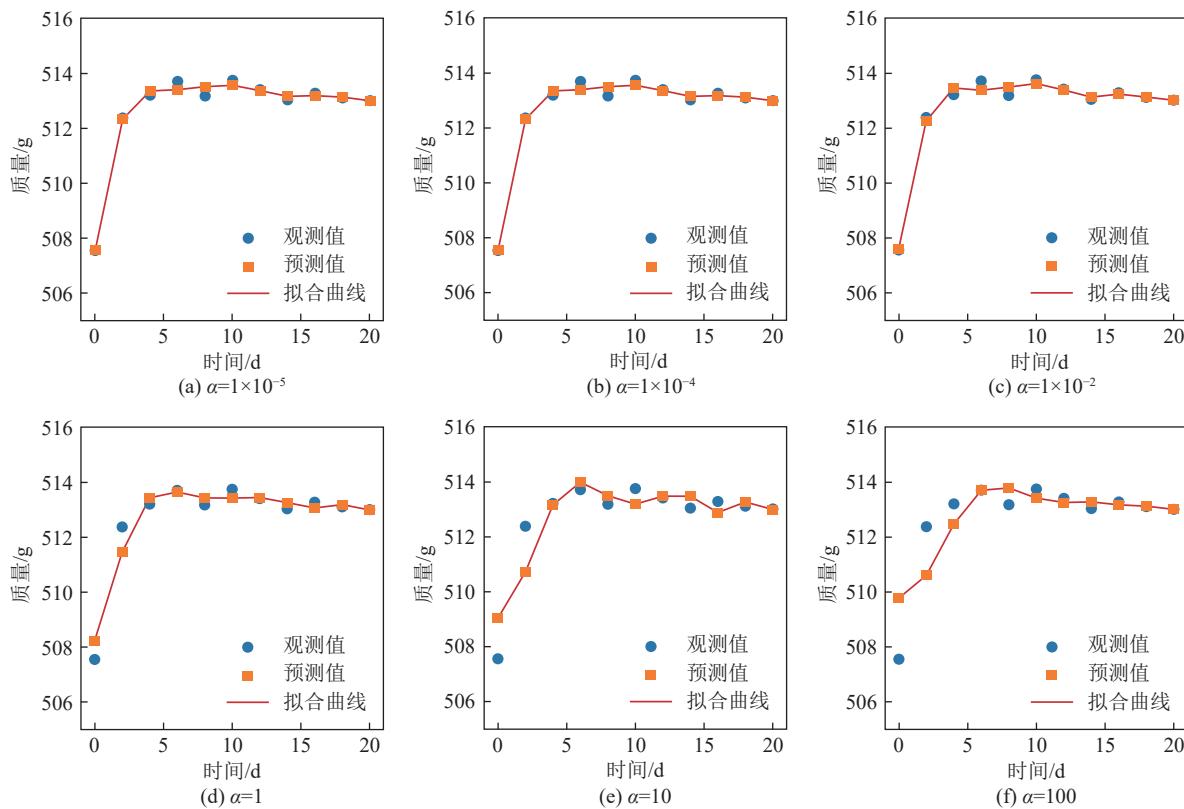


图3 不同惩罚因子对试件质量变化的拟合曲线  
Fig.3 Fitting curves of specimen quality variation under different penalty factors

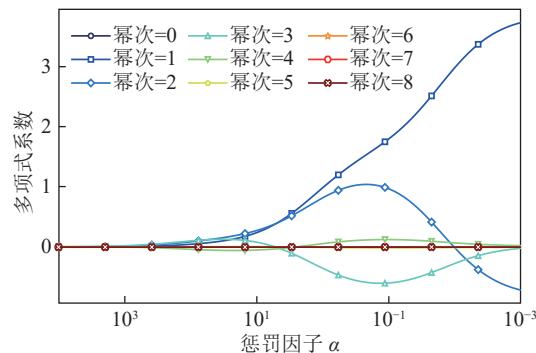


图 4 不同惩罚因子下的多项式系数岭迹图

Fig.4 Ridge plots of polynomial coefficients under different penalty factors

从图 4 可知,当惩罚因子  $\alpha$  在 1 附近时,喇叭口平滑,根据相关理论<sup>[35]</sup>,最终确定惩罚因子为 1,则,酸蚀下砾岩质量变化拟合表达式为

$$m = 508.249 + 0.983t + 0.816t^2 - 0.349t^3 + 0.057t^4 \quad (1)$$

式中:  $m$  为砾岩质量,  $g$ ;  $t$  为浸泡时间,  $d$ 。

通过图 3 可以看出,浸泡 6 d 时,试件质量增大到峰值,随后缓慢减小。浸泡初期质量增大是由于溶液与岩石矿物发生化学反应所消耗的质量小于吸水量。将试件放入硫酸溶液时,表面出现大量气泡,同时发出“嘶嘶”声,硫酸溶液开始变浑浊。气泡来源有 2 个:一是液体进入试件,压缩孔隙中的空气;二是矿物与硫酸生成  $\text{CO}_2$ ,声音来源主要是由于  $\text{CO}_2$  的快速产生和急速逸出。溶液变浑浊则是因为试件表面的岩粉颗粒进入溶液开始漂浮。从浸泡到

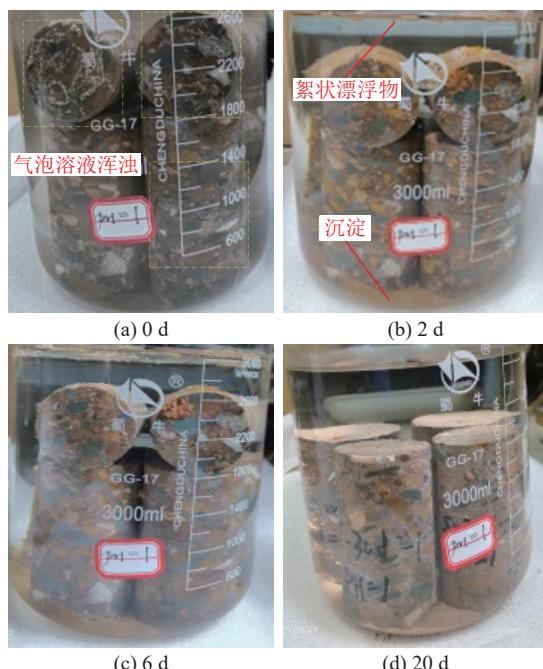


图 5 不同浸泡时间下砾岩图片

Fig.5 Images of conglomerate at different soaking times

第 2 天开始,试件表面出现絮状物质,且部分位置出现红色(图 5),推测絮状物质是试件中的  $\text{Fe}^{3+}$  与  $\text{OH}^-$  反应生成  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  沉淀,这与溶液中检测到  $\text{Fe}^{3+}$  吻合。在第 6 天时,试件表面气泡消失,结合图 3 可知,试件已经饱和,反应速度变缓。试件从浸泡到饱和,质量变化呈现先快后慢特征。饱和后,试件内部矿物与溶液反应,生成沉淀或者溶解到溶液中,质量逐渐减小,沉淀物增加,堵塞溶液运移通道,阻碍化学反应进一步发生,加上硫酸溶液被消耗,浓度逐渐降低,最终达到稳定状态。

### 3.2 物相变化及金属阳离子浓度分析

腐蚀发生时,砾岩矿物成分与硫酸反应,可能导致物相变化。图 6 为自然状态和硫酸浸泡 20 d 时的 XRD 图。自然状态下砾岩存在石英( $\text{SiO}_2$ )、方解石( $\text{CaCO}_3$ )、钠长石( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ )、钙长石( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ )、白云母( $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ )等物质,在浸泡 20 d 时生成了  $\text{CaSO}_4$ 。

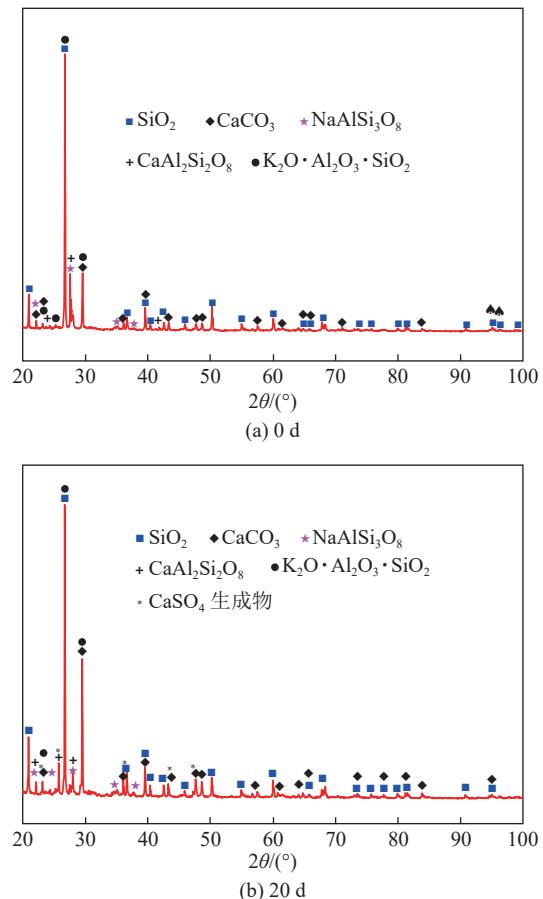
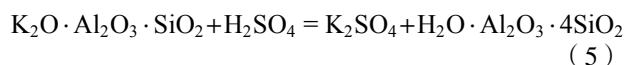
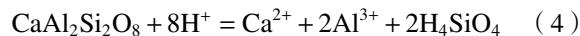
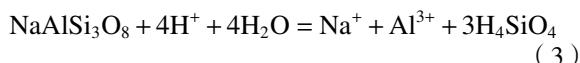


图 6 浸泡 0 d 和 20 d 时的试件成分 XRD 图  
Fig.6 XRD patterns of specimen composition after soaking for 0 d and 20 d

在酸蚀这一复杂的水岩作用中,溶液进入岩石内部孔隙中形成水膜,降低矿物晶体间摩擦力,产生

的孔隙压力削弱了晶体间的力学联系。伴随着溶液进入岩石内部孔隙,矿物与硫酸进行化学反应,降低晶体和胶结物强度,产生新孔洞,溶液继续沿着新孔洞发生渗流。根据砾岩的物相成分,在硫酸中的化学反应主要有:

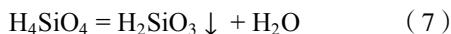


化学反应使砾岩中矿物逐渐溶解,增大孔隙,最终改变砾岩力学性质。

溶解的  $\text{Ca}^{2+}$  与  $\text{SO}_4^{2-}$  发生反应,产生  $\text{CaSO}_4$  沉淀,反应式为



在图 6b 中的 XRD 图中发现了  $\text{CaSO}_4$  沉淀。正硅酸( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ )不稳定,易分解成偏硅酸,故溶液中产生白色絮状沉淀。正硅酸分解为偏硅酸化学反应,可能由于偏硅酸量小,在浸泡 20 d 的 XRD 中未发现,反应式为



由于离子浓度变化能够反应砾岩在酸环境的溶蚀程度。由于砾岩中存在大量  $\text{Ca}^{2+}$ ,在实验室利用原子吸收分光光度计对不同浸泡时间下溶液中  $\text{Ca}^{2+}$  浓度进行测试,同时,配置了标准液对  $\text{Na}^+$  和  $\text{Fe}^{3+}$  浓度进行测量。

从图 7 可以看出,不同离子质量浓度随浸泡时间的变化规律类似,可分为快速增大阶段和缓慢增大阶段。试件在浸泡 6~8 d 后离子浓度增速显著降低,呈现缓慢增大特征,与前文得到的质量变化规律一致。文献 [15] 针对砂岩在 pH=2 硫酸溶液中观测

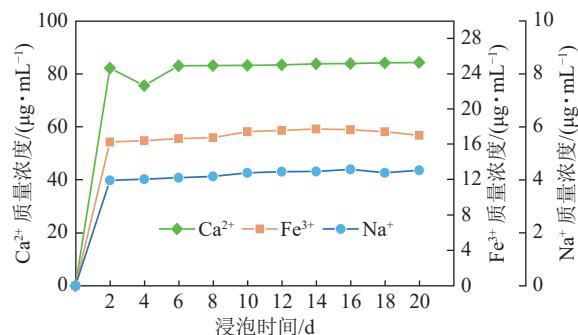


图 7 不同浸泡时间金属阳离子质量浓度变化

Fig.7 Changes in metal cation concentration at different soaking times

的离子质量浓度有类似变化规律。

从各质量浓度数值来看,  $\text{Ca}^{2+}$  质量浓度最高, 稳定时质量浓度为  $84.25 \mu\text{g}/\text{mL}$ ,  $\text{Na}^+$  和  $\text{Fe}^{3+}$  的质量浓度远低于  $\text{Ca}^{2+}$  质量浓度,  $\text{Fe}^{3+}$  稳定时质量浓度为  $17.05 \mu\text{g}/\text{mL}$ ,  $\text{Na}^+$  稳定时质量浓度为  $4.37 \mu\text{g}/\text{mL}$ , 说明砾岩中方解石含量多。

为阐明硫酸腐蚀下砾岩的化学反应机制,绘制图 8。浸泡初期,硫酸溶液作用范围在砾岩浅层,开始溶解砾岩浅层的矿物,产生  $\text{CaSO}_4$ ,由于  $\text{CaSO}_4$  体积大于  $\text{CaCO}_3$ , 体积膨胀导致被硫酸溶解矿物的空间和周围的初始裂隙被  $\text{CaSO}_4$  填充,同时砾岩中不与硫酸反应的岩石颗粒进入溶液中,溶液中的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$  和  $\text{Fe}^{3+}$  浓度显著增大(图 8a),规律与图 7 一致。

当持续浸泡后,砾岩内部越来越多矿物被溶解,未发生化学反应的岩石颗粒进入溶液,  $\text{CaSO}_4$  无法填充所有溶解空间,砾岩内部孔隙增大。砾石中的长石、白云母等物质与硫酸的持续反应也会降低砾石自身强度(图 8b)。

## 4 力学性质

### 4.1 能量分析

岩石试件变形破坏本质是由于能量的输入、积

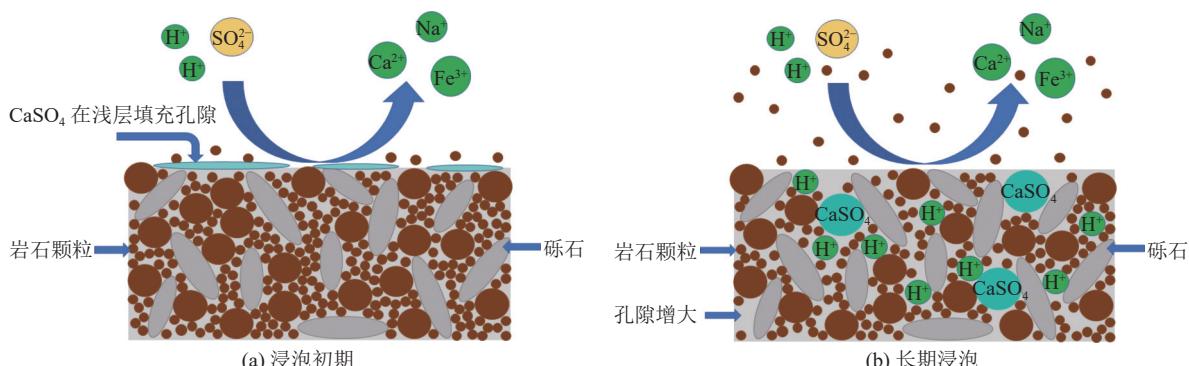


图 8 硫酸与砾岩化学反应机制

Fig.8 Mechanism of chemical reaction between sulfuric acid and conglomerate

聚、耗散和释放。对于三轴压缩试验,假设试件与外界无热交换,处于封闭系统。根据热力学第一定律及能量计算公式<sup>[36]</sup>,系统总能量密度为

$$v = v_e + v_d \quad (8)$$

式中:  $v_e$  为岩石内部的弹性应变能密度,  $\text{J/m}^3$ ;  $v_d$  为岩石的耗散能密度,  $\text{J/m}^3$ 。

应力应变曲线与应变轴所围面积即为试件的应变能密度。根据定积分概念,将整个面积根据试验机采集数据进行分割,然后将分割的面积作近似计算,最后在加载过程求和,计算式为

$$v = \int \sigma_1 d\varepsilon_1 + 2 \int \sigma_3 d\varepsilon_3 = \\ \sum_{i=1}^n \frac{(\varepsilon_{1,i+1} - \varepsilon_{1,i})(\sigma_{1,i+1} + \sigma_{1,i})}{2} + \\ \sum_{i=1}^n (\varepsilon_{3,i+1} - \varepsilon_{3,i})(\sigma_{3,i+1} + \sigma_{3,i}) \quad (9)$$

式中:  $\sigma_1$  为最大主应力(轴向应力),  $\text{MPa}$ ;  $\sigma_3$  为最小主应力(围压),  $\text{MPa}$ ;  $\varepsilon_1$  为最大主应变;  $\varepsilon_3$  为最小主应变(径向应变);  $\sigma_{1,i}$  和  $\sigma_{3,i}$  分别为第  $i$  个最大、最小主应力,  $\text{MPa}$ ;  $\sigma_{1,i+1}$  和  $\sigma_{3,i+1}$  分别为第  $i+1$  个最大、最小主应力,  $\text{MPa}$ ;  $\varepsilon_{1,i}$  和  $\varepsilon_{3,i}$  分别为第  $i$  个最大、最小主应变;  $\varepsilon_{1,i+1}$  和  $\varepsilon_{3,i+1}$  分别为第  $i+1$  个最大、最小主应变。

弹性指能够在卸载时恢复的变形,考虑到应力应变的线性关系,弹性应变能密度的表达式为

$$v_e = \frac{1}{2E_u} [\sigma_1^2 + 2\sigma_3^2 - 2\nu(2\sigma_1\sigma_3 + \sigma_3^2)] \quad (10)$$

式中:  $\nu$  为泊松比;  $E_u$  为卸载弹性模量,  $\text{MPa}$ 。

由文献 [37] 可知, 卸载弹性模量与加载弹性模量相差一般在 5% 以内, 笔者取初始弹性模量代替式(10)中的卸载弹性模量  $E_u$ 。

除浸泡 15 d 和 20 d 试验组中的 3 号试件应力应变曲线出现差异外, 其他几组的试验结果较为接近。选择的分析对象为尽量重合的试验曲线, 最终选择每组的 1 号作为研究对象。根据上述能量计算方法, 针对研究试件, 绘制不同浸泡时间的能量密度曲线如图 9 所示。

耗散能可以反映试件损伤程度, 当耗散能不变时, 认为岩石经过压密阶段后, 试件内部致密, 损伤程度稳定, 该阶段外力做的功全部转化为弹性能, 以耗散能稳定阶段确定弹性阶段。图 9 和图 10 中的弹性阶段由此确定。

在加载初期, 应变能密度、弹性能密度和耗散能密度差异不大, 数值小, 试件内部初始裂隙逐渐闭合, 外力做的功转变为裂隙闭合的耗散能, 弹性能积聚

少, 因此耗散能密度大于弹性能密度。当轴向继续加载, 总能量密度和弹性能密度快速增大, 弹性能密度大于耗散能密度。在弹性阶段, 耗散能密度保持稳定, 同时弹性能密度与总能量密度的增速一致。塑性阶段, 耗散能开始增大, 弹性能增速减小。峰后阶段, 耗散能快速增大, 相应地, 弹性能迅速减小, 外力做的功主要转化为试件峰后破坏的耗散能。在峰值处, 总能量密度的增速有较明显减小, 表明峰前试件发生单位应变所需的能量大于峰后阶段。耗散能密度增速随轴向应力增大出现“慢-快-慢”的变化趋势。文献 [38] 通过对花岗岩不同围压下常规三轴压缩和循环加卸荷研究中发现, 总能量密度增速在峰后出现下降, 耗散能密度增速也呈现“慢-快-慢”的变化特征。浸泡时间对试件能量变化趋势没有影响, 所有试件的能量变化趋势一致。

总弹性能密度与岩石强度密切相关, 强度越高, 在峰值处的总能量密度越大。浸泡 0 d 时, 总能量密度为  $0.37 \text{ MJ/m}^3$ , 浸泡 1、10、15 和 20 d 的峰值处总应变能密度分别为  $0.53$ 、 $0.38$ 、 $0.34$  和  $0.32 \text{ MJ/m}^3$ 。这是由于岩石强度越大, 要使其发生破坏, 外力所做的功越大。峰后总能量密度不具备这一特征, 因为在试验过程中往往通过应力应变曲线向下发展来终止加载, 即不同试件暂停标准并不统一。

耗散能密度变化率可以反映试件损伤劣化的快慢。耗散能密度变化率  $\dot{v}_d$  计算式为

$$\dot{v}_d = \Delta v_d / \Delta t \quad (11)$$

根据试验结果, 以试验机相邻 2 次采集的耗散能密度变化量  $\Delta v_d$  除以采集时间间隔  $\Delta t$  得到。将不同浸泡时间耗散能密度变化率绘制成图 10。为描述方便, 后文将耗散能密度变化率表达为损伤速率。

在压密阶段, 损伤速率处在较低水平, 数值绝大多数为  $0 \sim 0.0025 \text{ MJ/(m}^3 \cdot \text{s)}$ , 浸泡时间对于本阶段影响不明显。在弹性阶段时, 损伤速率比压密阶段更小, 内部损伤几乎不再增加。在塑性阶段, 原先较为平静的损伤速率突然稳定增强, 在峰值之前不同浸泡时间的损伤速率差异不大。

进入峰后, 损伤速率增大, 说明内部损伤持续发生。浸泡 0 d 时, 峰后有 2 次快速损伤, 应力-应变曲线相应表现为应力的快速跌落, 整体损伤速率处在较高水平。浸泡 1 d 时, 存在连续损伤, 随后试件破坏。由于损伤速率持续在高水平, 内部裂纹快速发展贯通, 表现为脆性破坏。浸泡 10 d 时, 首先出现速率为  $0.0580 \text{ MJ/(m}^3 \cdot \text{s)}$  快速损伤, 随后紧跟着 2 次略低强度损伤, 之后损伤速率逐渐减小, 直至试件破

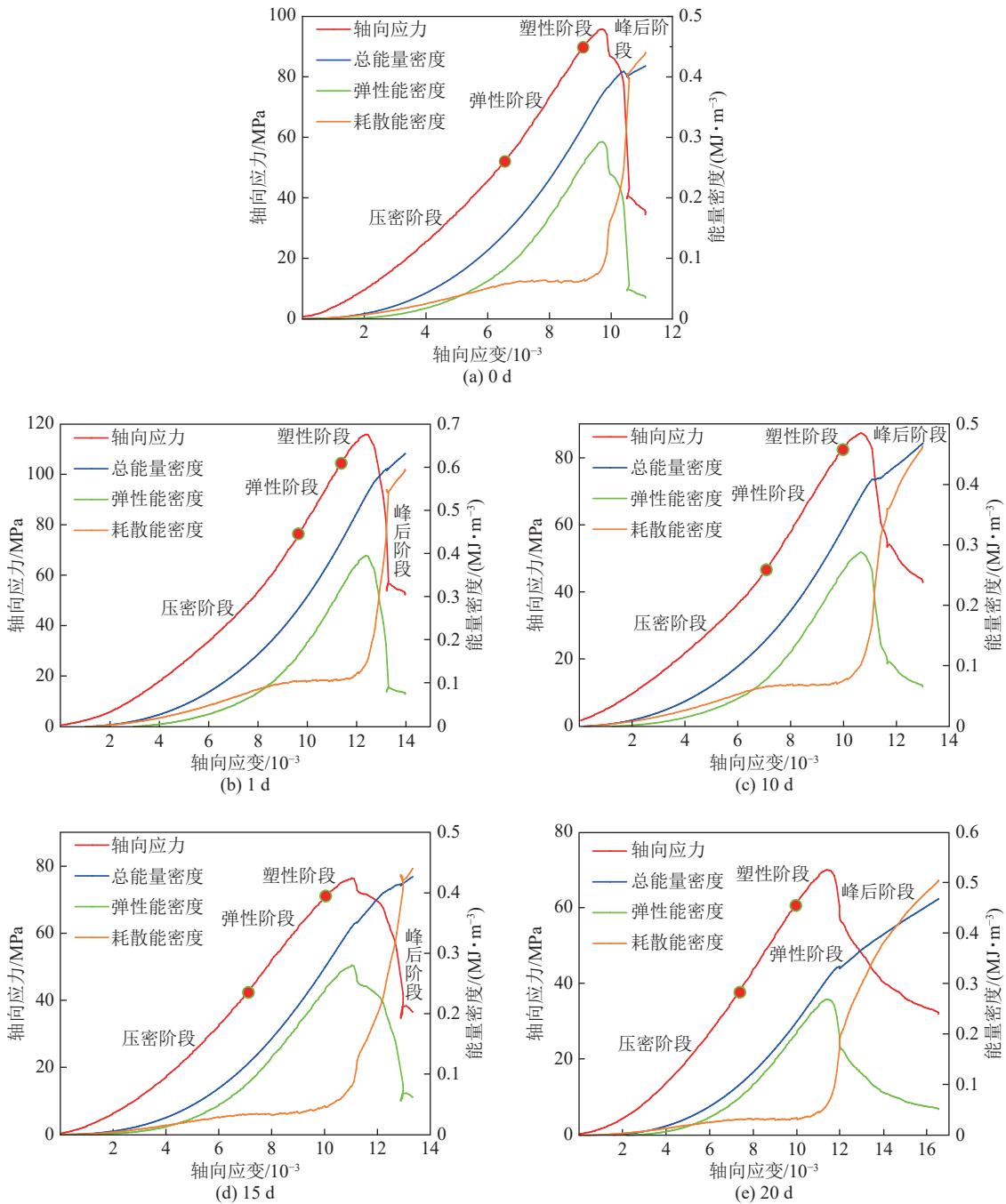


图9 不同浸泡时间能量密度变化曲线

Fig.9 Energy density variation curves at different soaking times

坏。在浸泡 15 d 时, 峰后出现速率为  $0.042 \text{ MJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$  的较大损伤, 然后出现强度逐渐增大的连续损伤并到达峰值。浸泡 20 d 时, 损伤速率峰值很快到达, 大小为  $0.0880 \text{ MJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ , 之后损伤速率逐渐下降直至试件破坏。浸泡 20 d 试件曲线在峰后变得较为光滑, 说明峰后变形没有出现应力快速跌落, 变形较为稳定。

综上可知, 浸泡时间对试件峰后损伤发展影响很大。浸泡时间短时, 峰后出现 2 次快速损伤, 损伤速率剧烈变化。随着浸泡时间变长, 仅出现 1 次快

速损伤, 整体损伤速率变化较为平稳, 浸泡 20 d 时峰后损伤速率平稳降低趋势明显, 侧面印证试件从脆性到延性的破坏模式转变。

#### 4.2 力学参数随浸泡时间的变化规律

试件应力-应变曲线如图 11 所示。浸泡 1 d 时强度出现升高, 之后强度逐渐降低。由图 8a 可知, 浸泡初期, 砂岩试件浅层  $\text{CaCO}_3$  与  $\text{H}_2\text{SO}_4$  反应生成  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{CaSO}_4$  的体积大于  $\text{CaCO}_3$ , 体积膨胀, 表明在短时浸泡下, 消耗  $\text{CaCO}_3$  形成的孔洞和一些初始裂隙会被  $\text{CaSO}_4$  填充, 短期内不仅提高试件浅层密实

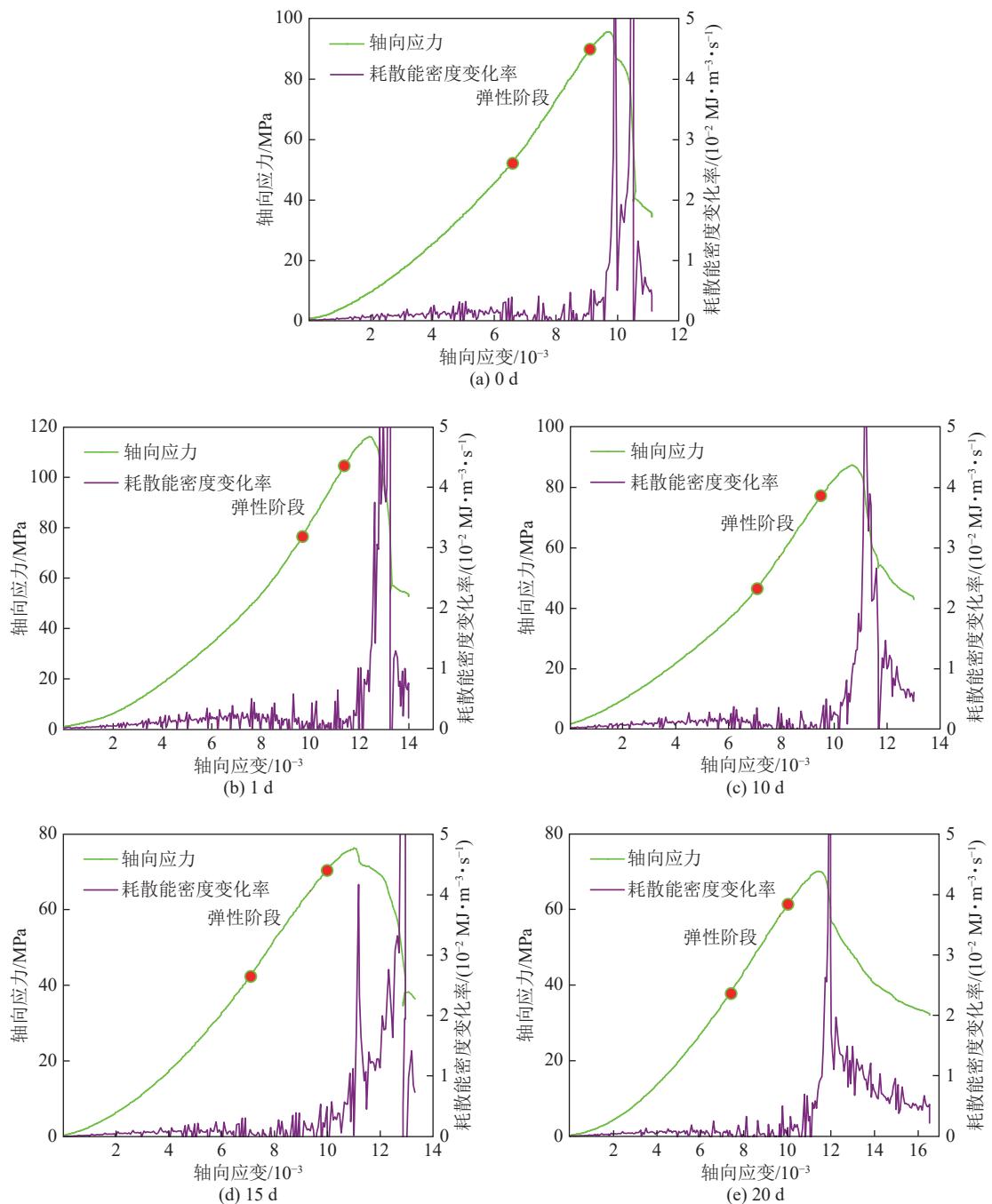


图 10 不同浸泡时间耗散能密度变化率曲线

Fig.10 Curves of change rate of dissipated energy density at different soaking times

度,还会阻碍溶液继续往内部运动,从而提高砾岩强度。根据朱传奇等<sup>[39]</sup>和刘小玲等<sup>[40]</sup>研究成果,具有一定黏滞性弱结合水在岩石颗粒间形成液桥,液桥力能够影响岩石强度。当低于临界含水率时,岩石强度升高,高于其含水率时,岩石强度降低。在前文质量变化规律研究中,浸泡 6 d 时试件达到饱和,可以推测,浸泡 1 d 的含水率小于临界含水率。因此,在砾岩浅层密实和液桥力作用下,浸泡 1 d 时三轴抗压强度有所升高。

浸泡 10 d 后,由于水和  $H^+$ 与矿物反应的双重作

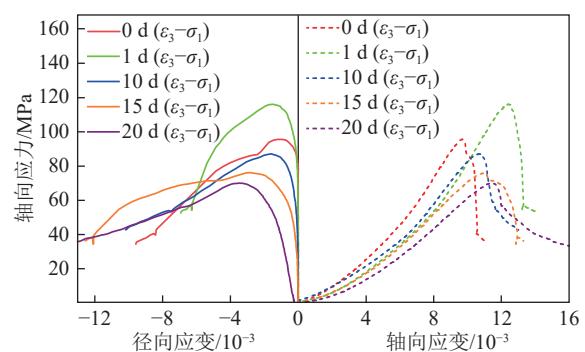


图 11 不同浸泡时间应力-应变曲线

Fig.11 Stress-strain curves at different soaking times

用,试件强度逐渐降低。随着化学反应持续进行,试件内部形成新的孔隙,又会改变渗流场,15和20 d强度降低程度减小。在峰后阶段自然状态和浸泡1 d的试件表现出明显脆性变化特征,随着浸泡时间增加,应变软化梯度逐渐降低。

径向应变与轴向应变曲线表明随着试件浸泡时间增加,径向应变逐渐增大,产生扩容,自然状态和浸泡1 d试件未发生明显扩容。

根据耗散能密度曲线确定的压密阶段、弹性阶段、塑性和峰后阶段,统计得到峰值应力( $\sigma_p$ )、屈服应力( $\sigma_y$ )、弹性模量( $E$ )、轴向峰值应变( $\varepsilon_{lp}$ )、峰值体积应变( $\varepsilon_{vp}$ )、压密阶段轴向应变( $\varepsilon_{cc}$ )和峰前轴向塑性应变( $\varepsilon^p$ )。自然状态下试件强度为95.75 MPa,浸泡1 d后,强度升至116.29 MPa,升高了21.45%,随后逐步降低,10、15和20 d的单轴抗压强度分别为87.33、76.37和70.19 MPa,较自然状态分别降低了8.49%、20.24%和26.69%,强度衰减明显。但随着浸泡时间增加,强度有稳定趋势。从图12可以看出,屈服应力和弹性模量与峰值应力具有很高的相关性。

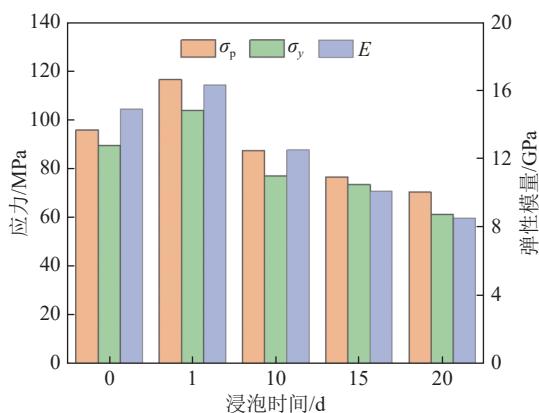


图12 不同浸泡时间强度、屈服应力和弹性模量变化  
Fig.12 Changes in strength, yield stress, and elastic modulus at different soaking times

由图13可以看出,浸泡1 d时,轴向峰值应变、峰值体积应变、压密阶段轴向应变和峰前轴向塑性应变均增大。随浸泡时间继续增长,轴向峰值应变逐渐增大,酸蚀下岩石内部裂纹发育,轴向应变增大。虽然轴向应变在浸泡后增大,但是体积应变持续减小,径向位移越来越大,泊松效应明显。长时浸泡下压密阶段轴向应变增大,因为化学反应增加了内部裂隙,次生裂隙发育增大了压密阶段的轴向应变(图8)。峰前轴向塑性应变在整个浸泡时间内,均呈现增长趋势,说明酸蚀作用下,试件从弹性阶段到破坏阶段裂纹发展充分。

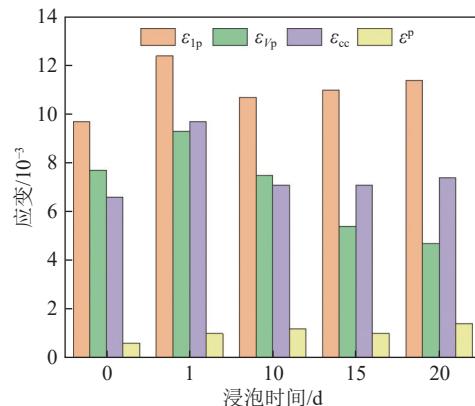


图13 不同浸泡时间压缩过程应变变化  
Fig.13 Strain change during compression process at different soaking times

#### 4.3 宏细观破坏特征分析

图14为三轴压缩破坏后试件照片及表面裂纹素描。表面裂纹素描图中,红色和蓝色线条代表裂纹形态,其中,红色线条为主控裂纹。从颜色上看,自然状态和浸泡1 d颜色偏红,说明此时试件存在 $\text{Fe}^{3+}$ ,表面无 $\text{CaSO}_4$ 沉淀。从浸泡10 d开始,出现大量 $\text{CaSO}_4$ 沉淀,砾石表面光滑,说明 $\text{Ca}^{2+}$ 主要存在于胶结物中。试件表面的红色基本消失,可能是由于表面 $\text{Fe}^{3+}$ 与溶液充分反应,生成的 $\text{Fe(OH)}_3$ 沉淀至烧杯底部(图5)。

从破坏形态角度,在自然状态下,由于围压的限制,由一条斜向裂纹控制,角度大约为56°。这一主控裂纹在试件中部出现转向,观察发现是由于中部分布有砾石,砾石改变了裂纹发育方向,整个破坏绕着砾石发生。由此可见,自然状态下,砾石位置和形态决定了试件的破坏形态。

经过硫酸浸泡1 d后,胶结物出现一些化学反应生成物,出现腐蚀孔洞,破坏形态仍以斜向裂纹为主,角度为51°,出现竖向裂纹,发生砾石破坏现象。浸泡10 d之后,斜向裂纹角度继续增加,达到71°,局部出现竖向与横向交叉裂纹,有裂纹穿砾石现象。

随着浸泡时间增加,主控裂纹由斜向变为竖向,裂纹的扩展路径主要还是砾石间的胶结成分,出现少量穿过砾石的裂纹。由此可见,酸蚀砾岩试件的破坏由斜向裂纹逐步过渡到竖向裂纹,砾石的位置分布和形态影响裂纹扩展路径。

自然状态下砾岩破坏形式为绕砾石的剪切破坏,由3.2节中的硫酸与砾岩的化学反应机制可以看出,随着浸泡时间增加,砾岩内部矿物与硫酸反应,不发生反应的岩石颗粒进入溶液,砾岩内部孔隙增大,砾石强度降低,破坏形式有从剪切向劈裂破坏的趋势发展,砾石强度降低导致出现穿砾石破坏。

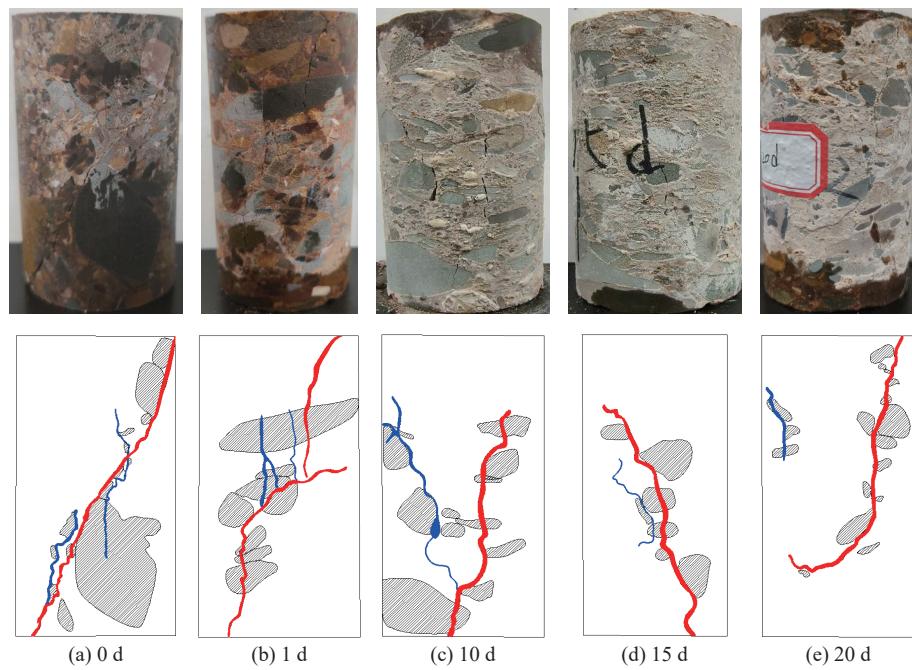
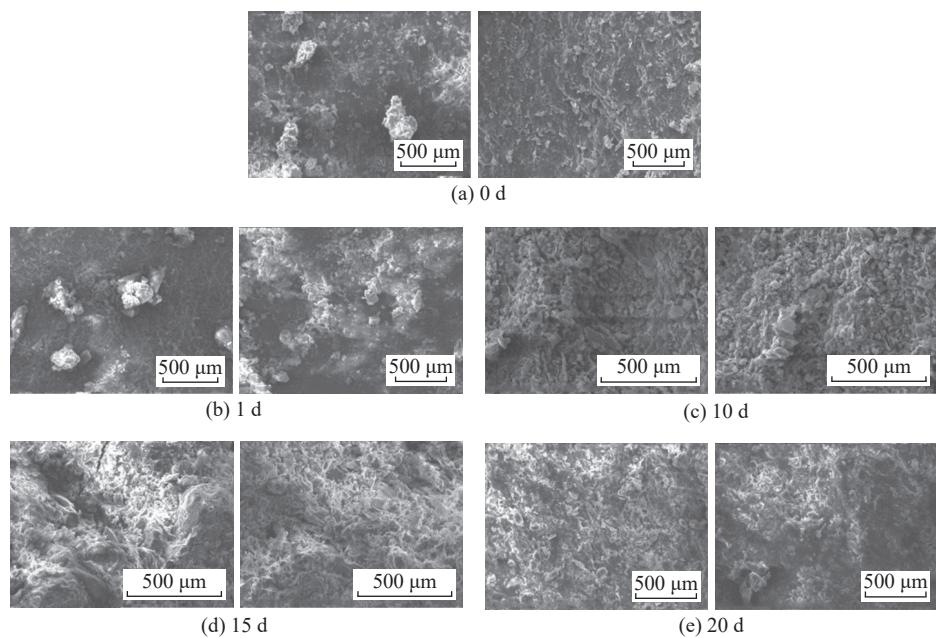


图 14 三轴压缩试件破坏照片及表面主要裂纹素描

Fig.14 Photos of three-axis compression specimen failure

岩石力学性质和破坏形式与其内部结构有关。下面利用 SEM 对试验之后岩石试件进行微观结构研究。图 15 给出了浸泡试件 2 个样品的 SEM 图片。

自然状态试件表面(图 15a)的矿物结构较为致密, 矿物分布较为均匀, 棱角分明, 有一定原生裂纹, 总体胶结性较好。

图 15  $\text{H}_2\text{SO}_4$  溶液浸泡下砾岩腐蚀前后 SEM 图Fig.15 SEM images of conglomerate before and after corrosion in  $\text{H}_2\text{SO}_4$  solution immersion

浸泡 1 d 时的试件变得更加粗糙、多孔。浸泡 10 d 时, 表面进一步粗糙, 化学反应生成物颗粒更多, 孔洞和孔隙增加, 与图 8 的分析结果一致。浸泡 15 d 时, 表面形态更加复杂, 可以看到明显的裂纹和孔洞。浸泡 20 d 时, 出现较均匀的片状结构, 具有一

定粗糙度, 可能的原因是, 矿物表面覆盖有白色粉末, 推断为化学生成物  $\text{CaSO}_4$ 。

化学反应会在试件内部形成孔洞, 造成孔隙度增加, 同时, 化学反应的生成物也会充斥在孔隙内部, 最终导致质量减少、力学性能衰减。浸泡时间越长,

内部形成的孔洞越多,微观结构越粗糙,酸腐砾岩具有明显的时间效应。

#### 4.4 相关性分析

由于 Kendall 秩相关性分析的样本量可以小于 30,且不必符合正态分布,因此,利用该分析方法研究前文得到的关键参数之间相关性<sup>[41]</sup>。表 1 统计了砾岩损伤演化参数,包含质量( $m$ )、 $\text{Ca}^{2+}$ 质量浓度

( $c(\text{Ca}^{2+})$ )峰值应力( $\sigma_p$ )、屈服应力( $\sigma_y$ )、弹性模量( $E$ )、轴向峰值应变( $\varepsilon_{1p}$ )、峰值体积应变( $\varepsilon_{Vp}$ )、压密阶段轴向应变( $\varepsilon_{cc}$ )、峰值总应变能密度( $\nu$ )、峰值弹性能密度( $\nu_e$ )和峰值耗散能密度( $\nu_d$ )。由于  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$  和  $\text{Fe}^{3+}$  质量浓度随浸泡时间变化规律一致(图 7),考虑到  $\text{Ca}$  元素在砾石中含量高于其他 2 种元素,因此相关性分析中选择  $c(\text{Ca}^{2+})$ 。

表 1 砾岩损伤演化参数

Table 1 Damage evolution parameters of conglomerate

$t/d$	$m/\text{g}$	$c(\text{Ca}^{2+})/(\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1})$	$\sigma_p/\text{MPa}$	$\sigma_y/\text{MPa}$	$E/\text{GPa}$	$\varepsilon_{1p}/10^{-3}$	$\varepsilon_{Vp}/10^{-3}$	$\varepsilon_{cc}/10^{-3}$	$\nu/(\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3})$	$\nu_e/(\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3})$	$\nu_d/(\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3})$
0	507.56	0	95.75	89.40	14.88	9.7	7.7	6.6	0.37	0.29	0.083
1	510.38	52.253	116.29	103.74	16.31	12.4	9.3	9.7	0.53	0.40	0.150
10	513.01	83.285	87.33	76.92	12.50	10.7	7.5	7.1	0.38	0.29	0.011
15	513.14	83.976	76.37	73.31	10.10	11.0	5.4	7.1	0.34	0.28	0.080
20	513.75	84.395	70.19	61.20	8.52	11.4	4.7	7.4	0.32	0.27	0.060

将表 1 中的数据进行 Kendall 秩相关性分析,得到相关性系数矩阵(表 2),为直观显示,绘制如图 16 所示的热力图。

一般而言,相关性强度与相关性系数( $r$ )尚无统一的判断标准。笔者认为当相关系数  $r>0.8$  为极强相关,  $r>0.6$  为强相关,  $r>0.4$  为中度相关,  $r>0.2$  为弱相关,  $r<0.2$  为极弱或者无相关。从图 16 可以看出,酸浸试件质量与  $\text{Ca}^{2+}$  质量浓度相关性最高,相关性系数为 1,说明当质量变化规律与  $\text{Ca}^{2+}$  质量浓度变化规律相同。这是由于饱和过程质量增大,扩散作用下溶液与矿物反应,溶液中离子浓度增大,当饱和后,化学反应降低试件质量,但是生成的  $\text{Ca}^{2+}$  会与  $\text{SO}_4^{2-}$  形成  $\text{CaSO}_4$  沉淀,溶液中的  $\text{Ca}^{2+}$  质量浓度降低。

峰值应力和屈服应力、弹性模量和峰值体积应变的正相关性最强,  $r=1$ , 表明试件强度越大, 则具有更高的屈服应力、弹性模量和峰值体积应变, 符合材料力学的基本规律。峰值应力与弹性能密度的相关性系数为 0.95, 说明试件强度越高, 意味着弹性能密度越大。总应变能密度与岩石的强度和弹性模量也具有极强相关性( $r=0.8$ ), 表明在较高强度试件内部存储着更高的弹性应变能, 具有更大的弹性模量, 破坏时也需要更大的总能量。压密阶段轴向应变与其他参数的相关性较弱, 但与峰值轴向应变相关性极强( $r=0.95$ )。从热力图可以看出,  $c(\text{Ca}^{2+})$  与砾岩力学参数相关性较强, 现场通过监测砾岩层位中的金属阳离子质量浓度可推测其力学性质。

表 2 相关性系数矩阵  
Table 2 Correlation coefficient matrix

参数	$m$	$c(\text{Ca}^{2+})$	$\sigma_p$	$\sigma_y$	$E$	$\varepsilon_{1p}$	$\varepsilon_{Vp}$	$\varepsilon_{cc}$	$\nu$	$\nu_e$	$\nu_d$
$m$	1.00	1.00	-0.80	-0.80	-0.80	0.40	-0.80	0.32	-0.60	-0.74	-0.40
$c(\text{Ca}^{2+})$	1.00	1.00	-0.80	-0.80	-0.80	0.40	-0.80	0.32	-0.60	-0.74	-0.40
$\sigma_p$	-0.80	-0.80	1.00	1.00	1.00	-0.20	1.00	-0.11	0.80	0.95	0.60
$\sigma_y$	-0.80	-0.80	1.00	1.00	1.00	-0.20	1.00	-0.11	0.80	0.95	0.60
$E$	-0.80	0.80	1.00	1.00	1.00	-0.20	1.00	-0.11	0.80	0.95	0.60
$\varepsilon_{1p}$	0.40	0.40	-0.20	-0.20	-0.20	1.00	-0.20	0.95	0	-0.11	0.20
$\varepsilon_{Vp}$	-0.80	-0.80	1.00	1.00	1.00	-0.20	1.00	-0.11	0.80	0.95	0.60
$\varepsilon_{cc}$	0.32	0.32	-0.11	-0.11	-0.11	0.95	-0.11	1.00	0.11	0	0.11
$\nu$	-0.60	-0.60	0.80	0.80	0.80	0	0.80	0.11	1.00	0.95	0.40
$\nu_e$	-0.74	-0.74	0.95	0.95	0.95	-0.11	0.95	0	0.95	1.00	0.53
$\nu_d$	-0.40	-0.40	0.60	0.60	0.60	0.20	0.60	0.11	0.40	0.53	1.00

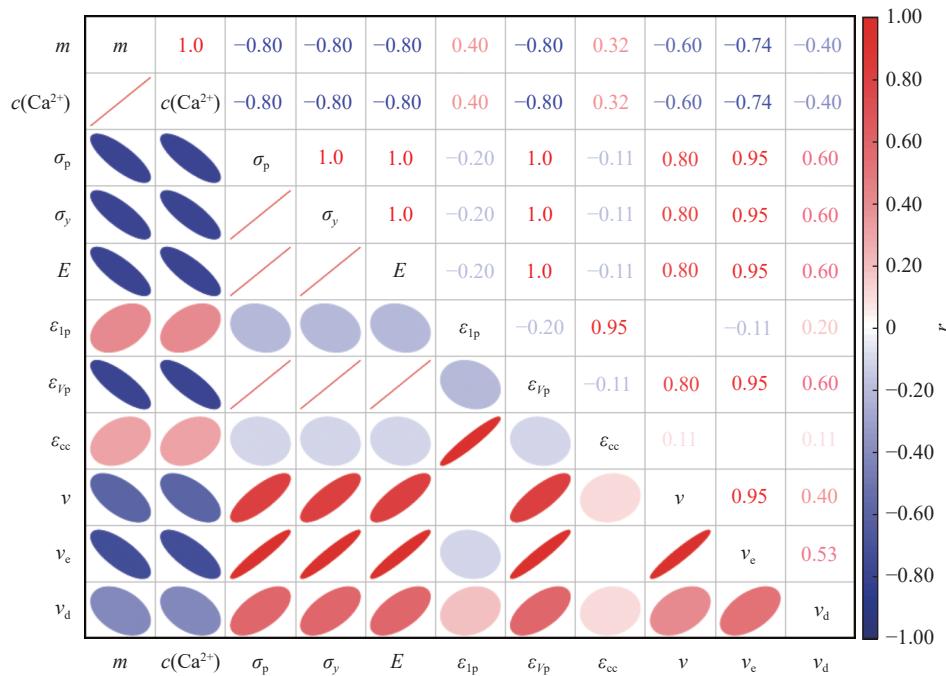


图 16 相关性系数热力图  
Fig.16 Correlation coefficient heatmap

## 5 结 论

1) 明确了砾岩的酸蚀机理。短时浸泡下, 质量砾岩浅层裂隙在生成物填充和液桥力作用下, 砾岩强度升高, 长时浸泡后, 砾岩中的方解石、钠长石、钙长石、白云母与硫酸发生化学反应, 从试件周边向内部渐进发展, 导致试件内部裂纹和孔洞增加, 晶体间力学联系减弱, 化学反应主要使胶结物质弱化, 对砾石影响较小。化学反应生成的  $\text{CaSO}_4$  等沉淀物会堵塞溶液的运移通道, 阻止了化学反应的持续发生, 因此离子溶液浓度、酸蚀试件质量和强度等最终趋于稳定。

2) 耗散能密度变化率表明砾岩的损伤机制随酸浸时间增加而改变。试件在峰后阶段的损伤速率呈现“慢-快-慢”特征, 损伤速率变化程度随着浸泡时间增加逐渐减小, 表明长时酸浸作用下砾岩的破坏模式由能量突然释放的脆性破坏向塑性损伤发展, 破坏过程更加平缓。

3) 相关性分析揭示了砾岩物理化学参数与力学性能的相关性。峰值应力、弹性模量、屈服应力与总应变能密度极强正相关( $r>0.8$ ), 表明试件强度越高, 存储的弹性能越多, 破坏时释放的总能量更大, 更具突然性。此外,  $\text{Ca}^{2+}$ 质量浓度与试件力学参数具有较强相关性( $r>0.6$ ), 说明  $\text{Ca}^{2+}$ 质量的浓度可作为监测砾岩酸蚀作用下力学性能评价的重要指标。在工程实践中, 可通过监测砾岩层位中金属阳离子质量浓

度, 预测其力学特性及稳定性, 为煤铀共采过程中的安全性评估提供理论支撑。

### 参考文献(References):

- [1] 张翔, 李江坤, 王培建, 等. 我国砂岩型铀矿勘查航空地球物理技术应用进展及展望[J]. 物探化探计算技术, 2025, 47(4): 487-496.  
ZHANG Xiang, LI Jiangkun, WANG Peijian, et al. Progress and prospects of airborne geophysical technology application in sandstone type uranium exploration in China[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2025, 47(4): 487-496.
- [2] 丁德馨, 李广悦. 溶浸采铀[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2015: 119-125.  
DING Dexin, LI Guangyue. Leaching uranium[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2015: 119-125.
- [3] ZHANG T, YUAN L, WEI Z, et al. Coupled multifield response to coordinate mining of coal and uranium: A case study[J]. Water, 2020, 12(1): 139.
- [4] 张通. 鄂尔多斯盆地煤铀协调开采扰动岩层多场耦合特征研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2018.  
ZHANG Tong. Research on the characteristics of multi-field coupling in the disturbance strata for coordinated mining of coal and uranium in Ordos Basin[D]. Beijing: China University of Mining and Technology-Beijing, 2018.
- [5] ZHANG T, HE X, ZHANG K, et al. Hydrogeology response to the coordinated mining of coal and uranium: A transparent physical experiment[J]. Geofluids, 2021, 2021(1): 6236455.
- [6] 袁亮. 煤及共伴生资源精准开采科学问题与对策[J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 1-9.

YUAN Liang. Scientific problem and countermeasure for precision mining of coal and associated resources[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(1): 1–9.

[7] 黄炳香, 韩晓克, 赵兴龙, 等. 采动岩层多相多场耦合运动数字孪生方法构想[J]. *中国矿业大学学报*, 2024, 53(6): 1037–1052.

HUANG Bingxiang, HAN Xiaoke, ZHAO Xinglong, et al. Research framework of digital twin construction method for mining induced strata movement under multiphase and multifield coupling[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2024, 53(6): 1037–1052.

[8] 黄炳香, 赵兴龙, 韩晓克, 等. 煤系共伴生矿产协同开发[J]. *采矿与安全工程学报*, 2024, 41(1): 1–14.

HUANG Bingxiang, ZHAO Xinglong, HAN Xiaoke, et al. Collaborative development of co-existed and associated minerals in the coal series[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2024, 41(1): 1–14.

[9] 赵兴龙, 黄炳香, 吴占伟, 等. 煤系共伴生矿产分区错时协调开采原理[J]. *采矿与安全工程学报*, 2024, 41(1): 74–85.

ZHAO Xinglong, HUANG Bingxiang, WU Zhanwei, et al. Principle of spatial delineation and temporal stagger coordinated mining of coal series co associated minerals[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2024, 41(1): 74–85.

[10] 曾晟, 叶文浩, 徐华清. 煤型铀矿床煤铀协同开采理论模型[J]. *金属矿山*, 2020(5): 117–123.

ZENG Sheng, YE Wenhao, XU Huaqing. Theoretical model of synergistic mining of coal and uranium in uranium bearing coal deposit[J]. *Metal Mine*, 2020(5): 117–123.

[11] CROIZÉ D, BJØRLYKKE K, JAHREN J, et al. Experimental mechanical and chemical compaction of carbonate sand[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2010, 115(B11): 2010JB007697.

[12] YU L Y, ZHANG Z Q, WU J Y, et al. Experimental study on the dynamic fracture mechanical properties of limestone after chemical corrosion[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2020, 108: 102620.

[13] HUO R K, LIANG Y L, LI S G, et al. The damage mechanism and deterioration characteristics of acid-corroded sandstone: An experimental study[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2022, 15(6): 537.

[14] 霍润科, 王龙飞, 李曙光, 等. 受酸腐蚀砂岩的损伤特性和分析模型[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2022, 44(1): 1–9.

HUO Runke, WANG Longfei, LI Shuguang, et al. Characteristics and analytical model of acid-corroded sandstone[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2022, 44(1): 1–9.

[15] 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 a reaction kinetic model of acid-corroded sandstone[J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, 2020, 36(5): 893–902.

[16] 霍润科, 韩飞, 李曙光, 等. 受酸腐蚀砂岩物理化学及力学性质的试验研究[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 51(1): 21–26.

HUO Runke, HAN Fei, LI Shuguang, et al. Experimental study on physicochemical and mechanical properties of acid-corroded sandstone[J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition)*, 2019, 51(1): 21–26.

[17] 陈卫昌, 李黎, 邵明申, 等. 酸雨作用下碳酸盐岩类文物的溶蚀过程与机理[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(11): 2058–2067.

CHEN Weichang, LI Li, SHAO Mingshen, et al. Experimental study on carbonate dissolution and erosion effect under attack of simulated sulphuric acid rain[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(11): 2058–2067.

[18] 何春明, 郭建春. 酸液对灰岩力学性质影响的机制研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(S2): 3016–3021.

HE Chunming, GUO Jianchun. Mechanism study of acid on mechanical properties of limestone[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(S2): 3016–3021.

[19] 付丽. 酸性溶蚀作用下层状灰岩各向异性力学特性研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2023.

FU Li. Study on anisotropic mechanical properties of layered limestone under acid dissolution[D]. Guiyang: Guizhou University, 2023.

[20] 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 Jian, ZHAO Yanlin, LIU Qiang, et al. Experimental study on shear strength characteristics of limestone under acidizing corrosion[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2020, 37(3): 639–646.

[21] 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.

DING Wuxiu, XU Tao, WANG Hongyi, et al. Experimental study of mechanical property of limestone under coupled chemical solution and freezing-thawing process[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(5): 979–985.

[22] REINHARDT H W, MIELICH O. Fracture toughness of alkali-sensitive rocks in alkaline solution[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2014, 70: 552–558.

[23] VAZQUEZ P, CARRIZO L, THOMACHOT-SCHNEIDER C, et al. Influence of surface finish and composition on the deterioration of building stones exposed to acid atmospheres[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 106: 392–403.

[24] 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.

DING Wuxiu, CHEN Jianping, XU Tao, et al. Mechanical and chemical characteristics of limestone during chemical erosion[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(7): 1825–1830.

[25] 廖浩浩, 陈有亮, 李诗铭, 等. 化学溶蚀及冻融循环作用下砂岩的力学特性研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2020, 40(6): 1009–1017.

LIAO Haohao, CHEN Youliang, LI Shiming, et al. Mechanical properties of sandstone under freeze-thaw cycling and chemical corrosion[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2020, 40(6): 1009–1017.

[26] RUTQVIST J. Fractured rock stress-permeability relationships from in situ data and effects of temperature and chemical-mechanical couplings[J]. *Geofluids*, 2015, 15(1-2): 48-66.

[27] HUANG Z, ZENG W, GU Q X, et al. Investigations of variations in physical and mechanical properties of granite, sandstone, and marble after temperature and acid solution treatments[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 307: 124943.

[28] 王帅, 许莹, 张艳博, 等. 粗颗粒砂砾岩内矿物颗粒和孔隙结构的非均匀性及量化表征细观试验研究[J]. 煤炭学报, 2024, 49(S2): 832-844.  
WANG Shuai, XU Ying, ZHANG Yanbo, et al. Microscopic experimental study on the heterogeneity and quantitative characterization of mineral grains and pore structures in coarse-grained glutenites[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(S2): 832-844.

[29] 段雪雷, 张强, 曹亚军, 等. 复杂水环境-应力状态下西域砾岩水敏效应与力学损伤特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(12): 2992-3004.  
DUAN Xuelei, ZHANG Qiang, CAO Yajun, et al. Study on water sensitivity effect and mechanical damage characteristics of Xiyu conglomerate under complex water environment and stress condition[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2024, 43(12): 2992-3004.

[30] 田巍巍, 陈洁, 吴彬. 西域组钙质胶结砾岩物质构成试验研究[J]. 水利水电技术, 2018, 49(12): 185-193.  
TIAN Weiwei, CHEN Jie, WU Bin. Experimental study on material composition of Xiyu Formation calcareous cementitious conglomerate[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2018, 49(12): 185-193.

[31] 李江华. 弱胶结巨厚砂砾岩含水层离层突水机制研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(2): 209-218.  
LI Jianghua. Study on separated layer water burst mechanism for weakly cemented giant thick glutenite[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(2): 209-218.

[32] 刘见通. 玛湖砾岩储层破裂过程与水力压裂裂缝扩展规律研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2022.  
LIU Jiantong. Failure process and hydraulic fracture propagation of Mahu conglomerate reservoir[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2022.

[33] 刘春雨. 酸法地浸过程中铀的迁移特征实验研究: 以某砂岩型铀矿为例[D]. 抚州: 东华理工大学, 2023.  
LIU Chunyu. Experimental study on uranium migration characteristics in acid leaching process[D]. Fuzhou: East China Institute of Technology, 2023.

[34] 姜伟生. 编程不难 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2024: 584-588.  
JIANG Weisheng. Easy programming[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2024: 584-588.

[35] 林同华. 线性模型有偏估计的一种新算法 [D]. 福州: 福州大学, 2016.  
LIN Tonghua. A new algorithm of biased estimation in linear model[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2016.

[36] 谢和平, 彭瑞东, 鞠杨, 等. 岩石破坏的能量分析初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(15): 2603-2608.  
XIE Heping, PENG Ruidong, JU Yang, et al. On energy analysis of rock failure[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(15): 2603-2608.

[37] 黄达, 黄润秋, 张永兴. 粗晶大理岩单轴压缩力学特性的静态加载速率效应及能量机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(2): 245-255.  
HUANG Da, HUANG Runqiu, ZHANG Yongxing. Experimental investigations on static loading rate effects on mechanical properties and energy mechanism of coarse crystal grain marble under uniaxial compression[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(2): 245-255.

[38] 马永安, 于崇, 李海波, 等. 三轴及循环加载下花岗岩力学特性与能量演化研究 [J/OL]. 岩石力学与工程学报, 2025: 1-13. [2025-01-15]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1397.03.20250114.1041.002.html>.  
MA Yongan, YU Chong, LI Haibo, et al. Study on the mechanical properties and energy evolution of granite under triaxial and cyclic loading and unloading conditions[J/OL]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2025: 1-13. [2025-01-15]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1397.03.20250114.1041.002.html>.

[39] 朱传奇, 李传明, 殷志强, 等. 不同含水率及黏土含量下松软煤体力学特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(S1): 3258-3265.  
ZHU Chuanqi, LI Chuanming, YIN Zhiqiang, et al. Experimental study on mechanical characteristics of soft coal under different moisture content and clay content[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(S1): 3258-3265.

[40] 刘小玲, 张泽天, 张茹, 等. 浸水煤体单轴压缩能量破坏机理及层理效应[J]. 工程科学与技术, 2025, 57(1): 189-200.  
LIU Xiaoling, ZHANG Zetian, ZHANG Ru, et al. Energy failure mechanism and bedding effect of soaked coal under uniaxial compression[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2025, 57(1): 189-200.

[41] 韩丽娟. 基于 Kendall 秩相关系数的高维数据独立性自适应检验 [D]. 开封: 河南大学, 2023.  
HAN Lijuan. An adaptive test of the independence of high-dimensional data based on Kendall rank correlation coefficient[D]. Kaifeng: Henan University, 2023.