

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.1243

单相流体对砂岩强度特性的影响

李凯达¹, 胡少斌², 李小春², 伍 键¹, 樊清怡¹, 伍海清²

(1. 武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070;

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

摘 要: 在 CO₂ 地质封存过程中, CO₂ 注入深部岩层, 引起地层孔隙流体组分和压力的改变, 影响岩层的力学稳定性, 可能导致储盖层破裂、地表隆起, 并引发中小规模地震等不良后果。以砂岩为试验研究对象, 以 CO₂、N₂、H₂O 作为孔隙流体介质, 通过控制和调节流体的温度和孔隙压力, 开展了单相流体作用下岩石三轴压缩力学特性对比试验, 分析了单相流体耦合作用下岩石强度、弹性模量和泊松比等基本力学参数。研究发现, 高压孔隙流体使干燥砂岩的峰值强度和弹性模量均出现不同程度降低, 泊松比却有较为明显的升高现象, 且影响作用从大到小依次为 H₂O、CO₂、N₂。孔隙流体降低了干燥砂岩的脆性, 并增强了塑性变形, 且含水砂岩塑性最强。孔隙流体对砂岩力学特性影响程度取决于流体与岩石矿物成分的相互作用强弱, 分析认为砂岩中不同矿物成分对 CO₂、N₂、H₂O 的选择性吸附导致孔隙流体对砂岩强度影响差异明显, 且作用效应从大到小依次为 H₂O、CO₂、N₂。

关 键 词: CO₂ 地质封存; 单相流; 真三轴试验; 强度特性; 砂岩

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2018)05 - 1789 - 08

Influence of single-phase fluid on strength characteristics of sandstone

LI Kai-da¹, HU Shao-bin², LI Xiao-chun², WU Jian¹, FAN Qing-yi¹, WU Hai-qing²

(1. School of Civil Engineering & Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China;

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

Abstract: In the process of CO₂ geological storage, the mechanical stability of rock can be influenced by changes in the composition and pressure of pore fluid due to CO₂ injection into deep rock stratum. In addition, adverse consequences may further arise, such as reservoir caprock rupture, surface uplifting, and small and medium scale earthquakes. The triaxial compression tests of rock were conducted to compare the effects of pore fluid media of supercritical CO₂, N₂ and H₂O under single-phase fluid. The fluid temperature and pore fluid pressure were controlled and adjusted to analyse the strength, elastic modulus and Poisson's ratio under single-phase fluid coupling. It was found that the peak strength and elastic modulus of dry sandstone were reduced at various degrees by high-pressure pore fluid. However, Poisson's ratio increased obviously, and the impacts of pore fluid were H₂O, CO₂ and N₂ in the descending order. The pore fluid decreased the brittleness of dried yellow sandstone and enhanced plastic deformation to a certain degree. Besides, the water-bearing sandstone had the strongest plastic property. The effect of pore fluid on mechanical properties of sandstone depended on the strength of interaction between the fluid and mineral composition of rock. The selective absorption of CO₂, N₂ and H₂O by different mineral compositions of sandstone resulted in a significant difference in the effect of pore fluid on sandstone strength. The action effects ranked as H₂O, CO₂ and N₂ in the ascending order.

Keywords: CO₂ geological storage; single-phase; true triaxial test; strength properties; sandstone

1 引 言

消耗化石燃料产生的温室气体是导致全球气候变暖的主要原因, 其中 CO₂ 是引起全球变暖等一

系列环境问题的主要因素。因此, CO₂ 的减排已经成为人类社会共同关注的热点问题^[1]。中国勇于担当 CO₂ 减排责任, 非常重视 CO₂ 减排工作。我国政府于 2009 年确定了到 2020 年单位国内生产总值

收稿日期: 2016-05-30

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No. 2016YFB0600805); 中国清洁发展机制基金赠款项目 (No.2014069); 中国博士后科学基金面上项目 (No. 2015M582313); 中国博士后科学基金特别资助 (No. 2016T90745); 国家自然科学基金面上项目 (No. 41172285)。

This work was supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0600805), China Clean Development Mechanism Fund Grant Project (2014069), the China Postdoctoral Science Foundation Funding (2015M582313), the China Postdoctoral Science Foundation Funding (2016T90745) and the General Program of the National Natural Science Foundation of China (41172285).

第一作者简介: 李凯达, 男, 1995 年生, 硕士研究生, 主要从事 CO₂ 地质封存力学稳定性评价方面的研究工作。Email: inkstamplee@outlook.com

通讯作者: 胡少斌, 男, 1990 年生, 在站博士后, 主要从事 CO₂ 地质封存力学稳定性评价方面的研究工作。E-mail: hsbcmu@126.com

CO₂ 排放比 2005 年下降 40% ~ 45% 的减排目标, 以促进低碳经济的发展, 共同应对全球气候变化。

经国内外研究表明, CO₂ 封存与利用技术(carbon capture and storage, 简称 CCS) 是一项有效的 CO₂ 减排措施^[2]。超临界 CO₂ 有以下两种封存方式:

CO₂ 以超临界状态储存在岩石孔隙中或者溶解在孔隙流体中^[3-4]; 矿化并形成稳定的碳酸盐矿物^[5], 但矿化反应速度很慢^[6-7]。将超临界 CO₂ 注入深部咸水层, 其规模大、范围广, 被认为是最具发展前景的方法。目前, 适合储存 CO₂ 的地质储层有地下深部咸水层、废弃油气田、不具有开采价值的煤层等^[8-9]。将 CO₂ 埋藏于地下 800 ~ 3 500 m 深的地层, 在储层中, CO₂ 一般情况下为超临界状态, CO₂ 临界压强为 7.39 MPa, 温度为 31.10 °C, 临界密度为 0.4 ~ 0.6 g/cm³。向地下注入 CO₂ 的过程中, CO₂ 将会引起一系列物理化学反应, 储层及盖层的安全性至关重要。保证大范围、长时间储存超临界 CO₂ 的关键是保证储盖层的力学稳定性。影响储盖层稳定性的因素有: 断层活化并诱发地震^[10]; 裂隙岩层的超压破坏; 储盖层破裂^[10-11]; 注入点附近岩石的水力压裂; 井口泄漏^[12]等。大规模封存的 CO₂ 一旦泄露, 将会对环境造成重大危害^[13]。因此, 有必要对 CO₂ 影响下的岩石力学特进行研究。

目前, 国内外学者对于盖层中不同孔隙流体的岩石力学特性开展了室内试验。Hangx 等^[14-15]开展了 CO₂ 影响下的硬石膏分别在湿润和干燥、不同温度、不同围压下的三轴压缩试验, 并用现有的强度准则进行数据拟合, 发现 CO₂ 的存在对岩石破坏特征没有显著影响; CO₂ 和孔隙流体的化学作用缓慢, 但可能对岩层长期力学性能有影响, 其强度准则更符合 Mogi-Coulomb 强度准则。

Ojala 等^[16]研究了 CO₂ 影响下岩石的抗拉强度的变化, 比较试验数据发现 CO₂ 对抗拉强度影响并不大, 并发现 CO₂ 影响下的砂岩孔隙率下降。

Liteanu 等^[17]进行了干燥、水、CO₂ 影响下的水饱和和白垩岩三轴压缩试验, 发现孔隙流体的加入使白垩岩强度降低。赵仁保等^[18]利用 SEM、XRD 三轴岩石试验系统及岩芯驱替试验装置, 研究了 CO₂ 化学溶蚀对储层岩石矿物组成成分、孔隙结构及力学性能的影响。张帆等^[19]提出了无流体压力影响下的岩层力学本构模型, 分析了两相流体-岩层相互作用机制。盛金昌等^[20]进行了 CO₂ 溶液与石灰岩长期的渗流-应力-化学耦合作用下岩石裂隙渗透特性变化的试验研究。Liu 等^[21]开展了 CO₂ 气体短期作用下砂

岩的破坏试验, 在试验条件下, 水导致砂岩的拉伸强度稍有减弱, CO₂ 和 H₂O 水的共同作用不明显。

综上所述, 国内外学者研究了孔隙流体对岩石力学影响, 并取得了丰富的研究成果。然而, 不同孔隙流体对岩石强度特性的差异明显。目前, 我们对影响储盖层稳定性的因素还不够明确, 通过试验模拟深部岩石就很有必要。本文试图通过单相流耦合岩石真三轴力学试验获得应力-应变曲线、弹性模量等力学性质, 对比不同孔隙流体作用下岩石力学行为的变化, 揭示单相流水-岩、气-岩耦合作用下岩石力学差异原因。

2 试验方法

2.1 试验样品

为了保证砂岩试样的均质性, 方便试验结果分析, 试验样品为均质性较好的四川自贡砂岩, 主要由砂粒等多种矿物颗粒胶结而成。根据 XRD 测试结果, 岩石成分及含量见表 1。同时测得试样砂岩孔隙率为 10.155%, 通过稳定流量测得其渗透系数为 4.35×10^{-8} m/s。

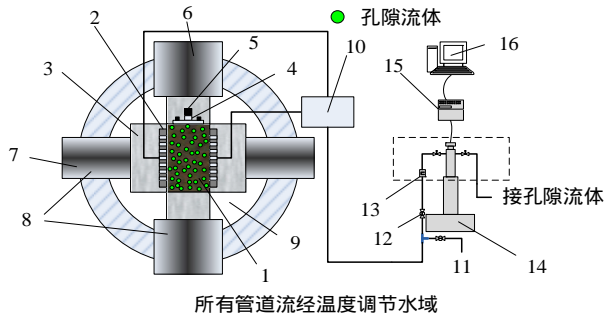
表 1 试样矿物组成
Table 1 Mineral composition of specimen

矿物成分	石英	钠长石	方解石	伊利石	蒙脱石
含量/%	50.73	34.01	10.59	3.32	1.36

2.2 试验设备和数据采集

本试验在中国科学院武汉岩土力学研究所自行研制的硬岩高压伺服真三轴试验系统上进行, 在原有的系统对加载板开小孔进行处理, 并与流体控制泵相连接, 实现了精确控制和调节 CO₂、N₂ 和 H₂O 的孔隙压力的功能。构建单相流条件下岩石的真三轴力学特性试验系统, 如图 1 所示。

本试验系统用于测试岩石在三个轴独立加载下的变形与破坏特征。系统采用横直滑动式对称加载结构和多轨道设计, 辅之可升降的试样定位装置, 配合高刚度加载框架和快速响应伺服控制系统, 能够对 3 个方向独立加载和伺服控制(位移控制模式和力控制模式), 解决了试样安置困难、偏心等问题, 并能有效地对硬岩破坏后区进行控制。此外, 该系统还能采用瞬态脉冲法、横流法等对岩石全应变过程进行渗透系数测量。本系统装置由油源、底座、一方向加载装置、二方向加载装置、围压加载装置、采集与控制装置以及渗流测试这 7 部分组成。系统模块分为三轴应力控制子模块、孔隙流体控制子模



1—单相流耦合岩石；2—多孔隔板；3—加载垫块；4—声发射传感器；5—软绵垫块；6—加载一方向；7—加载二方向；8—加载主轴；9—高围压加载腔体；10—温度调节水域；11—真空泵；12—球阀；13—过滤器；14—孔隙流体计量泵；15—控制器；16—电脑

图 1 单相流条件下岩石真三轴试验系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of true triaxial rock testing system under single-phase flow condition

块(包括温度控制)变形测量子模块和声发射测量子模块 4 部分。该试验系统能够独立精确控制三向轴应力、孔隙流体压力,并精确测量孔隙流体的瞬态质量、流量等参数,适用于真三轴应力路径下硬岩的应力-应变全过程加卸载试验、不同应力和应变状态下岩样的渗透系数测量。

孔隙流体压力的精确测量和控制采用 ISCO 100DX 计量泵。试样 3 个方向的变形均通过 LVDT 位移传感器来测量。单相流硬岩高压伺服真三轴试验系统如图 2 所示。

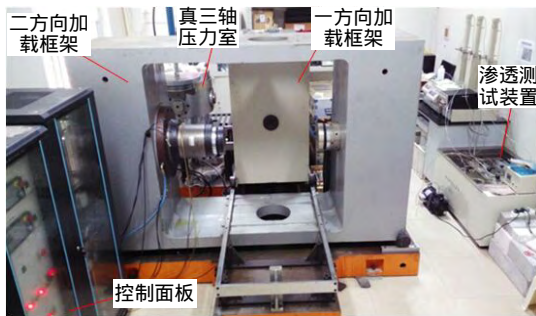


图 2 单相流条件下岩石真三轴试验系统

Fig.2 True triaxial rock testing system under single-phase flow condition

2.3 试验内容及方案

工业点源捕集的 CO₂ 往往含有少量 N₂ 杂质,并且李小春等^[22]提出 N₂ 自分离 CO₂ 含水层封存的方法(简称自分离封存);同时,考虑咸水层中水的作用,故本试验增加了以 N₂ 和 H₂O 作为孔隙流体的砂岩作为试验组。σ_i (i = 1, 2, 3) 分别对应加载一至三方向应力,且 σ₁ > σ₂ > σ₃ = P_C; P_C 为围压;有效主应力为 σ_i^{eff},且 σ_i^{eff} = σ_i - P_p; P_p 为孔隙压力。本试验开展干燥砂岩与分别含 N₂、含超临界 CO₂、

含 H₂O 单相流体条件下砂岩的真三轴力学特性对比试验,研究不同孔隙流体作用下砂岩强度及应力应变特征,以期发现 N₂、超临界 CO₂ 和水对岩石力学特性作用机制的差异,初步揭示流体种类对岩石力学行为影响机制。试验时,考虑到超临界 CO₂ 相变特性和地层孔隙流体状态,试验选择孔隙流体压力为 10 MPa、温度为 311 K (38)。具体试验参数见表 2。

表 2 气体和水对岩石力学特性影响试验参数

Table 2 Gas and water parameters affecting mechanical properties of rock

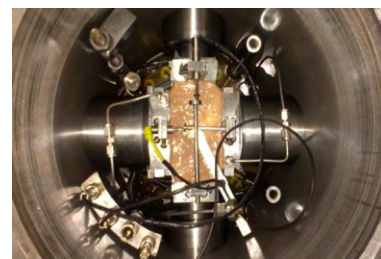
孔隙流体	P _p / MPa	σ ₂ / MPa	σ ₃ / MPa	抽真空时间 / h	流体平衡时间 / h	试验温度 T / K	位移加载速率 / (mm/s)
无	0	15	10	6	6	311	0.001
N ₂	10	25	20	6	6	311	0.001
CO ₂	10	25	20	6	6	311	0.001
H ₂ O	10	25	20	6	6	311	0.001

砂岩按国际岩石力学学会标准,被打磨成 50 mm×50 mm×100 mm 的长方体标准试样,将标准试样置于干燥箱内存放以备试验用,如图 3(a)所示。

如图 3(b)所示,将试样安装于三轴压力室。由于围压通过油压加载,需要将试样与液压油隔离。项目组成员发现,一种地板胶有较强的变形能力,受压变形时不会开裂,长期浸泡在液压油中不会与油发生反应,将其作为岩石密封材料。故在试验前,先将地板胶涂于试样表面及垫块之间的空白角处,



(a) 试样置于干燥箱



(b) 三轴压力室

图 3 试样与三轴压力室安装

Fig.3 Specimen and triaxial pressure chamber installation

厚度约 2~3 mm,能有效防止压力室中的液压油浸入试样。

试验过程包括试样安装、预加载并抽真空、孔隙流体饱和、加载 4 个阶段。以超临界 CO₂ 为例说明具体试验过程:

(1) 试样安装 将干燥试样和加载板之间的孔隙涂胶密封,待地板胶达到强度后,放入压力室内,如图 3(b)所示。安装完成后,连接上三向加载系统、流体平衡系统和数据采集系统。再盖上压力室密封盖将其密封,把油注满。

(2) 预加载并抽真空 由温度控制系统控制压力室内液压油温度维持在 311 K。预加载围压至 20 MPa(干燥砂岩为 10 MPa),将真空泵与岩石内部连接,抽真空 6 h。

(3) 孔隙流体饱和 关闭真空泵和阀门,控制 CO₂ 计量泵以恒压模式调节泵内 CO₂ 压强至指定数值,并饱和平衡 6 h,保证 CO₂ 与岩石充分作用。

(4) 加载 利用伺服加载系统将第二主应力方向加载至 25 MPa,待荷载稳定后,启动真三轴试验系统,采用位移控制模式,设置轴向位移加载速率为 0.001 mm/s,直至试验破坏,记录和保存应力-应变数据。

3 试验结果

在本文的试验中,开展了共 4 组对比试验,即干燥砂岩、含 N₂ 砂岩、含 CO₂ 砂岩和含 H₂O 砂岩的真三轴加载试验,每一组试验均做了相同条件下的验证试验,误差在 5% 以内,试验结果数据有参考价值。真三轴试验结果展现了在温度和有效应力不变的情况下不同孔隙流体作用下砂岩的力学特性,见图 4;特征数值及计算结果见表 3。

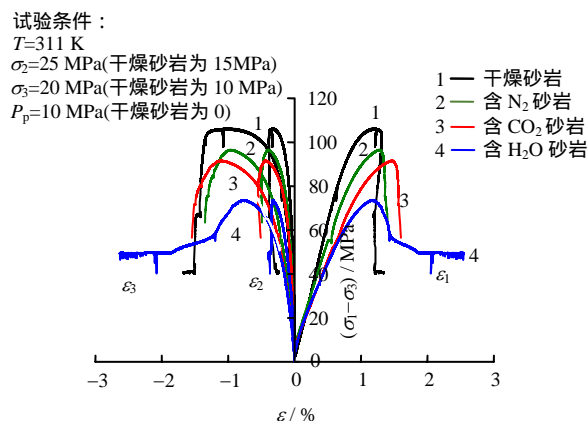


图 4 不同孔隙流体作用下主轴应力-应变曲线对比图
 Fig.4 Comparisons of stress-strain curves with different pore fluids

表 3 三轴压缩试验及计算结果表

Table 3 Tested and calculated results of true triaxial compression

孔隙流体	峰值应力 σ / MPa	屈服应力 σ_0 / MPa	弹性模量 E / GPa	泊松比 μ	I_σ / %	I_{σ_0} / %	I_E / %
干燥	105.235	80.239	11.681	0.209	0.0	0.0	0.0
含 N ₂	96.565	73.126	10.901	0.343	8.2	8.9	6.7
含 CO ₂	91.588	68.741	9.928	0.348	13.0	14.3	15.0
含 H ₂ O	73.774	54.104	8.883	0.371	29.9	32.6	23.9

注: $I_\sigma = \frac{\sigma_{\text{自然}} - \sigma_c}{\sigma_{\text{自然}}} \times 100\%$, $I_{\sigma_0} = \frac{\sigma_{0\text{自然}} - \sigma_{0c}}{\sigma_{0\text{自然}}} \times 100\%$, $I_E = \frac{E_{\text{自然}} - E_c}{E_{\text{自然}}} \times 100\%$, 即 $\sigma_{\text{自然}}$ 、 $\sigma_{0\text{自然}}$ 、 $E_{\text{自然}}$ 分别为干燥砂岩的峰值强度、屈服强度、弹性模量, I_σ 、 I_{σ_0} 、 I_E 分别为含有孔隙流体的试样的峰值强度、屈服强度、弹性模量相对于干燥砂岩的峰值强度、屈服强度、弹性模量的下降幅度^[23]。

从试验结果可知:

高压孔隙流体降低了干燥砂岩的峰值强度和弹性模量,且影响程度从大到小依次为 H₂O、CO₂、N₂。峰值强度方面,相比于干燥砂岩,在相同试验条件和围压下,饱和水砂岩强度降低了 29.89%,饱和 CO₂ 砂岩强度降低了 12.97%,饱和氮气砂岩弹性模量降低了 8.24%。弹性模量方面,相比于干燥砂岩,在相同试验条件和围压下,饱和水砂岩弹性模量降低了 23.95%,饱和 CO₂ 砂岩弹性模量降低了 15.01%,饱和氮气砂岩弹性模量降低了 6.68%。屈服强度方面,孔隙流体降低了砂岩的屈服强度。相比于干燥砂岩,在相同试验条件和围压下,饱和水砂岩屈服强度降低了 32.57%,饱和 CO₂ 砂岩屈服强

度降低了 14.33%,饱和氮气砂岩弹性屈服强度降低了 8.86%。含水砂岩的屈服强度下降幅度较大,说明孔隙水使得砂岩较早地出现了微裂缝,更容易被破坏。

泊松比反映了材料侧向变形特性的重要参数,会随着应力状态和加载方式的变化而变化^[24]。孔隙流体对干燥砂岩泊松比影响很大。含 N₂ 砂岩、含 CO₂ 砂岩、含 H₂O 砂岩泊松比依次增大,但含 N₂ 砂岩、含 CO₂ 砂岩相差不多。

试验过程中,计量泵监测到流量为正,说明含孔隙流体的砂岩在临近破坏时均发生了剪胀,含水砂岩试样剪胀尤其明显。当流体压强达到目标压强并平衡后,计量泵的流量读数为 0。加载过程前期,

计量泵流量为负,说明加载室的岩石内的孔隙被压缩,流体流出,导致计量泵内流体流入,流量为负。当加载到后期,流量为正,流体又进入岩石内部。分析认为岩石在临近破坏时产生剪切破裂面,孔隙体积增大而导致流体又进入。

岩石破坏后区特性也有很大差异。试验选用的干燥砂岩中的石英含量达 50.73%,质地较坚硬,在其应力达到峰值强度后应力-应变曲线陡降,出现明显的脆性破坏特征^[25]。含 N₂ 砂岩和含超临界 CO₂ 砂岩的破坏曲线表现出不明显的塑性变形,但仍以脆性破坏为主。

含 H₂O 砂岩在岩石破坏后期出现明显的塑性变形,岩石出现了软化特征。峰后后区曲线斜率为负,属于 I 型破坏^[26]。其残余强度为 50 MPa。由应力-应变曲线看出曲线并不光滑,有很多向下的突起,说明在近似相同的应变条件下,应力出现突然减小和反弹,有次生裂缝产生。总体而言,孔隙流体降低了干燥砂岩的脆性,增强了塑性。

4 分析与讨论

砂岩主要由砂粒等多种矿物颗粒胶结而成,表 1 已经罗列了本文试验用砂岩的矿物成分及比例,可见石英、长石、方解石占较大部分,伊利石和蒙脱石等黏土矿物所占比例较小。

由表 3 试验结果可知,温度和名义有效应力相同的情况下,不同孔隙流体作用下的砂岩力学特性差异很大。笔者认为,这可能同砂岩中不同矿物成分对 N₂、CO₂、H₂O 等不同孔隙流体的选择性吸附有关,来自黏土矿物的影响尤为重要。黏土矿物具有软化、崩解和膨胀等性质,其中蒙脱石吸水性和膨胀性显著^[27]。黏土矿物的吸附性按照引起吸附的原因不同可分为物理吸附、化学吸附和离子交换吸附。赵健^[28]通过模拟发现 CO₂ 分子在高岭石表面吸附位置和吸附形态多种多样,吸附能也较高,属于比较稳定化学吸附。吸附是一种不错的储存 CO₂ 的方法,特别是将天然的低成本的黏土矿物作为 CO₂ 吸附剂受到很多关注^[29]。此外,天然岩石可吸附 CO₂,并与其他物质作用形成碳酸盐等固态物质,但是历时较长。尽管通过水分子的层间吸附引起的水化蒙脱石溶胀性能已经被广泛研究,但是超临界 CO₂ 对矿物结构的作用仍不明确^[30]。现对试验结果原理解释如下。

水的作用机制:含黏土矿物岩石浸水后,黏土矿物与水分子之间产生吸附、扩散和渗透作用。经水化作用后的黏土矿物的晶格内部或者细的分散颗

粒周围生成结合水膜(水化膜),使得黏土矿物表面能降低,层间摩擦力减小。水分子进入岩石颗粒矿物颗粒间,产生了溶解、化学反应等削弱了颗粒间的联结力,使得浸水岩石的强度进一步降低。同时,矿物颗粒间的水膜增厚,晶格层间距增大,岩石呈现膨胀性质。但在加载过程中,刚性加载垫块限制了其受力一方向和二方向的位移,使得岩石在内部形成膨胀应力,进一步降低了岩石“有效围压”,使得岩石强度和弹性模量降低。

CO₂ 作用机制:超临界 CO₂ 存在相变,具有黏度低,扩散性和渗透性高等特性^[31]。饱和 CO₂ 岩石中,CO₂ 分子与矿物晶格产生相互作用,其作用的强弱与矿物晶格的种类、排列方式、层间离子键或共价键分布情况密切相关。CO₂ 本身能被黏土矿物吸附,比如蒙脱石吸附 CO₂ 能力很强,而且吸附几乎发生在瞬间^[32],这使得层间距增大。若岩石内存在吸附水,则有可能在层间形成含碳化合物,填充部分层间的体积,层间距进一步增大。吸附作用影响了矿物晶格层间力学平衡,使矿物宏观上表现出膨胀的趋势,有效围压减小,岩石强度和弹性模量降低。

N₂ 作用原理和效果与 CO₂ 有较大差别。N₂ 会与矿物颗粒发生物理吸附,使矿物晶格层间距增大,与矿物的表面积有关。这点与 CO₂ 差别不大。与超临界 CO₂ 不同的是:试验条件下 N₂ 处于气态(临界压强为 3.4 MPa,临界温度为 126.1 K),无相变特性;黏土矿物几乎没有对 N₂ 产生特征吸附现象;N₂ 性质比较稳定,试验条件下不易于岩石中的矿物或水发生化学反应。这些原因使得 N₂ 对砂岩强度特性的影响比 CO₂ 小。N₂、CO₂ 化学键的差异可能也是一个影响结果的重要因素,有待进一步研究证实。

组成岩石的矿物的复杂性和孔隙流体本身物理化学性质的差异导致试验结果大相径庭。本文选用砂岩矿物的吸附性能从大到小依次为蒙脱石、伊利石、方解石、钠长石、石英。矿物的吸附能力与矿物表面能有关,矿物表面积越大,吸附性越强^[27,33]。文献[34]给出了几种矿物表面积大小,见表 4。

矿物成分中,伊利石和蒙脱石对 N₂ 的吸附性最弱,对 CO₂ 的吸附性稍强,对水的吸附性最强。同时,由于吸附了 N₂、CO₂、H₂O 的黏土类矿物晶格层间距分别逐渐增大,晶格层间相互作用力依次减弱,表面能降低,有效围压依次减小,从而含 N₂ 砂岩、含 CO₂ 砂岩、含 H₂O 砂岩的强度和弹性模量依次降低。利用有效应力原理可直观地表达孔隙压

强、吸附作用、孔隙流体与矿物反应的作用效应，如图 5 所示，图中 c 、 ϕ 分别为干燥砂岩的内聚力和内摩擦角； c' 、 ϕ' 分别为有效应力下的内聚力和内摩擦角； σ'' 为孔隙压强， σ'' 为吸附应力。 σ_1 为第一主应力， σ_3 为第三主应力。

表 4 常见矿物比表面积

Table 4 Surface area of common clay minerals

黏土矿物	层间距 / nm	内表面积 / (m ² /g)	外表面积 / (m ² /g)	总表面积 / (m ² /g)
蒙脱石	0.96 ~ 2.14	750	50.00	800.00
伊利石	1.00	0	30.00	30.00
绿泥石	1.42	0	15.00	15.00
高岭石	0.72	0	15.00	15.00
石英砂		0	0.02	0.02

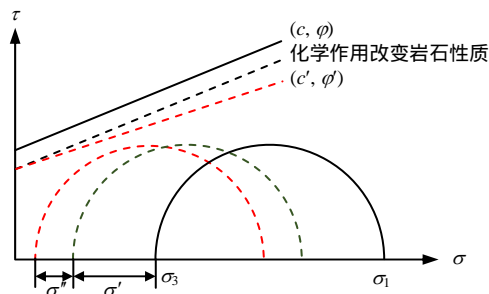


图 5 吸附膨胀应力作用机制

Fig.5 Mechanism of swelling stress

5 结 论

(1) 组成岩石的矿物的复杂性和孔隙流体本身物理化学性质的差异导致不同孔隙流体下砂岩的力学特性差异明显。高压孔隙流体使干燥砂岩的峰值强度和弹性模量减小，且影响作用由大到小依次为 H₂O、CO₂、N₂，故在储盖层设计的时候应考虑超临界 CO₂ 对岩石强度和弹性模量的削弱作用，保证工程安全。

(2) 岩石孔隙水在矿物表面形成结合水膜，降低了砂岩胶结强度，同时使黏土矿物表面能降低，矿物晶格层间摩擦力减小，并产生膨胀应力，使砂岩塑性增强，体现出较强的软化性，大幅度降低了岩石的强度和弹性模量。

(3) 岩石矿物会吸附 CO₂，且吸附能力与矿物表面能有关，矿物表面积越大，吸附能力越强，对砂岩强度和弹性模量的削弱作用增强。吸附导致黏土类矿物发生膨胀变形，产生膨胀应力，降低试验有效围压，使岩石强度降低。

致谢：感谢李小春研究员对试验的悉心指导和大力支持，感谢胡少斌老师对论文的指导！

参 考 文 献

- [1] CHANGE I P O C. Climate change 2007: the physical science basis[J]. *Agenda*, 2007, 6(7): 333.
- [2] HOLLOWAY S. An overview of the underground disposal of carbon dioxide[J]. *Energy Conversion and Management*, 1997, 38(Supp.): 193 - 198.
- [3] BACHU S, GUNTER W D, PERKINS E H. Aquifer disposal of CO₂: hydrodynamic and mineral trapping[J]. *Energy Conversion and Management*, 1994, 35(4): 269 - 279.
- [4] GUNTER W D, PERKINS E H, MC CANN T J. Aquifer disposal of CO₂-rich gases: reaction design for added capacity[J]. *Energy Conversion and Management*, 1993, 34(9 - 11): 941 - 948.
- [5] GILFILLAN S M V, LOLLAR B S, HOLLAND G, et al. Solubility trapping in formation water as dominant CO₂ sink in natural gas fields[J]. *Nature*, 2009, 458(7238): 614 - 618.
- [6] XU T, APPS J A, PRUESS K. Numerical simulation of CO₂ disposal by mineral trapping in deep aquifers[J]. *Applied Geochemistry*, 2004, 19(6): 917 - 936.
- [7] ZERAI B, SAYLOR B Z, MATISOFF G. Computer simulation of CO₂ trapped through mineral precipitation in the Rose Run sandstone, Ohio[J]. *Applied Geochemistry*, 2006, 21(2): 223 - 240.
- [8] 李小春, 刘延锋, 白冰, 等. 中国深部咸水含水层 CO₂ 储存优先区域选择[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 27(5): 963 - 968.
LI Xiao-chun, LIU Yan-feng, BAI Bing, et al. Ranking and screening of CO₂ saline aquifer storage zones in China[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 27(5): 963 - 968.
- [9] MICHAEL K, GOLAB A, SHULAKOVA V, et al. Geological storage of CO₂ in saline aquifers—a review of the experience from existing storage operations[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2010, 4(4): 659 - 667.
- [10] HOLLOWAY S, SAVAGE D. The potential for aquifer disposal of carbon dioxide in the UK[J]. *Energy Conversion and Management*, 1993, 34(9 - 11): 925 - 932.
- [11] GUPTA A P, GUPTA A, LANGLINAIS J. Feasibility of supercritical carbon dioxide as a drilling fluid for deep underbalanced drilling operation[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Texas: [s. n.], 2005.

- [12] HAWKES C D, MCLELLAN P J, BACHU S. Geomechanical factors affecting geological storage of CO₂ in depleted oil and gas reservoirs[J]. **Journal of Canadian Petroleum Technology**, 2005, 44(10): 52 - 61.
- [13] FLEURY M, PIRONON J, LE NINDRE Y M, et al. Evaluating sealing efficiency of caprocks for CO₂ storage: an overview of the geocarbone-integrity program and results[J]. **Energy Procedia**, 2011, 4(3): 5227 - 5234.
- [14] HANGX S J T, SPIERS C J, PEACH C J. The mechanical behavior of anhydrite and the effect of deformation on permeability development—Implications for caprock integrity during geological storage of CO₂[J]. **Energy Procedia**, 2011, 4(1): 5358 - 5363.
- [15] HANGX S J T, SPIERS C J, PEACH C J. The mechanical behavior of anhydrite and the effect of CO₂ injection[J]. **Energy Procedia**, 2009, 1(1): 3485 - 3492.
- [16] OJALA I O. The effect of CO₂ on the mechanical properties of reservoir and cap rock[J]. **Energy Procedia**, 2011, 4(4): 5392 - 5397.
- [17] LITEANU E, SPIERS C J, DE BRESSER J H P. The influence of water and supercritical CO₂ on the failure behavior of chalk[J]. **Tectonophysics**, 2013, 599: 157 - 169.
- [18] 赵仁保, 孙海涛, 吴亚生, 等. 二氧化碳埋存对地层岩石影响的室内研究[J]. **中国科学(技术科学)**, 2010, 40(4): 378 - 384.
ZHAO Ren-bao, SUN Hai-tao, WU Ya-sheng, et al. Laboratory study of carbon dioxide storage on the formation rock[J]. **Scientia Sinica (Technologica)**, 2010, 40(4): 378 - 384.
- [19] 张帆, 周辉, 吕涛, 等. CO₂注入下岩层变形和流体运移分析(I): 两相流-岩层耦合模型[J]. **岩土力学**, 2014, 35(9): 2549 - 2554.
ZHANG Fan, ZHOU Hui, LÜ Tao, et al. Analysis of reservoir deformation and fluid transportation induced by injection of CO₂ into saline aquifer (I): two-phase flow-reservoir coupling model[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(9): 2549 - 2554.
- [20] 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.
SHENG Jin-chang, LI Feng-bin, YAO De-sheng, et al. Experimental study of seepage properties in rocks fracture under coupled hydro-mechano chemical process[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(5): 1016 - 1025.
- [21] LIU M, BAI B, LI X. Experimental studies on the short term effect of CO₂ on the tensile failure of sandstone[J]. **Energy Procedia**, 2014, 63: 3357 - 3363.
- [22] 李小春, 方志明, 魏宁, 等. 我国CO₂捕集与封存的技术路线探讨[J]. **岩土力学**, 2009, 30(9): 2674 - 2678.
LI Xiao-chun, FANG Zhi-ming, WEI Ning, et al. Discussion on technical roadmap of CO₂ capture and storage in China[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(9): 2674 - 2678.
- [23] 鲁祖德. 裂隙岩石水-岩作用力学特性试验研究与理论分析[D]. 武汉: 中国科学院研究生院武汉岩土力学研究所, 2010.
LU Zu-de. Experimental and theoretical analysis on mechanical properties of fractured rock under water-rock interaction[D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [24] 孙益振, 邵龙潭. 基于局部与整体变形测量的粉土泊松比试验研究[J]. **岩土工程学报**, 2006, 27(8): 1033 - 1038.
SUN Yi-zhen, SHAO Long-tan. Experimental researches on Poisson's ratio of silty soil based on local and whole deformation measurements[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 27(8): 1033 - 1038.
- [25] 刘东燕. 岩石力学[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2014: 12 - 16.
LIU Dong-yan. Rock mechanics[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2014: 12 - 16.
- [26] 吴玉山, 林卓英. 单轴压缩下岩石破坏后区力学特性的试验研究[J]. **岩土工程学报**, 1987, 9(1): 23 - 31.
WU Yu-shan, LIN Zhou-ying. Experimental study of the post-failure behaviours of rock under uniaxial compressive loading[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1987, 9(1): 23 - 31.
- [27] 吉利明, 邱军利, 夏燕青, 等. 常见黏土矿物电镜扫描微孔隙特征与甲烷吸附性[J]. **石油学报**, 2012, 33(2): 249 - 256.
JI Li-ming, QIU Jun-li, XIA Yan-qing, et al. Micro-pore characteristics and methane adsorption properties of common clay minerals by electron microscope scanning[J]. **Acta Petrolei Sinica**, 2012, 33(2): 249 - 256.

- on reinforcement materials for mural base in humid environment[J]. **Dunhuang Research**, 2005, 93(5): 66 - 70.
- [16] 李黎, 赵林毅. 中国古代石灰类材料研究[M]. 北京: 文物出版社, 2015: 297 - 354.
LI Li, ZHAO Lin-yi. Study on the lime materials in ancient China[M]. Beijing: Cultural Relics Publishing House, 2015: 297 - 354.
- [17] 中华人民共和国水利部. SL264 - 2001 水力水电工程试验规程[S]. 北京: 中国水力水电出版社, 2001: 16 - 37.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. SL264-2001 Test procedure for hydraulic and hydroelectric engineering[S]. Beijing: China Hydraulic and Hydropower Press, 2001: 16 - 37.
- [18] SIEGISMUND S, SNETHLAGE R. Stone in architecture: properties, durability[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2011.
- [19] 刘新荣, 余海龙, 姜德义, 等. 岩盐顶板复合岩石力学性质试验研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2004, 26(3): 32 - 36.
LIU Xin-rong, YU Hai-long, JIANG De-yi, et al. Experimental study on mechanical properties of rock roof[J]. **Journal of Chongqing University of Architecture**, 2004, 26(3): 32 - 36.
- [20] 张玉, 徐卫亚, 赵海斌, 等. 碎屑砂岩三轴压缩下强度和变形特性试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 666 - 673.
ZHANG Yu, XU Wei-ya, ZHAO Hai-bin, et al. Experimental investigation on strength and deformation properties of clastic sandstone under triaxial compression[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(3): 666 - 673.
- [21] 尤明庆. 基于黏结合摩擦特性的岩石变形与破坏的研究[J]. 地质力学学报, 2005, 13(3): 286 - 292.
YOU Ming-qing. Study of deformation and failure of rock based on properties of cohesion and friction[J]. **Journal of Geomechanics**, 2005, 13(3): 286 - 292.
- [22] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 223 - 226.
CAI Mei-feng, HE Man-chao, LIU Dong-yan. Rock mechanics and engineering[M]. Beijing: The Science Publishing Company, 2002: 223 - 226.
- [23] 郭印同, 杨春和. 硬石膏常规三轴压缩下强度和变形特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1776 - 1780.
GUO Yin-tong, YANG Chun-he. Experimental investigation on strength and deformation properties of anhydrite under conventional triaxial compression[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(6): 1776 - 1780.
- [24] 杨圣奇, 温森, 李良权. 不同围压下断续预制裂纹粗晶大理岩变形和强度特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(8): 1572 - 1587.
YANG Sheng-qi, WEN Sen, LI Liang-quan. Experimental study on deformation and strength properties of coarse marble with discontinuous pre-existing cracks under different confining pressures[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(8): 1572 - 1587.
- [25] MORLEY A. Strength of materials[M]. London: Longman Green, 1944: 71 - 72.
- [26] BIENIAWSKI Z T. Mechanism of brittle fracture of rock, parts I, II and III[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts**, 1967, 4(4): 395 - 430.
- [28] 赵健. 软岩黏土矿物的掺杂机制及其吸附特性[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2013.
ZHAO Jian. The research on defect formation mechanism and adsorption property of clay minerals in soft rock[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing, 2013.
- [29] CASTRO GÓMEZ F, SALASSA G, KLEIJ A W, et al. A DFT study on the mechanism of the cycloaddition reaction of CO₂ to epoxides catalyzed by Zn (Salphen) complexes[J]. **Chemistry-A European Journal**, 2013, 19(20): 6289 - 6298.
- [30] 王平全. 黏土表面结合水定量分析及水合机制研究[D]. 成都: 西南石油学院, 2001.
WANG Ping-quan. The study for quantitative analysis of water absorbed on clays and their hydration mechanism[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2001.
- [31] 苏宝根. 超临界CO₂微乳液的热力学性质研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
SU Bao-gen. Study on the thermodynamic properties of microemulsion formed in supercritical carbon dioxide[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [32] DE JONG S M, SPIERS C J, BUSCH A. Development of swelling strain in smectite clays through exposure to carbon dioxide[J]. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, 2014, 24: 149 - 161.
- [33] TONE K, KAMORI M Y, SHIBASAKI Y, et al. Effect of the surface potential on the cation exchange capacity of Kaolin minerals[J]. **Clay Science**, 1998, 4(10): 327 - 335.
- [34] 赵杏援, 张有喻. 黏土矿物与黏土矿物分析[M]. 北京: 海洋出版社, 1990: 291 - 341.
ZHAO Xing-yuan, ZHANG You-yu. Clay minerals and clay mineral analysis[M]. Beijing: China Ocean Press, 1990: 291 - 341.

上接第 1795 页