DOI:10.11705/j. issn. 1672 - 643X. 2018. 02. 35

侵蚀性流体作用下石灰岩渗透性变化规律

杜昀宸,张肖肖,盛金昌,吴彦青,周庆,刘星星 (河海大学水利水电学院,江苏南京210098)

摘 要:为研究侵蚀性流体渗透过程中完整石灰岩石渗透性的变化规律,设计3组不同的渗透溶液化学侵蚀条件和应力条件下的石灰岩芯渗透实验,通过测量每种工况下不同时刻渗出液流量、渗出液中含有的离子浓度等数据,分析完整石灰岩渗透特性的主要影响因素和演化机理。实验结果表明:渗透液体侵蚀和应力施加对岩石渗透性演变存在不同作用。由于加压(围压、轴压、渗透压)对岩芯渗透性具有时效性,在实验初期(0~50h)3种工况下岩芯渗透率都急剧下降,应力作用是引起岩石渗透率变化的主要因素;随着实验过程的进展,岩芯内部孔隙喉道逐渐闭合,大约50h之后,渗透流体的化学侵蚀作用开始显现,在之后的330h中,渗透液为蒸馏水时岩芯渗透率基本趋于稳定,渗透溶液为pH=6的硫酸钠溶液或硫酸溶液时岩芯渗透率则持续下降,表明实验后期渗透液的化学侵蚀作用对岩芯渗透率演变起主要作用。3种工况实验过程中岩芯渗出液中始终有离子溶出,但是不同的渗透液体对岩芯矿物质的溶解效果有差异,显著改变渗出液的离子浓度和离子浓度比值。当渗透溶液中存在促进矿物质溶解的成分并且渗透压力较小时,渗透液中离子逐渐积累变多但不能及时被运移到岩芯外,从而可能产生沉淀堵塞岩芯渗透通道。实验过程中,完整石灰岩石渗透性的演变特性是渗透溶液的侵蚀作用、应力作用和溶质运移沉淀共同作用的结果。

关键词:完整石灰岩石;渗透特性;侵蚀性渗透溶液;耦合渗透实验

中图分类号:TU458 + . 2

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)02-0212-07

Limestone permeability evolution under the infiltration of erosion fluid

DU Yunchen, ZHANG Xiaoxiao, SHENG Jinchang, WU Yanqing, ZHOU Qing, LIU Xingxing (College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to study the complete limestone rocks´permeability evolution law during the process of erosive fluid infiltration, three different penetrant experiments of the limestone core under the conditions of chemical erosion and stress of the infiltration solution were designed. By measuring the flow rate of exudate and the ion concentration contained in the exudate at different times in each working condition, the main influencing factors and evolutionary mechanism of the complete limestone permeability were analyzed. The experimental results show that the infiltration of liquid and the application of stress have diverse effects on the evolution of rock permeability. At the beginning of the experiment $(0 \sim 50 \text{ h})$, since the pressurization (surrounding pressure, axial pressure, osmotic pressure) has a time – dependent permeability to the core, the core permeability decreased sharply under the three conditions, and stress effect was the main factor that caused the change of rock permeability. As the experimental process progresses, the pore throat inside the core gradually closes. The chemical erosion of the permeable liquid began to appear after about 50 h. In subsequent 330 h, the permeability of the core was basically stable if penetrant was distilled water. When the permeation solution was sodium sulfate solution or sulfuric acid solution with pH = 6, the core permeability decreased continuously which indicated that at the end of the experiment chemical erosion played a key role in the evolution of core permeability. In the three working

收稿日期:2017-09-29; 修回日期:2017-12-07

基金项目:国家自然科学基金项目(51579078、51474204、51679070);河海大学优秀创新人才支持计划项目;中央高校基本 科研业务费专项(2015B20514);江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(KVLX15_0434)

作者简介:杜昀宸(1992-),女,河北唐山人,硕士研究生,研究方向为工程渗流及地下水。

通讯作者:盛金昌(1969-),男,安徽铜陵人,博士,教授、博士生导师,研究方向为岩体渗流及多物理场耦合机理。

conditions, ion dissolution happened in the core exudate all the time, but different permeation liquids had different dissolution effects on the minerals of the core, with significant changes in exudates of ion concentration and ion concentration ratio. When there were components promoting the dissolution of the mineral and a low osmotic pressure in the permeate solution, the ions gradually accumulated but cannot be transported out of the core in time, which caused precipitation to block the core permeation channel. During the experiments, the evolution of permeability of the complete limestone is a result of the combined action of erosion of the permeate solution, stress interaction and the solute precipitation.

Key words: complete limestone rock; seepage properties; erosive fluid infiltration; coupled permeation experiment

1 研究背景

我国西部水电资源的开发促进了深埋岩体工程在高水压、高应力、水化学等复杂地质环境下工作状况的研究,对这种特殊环境中多因素之间相互作用的研究是岩石渗透特性领域的一个重要课题^[1],对于岩体工程具有很大的科学意义和应用价值。由于耦合过程非常复杂,近年来国内外学者一直对侵蚀性流体渗透过程中岩石渗透特性的演变规律进行着不懈探索。

Elsworth 等^[2]探讨了反应流体的流动如何影响 密闭的碳酸盐岩裂缝渗透率发展的问题,定量得出 了裂缝张开和断裂闭合模式之间的转变模式;Yasuhara 等[3] 观察研究了在碳酸盐岩裂缝中主要进行的 机械和化学过程,发现孔隙中流体溶解的物质质量 浓度随应力、温度和pH值而改变,并能在一定程度 上反映裂缝渗透的演化:Khather 等[4] 观测到地质封 存中溶质和主岩之间发生化学反应后,大多数样品 的孔隙度和渗透率有所增加但少数样品以上两项指 标数值减小,这是由于矿物沉淀和机械压实机制的 综合效应产生的结果;Lisabeth 等[5] 通过在 CO, 饱 和水溶液中浸泡碳酸盐样品后进行流体静力学和三 轴变形实验,分析其应力、应变、渗透特性,结果表明 经过处理的样品中所出现的碳化溶解和碳酸盐矿物 沉淀作用会导致其刚度、强度和渗透率的降低; Liu 等[6]模拟了在水动力压力和温度改变作用下的石 灰石溶解过程,发现温度的升高会增大溶解速率,同 时水动力压力增强了化学溶解作用,并影响岩石的 矿物形态和内部孔隙结构;盛金昌等[7]设计了渗透 液为碳酸溶液的不同渗透压力下裂隙岩石渗透实 验,建立了裂隙开度变化率与渗出液中钙离子浓度 值之间的关系式,理论上描述了裂隙岩体在渗流 -应力 - 化学耦合作用下的渗透特性演化规律;杨金 保等[8]开展了在以硫酸钠为介质的酸性或碱性溶 液条件下的单裂隙花岗岩恒定三轴压应力渗透试 验,得出裂隙接触面矿物溶解、自由面矿物溶解以及矿物沉淀 3 种作用影响下裂隙开度的演化规律;姚华彦^[9]研究了在不同 pH 值的 0.1 mol/L 硫酸钠和氯化钙溶液水化学溶液浸泡后灰岩的宏细观力学特性,结果表明化学腐蚀作用对裂纹岩石破裂过程的影响主要表现在弱化力学参数和增大岩石非均质性两个方面;申林方等^[10]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了研究,提出了水岩化学反应及水力通道贯通两种因素的相互耦合会导致不同渗透溶液渗流情况下水力开度变化趋势不同的观点;郭慧^[11]探讨了煤体浸泡于 CO₂ 水溶液中发生的相互作用反应机理和影响因素,得到渗透率随时间的变化规律,分析了不同参数对渗透率变化的影响。

综上所述,多年来国内外学者开展了岩石介质 受到渗透作用、应力作用和化学侵蚀作用的现场或 室内实验,从实验现象到理论说明探索了岩体发生 的力学性质或渗透性质的变化,取得了一些有价值 的研究成果。但是这些实验主要是为了研究裂隙岩 石在化学渗透和压力作用下的变形损伤过程或完整 岩石经过化学溶液浸泡处理后的力学和渗透性质的 变化,然而自然状况或工程施工中的耦合条件更加 复杂,岩石的完整或破碎程度各不相同,且受到的应 力作用、流体的侵蚀和渗透作用是同时进行的,所以 实验的施加条件与工程实际还有一定距离,在侵蚀 性流体渗透作用下较完整岩石渗透性的演化机理研 究,仍有大量工作需要开展。

本文借助河海大学渗流实验室的高应力、高水 压、变温、大梯度等复杂条件下的多因素耦合渗透实 验平台,选取完整低渗石灰岩作为实验岩芯,在轴 压、围压、渗透压的作用下加入不同化学作用,设计 多组工况进行渗透实验。在实验过程中收集渗出 液,对其流量、离子浓度进行测量,通过不同指标的 数值变化趋势,定性分析完整石灰岩渗透特性的主 要影响因素和演化机理。

2 实验介绍

2.1 实验工况设计

本文实验目的是为了研究不同侵蚀性渗透溶液和应力作用下完整石灰岩渗透性的变化规律。根据实验目的,确定实验任务如下:

- (1)改变实验中的溶液侵蚀条件和应力条件,测定岩样渗流量,对比研究岩石渗透特性的演变规律;
- (2)测定渗出液中的离子浓度,探讨不同化学 溶液侵蚀条件对岩石中矿物质溶解的影响;
- (3)通过岩芯渗透率的变化和渗出液中离子浓度的变化,分析渗透侵蚀、应力的共同作用对岩石渗透特性的影响。

实验中各影响因素的指标确定如下:为了减小 应力对于渗透实验的影响,轴压选择实验仪器保持 稳定需要的最小值 6.5 MPa;根据岩石力学试验的 相关规范, 围压需要比渗透压高 0.2~0.5 MPa^[12], 本文实验中的围压统一高于渗透压 0.5 MPa;选取 强酸中挥发性较小的硫酸调节溶液的酸性,并要控 制溶液中的 SO₄²⁻浓度不产生硫酸钙难溶沉淀,每 调节1 L pH = 6 的硫酸溶液需要1 mol/L 浓硫酸约 0.001 mL,其中的 SO₄²⁻可忽略不计;选择 Na₂SO₄ 溶液添加 Na + 以促进其与岩石中矿物质的反应效 率,实验中0.01 mol/L Na,SO4 最多会产生1.36 g/L 硫酸钙微溶物,小于其溶解度 0.264 g/100 g,所以 两种有化学溶液的工况都可以看作宏观总体不产生 沉淀[13]。根据以上对压力作用及渗透溶液的考虑, 结合实验目的和实验任务,得到设计实验工况如表 1 所示。

表1 实验工况

工况 轴压/		围压渗透压/MPa		海泽淡流
序号	MPa	组合 a	组合 b	渗透溶液
I	6.5	1/0.5	1/0.5	蒸馏水
II	6.5	1/0.5	1/0.5	$pH = 6$ 的 0. 01mol/L $Na_2 SO_4$ 溶液
	6.5	1/0.5	1.3/0.8	$pH = 6$ 的 H_2SO_4 溶液

2.2 实验装置简介

实验中使用的仪器设备为河海大学渗流实验室设计的高应力、高水压、变温、大梯度等复杂条件下岩石耦合渗透实验平台。实验需要使用的部分是计算机伺服系统、高精度静态伺服液压控制台、油源、油泵、压力系统、油水压力转换系统等。

各子系统之间的关系如图 1 所示,实验台示意如图 2 所示,实验设备的工作简要步骤为:将设计的实验工况输入到计算机中,计算机输出工作信号到高精度液压控制台,使压力系统通过油源和油泵直接将轴压和围压以油压的形式加载到压力室中的岩芯上;渗透压力通过油—水转换装置把油压转换为水压将渗透水箱里的指定溶液流经渗流通道施加到岩芯中;最后,由测量系统返回数据给计算机伺服系统以实时监控实验平台的工作状态,使实验能在无人值守条件下长期平稳连续运行。

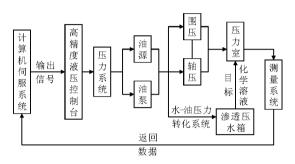


图 1 实验设备系统原理图

2.3 实验岩芯试样

实验采用的岩芯取自山东省嘉祥市的石灰岩,钻芯得到的底面直径 5 cm、高 10 cm 的低渗完整致密石灰岩圆柱体,分析得到其主要成分为碳酸钙90.37%、碳酸镁 5.56%、二氧化硅 2.40%,还有其他成分占比例不到 2%,试样的强度指标为压缩强度 127.7 MPa、干燥弯曲强度 14.1 MPa 与水饱和弯曲强度 17.3 MPa;选取同批次试样 6 个,使用核磁共振的方法^[14]得到其孔隙率均在 0.7% 左右,孔隙半径主要分布在 0.01~1 μm 范围内,其平均孔隙半径为 0.07 μm。

2.4 实验步骤

- (1)实验岩芯处理:将实验所用岩芯在蒸馏水中分4次加水浸泡,每次静置2h;然后放入真空饱和仪中进行饱水,直至岩芯表面无气泡逸出后解除真空。在已饱水的岩芯外套上长于试件的热缩管套,并用热风枪使其缩紧包裹在岩芯上,热缩管外面用铁箍将试件与渗透压头接触的位置箍紧后装入压力室腔体内,如图3所示。
- (2)实验加载过程:启动实验装置加载轴压至目标值后,围压注油加载指定围压;将渗透通道内空气排出,向渗透压水箱中注入调配好的指定溶液;输入渗透压数值,溶液沿渗流通道进入压力室,对岩芯施加水化学作用。
 - (3)获得实验数据:收集渗出溶液,计算岩芯渗

透率;将收集的渗出溶液进行杂质过滤和酸化处理,使用中国科学院南京土壤研究所的电感耦合等离子

体发射光谱仪(如图 4 所示)进行 Ca²⁺、Mg²⁺离子的浓度测量,并记录和分析相关数据。

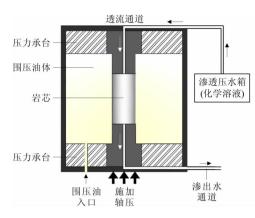






图 2 实验平台示意图

图 3 安装于实验台上的岩芯试样

图 4 电感耦合等离子体发射光谱仪

3 实验成果分析

岩石渗透率的实验室测量方法可以归纳为瞬态 法和稳态法两大类,其中稳态法实验需要时间较长, 但可以保证较高的精度^[15]。本文研究内容主要针对 低渗石灰岩在侵蚀性流体渗透过程中渗流特性随时 间演化规律,实验工况中应力、渗透压等条件长时间 保持不变,因此采取稳态法对岩石渗透率进行研究。

稳态法通过孔隙水压控制系统在岩石试样的两端提供稳定的渗透压差,记录渗流稳定时的渗透流量,基于经典的达西定律,利用下式可计算渗透率 *k* 的值。

$$k = \frac{Q \cdot \mu \cdot L}{A \cdot \Delta p} \tag{1}$$

式中: Q 为渗透流量, cm^3/s ; μ 为渗透流体介质的 动力黏滞系数, $Pa \cdot s$,根据每日测量的温度查取相 应值; L 为试样长度,cm; A 为试样断面面积, cm^2 ; Δp 为渗透压力差,Pa。

3.1 侵蚀性流体渗透过程中石灰岩芯渗透率演化 对比

不同岩芯的渗透率因其孔隙率和孔隙半径不同而有所差别,为了更直观地比较渗透率的变化趋势,将不同时刻的岩芯渗透率除以岩芯的初始渗透率 k_0 得到一个新的无量纲变量k',这里称之为归一化渗透率,即:某时刻渗透率占初始渗透率的百分比, $k'=\frac{k}{k_0}\times 100\%$ 。

图 5 为 3 种工况下岩芯归一化渗透率 k' 随时间的变化曲线图。从图 5 中可以看出,3 种工况的 k' 在前 50 h 都急剧下降至约 20%,变化规律相似,但是 50 h 后 3 种工况下 k' 的变化趋势产生差异,工

况 I 的 k' 值趋于稳定,最终归一化渗透率 k' 约为 10%;工况 II 和工况 III 实验进行到 400 h, k' 不能 达到稳定仍不断下降,两条曲线在 100 h 到工况 III 二次加压前基本重合,加压瞬间工况 III 的 k' 值突 变增大后再次下降与工况 II 曲线重合。分别绘制前 50 h 和 50 h 后的归一化渗透率变化速率曲线图以进一步统计归一化渗透率 k' 的变化规律,如图 6、图 7 所示。

图 6 中 3 种溶液渗透作用下前 50 h 归一化渗透率 k' 变化速率曲线相似,都是先快速下降然后在小数值范围内波动。实验进行到 50 h 后,从图 7 (a) 中看出工况 I 的 k' 变化速率的平均值贴近坐标轴,在零点附近进行比较对称的振动;图 7 (b) 工况 II 的 k' 变化速率曲线的振动幅度逐渐减小,但大部分数值小于零,平均值为 -0.065%/h;图 7(c) 为工况 III 的 k' 速率演化曲线图 (排除了加压瞬间 k' 的变化速率 3.5%/h),平均值约为 -0.043%/h,可以看出加压前后的工况 III 的 k' 变化速率规律无太大变化,虽然在 $-0.7\%/h \sim 0.3\%/h$ 附近振动,但是其下降速率普遍大于上升速率,所以工况 III 的 k' 演变曲线在图 5 中呈不断下降的趋势。

3.2 侵蚀性流体渗透过程中石灰岩芯渗出液离子 浓度变化对比

低渗石灰岩岩芯在侵蚀性流体渗透作用下,孔隙上的矿物质与渗透溶液发生反应,固体物质被冲刷,溶解于渗透溶液中以离子形式跟随溶液移动;另一方面,随着矿物质的溶解,渗透溶液中离子浓度逐渐增加,在孔隙中某些位置集聚沉淀。矿物质的溶解和沉淀两种作用会引起孔隙的扩大或堵塞从而导致岩芯渗透性的变化。实验中使用的石灰岩试样的

主要化学成分是碳酸钙(CaCO₃)、碳酸镁(MgCO₃)、少量二氧化硅(SiO₂)和其他成分,所以均匀选取实验渗透溶液样本,通过测试 Ca²⁺、Mg²⁺浓度对比不同侵蚀性流体渗透过程产生的效果。

图 8、9 分别为 3 种工况条件下渗出溶液 Ca²⁺、Mg²⁺浓度演变曲线图,图 10 为渗出溶液 Ca²⁺浓度与Mg²⁺浓度的比值演变曲线图。从图中可以看出,3 种化学条件下 0~50 h 的离子浓度有剧烈变化,50 h 之

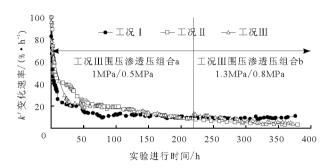


图 5 3 种工况溶液渗透作用下 k' 演变曲线图

后趋于平稳,本文主要分析后半部分的离子浓度变化规律。3 种不同化学溶液条件下收集的渗出液 Ca²+、Mg²+浓度在 50 h 后都缓慢下降,但 Ca²+、Mg²+浓度比值都基本稳定于定值。工况 I 渗出液中两种离子浓度和离子浓度比都低于其他工况;工况 II 渗出液中Ca²+浓度和离子浓度比为 3 种工况中最高,Mg²+浓度处于其他两种工况之间;而工况 III 的 Mg²+浓度最高,其他两项指标的稳定值都是第 2 位。

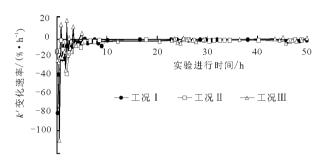
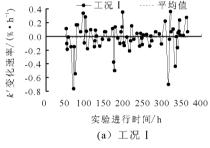
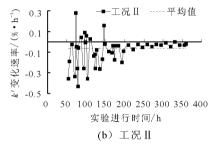


图 6 3 种工况溶液渗透作用下前 50 h 变化速率演变曲线图





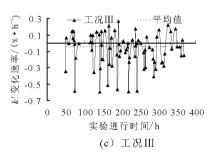


图 7 3 种工况溶液渗透作用下 50 h 后 变化速率演变曲线图

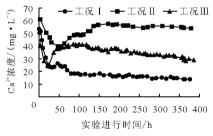


图 8 不同化学条件下渗了溶液 Ca²⁺ 浓度演变曲线图

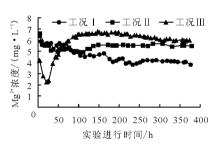


图 9 不同化学条件下渗出溶液 Mg²⁺ 浓度演变曲线图

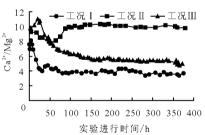


图 10 不同化学条件下渗出溶液两种 离子浓度比值演变曲线图

4 石灰岩岩石渗透性演变机理探讨

在设计的 3 种工况条件下,在侵蚀性流体渗透实验中的完整石灰岩于实验进行的前 50 h 时,归一化渗透率和变化速率演变趋势相似,但随着时间的增加,两种渗透性指标的演变产生了不同,且不同侵蚀性渗透条件对于岩石内矿物质溶解的效果有所差别。以下是根据实验成果分析应力、侵蚀性流体渗透以及离子沉淀对岩芯的渗透率和物质溶解产生的

影响。

4.1 应力条件对岩石产生的作用

上述侵蚀性流体渗透作用下石灰岩渗透实验的 3 种工况的初始轴压、围压和渗透压力的条件是相同的,在前 50 h 中呈现相似急剧下降的趋势。由于渗透率低的岩石其孔喉相对较细小,随着加压时间延长孔隙喉道相继闭合,渗透率逐渐降低。而初始渗透率低特别是低于 4.6 mD 的岩芯归一化渗透率随时间的下降幅度较大,在实验进行的前期下降明

显而后变缓^[16],本文实验中选取的岩芯渗透性很弱,其初始渗透率分别为 1.201、3.184 和 1.362 mD,属于应力敏感性较强的低渗透性岩芯,故实验中前 50 h 3 种工况的归一化渗透率急速下降是由于加压时间对于岩石的渗透率的时效性引起的。

随着时间的增加,在稳定应力作用下岩芯内孔 喉的闭合逐渐完成,渗透液为蒸馏水的工况 I 渗透率达到稳定,而渗透溶液为化学溶液的工况 II 和工况 III 渗透率持续下降,实验后期岩芯的渗透率在增大应力条件的瞬间增加,但是经过前期的实验加载容易变形的孔喉已经闭合,应力条件对岩芯渗透性的影响减弱,所以岩芯渗透率马上恢复到加压前的渗透率变化规律继续下降;219 h 时工况 III 的渗透压和围压同时增加了 0.3 MPa,从图 8~10 中曲线可知,压力的增加没有影响离子浓度的变化趋势。

在侵蚀性流体渗透作用下完整石灰岩石的渗透 性演化实验中,应力条件对于岩石性质的影响主要 在于对其渗透率的影响,且随时间逐渐减弱,而对岩 石内矿物质的溶解影响较小。

4.2 不同侵蚀性流体对岩石产生的作用

化学条件的不同能够影响岩芯的渗透性质。实验的前50h中,3种溶液条件下岩芯的归一化渗透率和变化速率趋势相似,在后续阶段,侵蚀性流体的存在会改变岩芯的渗透性质,对岩芯渗透率的影响逐渐显现出来,渗透液为蒸馏水的渗透率能够稳定,但是渗透液为侵蚀性流体的其他两种工况的渗透率不断降低。

化学条件的不同还能够影响岩芯中矿物质的溶解效果。渗透溶液为蒸馏水的工况 I 在实验进行时间超过 50 h 后,由图 10 看出渗出液的 Ca²+、Mg²+浓度比值约为 4 并保持不变,与岩芯试样中 Ca²+、Mg²+的质量比值 22.75 有差别,这是因孔隙壁与整体矿物质组成不同引起的;当渗透溶液为 pH = 6 的 0.01 mol/L 硫酸钠溶液时,由于 Na+可以置换 Ca²+、Mg²+和其他多种离子[17],且对于 Ca²+的置换作用大于 Mg²+,导致渗出液中 Ca²+、Mg²+浓度都有所增大而且两种离子浓度比值的最终稳定值最大,约为 10;工况 III 的渗透溶液为 pH = 6 的硫酸溶液, H⁺会与岩芯中的碳酸钙与碳酸镁反应加速离子的溶出,所以其渗透液中的 Ca²+、Mg²+浓度都高于工况 I,离子浓度比值的稳定值与工况 I 相近。

综上所述,在本次3种工况的在侵蚀性流体渗透作用下完整石灰岩石的渗透性演化实验中,化学条件的不同会影响岩石的渗透性质,并且会在实验

的后期逐渐体现;岩芯中矿物质的溶解主要与化学条件有关,从渗出液的离子浓度对比可知,溶液的酸性条件能够加强低渗石灰岩中的溶解作用,而 Na⁺的存在会加速 Mg²⁺特别是 Ca²⁺的溶出。

4.3 离子沉淀对岩石产生的作用

3 种化学条件下都有离子不断溶解到渗透溶液中,但是当渗透溶液中有其他离子存在时,岩芯的归一化渗透率没有随着物质的溶解增大,反而呈不断下降的趋势。根据 Luquot 等^[18]的研究,化学渗透对低渗石灰岩的作用效果与渗透压力有关,当渗透压力较高(6~10 MPa)时,化学溶液对岩石的溶解效果较强,使岩石孔隙增大进而增加其渗透性;但是随着渗透压力的降低至0.7 MPa时,岩石中矿物质溶解后离子浓度逐渐增加并在渗径后半段形成沉淀,从而造成岩石的孔隙率降低,渗透性减小。本文实验中的3种工况的初始渗透压力都为0.5 MPa,仅工况 III 于实验后期加大渗透压力至0.8 MPa,因渗透压力较小,离子在渗透通道中沉淀,从而产生实验中矿物质不断溶解而岩芯的归一化渗透率不断下降的现象。

由以上分析可知,因实验中加载的渗透压力较小,渗透溶液中具有促进岩芯溶解反应的物质使溶液中离子浓度显著增加,离子无法及时运移出岩芯产生的沉淀导致了岩芯渗透率的下降。

5 结 论

根据对 3 组不同工况条件下长期进行的完整石灰岩石在侵蚀性流体渗透作用下的渗透性演化实验成果的整理探讨,可得到如下结论:

(1)在应力条件相同的条件下,前50h3种化学溶液作用下岩石的渗透率变化率都快速降低而后又在小数值波动,渗透率急剧下降,而渗透溶液为pH=6的硫酸溶液(工况III)在实验进行到219h时实施了一次应力条件的提升,渗透率在加压瞬间有明显突变之后马上恢复到原有状态,但是岩芯中矿物质的溶解没有因应力条件的改变发生变化,应力条件由于加压时间对于岩石的渗透率具有时效性,在实验进行前期(前50h)是影响岩石渗透率的主要因素,随着实验的进行对岩石渗透率的影响力逐渐减弱,但是其对于岩芯矿物成分溶解的促进作用较小。

(2)3 种实验工况的渗出液中始终有 Ca²⁺、Mg²⁺溶解,Ca²⁺、Mg²⁺的浓度都随时间缓慢减小,但是两者比值会逐渐稳定到某一定值,岩芯中矿物质的溶解主要与渗透溶液的成分有关,溶液中 H⁺的

存在能够增强低渗石灰岩中 Ca²⁺和 Mg²⁺的溶解作用,溶液的 Na⁺会导致 Ca²⁺和 Mg²⁺浓度比值增大,溶液侵蚀性条件是影响岩石中矿物质溶解的主导因素,增加酸性条件可以加速矿物质的溶解,增加 Na⁺能够促进岩石中 Mg²⁺特别是 Ca²⁺的溶出,随着实验时间的延长对岩石渗透性质的影响逐渐显现。

- (3)实验过程中始终有矿物成分溶解于渗透溶液并以离子的形式流出,渗透溶液为蒸馏水时,渗透率可维持定值,但是在酸性条件(pH=6的硫酸钠溶液或硫酸溶液)下岩石的渗透率随着实验的进行逐渐降低无法保持稳定,岩芯渗透率的下降是由于当渗透溶液中具有侵蚀性成分存在时离子浓度显著增加,但是渗透压力较小使离子无法及时运移至岩芯外产生沉淀堵塞渗透孔隙所导致。
- (4)本文根据3种不同工况的实验成果探讨了应力作用、侵蚀性流体渗透作用和离子的沉淀作用对低渗石灰岩芯的渗透率和物质溶解的影响,但是设计的渗透压力和应力较小,且渗透溶液呈中性或酸性,还需进一步加大应力条件以及选择其他侵蚀性溶液进行研究。

参考文献:

- [1] 姚华彦,吴平. 岩石力学—化学耦合效应研究进展 [J]. 中国科技论文. 2013, 8(5): 391-396.
- [2] ELSWORTH D, YASUHARA H. Short timescale chemo – mechanical effects and their influence on the transport properties of fractured rock [J]. Pure and Applied Geophysics, 2006, 163 (10): 2051 – 2070.
- [3] YASUHARA H, ELSWORTH D, POLAK A, et al. Spontaneous switching between permeability enhancement and degradation in fractures in carbonate: lumped parameter representation of mechanically and chemically mediated dissolution [J]. Transport in Porous Media, 2006, 65 (3): 385 409.
- [4] KHATHER M, SAEEDI A, REZAEE R, et al. Experimental investigation of changes in petrophysical properties during CO₂ injection into dolomite rich rocks [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2017,59 (Supplement C):74 90.

- [5] LISABETH H P, ZHU W, KELEMEN P B, et al. Experimental evidence for chemo-mechanical coupling during carbon mineralization in ultramafic rocks[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2017, 474 (Supplement C): 355 367.
- [6] LIU Qi, LU Yaoru, ZHANG Feng. Laboratory simulation experiment on dissolution of limestone under hydrodynamic pressure[J]. Carbonates and Evaporites, 2013, 28(1-2): 3-11.
- [7] 盛金昌,李凤滨,姚德生,等. 渗流 应力 化学耦合作用下岩石裂隙渗透特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(5);1016-1025.
- [8] 杨金保,冯夏庭,潘鹏志,等. 三轴压应力 化学溶液渗透作用下单裂隙花岗岩裂隙开度演化[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(9):1869 1878.
- [9] 姚华彦. 化学溶液及其水压作用下灰岩破裂过程宏细观力学试验与理论分析[D]. 北京:中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所),2008.
- [10] 申林方,冯夏庭,潘鹏志,等. 单裂隙花岗岩在应力 渗流 化学耦合作用下的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(7):1379 1388.
- [11] 郭 慧. 注 CO₂ 后煤中矿物质化学反应对渗透率变化的影响研究[D]. 北京:中国矿业大学,2016.
- [12] 付志亮. 岩石力学试验教程[M]. 北京: 化学工业出版社,2011.
- [13] 何 伟,吴晓琴,刘 芳. 硫酸钙在 $Ca-Mg-K-Cl-H_2O$ 体系转化过程中溶解度研究[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(5):35-38+70.
- [14] 狄勤丰,华 帅,顾春元,等. 岩心微流动的核磁共振可视化研究[J]. 实验流体力学,2016,30(3):98-103.
- [15] 李玉寿,马占国,贺耀龙,等. 煤系地层岩石渗透特性 试验研究[J]. 实验力学,2006,21(2):129-134.
- [16] 杨胜来,刘伟,冯积累,等.加压时间对储层岩心渗透率的影响[J].中国石油大学学报(自然科学版),2008,32(1):64-67.
- [17] 李庆诚. 钠离子置换作用对地下水硬度升高的影响 [J]. 环境科学丛刊,1987,8(2):47-53.
- [18] LUQUOT L, GOUZE P. Experimental determination of porosity and permeability changes induced by injection of CO₂ into carbonate rocks [J]. Chemical Geology, 2009, 265(1-2):148-159.