

DOI: 10.16285/j.rsm.2018.2273

高压孔隙 CO₂/水作用下完整四川三叠系砂岩剪切特性的试验研究

张 强^{1,2,3}, 李小春¹, 周英博⁴, 石 露¹, 白 冰¹

(1. 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;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122;
4. 国网湖北省电力有限公司 经济技术研究院, 湖北 武汉 430077)

摘 要: 越来越多的地下岩土工程面临着高压孔隙流体的作用, 研究高压孔隙 CO₂/水作用下岩石的剪切特性对工程设计及安全施工、运营具有重要意义。研究了完整四川三叠系砂岩在干燥、饱和水、高压孔隙水和高压孔隙 CO₂ 4 种不同条件下的剪切特性。研究发现: 4 种不同条件下砂岩的剪切强度和残余剪切强度都会随着预剪切面上有效正应力的增加而增加; 在干燥条件下随正应力的增加砂岩的剪切刚度也会增大。孔隙压力对砂岩剪切强度的影响遵守 Terzaghi 有效应力原理。水和 CO₂ 对砂岩的剪切强度具有显著的弱化作用, 水会明显降低内摩擦角 φ , 而 CO₂ 对 φ 几乎不影响; 而水对黏结力 c 的影响小于 CO₂ 的影响。其弱化作用可以归结为水/CO₂-岩石之间的相互作用, 由于砂岩中含有黏土成分, 水和 CO₂ 都会对黏土产生软化作用。

关 键 词: 剪切强度; 摩擦系数; CO₂ 地质封存; 高孔隙压; 剪切渗流

中图分类号: TU 432

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2019) 08-3028-09

Shear behavior of the Triassic sandstone in Sichuan under high pore pressure of H₂O/CO₂ conditions

ZHANG Qiang^{1,2,3}, LI Xiao-chun¹, ZHOU Ying-bo⁴, SHI Lu¹, BAI Bing¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou, Zhejiang 311122, China;
4. Economic Research Institute, State Grid Hubei Electric Power Company Limited, Wuhan, Hubei 430077, China)

Abstract: Understanding shear behavior of a sandstone is vital for underground engineering projects, such as mining, underwater tunnel excavation and CO₂ geological storage, and so on. In this study, the shear behavior of a intact sandstone under dry/saturated/H₂O-injected/CO₂-injected conditions were conducted using a shear-flow test apparatus. The results show that the shear strength and the residual shear strength were increase with the effective normal stress under dry/saturated/H₂O-injected/CO₂-injected conditions. The shear stiffness was also increase with the normal stress under dry condition. The effect of pore pressure on the shear strength follows the Terzaghi effective stress law. Water/CO₂ could weaken the shear strength. Water lowered the internal friction angle φ , CO₂ hardly affected it. CO₂ lowers the cohesion stronger than that of water. The reasons of the weakening effect of water and CO₂ were the interaction of fluid-rock, and the weakening effect of water on the clay contained in the sandstone was stronger than that of CO₂.

Keywords: sheath strength; friction coefficient; CO₂ geological storage; high pore pressure; shear-flow

1 引 言

岩体的力学特性会受到环境的影响, 环境流体

对其具有一定的劣化作用^[1-5]。随着岩土工程不断地深入地下, 岩体面临着高压流体的作用, 如在矿山开采、水下隧道开挖、CO₂ 地质封存等工程中。在多数

收稿日期: 2018-12-17

基金项目: 科技部重点研发计划国际合作项目 (No. S2016G9005); 国家自然科学基金面上项目 (No. 41672252)。

This work was supported by the Key Research and Development Program of International Cooperation of Ministry of Science and Technology (S2016G9005) and the General Program of National Natural Science Foundation of China (41672252).

第一作者简介: 张强, 男, 1989 年生, 博士研究生, 主要从事节理岩体的应力-渗流耦合特性等方面的研究工作。E-mail: zhangqiang02016@163.com

通讯作者: 李小春, 男, 1964 年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事二氧化碳地质封存等方面的研究工作。E-mail: xcli@whrsm.ac.cn

岩土工程中，岩石的破坏主要以剪切破坏为主。砂岩地层也是以上工程中常见的地层。因此，对含高压流体砂岩剪切特性的研究具有重要的工程意义。

砂岩的力学特性一直备受国内外学者的关注，目前对砂岩的剪切特性已进行了系列的研究。许江等^[6]利用高速摄像和声发射技术观察到了完整砂岩在剪切破坏过程中裂纹的产生、扩展和贯通过程。李男等^[7]研究发现，剪切时水会增大砂岩的蠕变速率及降低砂岩的蠕变破坏强度值。彭守建等^[8-9]研究了砂岩在低压孔隙水、低法向应力条件下的剪切特性，研究发现，在恒定的孔隙水压力下，法向应力的增加会增强砂岩的剪切强度。贺晶晶等^[10]研究了冻融作用对含水砂岩力学特性的影响，冻融循环次数与砂岩剪切特性的劣化程度正相关。许江等^[11]对酸性条件下砂岩的剪切破坏特性进行了研究，研究发现酸化时间及酸性大小都会增强对砂岩力学特性的劣化作用。宋朝阳等^[12]对比研究了弱胶结砂岩在干燥与饱和水状态下的破坏机制，水岩相互作用会降低颗粒之间的胶结性。近年来，含流体砂岩的力学特性也得到深入的研究。高压孔隙水/CO₂/CO₂-H₂O 两相流体都会明显地降低完整砂岩的抗压强度，并会增强其塑性特性^[5, 13-16]。孔隙流体对完整砂岩的抗压强度具有显著的降低作用，而对含高压孔隙流体砂岩剪切特性的影响尚未有研究。在 CO₂ 地质封存中，砂岩将受到高压孔隙 CO₂ 的作用，含高压 CO₂ 砂岩的力学特性特别是剪切特性会影响封存地层的稳定性。目前，含高压 CO₂ 砂岩的剪切特性尚未见到文献报道。因此，有必要对高压孔隙 CO₂/水条件下砂岩剪切特性进行试验研究。

为了揭示短时间内含高压孔隙 CO₂/水砂岩的剪切特性，本文进行了砂岩在干燥、饱和水、高压孔隙水和高压孔隙 CO₂ 4 种不同条件下的剪切试验，得到了完整砂岩在 4 种不同条件下的剪切强度、法向变形特性以及残余剪切强度，初步揭示了孔隙压力的作用及水/CO₂ 对砂岩剪切特性的影响作用。

2 试验方案

2.1 试验样品

试验中所采用的砂岩为四川三叠系上统须家河组黄砂岩，采自四川省自贡市的一处采石场。试样尺寸为 $\phi 38 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$ ，由同一块砂岩中钻取并磨平，如图 1 所示。该试样长度为了适应自主研发的剪切渗流试验装置。该砂岩具有很好的均质性，其基础力学性质如表 1 所示。由 XRD 分析知，其矿物组成为：56.73% 的石英、34.04% 的长石、10.59%

的方解石、3.32% 的伊利石和 1.36% 的蒙脱石。该砂岩的孔隙率为 10.56%，其微观结构如图 2 所示。由图可看出，砂岩内部存在较多的微孔隙，砂岩胶结很好，矿物颗粒由胶结物很好地包裹起来。该砂岩的具有较低的渗透率，其渗透率为 10^{-17} m^2 数量级，即数十 μD 。如图 3 所示，渗透率与有效围压具有较好的幂指数关系：

$$k = 2.14 \cdot 10^{-17} e^{\frac{\sigma'}{12.74}} + 1.56 \cdot 10^{-18} \quad (1)$$

式中： k 为渗透率 (m^2)； σ' 为有效围压 (MPa)。

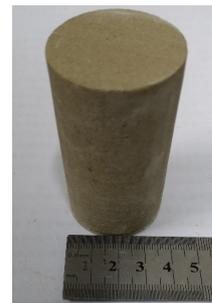


图 1 试样
Fig.1 The sample

表 1 试验中砂岩完整岩块的基础力学性质
Table 1 The mechanical parameters of the intact sandstone

尺寸 / mm	单轴强度 / MPa	张拉强度 / MPa	弹性模量 / MPa	泊松比
$\phi 38 \times 70$	46.12	2.01	4.72	0.33

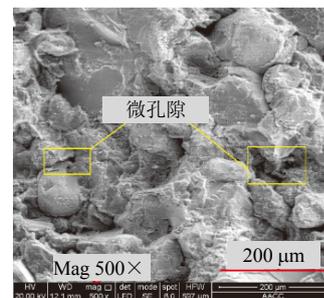


图 2 砂岩的微观结构
Fig.2 The microstructure of the sandstone

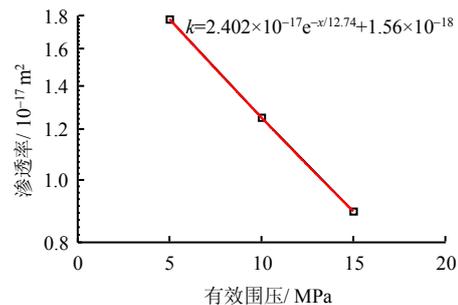


图 3 有效围压与渗透率的关系
Fig.3 The relationship of permeability and effective confining pressure

2.2 试验原理与装置

研究高压 CO₂/水作用下完整砂岩的剪切特性，需要对完整砂岩进行高孔隙压力下的直剪试验。目前常规的剪切渗流试验装置难以密封较高压力的孔隙流体，尤其是在发生剪切大变形时。为了实现高孔隙压力条件下的剪切试验，我们自主研发了剪切渗流试验装置。该剪切渗流试验装置由特殊设计的 L 型剪切模块和真三轴试验装置构成^[7]，如图 4 所示。L 型剪切模块由图 4(a)下图中的一对 L 型剪切垫块、一对硅胶塞和隔板、三只法向线性可变差动位移传感器 (LVDT)、热缩管及图 4(b)中的底板和轴向 LVDT 等组成。如图 4(c)所示，L 型剪切板是上部为半圆柱，下部为圆台，形如 L，硅胶塞和隔板填充在剪切板缺失的半圆空间内。左、右剪切板呈 69 形放置。由于剪切板与硅胶塞的弹性模量相差较大，在轴向荷载的作用下可对试样实现剪切。通过围压对试样的预剪切面施加正应力，由于围压是静水压力，预剪切面上的正应力始终等于围压。通过 ISCO 计量泵向试样注入孔隙流体，并保持恒定的孔隙压力。轴向 LVDT 可以实时测量剪切位移，法向 LVDT 可以实时测量垂直预剪切面的法向位移。

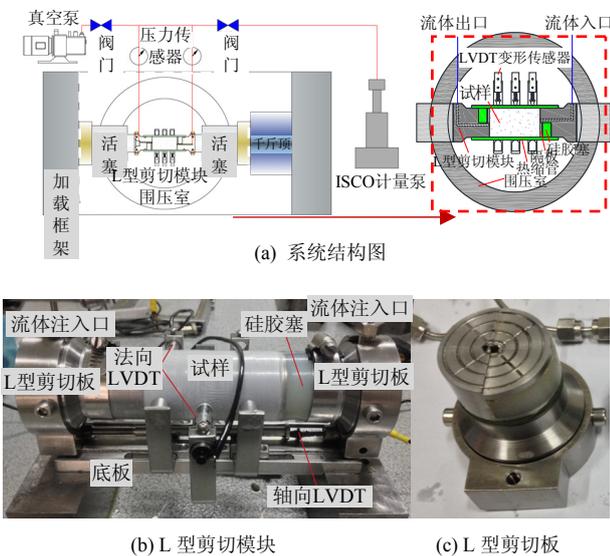


图 4 剪切渗流试验装置

Fig.4 The shear-flow test apparatus

2.3 试验方案

本次研究共进行了 4 种条件下剪切试验，分别为：①干燥条件下；②饱和水条件下（孔隙压力为 0）；③5 MPa 高压孔隙水条件下；④5 MPa 高压孔隙 CO₂ 条件下。每种条件下共进行了 2、5、7、10 MPa 有效正应力下的剪切试验，如表 2 所示。本文采用

经典有效应力原理描述应力条件：

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \varepsilon_{ij} P_p \tag{2}$$

式中： σ'_{ij} 为有效正应力； σ_{ij} 为正应力； ε_{ij} 为单位张量； P_p 为孔隙压力。具体的试验步骤可分为以下 5 步：

(1) 试样准备：试样首先在 105℃ 下干燥 4 h，并密封保存；饱和水和高压孔隙水条件下测试的试样需要在测试前 12 h 进行真空饱和。

(2) 试样安装：试样安装时，先在试样圆柱面包裹一层聚四氟乙烯膜以减少热缩管与试样间的摩擦力，然后与 L 型剪切板、硅胶塞、隔板、LVDT 等进行组装，组成 L 型剪切模块。最后将该剪切模块安装到真三轴围压室内，并连接好孔隙管路和传感器。

(3) 施加围压：向围压室内注入液压油；通过围压对试样的预剪切面施加正应力，围压加载速率为 0.01 MPa/s。

(4) 注入孔隙流体：饱和水条件下的剪切试验，试样与大气连通实现排水条件；高压孔隙水/CO₂ 条件下的剪切试验，通过 ISCO 泵向试样注入水/CO₂，ISCO 计量泵采用恒压模式保持恒定的高孔隙压力，待 ISCO 计量泵的流量为零后继续平衡 1 h 后可进行剪切试验。

(5) 剪切测试：剪切时，采用真三轴的恒速加载模式进行轴向加载，加载速率为 0.3 mm/min。待剪切完成后首先卸载轴向应力和孔隙压力，再卸载围压。

表 2 试验方案及结果

Table 2 The test conditions and the results

试样	孔隙流体	正应力 / MPa	孔隙压力 / MPa	有效正应力 / MPa	剪切强度 / MPa	残余剪切强度 / MPa
1#	干	2	0	2	9.20	3.25
2#	干	5	0	5	11.27	5.78
3#	干	7	0	7	12.70	6.18
4#	干	10	0	10	17.77	8.46
5#	饱和水	2	0	2	7.71	2.89
6#	饱和水	5	0	5	9.91	4.05
7#	饱和水	7	0	7	10.57	5.64
8#	饱和水	10	0	10	13.57	7.53
9#	水	7	5	2	7.85	3.28
10#	水	10	5	5	9.91	6.54
11#	水	12	5	7	11.55	7.33
12#	水	15	5	10	13.20	9.93
13#	CO ₂	7	5	2	5.89	1.48
14#	CO ₂	10	5	5	10.86	4.85
15#	CO ₂	12	5	7	11.63	5.97
16#	CO ₂	15	5	10	14.34	8.77

3 试验结果

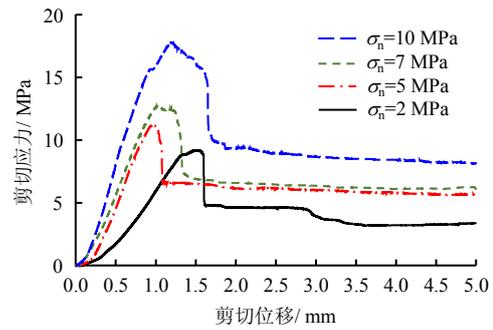
由于试样由水饱和开始到试验结束均在 24 h 以内。真空水饱和时间为 12 h；孔隙水压力平衡时间最长为 5~6 h，而 CO₂ 注入平衡时间更短，只需要 2 h 左右；剪切过程只需 20 min 左右。这段时间是到达试验条件所必须的。因此，水和 CO₂ 的影响都是短期。该试验重点研究短期内水和 CO₂ 对砂岩剪切特性的固有影响。

3.1 试样的剪切特性

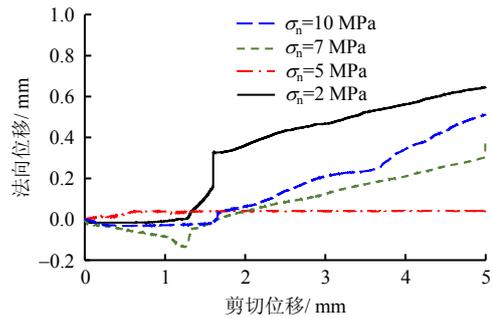
图 5 为在干燥条件下 1#~4# 试样的剪切应力和法向位移随剪切位移的变化曲线。由图 5(a) 可以看出，试样先经历了线性变形阶段和应力硬化阶段而达到峰值剪切应力，然后经过应力软化阶段，应力开始陡降到残余阶段。剪切强度为峰值剪切应力，残余剪切强度为试样达到稳定状态时的平均剪切应力。随着预剪切面上正应力的增加，试样的剪切强度、残余剪切强度和应力-变形曲线的斜率都随之增加。这表明在干燥条件下正应力的增加不仅增强了砂岩的剪切强度和残余剪切强度，而且会增强剪切刚度。当剪切应力陡降到残余剪切力，剪坏后的试样表现出稳定的剪切摩擦特性。由图 5(b) 可看出，垂直于剪切面的法向位移表现出很强的随机性，不同正应力下的法向位移差距很大。在剪切应力发生陡降时，法向位移也突然地增加，随后法向位移发生持续地增加，即剪胀。这表明此刻试样的剪切面发生突然地贯通，随后进入剪切面的剪切摩擦阶段。

图 6 为在饱和水条件下 5#~8# 试样的剪切应力和法向位移随剪切位移的变化曲线。由图 6(a) 可看出，随着正应力的增加，饱和试样的剪切强度和残余剪切强度也随之增加，但剪切刚度并没有发生明显的变化。当试样发生剪切破坏后，饱和试样也表现出稳定的剪切摩擦特性。由图 6(b) 也可看出，垂直于剪切面的法向位移也表现出随机的特性。

图 7 是 5 MPa 高压孔隙水条件下 9#~12# 试样的剪切应力和法向位移随剪切位移的变化曲线。图 8 为 5 MPa 高压孔隙 CO₂ 条件下 13#~16# 试样的剪切应力和法向位移随剪切位移的变化曲线。由图 7(a) 和图 8(a) 可看出，试样在高压孔隙水/CO₂ 条件下都发生了剪切应力陡降，均表现出脆性破坏特性及试样破坏后的稳定剪切摩擦特性。剪切强度、残余剪切强度随有效正应力的增加而增加；有效正应力对剪切刚度影响不明显。10# 试样在残余摩擦阶段表现出剪切应力的突然上升后缓慢下降，这是由于试样剪切面上存在较大的凸起，在残余摩擦阶段，凸起



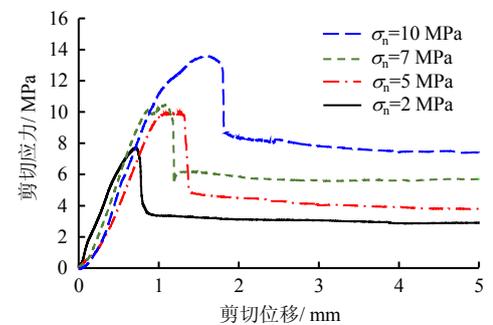
(a) 剪切应力随剪切位移的变化曲线



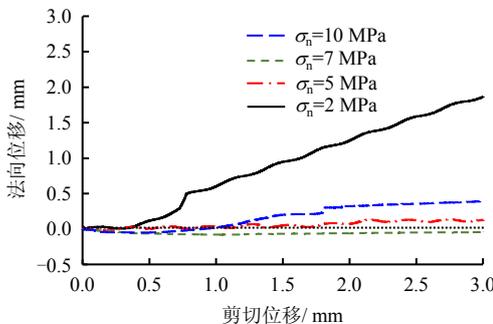
(b) 法向位移随剪切位移的变化曲线

图 5 干燥条件下剪切应力和法向位移随剪切位移的变化曲线

Fig.5 The curves of shear stress and normal displacement versus shear displacement under dry condition



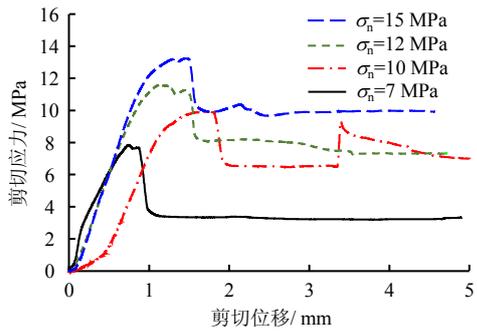
(a) 剪切应力随剪切位移的变化曲线



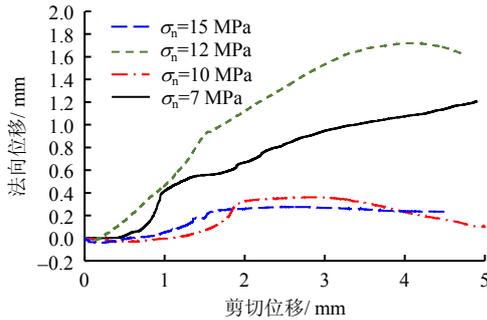
(b) 法向位移随剪切位移的变化曲线

图 6 饱和水条件下剪切应力和法向位移随剪切位移的变化曲线

Fig.6 The curves of shear stress and normal displacement versus shear displacement under saturated condition

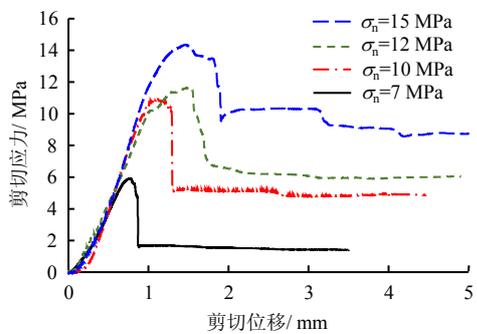


(a) 剪切应力随剪切位移的变化曲线

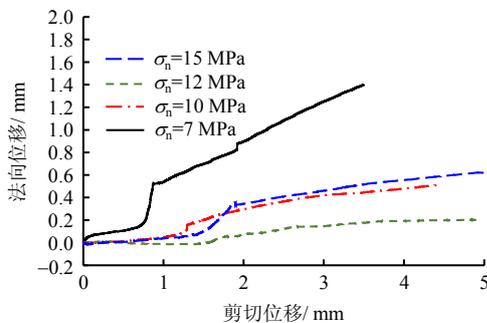


(b) 法向位移随剪切位移的变化曲线

图7 5 MPa 高压孔隙水条件下剪切应力和法向位移随剪切位移的变化曲线
 Fig.7 The curves of shear stress and normal displacement versus shear displacement under 5 MPa H₂O-injected condition



(a) 剪切应力随剪切位移的变化曲线



(b) 法向位移随剪切位移的变化曲线

图8 5 MPa 高压孔隙 CO₂ 条件下剪切应力和法向位移随剪切位移的变化曲线
 Fig.8 The curves of shear stress and normal displacement versus shear displacement under 5 MPa CO₂-injected condition

被剪断而引起剪切应力的变化。图 7(b)和图 8(b)中剪切面的法向位移变化也和图 5(b)和图 6(b)中剪切面的法向位移变化类似，垂直于剪切面的法向位移的变化具有随机特性，与有效正应力的变化无明显规律。

由图 5~8 可以得到试样的剪切强度和残余剪切强度，如表 2 所示。图 9 为不同条件下砂岩的剪切强度随有效正应力的变化。由此图可看出，在相同的有效正应力下，含流体砂岩的剪切强度均低于干燥砂岩的剪切强度；含水（即饱和水和高压孔隙水条件下）砂岩的剪切强度很接近，含 CO₂ 砂岩的剪切强度基本介于干燥和含水砂岩的剪切强度之间。这表明水、高压孔隙水/CO₂ 都会弱化砂岩的剪切强度；水对砂岩剪切强度的弱化作用要大于 CO₂。

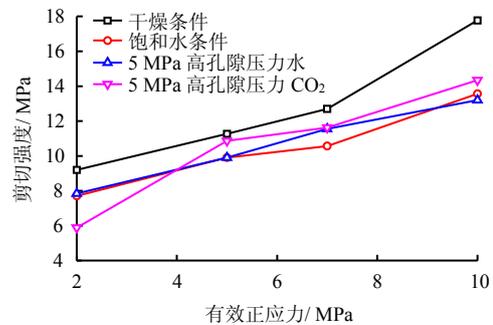


图9 不同条件下砂岩的剪切强度随有效正应力的变化
 Fig.9 Shear strength versus effective normal stress under different conditions

图 10 为不同条件下砂岩的残余剪切强度随有效正应力的变化。由此图可以看出，不同的孔隙流体条件下的砂岩残余剪切强度的变化与完整砂岩剪切强度的变化是有所区别的。高压孔隙水作用下砂岩的残余剪切强度最大，饱和水条件下最小。干燥和高压孔隙 CO₂ 条件下的残余剪切强度介于高压孔

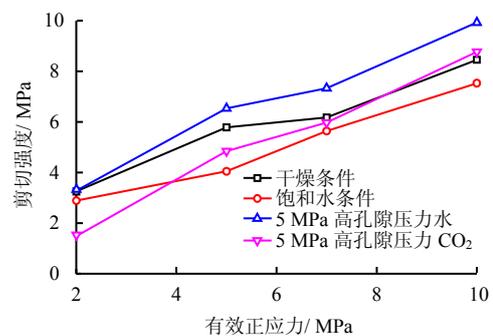


图10 不同条件下砂岩的残余剪切强度随有效正应力的变化
 Fig.10 Residual shear strength versus effective normal stress under different conditions

隙水和饱和水条件之间。残余剪切强度与剪切面的形貌密切相关。由于完整砂岩的剪切面的形成具有随机性，其残余剪切强度也会表现出一定的随机性。因此，不同的孔隙流体条件下的砂岩残余剪切强度的变化不能进行有效的对比。

3.2 破坏后试样

图 11 为不同条件下剪切后试样的剪切面。由图可看出，试样沿着岩芯的轴向发生破坏，剪切面的形态不一致，并留有明显的剪切摩擦痕迹（即图中发亮或亮白处），剪切摩擦的位置也不一致。干燥和高孔隙压 CO₂ 条件下剪切面的剪切摩擦痕迹呈明显

的亮白色，可以明显地看出剪切摩擦总面积与有效正应力呈正比。饱和水条件下试样的剪切面颜色较暗，对比度不明显，但其擦痕明显。除了 2 MPa 有效应力下的试样都发生较大面积的剪切摩擦。高压孔隙水条件下剪切面的剪切摩擦痕迹呈泛白色，剪切摩擦总面积也与有效正应力呈正比。总体来看，剪切摩擦痕迹出现的位置具有随机性，但随着有效正应力的增加，剪切面上的摩擦面积加大。不同试样之间，产生的剪切面形貌不同。饱和水和高压孔隙水条件下剪切面的摩擦面积也大于干燥和高压孔隙 CO₂ 条件下的。

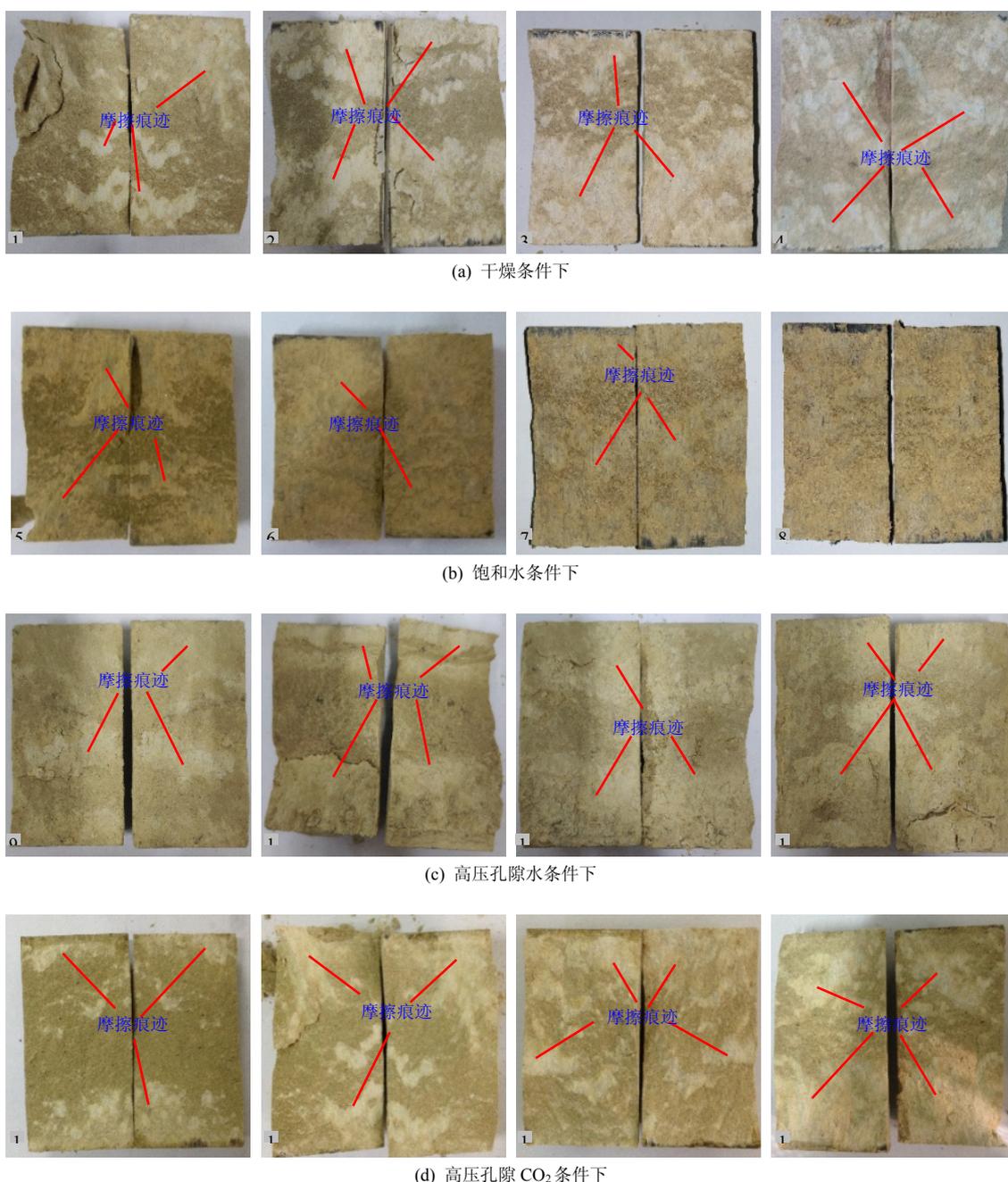


图 11 剪切后的砂岩剪切面

Fig.11 The post-sheared shear surfaces of sandstone

4 讨论

由于剪切破坏后剪切面的形貌具有随机性,且剪切面的形貌对残余剪切强度具有很大影响,在本次试验无法进行有效对比,故本文不对残余摩擦特性进行讨论。孔隙压力的作用和短期内流体本身对砂岩剪切强度的影响作为重点讨论内容。

4.1 孔隙压力的作用

流体对岩体的力学特性的影响主要通过以下两个方面的作用^[1]:①通过孔隙压力改变岩体的应力状态而影响岩体的力学特性;②通过流体-岩石之间的物理化学作用改变岩石的力学特性。本文采用 Terzaghi 有效应力原理 ($\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \varepsilon_{ij} P_p$)。饱和水与高压孔隙水条件下的砂岩具有相同的有效应力和水-岩反应的物理化学作用,其差异在于孔隙压力的作用。由图 9 和表 2 可知,在相同的有效正应力作用下饱和水与高压孔隙水条件下的剪切强度存在较小的差距。如果以饱和水的剪切强度为参照,高压孔隙水的剪切强度相对其误差值为:1.82% (有效正应力 2 MPa)、0 (有效正应力 5 MPa)、9.27% (有效正应力 7 MPa)、-2.73% (有效正应力 10 MPa)。在含水条件下,水-岩相互作用对剪切强度的影响是相同的,只有孔隙压力的作用导致两者的差异。除了在有效正应力 7 MPa 条件下误差较大,其余误差均小于 5%,这表明在高压孔隙水条件下 Terzaghi 有效应力原理很好地适用于砂岩的剪切强度。CO₂ 的黏度远小于水的黏度,在砂岩孔隙中更容易平衡,孔隙 CO₂ 压力对砂岩剪切强度也会服从 Terzaghi 有效应力原理。

4.2 流体对砂岩剪切强度的影响

由 4.1 节可知, Terzaghi 有效应力原理很好地适用于砂岩的剪切强度,试验中饱和水、高压孔隙水和高压孔隙 CO₂ 砂岩的剪切强度均低于干燥砂岩的剪切强度。相对干燥砂岩的剪切强度,水对砂岩的

剪切强度平均降低了 17.17% (饱和水)、15.38% (高压孔隙水), CO₂ 对砂岩剪切强度平均降低了 10.45% (剔除了 2 MPa 有效正应力的异常点)。这表明由于水/CO₂-岩之间的物理化学作用造成了砂岩剪切强度的降低,而且水-岩相互作用的影响大于 CO₂-岩相互作用的影响。根据表 2 中的剪切强度,采用摩尔-库仑准则对不同条件下砂岩的剪切强度进行拟合。如表 3 所示,不同条件下砂岩剪切强度的摩尔-库仑准则公式具有较高的相关度。由表 3 可看出,水对剪切强度的弱化作用主要体现在对内摩擦角 φ 的影响,其中水对 φ 影响程度显著大于 CO₂ 的影响, CO₂ 对 φ 几乎不影响;而水对黏结力 c 的影响小于 CO₂ 的影响。

水和 CO₂ 对砂岩剪切强度的弱化作用与对砂岩的抗压强度具有类似的规律,水对砂岩抗压强度的弱化影响明显强于 CO₂ 的影响^[5]。其主要原因为:试验所用的砂岩中含有部分黏土(即 3.32% 的伊利石和 1.36% 的蒙脱石),黏土矿物具有很强的遇水软化特性^[2, 18-20];黏土矿物遇水后,黏土的分子对水具有吸附作用而造成黏土分子层间的吸附膨胀降低了其剪切强度,因而黏土矿物的强度被水降低^[21]。黏土对 CO₂ 同样具有吸附性,当黏土吸附 CO₂ 分子,会造成黏土矿物分子层间膨胀而降低黏土的强度,水对黏土的弱化作用高于 CO₂ 的作用^[22]。通过摩尔-库仑准则可知,水对剪切强度的弱化作用主要体现在对内摩擦角 φ 的影响,这可能由于水的润滑作用。当矿物颗粒间发生摩擦时,矿物颗粒间存在水分子层,对其摩擦起到润滑的作用。CO₂ 的黏度远小于水的黏度,黏度与流体的润滑效果密切相关^[23],因此, CO₂ 表现出对 φ 几乎不影响的作用。砂岩的黏结力均会被水和 CO₂ 弱化。但水对 φ 的弱化作用较为明显而掩盖了对黏结力的弱化。CO₂ 对 φ 几乎不影响,因此对黏结力的弱化作用更容易体现出来。因此,表现出水对黏结力的影响小于 CO₂ 的影响。

表 3 不同条件下的摩尔-库仑准则

Table 3 The Mohr-Coulomb criterion under different conditions

孔隙条件	摩尔-库仑准则	相关系数	内摩擦角 φ ($^{\circ}$)	φ 变化率 /%	黏结力 c /MPa	c 值变化率 /%
干燥	$\tau_p = 1.05\sigma'_n + 6.43$	0.937 8	46.40	0.00	6.43	0.00
饱和水	$\tau_p = 0.79\sigma'_n + 6.19$	0.973 5	38.31	-17.44	6.19	-3.73
高压孔隙水	$\tau_p = 0.68\sigma'_n + 6.56$	0.994 6	34.22	-26.25	6.56	2.02
高压孔隙 CO ₂	$\tau_p = 1.02\sigma'_n + 4.58$	0.943 0	45.57	-1.78	4.58	-28.77

5 结论

本文通过试验方法研究了高压孔隙水/CO₂ 对

完整砂岩剪切强度的影响,揭示了孔隙压力、流体本身对砂岩剪切强度造成的影响。由以上试验结果和讨论可以得出以下主要结论:

(1) 干燥、饱和水、高压孔隙水和高压孔隙 CO₂ 作用下砂岩的剪切强度、残余剪切强度随有效正应力的增加而增加, 并符合摩尔-库仑准则。干燥条件下正应力的增加还会增大砂岩的剪切刚度。

(2) 水、高压孔隙水和高压孔隙 CO₂ 都会弱化砂岩的剪切强度。水对砂岩的剪切强度降低了 17.17% (饱和水)、15.38% (高压孔隙水), CO₂ 对砂岩剪切强度降低了 10.45% (剔除 2 MPa 有效正应力的异常点)。其弱化作用可以归结为水/CO₂-岩石之间的相互作用。由于砂岩中含有黏土成分, 水对黏土的软化程度高于 CO₂。

(3) 孔隙压力对砂岩剪切强度的影响遵守 Terzaghi 有效应力原理。含水 (饱和水及高压孔隙水) 砂岩的剪切强度很接近, 含 CO₂ 砂岩的剪切强度介于干燥和含水剪切强度之间。

(4) 水的弱化作用主要体现在对内摩擦角 φ 的影响, CO₂ 对 φ 几乎不影响; 而水对黏结力 c 的影响小于 CO₂ 的影响。这可能由于水的润滑作用, 对矿物颗粒摩擦起到润滑的作用。而 CO₂ 的黏度远小于水的黏度, 润滑作用也远小于水的。

参考文献

- [1] JAEGER J C, COOK N G, ZIMMERMAN R. Fundamentals of rock mechanics[M]. [S. l.]: John Wiley & Sons, 2009.
- [2] TANG S B, YU C Y, HEAP M J, et al. The influence of water saturation on the short- and long-term mechanical behavior of red sandstone[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2018, 51(9): 2669—2687.
- [3] GRGIC D, GIRAUD A. The influence of different fluids on the static fatigue of a porous rock: poro-mechanical coupling versus chemical effects[J]. **Mechanics of Materials**, 2014, 71: 34—51.
- [4] BAUD P, ZHU W, WONG T F. Failure mode and weakening effect of water on sandstone[J]. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, 2000, 105(B7): 16371—16389.
- [5] 李凯达, 胡少斌, 李小春, 等. 单相流体对砂岩强度特性的影响[J]. 岩土力学, 2018, 39(5): 1789—1795, 1804. LI Kai-da, HU Shao-bin, LI Xiao-chun, et al. Influence of single-phase fluid on strength characteristics of sandstone[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(5): 1789—1795, 1804.
- [6] 许江, 刘婧, 程立朝, 等. 压剪应力条件下砂岩双面剪切细观开裂扩展演化特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(4): 649—657.
- XU Jiang, LIU Jing, CHENG Li-chao, et al. Mesoscopic cracking and expansion of double sheared sandstone under compressive-shear stress[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(4): 649—657.
- [7] 李男, 徐辉, 胡斌. 干燥与饱水状态下砂岩的剪切蠕变特性研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(2): 439—443. LI Nan, XU Hui, HU Bin. Shear creep characteristics of sandstone under dry and saturated states[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(2): 439—443.
- [8] 彭守建, 谭虎, 许江, 等. 渗透水压作用下完整砂岩剪切-渗流耦合试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(8): 2213—2220. PENG Shou-jian, TAN Hu, XU Jiang, et al. Experimental study on shear-seepage of coupled properties for complete[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(8): 2213—2220.
- [9] 彭守建, 谭虎, 许江, 等. 不同孔隙水压条件下完整砂岩剪切力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(增刊 1): 3131—3139. PENG Shou-jian, TAN Hu, XU Jiang, et al. Experimental study on shear mechanical properties of complete sandstone under different pore water pressures[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2017, 36(Suppl.1): 3131—3139.
- [10] 贺晶晶, 师俊平. 冻融后不同含水状态砂岩的剪切破坏特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(6): 1350—1358. HE Jing-jing, SHI Jun-ping. Shear failure properties of sandstone with different moisture contents after cyclic freezing-thawing[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2018, 37(6): 1350—1358.
- [11] 许江, 吴慧, 程立朝, 等. 酸性条件下砂岩剪切破坏特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊 2): 3897—3903. XU Jiang, WU Hui, CHENG Li-chao, et al. Experimental study of shearing failure properties of sandstone acidic conditions[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(Suppl.2): 3897—3903.
- [12] 宋朝阳, 纪洪广, 刘志强, 等. 饱和水弱胶结砂岩剪切断裂面形貌特征及破坏机理[J]. 煤炭学报, 2018, 43(9): 2444—2451. SONG Zhao-yang, JI Hong-guang, LIU Zhi-qiang, et al. Morphology and failure mechanism of the shear fracture

- surface of weakly cemented sandstone with water saturation[J]. **Journal of China Coal Society**, 2018, 43(9): 2444—2451.
- [13] ZHANG Q, HU S B, LI X C, et al. Preliminary experimental study of effect of CO₂-H₂O biphasic fluid on mechanical behavior of sandstone under true triaxial compression[J]. **International Journal of Geomechanics**, 2019, 19(2): 06018036.
- [14] HU S, LI X, BAI B, et al. A modified true triaxial apparatus for measuring mechanical properties of sandstone coupled with CO₂-H₂O biphasic fluid[J]. **Greenhouse Gases: Science and Technology**, 2017, 7(1): 78—91.
- [15] 许江, 杨红伟, 彭守建, 等. 孔隙水压力-围压作用下砂岩力学特性的试验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2010, 29(8): 1618—1623.
- XU Jiang, YANG Hong-wei, PENG Shou-jian, et al. Experimental study of mechanical properties of sandstone under pore water pressure and confining pressure[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(8): 1618—1623.
- [16] 刘明泽, 白冰, 李小春, 等. 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[J]. **岩石力学与工程学报**, 2016, 35(2): 250—259.
- LIU Ming-ze, BAI Bing, LI Xiao-chun, et al. Experimental study of fracturing characteristics of sandstone under CO₂-water two-phase condition and effective stress model[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(2): 250—259.
- [17] 张强, 李小春, 胡少斌, 等. 高应力下花岗岩耦合节理在剪切过程中渗透率演化特性[J]. **岩土力学**, 2018, 39(10): 3641—3650.
- ZHANG Qiang, LI Xiao-chun, HU Shao-bin, et al. Permeability evolution of coupling granite joint during shearing under high stress condition[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(10): 3641—3650.
- [18] FOSTER W R. Lattice expansion and rheological behavior relationships in water-montmorillonite systems[J]. **Clays and Clay Minerals**, 1954, 3(1): 296—316.
- [19] AYLMORE G. Gas sorption in clay mineral systems[J]. **Clays and Clay Minerals**, 1974, 22(2): 175—183.
- [20] CHERBLANC F, BERTHONNEAU J, BROMBLET P, et al. Influence of water content on the mechanical behaviour of limestone: role of the clay minerals content[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2016, 49(6): 2033—2042.
- [21] MARTIN R T. Adsorbed water on clay: a review[J]. **Clays and Clay Minerals**, 1960, 9(1): 28—70.
- [22] TENNEY C M, CYGAN R T. Molecular simulation of carbon dioxide, brine, and clay mineral interactions and determination of contact angles[J]. **Environmental Science & Technology**, 2014, 48(3): 2035—2042.
- [23] POPOV V L. Contact mechanics and friction: physical principles and applications[M]. New York: Springer, 2010.

上接第 3027 页

- [29] 肖荣久, 赵强, 邓媛华. 陕西三趾马红土工程地质特性初步研究[C]//全国工程地质大会论文选集. [出版地不详]: [出版者不详], 1992.
- XIAO Rong-jiu, ZHAO Qiang, DENG Yuan-hua. A preliminary study on engineering geologic characteristics of laterite red clay in Shaanxi[C]// Selected Papers of National Engineering Geological Conference. [S. l.]: [s. n.], 1992.
- [30] 曲永新, 张永双, 覃祖森. 三趾马红土与西北黄土高原滑坡[J]. **工程地质学报**, 1999, 7(3): 257—265.
- QU Yong-xin, ZHANG Yong-shuang, YAN Zu-yu. Hipparion laterite and Landslide hazards on Loess Plateau of Northwestern China[J]. **Journal of Engineering Geology**, 1999, 7(3): 257—265.
- [31] 刘春, 王宝军, 施斌, 等. 基于数字图像识别的岩土体裂隙形态参数分析方法[J]. **岩土工程学报**, 2008, 30(9): 1383—1388.
- LIU Chun, WANG Bao-jun, SHI Bin, et al. Analytic method of morphological parameters of cracks for rock and soil based on image processing and recognition[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(9): 1383—1388.