

CO₂ – 水两相条件下砂岩致裂特征与有效应力模型的试验研究

刘明泽, 白 冰, 李小春, 高 帅, 王 磊, 伍海清

(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: CO₂ – 水两相条件下的岩石力学行为是 CO₂ 地质封存中的关键科学问题之一。利用自主研发的厚壁圆筒式两相致裂仪进行 CO₂ – 水两相条件下砂岩压裂试验, 并研究 CO₂ – 水两相有效应力模型。通过向试样加载内压、围压和轴压形成与井壁围岩类似的最小主应力为负的真三轴应力状态, 采用半透隔板法进行 CO₂ 驱水试验以精确控制试样孔隙中 CO₂ – 水两相流体的组分压力和饱和度, 最后通过内压致裂试样获得致裂压力。还进行了不同有效围压下含单相水孔流试样的致裂试验, 得到其致裂压与有效围压的拟合函数。为研究 CO₂ – 水两相有效应力模型, 选用 4 种可应用于岩石的非饱和介质有效应力公式与拟合函数联立推导得到破裂压力预测模型, 与试验结果对比以间接验证这 4 种有效应力公式对于表征 CO₂ – 水两相流体条件下有效应力的适用性。结果表明, 考虑 Biot 系数的 Bishop 非饱和有效应力模型能够较好地描述 CO₂ – 水两相流体下所测试砂岩的张性开裂行为, 可直接作为 CO₂ – 水两相有效应力模型使用。

关键词: 岩石力学; CO₂ – 水; 张拉破坏; 有效应力

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 – 6915(2016)02 – 0250 – 10

Experimental study of fracturing characteristics of sandstone under CO₂-water two-phase condition and effective stress model

LIU Mingze, BAI Bing, LI Xiaochun, GAO Shuai, WANG Lei, WU Haiqing

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

Abstract: The rock mechanical behavior under the two-phase pore fluid condition of CO₂-water is one of the key scientific issues in geological storage of CO₂. The fracturing experiments of sandstone in two-phase fluid of CO₂-water were conducted with the test device named hollow-cylinder tensile tester in two-phase fluid developed in-house. An effective stress model in two-phase fluid of CO₂-water was studied based on the experimental results. The internal, confining and axial pressures were imposed on the hollow cylinder sample to build a true triaxial stress state so that the minimum principal stress was negative, which was similar to the stress state in surrounding rock of borehole. A semi-permeable disk method was used to flood water to precisely control the partial pressure and saturation of two-phase fluid of CO₂-water in the sample. The fracturing pressure was measured by fracturing

收稿日期: 2015 – 07 – 14; **修回日期:** 2015 – 09 – 21

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(11102218); 国际科技合作计划项目(2012DFG61510)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No.11102218) and International Science and Technology Cooperation Program of China(Grant No.2012DFG61510)

作者简介: 刘明泽(1991 –), 男, 2011 年毕业于中南大学采矿与岩土工程专业, 现为博士研究生, 主要从事二氧化碳地质封存试验岩石力学方面的研究工作。E-mail: airdawn@yeah.net。通讯作者: 白 冰(1980 –), 男, 博士, 现任副研究员, 主要从事岩土力学理论、试验及其应用方面的研究工作。E-mail: bai_bing2@126.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2015.0951

the sample with internal pressure. The function of fracture pressure and effective confining pressure was fit with the results of the fracturing tests of samples in water under different effective confining pressures. Finally, the prediction models were deduced based on the fitting function and four types of unsaturated effective stress formula were proved to apply to rock. The prediction models were compared with the experimental result to indirectly verify the applicability of these formulas for describing the effective stress under the two-phase fluids of CO₂-water condition. The results indicated that Bishop's unsaturated effective stress formula was the most appropriate to describe the issue for the tested sandstone, which can be directly used as the effective stress model in two-phase fluids of CO₂-water.

Key words: rock mechanics; CO₂-water; tensile fracturing; effective stresses

1 引言

CO₂ 捕集与封存被认为是最具潜力的 CO₂ 减排技术之一^[1]。注入 CO₂ 时高压流体作用于井壁岩体使围岩产生周向拉应力, 结合上覆地层压力和水平向地应力使岩石处于最小主应力为负的三轴应力状态^[2]。这种应力状态下岩石可能发生张拉破裂, 导致井筒或盖层破坏^[3], 引起 CO₂ 泄漏, 使工程无法正常进行。而 CO₂ 进入地层使这一破坏现象变得更加复杂。

为实现 CO₂ 的成功注入, 井底 CO₂ 流体压力需高于地层孔隙水压力, 其差压驱使 CO₂ 侵入地层岩石孔隙并驱替其中的水^[4]。CO₂ 的非润湿性促使其占据孔隙中部空间, 而水附于岩石颗粒表面, CO₂-水接触面的表面张力以及毛管压力使 2 种流体间存在一定压差。越远离注入井, 地层岩石内 CO₂ 孔隙压力越小, 相应驱替作用形成的 CO₂ 饱和度越低^[5]。因此, 孔隙尺度上 CO₂-水两相流独特的物质与压力分布特征, 结合场地尺度上 CO₂ 孔隙压力与饱和度的非均匀分布使地层有效应力场变得极为复杂。另一方面, 与水相比 CO₂ 是可压缩流体, 孔隙中较大份额可压缩流体的存在会改变孔隙流体整体的可压缩性, 影响岩石的变形与破坏^[6]。因此, 研究不同相压力和相饱和度组合的 CO₂-水两相孔流下岩石在最小主应力为拉应力的三轴应力状态下的致裂特征具有重要的工程意义。

国内外学者针对 CO₂ 条件下岩石的力学行为开展了一系列的研究。Q. Li 等^[7]利用声发射系统监测砂岩与花岗岩在注入 CO₂ 时的破坏机制, 试验中 CO₂ 的注入使有效应力发生突变, 促进了岩石内裂纹成核与扩展, 导致岩石突发失稳; 赵仁保等^[8]研究了二氧化碳溶蚀对储层岩石矿物组分、孔隙结构及力学性能的影响, 发现 CO₂ 与岩石的长时间作用会导致其抗拉与抗压强度的下降; 李冠颖等^[9]采用

多种类型油井水泥在 CO₂ 条件下养护并测试了它们的力学性质和化学成分; 盛金昌等^[10]进行了石灰岩与 CO₂ 溶液长期的渗流-应力-化学耦合作用的试验研究; J. Samuelson 和 C. J. Spiers^[11]为模拟断层滑动, 分别使用砂岩和泥岩作为断层泥进行步进直剪试验, 得出 CO₂ 作为孔隙流体对其剪切破坏没有明显影响的结论; E. Liteanu 等^[12]分别对干燥、水饱和、注入 CO₂ 的水饱和白垩岩进行常规三轴压缩试验, 发现 CO₂ 的存在对岩石破坏特征没有显著影响; M. Liu 等^[13]开展试验研究了短期内 CO₂ 与水作为孔隙流体对砂岩张拉破坏的作用, 发现水会降低破裂压力而 CO₂ 没有明显的影响。以上研究对于认识 CO₂ 对岩石的力学性质及行为的影响具有重要意义, 表明 CO₂ 与岩石的化学反应在长期作用下对岩石力学性质有一定影响。然而, 关于 CO₂ 渗入岩石驱替孔隙水形成的 CO₂-水两相孔隙流体条件下岩石的力学行为以及这种条件下有效应力表征的研究尚未见报道。

本文拟基于厚壁圆筒式两相致裂仪^[14], 利用空心圆柱试样构建最小主应力为负的三轴应力条件, 采用非湿润相突破压为 1.5 MPa 的半透隔板进行 CO₂ 驱替水试验以形成特定分压及饱和度的 CO₂-水两相孔流, 并研究这一状态下砂岩的致裂条件与特征。再进行不同有效围压下含单相水孔流砂岩的致裂试验, 研究砂岩致裂压力随有效围压的变化规律。最后基于这 2 类试验和几种现有的非饱和介质有效应力模型研究 CO₂-水两相有效应力模型。

2 试验样品及装置

2.1 试验样品

本试验选用均质性较好并且石英含量高的四川自贡石英砂岩。采用同心水钻法制成高 100 mm, 内径 20 mm, 外径 50 mm 的厚壁圆筒试样, 加工误差 < 1 mm。这种尺寸的试样在岩石力学试验中被广

泛使用，具有一定代表性。厚壁圆筒石英砂岩试样如图 1 所示。将加工完成的试样用超声波洗净后烘干置于干燥箱内以备试验使用。通过压汞试验测得该砂岩孔隙率为 10.16%。加载 1 MPa 围压，控制试样两端压差为 0.3 MPa，根据通过试样流体的稳定流量测得其渗透率为 4.35 mD。通过 X-射线衍射试验分析其物性成分，主要为石英、高岭石和方钠石，试样 XRD 矿物分析结果如图 2 所示，试样矿物组成如表 1 所示。通过压汞试验测定其孔径分布，如图 3 所示，孔径尺度集中在 10 μm 左右。



图 1 厚壁圆筒石英砂岩试样

Fig.1 Thick hollow cylinder sample of quartz sandstone

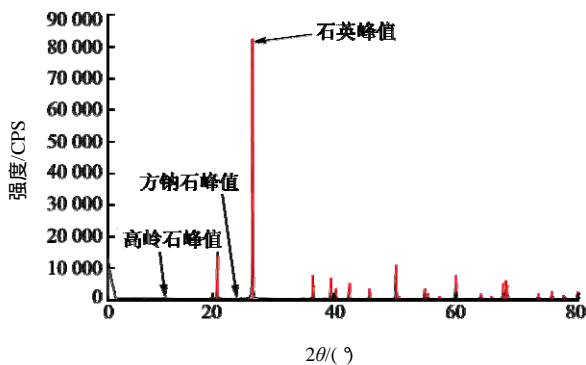


图 2 试样 XRD 矿物分析结果

Fig.2 XRD results of mineral analysis of sample

表 1 试样矿物组成

Table 1 Mineral composition of sample

矿物成分	含量/%
石英	97.73
高岭石	1.82
方钠石	0.45

2.2 试验装置

试验采用中国科学院武汉岩土力学研究所自主

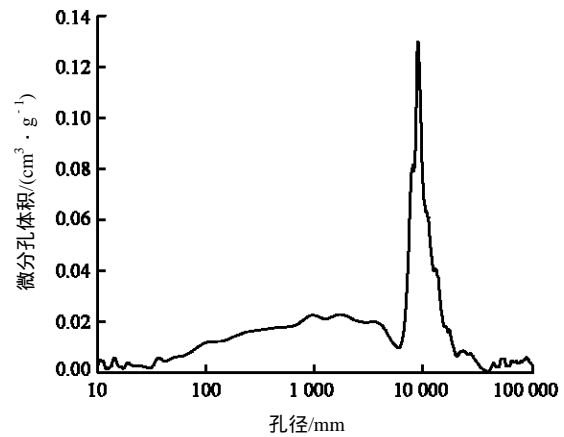


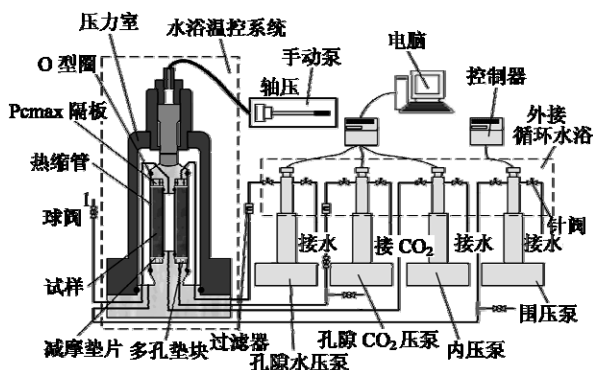
图 3 砂岩孔径分布图

Fig.3 Pore diameter distribution of sandstone

研发的厚壁圆筒式两相流体致裂仪，如图 4 所示。装置由温度控制子系统、三向加载子系统、两相流体子系统、数据采集子系统和压力室五大部分组成。温度控制子系统包括恒温水浴箱和外接循环水浴，分别用于控制压力室和计量泵温度，控制范围为 10 ~ 95 ，温度波动 0.1 。三向加载子系统由 2 台计量泵(ISCO 100D, ISCO 500D)和手动油压泵组成，分别用于加载内压、围压和轴压。计量泵可精确控制压力与流量，并实时记录压力、流量和体积数据。内压泵压力控制范围为 0 ~ 68.95 MPa，压力控制精度 0.5%，流量范围 0.01×10⁻³ ~ 50 mL/min，控制精度 0.5%。围压泵压力控制范围为 0 ~ 25.86 MPa，压力控制精度 0.5%，流量范围 1.0×10⁻³ ~ 204 mL/min，控制精度 0.5%。手动油压力泵压力范围为 0 ~ 50 MPa。试验的岩芯驱替部分主要由两相流体子系统完成，该子系统主要包括 2 台 ISCO 260D 计量泵和半透隔板，2 台计量泵分别控制孔隙水和孔隙 CO₂ 的加载，压力控制范围为 0 ~ 51.71 MPa，压力控制精度 0.5%，流量范围 1.0×10⁻³ ~ 107 mL/min，控制精度 0.5%。半透隔板经过加工后被镶入上端垫块圆孔中，其对非湿润相的进气值压为 1.5 MPa，这意味着当岩样孔隙中 CO₂ 压力与水压力的差值低于该数值时，CO₂ 将无法通过隔板，而水能正常通过。数据采集系统可通过计量泵的控制采集到流量、体积和压力实时数据。压力室包含顶罩、试样夹持器和多条流体通路。试验过程中围压流体、内压流体和试样间通过特氟龙热缩管和 O 型圈密封以防止压力窜通。装置管路采用外径 3.18 mm(1/8 英寸)，内径 0.9 mm 的不锈钢无缝钢管，接头采用卡套接头、螺纹接头连接，阀门采用针阀和球阀。设备整体耐压 50 MPa。使用紫铜片与聚四氟



(a) 实物图^[14]



(b) 原理图

图 4 厚壁圆筒式两相流体致裂仪

Fig.4 Hollow-cylinder tensile equipment in two-phase fluid

乙烯薄膜减小端部摩擦，其中紫铜片紧贴试样端部，而聚四氟乙烯薄膜与端部垫块接触，减摩垫片上开有小孔以保证流体的通过。

3 试验方案与过程

3.1 试验方案

CO₂ 注入地层驱替储层水这一过程中，离注入点越远的区域 CO₂ 孔隙压力越小。根据这些特征，设计分别注入 3.0, 3.2, 3.4, 3.6, 3.7 MPa CO₂ 压力的共 5 组驱水试验，孔隙水压力 2.5 MPa，轴压 20 MPa，围压 8 MPa，初始内压(驱水阶段内压)8 MPa，温度 25℃。驱替稳定后以 0.3 mL/min 流量注入流体提升内压致裂试样。

有效围压是指试样所受围压减去试样孔隙压力后的围压。上述各组试验间 CO₂ 压力的不同意味着岩石内总孔隙压力的差异，从而使岩石致裂时受不同的有效围压作用，不同有效围压对砂岩压密的差异性导致各组试验中岩石抗拉强度的差别，不利于对试验结果进行定量的分析。为独立分析 CO₂-水两相孔隙压力对致裂的影响，还需获取该砂岩致裂压与有效围压的关系，故设计不同有效围压下含单

相水试样的致裂试验：围压分别为 2, 4, 7, 10, 13 MPa，轴压为 20 MPa，孔隙水压为 1 MPa，温度 25℃，同样以 0.3 mL/min 流量注入流体提升内压致裂。

3.2 试验过程

试验过程包括试样安装、试样水饱和、驱替和致裂 4 个阶段。

首先是试样安装。在压力室基座端部垫块上依次垫上开有孔洞的聚四氟乙烯薄膜和紫铜片。将试样装入岩芯加持器并采用特氟龙热缩管进行内外表面的密封。镶有半透隔板的垫块被置于试样顶部。连接管线后安装压力室顶罩完成试样安装。

其次，进行试样水饱和和工作。压力室安装完成后，连接三向加载系统、两相流体系统和数据采集系统。通过温度控制系统中的外接循环水浴控制计量泵中流体温度达到 25℃。通过手动油压泵和压力室上部千斤顶向试样加载轴压。采用真空泵对围压腔抽真空 2 h，随后控制计量泵向其中注入蒸馏水以加载围压。以相同的方式依次加载内压与孔隙水压。将压力室置入恒温水浴箱，12 h 后认为试样已经充分水饱和并且系统整体温度达到设定值，即完成驱替前准备工作。

然后，开始驱替工作。控制孔隙 CO₂ 计量泵以恒压模式调节泵内 CO₂ 压力至指定数值，开启数据采集系统，打开 CO₂ 管路阀门使其进入试样并驱替其中的水。随着较高压力的 CO₂ 进入试样孔隙，孔隙水被压缩，总孔隙压力随之升高，处于恒压模式的孔隙流体计量泵为了稳定压力，将进入回退状态，使孔隙流体往计量泵方向流动，但由于半透隔板对 CO₂ 的阻挡，这一流动中只有水会进入计量泵。随着孔隙流体中水被驱出，试样内 CO₂ 饱和度逐渐增大，导致 CO₂ 会尝试进入试样中更小的孔隙驱替其中的水，而进入更小的孔隙需要抵抗更大的毛管压力，当毛管压力超过孔隙中 CO₂ 与水的压差(即 CO₂ 驱替压)时，CO₂ 不再进入试样，驱替趋于稳定。此时，试样内流体为所需要的 CO₂-水两相流体，各组分分压达到试验前设计值，CO₂ 饱和度可通过孔隙水泵内体积增量计算得到。数据采集系统记录这一阶段两相流体系统的压力、流量与体积数据。

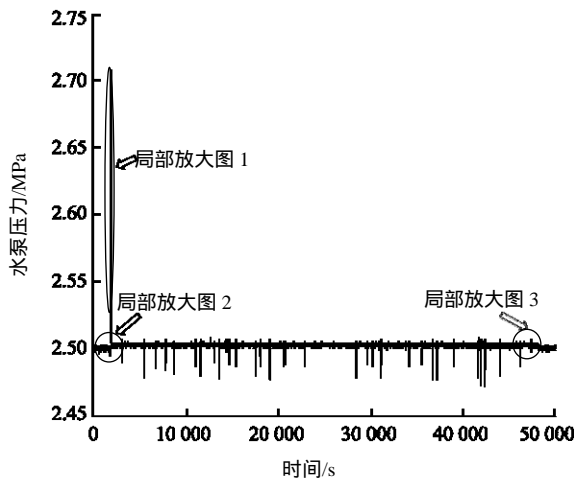
最后，待驱替稳定后实施压裂。控制内压泵进入恒流模式并以 0.3 mL/min 的流速向内压腔注入流体使内压缓慢持续升高。当内压泵压力读数出现突降时，认为试样已经失稳破裂并停止内压泵。数据采集系统会记录这一过程中内压随时间的变化数据。

不同围压下含单相水试样的致裂试验同样在这一套试验系统上进行，分为试样安装、试样水饱和和致裂 3 个阶段，各阶段操作与上述试验相应步骤相同。

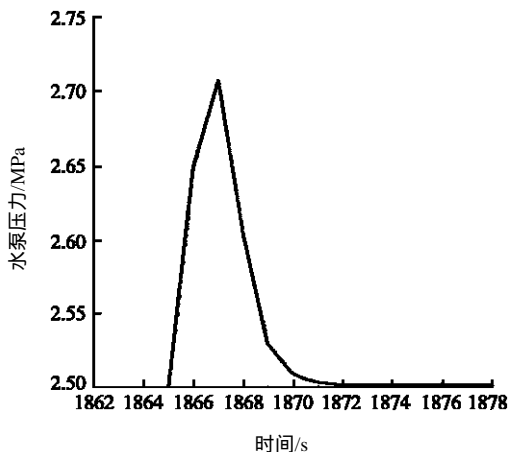
4 试验结果与分析

4.1 CO₂-水两相流体下砂岩致裂试验

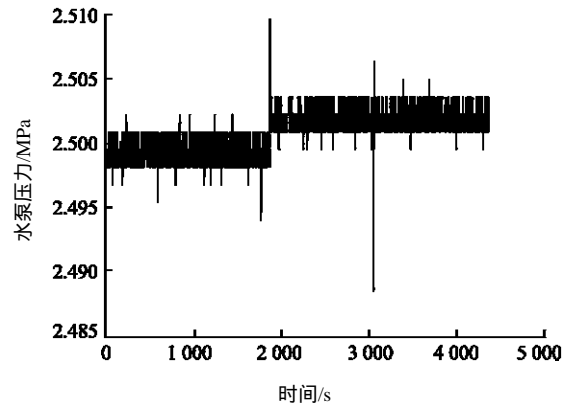
共进行了 5 组两相流体下砂岩致裂试验。图 5 和 6 分别为第 4 组两相致裂试验中 CO₂ 驱替水时孔隙水泵压力随时间的变化曲线和孔隙水通过半透板进入计量泵的产水流量随时间变化曲线，以这次试验数据为例分析 CO₂ 驱水过程。由图 5 和 6 可知，驱替分 3 个阶段进行。在 $t = 1865$ s 时阀门被打开，CO₂ 开始进入岩石引起孔隙水压力突增，并在 $t = 1867$ s 处达到了最高的 2.707 MPa，随后由于计量泵恒压模式的调节使其下降并趋于稳定，这一阶段中产水流量不稳定，在孔隙水压最高处达到了 -10.82 mL/min，为非稳定驱替阶段，共持续 6 s；第二阶段为稳定驱替段，这一阶段中孔隙水压力与



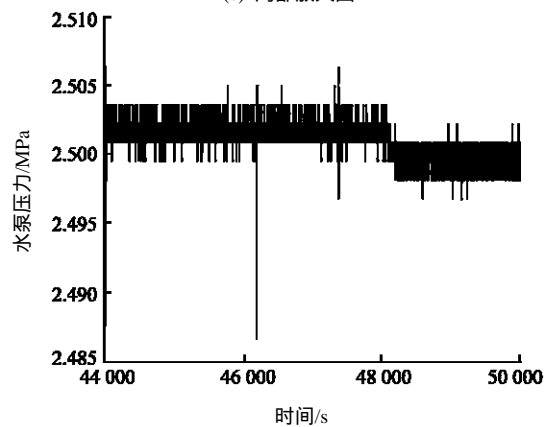
(a) 水泵压力-时间曲线



(b) 局部放大图 1



(c) 局部放大图 2



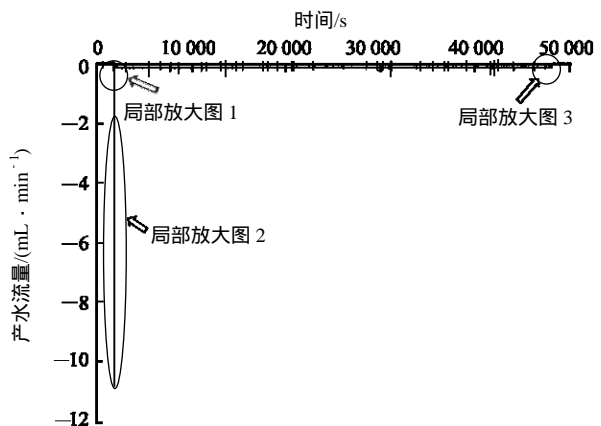
(d) 局部放大图 3

图 5 驱替过程中水泵压力随时间变化曲线

Fig.5 Curves of water pump pressure with time during the flooding

产水流量维持在一个稳定的水平，分别为 2.503 MPa 与 -0.13 mL/min，为驱替的主体阶段，持续了 12.84 h；最后为驱替停止阶段，驱替于 $t = 48089$ s 处结束，孔隙水压力回到恒压设定值 2.5 MPa，并不再产水。

图 7 为各组试验驱替段产水量随时间变化曲线，其中各组试验孔隙水压力均为 2.5 MPa。各组试验驱替段产水流量与驱替压差整体上正相关，驱



(a) 水泵压力-时间曲线

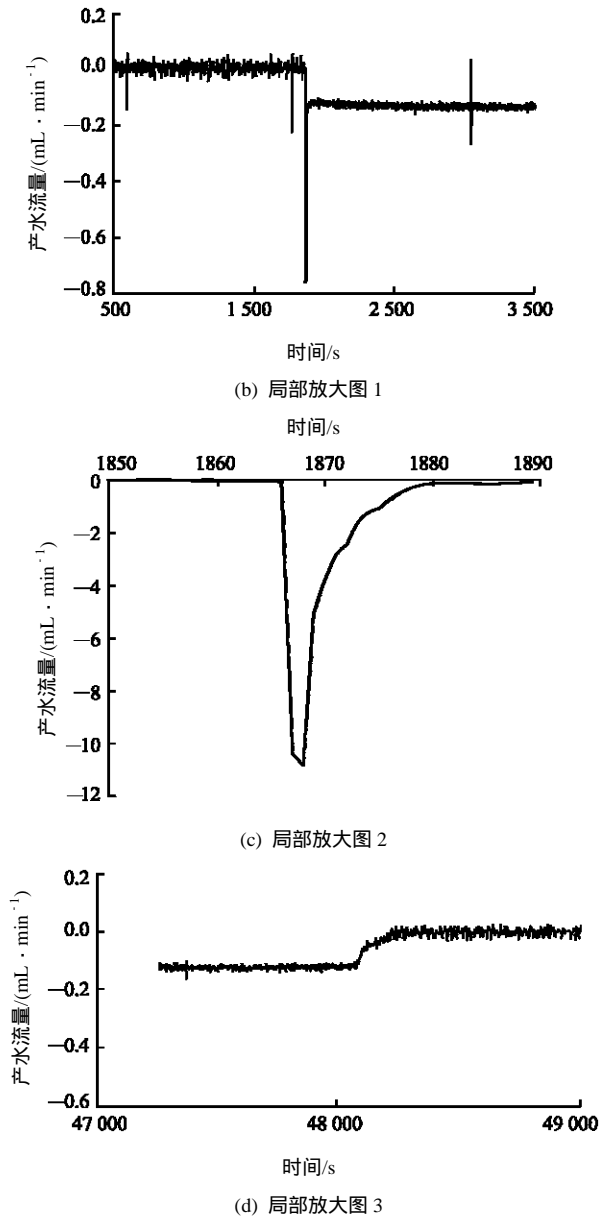


图 6 驱替过程中产水流量随时间变化曲线

Fig.6 Curves of water production rate with time during the flooding

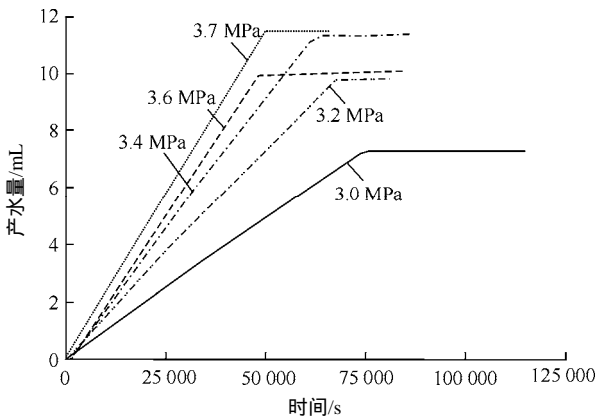


图 7 各组试验驱替段产水量随时间变化曲线

Fig.7 Curves of water production with time during the flooding in each test

替时间为 12.84 ~ 21.06 h。通过驱替结束后的累计产水量可以计算得到最终所形成的 CO₂-水两相孔隙中 CO₂ 的饱和度 S_{CO_2} ，计算公式为

$$S_{CO_2} = \frac{V_2 - V_1}{V_k} \times 100\% \quad (1)$$

式中： V_2 为驱替结束后水泵记录体积， V_1 为驱替前水泵记录体积， V_k 为试样孔隙体积。

图 8 为根据式(1)计算得到的各组试验驱替后 CO₂ 饱和度与驱替压差的关系曲线，其中各组试验孔隙水压力皆为 2.5 MPa。由图可知，驱替形成的 CO₂ 饱和度为 44.15% ~ 68.43%，并且较大的 CO₂ 驱替压力多数情况下会形成较大的 CO₂ 饱和度，这是因为其能克服更大的毛管压力从而进入更小的岩石孔隙并驱替出更多的水。

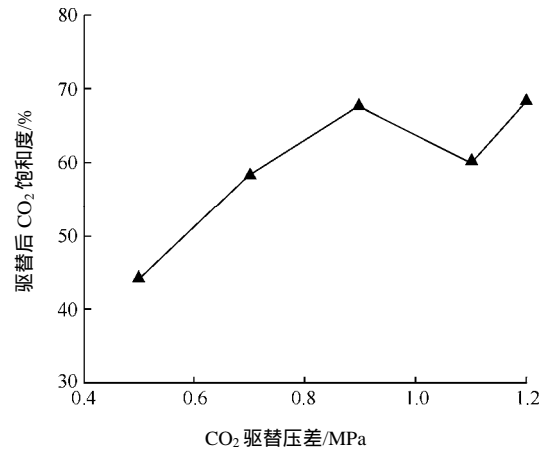


图 8 各组试验驱替后试样中 CO₂ 饱和度与驱替压差关系曲线

Fig.8 Curves of the CO₂ saturation and flooding differential pressure in each test after the flooding

在驱水阶段结束后，试样处于 CO₂-水两相流体状态，通过以准静态速率增加内压致裂可得到试样的致裂压。图 9 为以 0.3 mL/min 恒定速率向内腔注入流体提升试样内压时各组试验内压随时间变化曲线，其中各组试验孔隙水压力皆为 2.5 MPa。由图可知，内压随时间以相对恒定的速率增加，在某一压力处发生突降，然后保持相对稳定。这是因为当内压达到试样致裂压时，试样发生破裂，引起内压腔体积突然变大，导致内压突降。当破裂行为为停止后，试样已失去抗拉能力，内压腔无法维持恒定体积，即使继续注入流体，内压也不再增加。因此认为内压突降点处压力即试样致裂压力。CO₂-水两相致裂试验结果如表 2 所示。

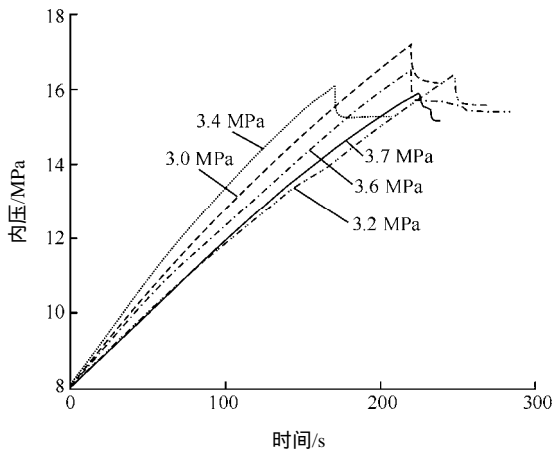


图9 各组试验致裂阶段内压随时间变化曲线
Fig.9 Curves of internal pressure with time during the fracturing in each test

表2 CO₂-水两相致裂试验结果

Table 2 Results of fracturing test in CO₂-water two-phase fluid

试验编号	CO ₂ 压力/MPa	水压力/MPa	CO ₂ 饱和度/%	致裂压力/MPa
1	3.0	2.5	44.15	17.20
2	3.2	2.5	58.43	16.38
3	3.4	2.5	67.76	16.13
4	3.6	2.5	60.09	16.51
5	3.7	2.5	68.43	15.89

图10为根据表2中数据所作出的各组试验致裂压力随CO₂孔隙分压与相应CO₂饱和度变化的三维曲线图，其中各组试验孔隙水压恒定为2.5 MPa。由图可知，整体上致裂压力随CO₂孔隙分压和相应的饱和度的增大呈下降趋势。

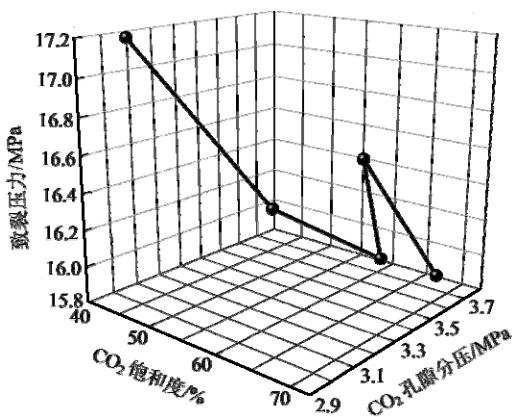


图10 各组试验致裂压力随CO₂孔隙分压和相应CO₂饱和度变化的三维曲线图

Fig.10 3D plot of fracturing pressures varying with partial CO₂ pore pressure and corresponding CO₂ saturation

4.2 不同有效围压下砂岩致裂试验

为探究该砂岩致裂压力与有效围压的关系，设计进行5组不同有效围压下含单相水试样的致裂试验。图11为不同围压下致裂试验内压随时间变化曲线，其中，P'_c为各组试验中所施加的有效围压(MPa)。由图11曲线上内压的峰值点可以得到各组试验的致裂压力。不同有效围压下致裂试验结果如表3所示。对致裂压与有效围压的关系进行线性拟合，如图12所示，得到两者的函数关系：

$$P_f = 2.946 + 2.497P_{ec} \quad (2)$$

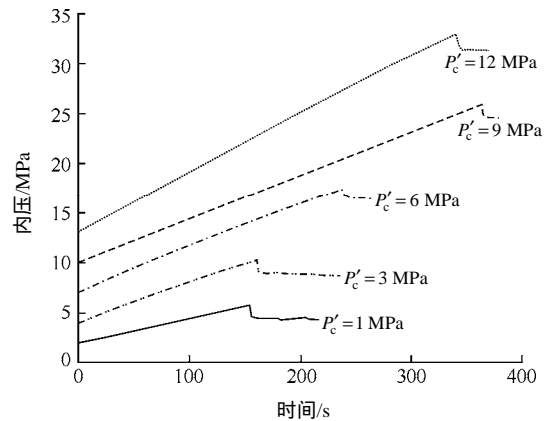


图11 不同围压下致裂试验内压随时间变化曲线
Fig.11 Curves of internal pressure with time in the fracturing test under different confining pressures

表3 不同有效围压下致裂试验结果

Table 3 Results of fracturing tests under different effective confining pressures

试验编号	围压/MPa	孔隙压力/MPa	有效围压/MPa	致裂压力/MPa
1	2	1	1	5.81
2	4	1	3	10.26
3	7	1	6	17.33
4	10	1	9	25.85
5	13	1	12	32.92

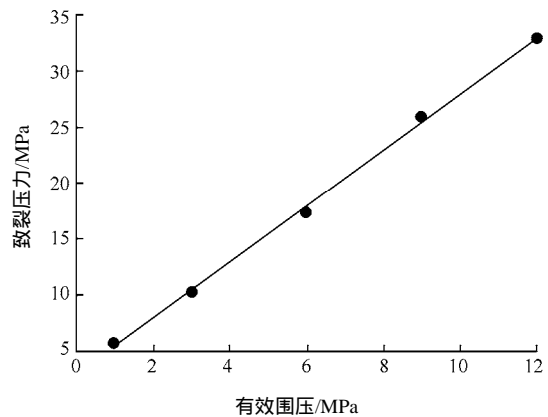


图12 有效围压与致裂压线性拟合结果
Fig.12 Linear fitting result of effective confining pressure and fracturing pressure

式中： P_f 为致裂压力(MPa)； P_{ec} 为有效围压(MPa)， $P_{ec}=P_c - P_p$ ， P_p 为孔隙流体压力(MPa)， P_c 为围压(MPa)。式(2)线性相关性很高， $R^2 = 0.998\ 09$ 。

5 CO₂-水两相有效应力模型研究

许多非饱和有效应力模型来自土力学。其中一部分模型被证明也适用于含空气的非饱和岩石。CO₂-水两相流系统与非饱和岩土中空气-水两相系统具有一定的相似性。本文利用试验结果研究和验证砂岩的 CO₂-水两相有效应力模型。非饱和有效应力公式分为单应力变量和双应力变量 2 类^[15]。其中双应力变量针对土的剪切强度而开发，对拉伸破坏不具备完善的物理意义，因而只考虑单应力变量的有效应力公式。这类公式以 A. W. Bishop^[16]提出的公式为源，经过不断发展形成了多种形式，并且大多适用于描述土的力学特征，适用于岩石的并不多。选用最初始的以及之后经试验验证^[17-19]能够较好适用于岩石的非饱和有效应力数学模型与试验结果进行对比分析。比较有代表性的模型有 4 种，如表 4 所示，其中， σ 为总应力(MPa)； σ' 为有效应力(MPa)； u_w 为气-水系统中孔隙水压力(MPa)； u_a 为气-水系统中孔隙气压力(MPa)； S_a 为气-水系统中气饱和度(%)； χ 为有效应力系数，取值为 0~1； χ_1 与 χ_2 均为有效应力系数，取值为 0~1，且满足 $\chi_1 + \chi_2 = 1$ 。有研究证明砂岩在单相水条件下与 CO₂-水两相条件下具有同样的致裂压随有效围压变化的规律^[13]，故将这些模型结合节 4.2 中该砂岩致裂压与有效围压的拟合公式(2)可得到相应 4 种两相致裂压力的预测模型：

表 4 4 种非饱和有效应力公式

公式编号	公式	来源
1	$\sigma' = \sigma - u_w + \chi(u_w - u_a)$	A. W. Bishop ^[16]
2	$\sigma' = \sigma - u_w + S_a(u_w - u_a)$	E. Papamichos 等 ^[17]
3	$\sigma' = \sigma - u_w + (\chi_1 + \chi_2 S_a)(u_w - u_a)$	M. Brignoli 等 ^[18]
4	$\sigma' = \sigma - \alpha u_w + \alpha S_a(u_w - u_a)$	M. Ramos da Silva 等 ^[19]

(1) 预测模型 1：

$$P_{pf} = 2.946 + 2.497[P_c - P_w + \chi(P_w - P_{CO_2})] \quad (3)$$

式中： P_{pf} 为预测致裂压力(MPa)， P_w 为孔隙水压力(MPa)， P_{CO_2} 为孔隙 CO₂ 分压(MPa)。

(2) 预测模型 2：

$$P_{pf} = 2.946 + 2.497[P_c - P_w + S_{CO_2}(P_w - P_{CO_2})] \quad (4)$$

(3) 预测模型 3：

$$P_{pf} = 2.946 + 2.497[P_c - P_w + (\chi_1 + \chi_2 S_{CO_2})(P_w - P_{CO_2})] \quad (5)$$

(4) 预测模型 4：

$$P_{pf} = 2.946 + 2.497[P_c - \alpha P_w + \alpha S_{CO_2}(P_w - P_{CO_2})] \quad (6)$$

式中： α 为 Biot 系数。

对于上述 4 种预测模型，预测模型 1, 3 中含有未确定参数，使用 1stOpt 软件中的麦夸特优化算法基于试验结果对上述 2 个模型进行优化拟合。而预测模型 2 和 4 中参数皆可确定，直接代入计算得到预测值。预测模型 4 中的 Biot 系数采用 J. Geertsma 和 D. C. Smit^[20]提出的针对砂岩的经验模型计算，模型如下：

$$\alpha = 1 - \frac{1}{1 + 50\phi} \quad (7)$$

式中： ϕ 为砂岩孔隙度。

图 13 为各模型的拟合或计算结果与试验结果对比。表 5 为相应各模型对比试验结果。由此可知，模型 3 经过拟合参数优化后退化成为模型 2，在模型 1, 2, 4 中模型 4 在均方差和相关系数的平方 2 个指标方面都最具优势，并且不含有未确定参数，其均方差 0.27 MPa 为试验致裂压平均值 16.42 MPa 的 1.66%，相关系数平方为 0.757，说明该模型对本试验结果预测准确，进而表明考虑 Biot 系数的 Bishop 有效应力公式适用于描述本试验条件的 CO₂-水两相流体下所测试砂岩的张拉开裂行为，可直接作为 CO₂-水两相有效应力模型使用。

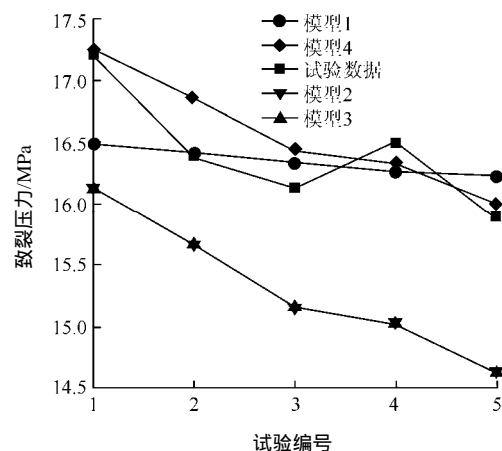


图 13 各模型拟合或计算结果与试验结果对比

Fig.13 Comparisons of fitting or calculation results of each model with experimental results

表5 各模型对比试验结果

Table 5 Comparisons between each model and experimental results

预测模型	均方差	相关系数平方	最优拟合参数
1	0.38	0.61	$\chi = 0.15$
2	1.13	0.76	未拟合
3	1.13	0.76	$\chi_1 = 0, \chi_2 = 1$
4	0.27	0.76	未拟合

在上述试验中,热缩管的刚度远小于砂岩样品,故在后续加载内压时其承受的内压亦远小于样品,所以内壁热缩管的存在不会对试验结果造成明显的影响。试验所选用的驱替方法为半透隔板法,待驱替稳定后计量泵与试样孔隙系统仍处于连通状态,驱替稳定后计量泵依然在控制孔隙水排出或进入试样,而产水曲线上不再产水是因其排出水量与进入水量几乎相等,即达到动态平衡,长时间的动态平衡在一定程度上标志着试样内驱替均匀性的良好;另一方面,根据压汞试验得到的孔径分布图可知,选用的砂岩样品孔径分布比较均匀。因此,假设试验中CO₂驱替稳定后试样内的两相孔隙压力分布足够均匀并对试验结果没有明显影响。根据XRD矿物分析结果可知,试验砂岩泥质含量仅占1.82%,并且由于试验时间较短,忽略CO₂与泥质发生化学、物理作用对试验结果的影响。本文联立多种非饱和岩土有效应力模型与试验所用砂岩在不同有效围压下的致裂压拟合公式得到预测模型,虽然这种预测模型是基于特定试验数据拟合得到的,不一定具有普遍性,但它有利于验证有非饱和有效应力模型的适用性这一最终目的。

非饱和有效应力公式(特别是表4中公式2)已被广泛应用于CO₂地质封存中力学稳定性的数值模拟分析^[21-24]。但没有研究从试验角度对这些公式的适用性进行验证,本文的结果表明,对于本文所选用砂岩,表4中公式4比公式2更适合作为CO₂-水两相有效应力模型模拟其破坏,对CO₂地质封存领域的数值研究有重要的参考价值。

6 结 论

本文采用厚壁圆筒式两相致裂仪开展了CO₂-水两相流体下砂岩驱替与致裂试验,研究了不同压

力CO₂驱水规律,及其形成的CO₂-水两相孔隙分压、饱和度下砂岩致裂特征,并检验了多种非饱和有效应力公式描述这一问题的适用性,确定了一种合适的CO₂-水两相有效应力模型。主要结论如下:

(1) CO₂驱水过程中的产水速率,总产水量主要受CO₂驱替压差影响,并呈正相关关系。试验中驱替压差0.5~1.2 MPa所形成CO₂饱和度为44.15%~68.43%。

(2) 在CO₂-水两相流体条件下,CO₂分压与对应饱和度的增加会引起砂岩致裂压的降低;单相水条件下砂岩致裂压随有效围压的减小而降低,并呈高度线性相关性。

(3) 文中所验证的4种非饱和岩土有效应力公式中,考虑Biot系数的Bishop非饱和有效应力公式4(表4中公式4)能够较好地描述本试验条件下的CO₂-水两相流体下所测试砂岩的张性开裂行为,可直接作为CO₂-水两相有效应力模型使用。

本文的研究成果对CO₂地质封存数值研究中CO₂-水两相有效应力模型的设置具有重要指导意义。实际CCS工程中CO₂常处于超临界状态,将来需改进试验工艺,进一步开展超临界CO₂-水两相条件下岩石拉破坏试验。

参考文献(References):

- [1] 李小春,小出仁,大隅多加志. 二氧化碳地质封存技术及其岩石力学问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(6): 989-994.(LI Xiaochun, HISTOSHI K, TAKASHI O. CO₂ geological storage and the related rock mechanics issues[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(6): 989-994.(in Chinese))
- [2] HAIMSON B, FAIRHURST C. Initiation and extension of hydraulic fractures in rocks[J]. Old SPE Journal, 1967, 7(3): 310-318.
- [3] RUTQVIST J. The geomechanics of CO₂ storage in deep sedimentary formations[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2012, 30(3): 525-551.
- [4] NORDBOTTEN J M, CELIA M A, BACHU S. Injection and storage of CO₂ in deep saline aquifers: analytical solution for CO₂ plume evolution during injection[J]. Transport in Porous Media, 2005, 58(3): 339-360.
- [5] LOMBARD J M, AZAROUAL M, PIRONON J, et al. CO₂ injectivity in geological storages: an overview of program and results of the GéoCarbone-Injectivity Project[J]. Oil and Gas Science and Technology, 2010, 65(4): 533-539.

- [6] ARSYAD A, MITANI Y, BABADAGLI T, et al. Experimental and numerical investigation of the hydromechanical response of low permeable rocks during injection of supercritical CO₂[C]// Proceedings of the International Symposium on Earth Science and Technology. Fukuoka, Japan : [s. n.] , 2011 : 271 – 276.
- [7] LI Q, WU Z, LEI X, et al. Experimental and numerical study on the fracture of rocks during injection of CO₂-saturated water[J]. Environmental Geology , 2007 , 51(7) : 1 157 – 1 164.
- [8] 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, 53(3) : 822 – 828.(ZHAO Renbao ,SUN Haitao ,WU Yasheng ,et al. Influence of CO₂ corrosion on rock structure and its mechanical characteristics[J]. Science in China : Technology , 2010 , 53(3) : 822 – 828.(in Chinese))
- [9] 李冠颖,郭俊志,谢其泰,等. 二氧化碳储存环境对油井水泥性质影响之研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增 2) : 346 – 350.(LEE Kuanying ,KUO Chunchin ,HSIEH Chitai ,et al. Study of mechanical and microscopic properties of API G cement with additives exposed to CO₂-rich environment[J]. Rock and Soil Mechanics , 2011 , 32(Supp.2) : 346 – 350.(in Chinese))
- [10] 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) : 1 016 – 1 025.(SHENG Jinchang , LI Fengbin , YAO Desheng , 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) : 1 016 – 1 025.(in Chinese))
- [11] SAMUELSON J, SPIERS C J. Fault friction and slip stability not affected by CO₂ storage : evidence from short-term laboratory experiments on North Sea reservoir sandstones and caprocks[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control , 2012 , 11 : S78 – S90.
- [12] 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.
- [13] 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 : 3 357 – 3 363.
- [14] 李小春,鲁建荣,白冰,等. 厚壁圆筒式两相流体致裂仪研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(8) : 1 537 – 1 544.(LI Xiaochun , LU Jianrong , BAI Bing. et al. Development of hollow-cylinder tensile tester in two-phase fluids[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2012 , 31(8) : 1 537 – 1 544.(in Chinese))
- [15] KHALILI N ,GEISER F ,BLIGHT G E. Effective stress in unsaturated soils : review with new evidence[J]. International Journal of Geomechanics , 2004 , 4(2) : 115 – 126.
- [16] BISHOP A W. The principle of effective stress[J]. Teknisk Ukeblad , 1959 , 106(39) : 859 – 863.
- [17] PAPAMICHOS E , BRIGNOLI M , SANTARELLI F J. An experimental and theoretical study of a partially saturated collapsible rock[J]. Mechanics of Cohesive-frictional Materials , 1997 , 2(3) : 251 – 278.
- [18] BRIGNOLI M , PAPAMICHOS E , SANTARELLI F J. Capillary effects in sedimentary rocks : application to reservoir water-flooding[C]// Proceedings of the 35th US Symposium on Rock Mechanics. [S. l.] : [s. n.] , 1995 : 619 – 625.
- [19] RAMOS DA SILVA M , SCHROEDER C , VERBRUGGE J C. Unsaturated rock mechanics applied to a low-porosity shale[J]. Engineering Geology , 2008 , 97(1) : 42 – 52.
- [20] GEERTSMA J , SMIT D C. Some aspects of elastic wave propagation in fluid-saturated porous solids[J]. Geophysics , 1961 , 26(2) : 169 – 181.
- [21] ROHMER J , SEYEDI D M. Coupled large scale hydromechanical modelling for caprock failure risk assessment of CO₂ storage in deep saline aquifers[J]. Oil and Gas Science and Technology , 2010 , 65(3) : 503 – 517.
- [22] FERRONATO M , GAMBOLATI G , JANNAC , et al. Geomechanical issues of anthropogenic CO₂ sequestration in exploited gas fields[J]. Energy Conversion and Management , 2010 , 51(10) : 1 918 – 1 928.
- [23] CAPPAL F , RUTQVIST J. Modeling of coupled deformation and permeability evolution during fault reactivation induced by deep underground injection of CO₂[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control , 2011 , 5(2) : 336 – 346.
- [24] ALONSO J , NAVARRO V , CALVO B , et al. Hydro-mechanical analysis of CO₂ storage in porous rocks using a critical state model[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences , 2012 , 54 : 19 – 26.