

超临界 CO₂ 对气化燃空区盖层烧变 页岩力学性质影响规律研究

李怀展^{1,2}, 唐超², 郭广礼^{1,2}, 李伟², 查剑锋^{1,2},
曹景春², 黄温钢³, 元亚菲²

(1. 中国矿业大学 矿山生态修复教育部工程研究中心, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 江苏省老工业基地资源利用
与生态修复协同创新中心, 江苏 徐州 221116; 3. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 超临界 CO₂ 对气化燃空区烧变围岩力学性质的影响规律是评估煤炭地下气化耦合 CO₂ 封存(UCG-CCS)中 CO₂ 泄漏风险的重要参数. 针对目前国内外关于超临界 CO₂ 浸泡作用下烧变围岩力学试验缺乏的问题, 论文基于自主研发的超临界 CO₂ 饱和增压装置, 通过巴西劈裂试验以及单轴压缩试验研究了不同气化温度、不同超临界 CO₂ 浸泡压力及时间作用下页岩的抗拉强度、单轴抗压强度以及裂隙破坏特征的变化规律. 研究表明: 烧变页岩质量减轻, 且随着温度的升高, 质量减轻幅度增大, 烧变页岩的抗拉强度和单轴抗压强度呈阶梯状下降趋势; 经超临界 CO₂ 浸泡后, 烧变页岩试件质量增加; 超临界 CO₂ 弱化了烧变页岩的抗拉强度、抗压强度和弹性模量, 超临界 CO₂ 浸泡后, 抗拉强度和单轴抗压强度显著降低, 随着浸泡压力的提升, 烧变页岩抗拉强度逐渐降低, 但降低幅度逐渐减小, 抗压强度、弹性模量逐渐减小; 随着浸泡时间的延长, 烧变页岩的抗拉、抗压强度逐渐降低; 随着气化温度、超临界 CO₂ 浸泡压力和时间的提升, 烧变页岩岩样的原生裂隙逐渐扩展, 次生裂隙逐渐增多. 构建了页岩抗拉强度-温度、浸泡压力和浸泡时间拟合函数与抗压强度-温度、浸泡压力和浸泡时间拟合函数. 研究成果对于 UCG-CCS 选址及推广应用具有重要的理论及实践意义.

关键词: 煤炭地下气化; 超临界 CO₂ 封存; 烧变页岩; 气化燃空区; 力学性质

中图分类号: TD 313 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1964(2025)02-0385-14

Impact of supercritical CO₂ on mechanical properties of burnt shale in overlying strata of gasification combustion zone

LI Huaizhan^{1,2}, TANG Chao², GUO Guangli^{1,2}, LI Wei², ZHA Jianfeng^{1,2},
CAO Jingchun², HUANG Wengang³, YUAN Yafei²

(1. Engineering Research Center of Ministry of Education for Mine Ecological Restoration, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 2. Collaborative Innovation Center for Resource Utilization and Ecological Restoration of Old Industrial Base, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 3. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

收稿日期: 2024-07-16 修回日期: 2024-11-01 DOI: 10.13247/j.cnki.jcumt.20240344

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42174048); 国家自然科学基金联合基金重点支持项目(U24B2042); 江苏省优秀青年基金项目(BK20220158)

通信作者: 唐超(1999-), 男, 山东省临沂市人, 博士研究生, 从事变形监测与沉降控制方面的研究.

E-mail: ts21160073a31@cumt.edu.cn Tel: 15610117125

引用格式: 李怀展, 唐超, 郭广礼, 等. 超临界 CO₂ 对气化燃空区盖层烧变页岩力学性质影响规律研究[J]. 中国矿业大学学报, 2025, 54(2): 385-398.

LI Huaizhan, TANG Chao, GUO Guangli, et al. Impact of supercritical CO₂ on mechanical properties of burnt shale in overlying strata of gasification combustion zone[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(2): 385-398.

Abstract: The influence of supercritical CO₂ on the mechanical properties of burnt surrounding rock in the gasification combustion zone is a key parameter for evaluating the risk of CO₂ leakage in UCG-CCS. Given the current lack of research on the mechanical tests of burnt surrounding rock under the influence of supercritical CO₂ infiltration, this study is carried out by leveraging a self-developed supercritical CO₂ saturation pressurization device. Through Brazilian splitting tests and uniaxial compression tests, the changes in the tensile strength, uniaxial compressive strength and fracture failure characteristics of shale under different gasification temperatures, supercritical CO₂ soaking pressures and supercritical CO₂ soaking times were studied. The results show that the mass of burnt shale decreases, and with the extent of mass reduction increases with the rise in temperature. The tensile strength and uniaxial compressive strength of burnt shale exhibit a stepwise decline. After supercritical CO₂ soaking, the quality of burnt shale specimens increases. Supercritical CO₂ weakens the tensile strength, compressive strength and elastic modulus of burnt shale. Supercritical CO₂ soaking weakens the tensile strength and uniaxial compressive strength significantly. As the soaking pressure increased, the tensile strength of burnt shale gradually decreases, but the reduction rate becomes smaller. Both the compressive strength and elastic modulus also decline gradually. As the soaking time increases, the tensile strength and compressive strength of the burnt shale rock specimens exhibit a gradual decline. As the gasification temperature, supercritical CO₂ soaking pressure and soaking time increases, the primary cracks of burnt shale rock samples slowly expand, and the secondary cracks begin to emerge. In this study, we meticulously construct fitting functions that correlate the tensile strength of shale with temperature, soaking pressure, and soaking time, as well as for compressive strength in relation to the same variables, are meticulously constructed. These outcomes offer profound theoretical and practical insights for the site selection, design, and widespread application of UCG-CCS projects.

Key words: underground coal gasification; supercritical CO₂ storage; burnt shale; gasification combustion zone; mechanical property

煤炭地下气化是煤炭清洁绿色开采的重要技术手段^[1-3],但煤炭气化开采不可避免地会形成大量的燃空区,严重威胁地面建(构)筑物安全及场地生态环境^[4-7].因此,可在煤炭地下气化后的燃空区封存 CO₂^[8-10],既能利用燃空区减少 CO₂ 排放,又可保护地面建(构)筑物及生态环境安全^[11-13].然而在煤炭地下气化耦合 CO₂ 封存(UCG-CCS)过程中,盖层烧变岩石损伤极易造成 CO₂ 泄露等风险^[14-15].因此,探究超临界 CO₂ 浸泡对高温烧变岩石力学性质影响具有重要意义.

目前,学者们针对 CO₂ 对地质盖层完整性的影响已展开诸多研究^[16-19].在燃空区封存超临界 CO₂ 的过程中,盖层岩石的物理力学特性是影响盖层密闭性以及封存安全性的重要因素.文献[20-21]提出了不同类型岩石在超临界 CO₂ 作用下蚀变损伤规律的修正方法.针对砂岩,文献[22]探究了盐水-超临界 CO₂-砂层的化学反应演化机制,研究结果表明,适当提高温度有利于该环境下的

CO₂ 封存.针对花岗岩,文献[23]探究了高温环境下超临界 CO₂ 对花岗岩力学性质的影响,研究结果表明,微量水环境下超临界 CO₂ 对花岗岩力学强度的影响可以忽略不计.针对煤岩,文献[24]的研究结果表明超临界 CO₂ 作用会促进煤岩组合体的塑性破坏;文献[25]研究结果表明,在超临界 CO₂ 作用下裂缝能否穿透煤岩界面取决于竖向应力和界面内聚力;文献[26]建立了超临界 CO₂ 作用下煤体结构面剪切硬化本构模型.针对泥岩,文献[27]使用 X 射线衍射等设备研究了 CO₂ 作用下泥岩的结构特征.针对碳酸岩,文献[28]研究发现水-超临界 CO₂ 耦合作用下致密碳酸岩的力学强度降低明显.针对玄武岩,文献[29]探究了超临界 CO₂ 作用下玄武岩的可裂性.针对石灰岩,文献[30]研究发现超临界 CO₂ 可使石灰石的孔隙率增大.针对页岩,文献[31]研究发现页岩的弹性模量与超临界 CO₂ 浸泡时间、压力呈反比关系;文献[32]的研究结果表明在超临界 CO₂ 作用下页岩的

润湿性发生变化;文献[33]的研究结果表明,超临界 CO₂ 作用弱化了页岩的抗拉强度和劈裂模量,弱化程度随着作用时间的增加而增大;文献[34]明确了超临界 CO₂ 对页岩的影响机制。

以上研究基本明确了在常规 CO₂ 地质封存环境中盖层岩石力学性质的破坏规律及其演化特征,但围绕 UCG-CCS 过程中烧变岩石的力学破坏规律及机理尚未有相关研究.随着 UCG-CCS 工业性试验及未来大规模推广应用,气化燃空区烧变岩石的力学性质对于评估 UCG-CCS 盖层密封性与确定适宜 CO₂ 封存压力具有重要意义.基于此,本文以烧变页岩岩样为研究对象,利用自主研发的超临界 CO₂ 饱和增压装置,围绕煤炭地下气化高温、超临界 CO₂ 浸泡压力、超临界 CO₂ 浸泡时间等主要因素,探究其对烧变页岩力学性质的影响规律.研究成果可为 UCG-CCS 碳封存项目页岩盖层密封性评估提供重要的理论依据及指导价值。

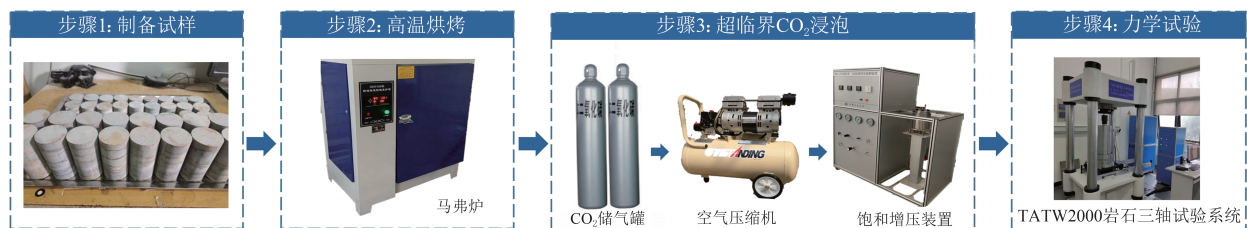


图1 超临界 CO₂ 高温烧变页岩力学试验技术流程

Fig. 1 Mechanical test technical process of supercritical CO₂ high temperature burnt shale

表1 主要试验仪器及设备

Table 1 Main experimental instruments and equipment

名称	型号	关键性能参数
SX2 系列 1 000 °C 箱式电阻炉	SX2-12-10A	额定功率:12 kW
		额定电压:380 V
		控温范围:室温至 1 000 °C
		炉膛尺寸(深×宽×高):50 cm×30 cm×20 cm
HY-2 型超临界 CO ₂ 增压饱和装置	TC-100	最大出口压力:70 MPa
		增压比:1:100
		控温精度:±0.5 °C
		反应釜容积:1 000 mL
岩石三轴试验系统	TATW2000	最大轴向试验力:2 000 kN;精度:±0.1%
		最大围压:100 MPa;精度:±0.1%
		轴向活塞行程:0~150 mm

1.3 试验方案设计

为揭示在超临界 CO₂ 扰动下,燃空区烧变岩石力学损伤变形特性,设置 30 组对照试验(尺寸为 $\varnothing 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的圆柱 45 个;尺寸为

1 试验样品及方案设计

1.1 试验样品

页岩是具有极低孔隙度和低渗透率的致密岩石,对注入封存的 CO₂ 运移具有很强的阻力^[35].因此,本试验采用页岩岩样开展力学损伤变形规律研究。

将页岩岩样制备成尺寸为 $\varnothing 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的圆柱体试件以及尺寸为 $\varnothing 50 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ 的圆盘试件.页岩岩样两端的平整度偏差在 $\pm 0.01 \text{ mm}$ 以内,端面与轴线偏差在 0.25° 以内,符合国际岩石力学与岩石工程学会(ISRM)推荐规定。

1.2 试验设备

本研究涉及的超临界 CO₂ 浸泡试验是通过自主研发的超临界 CO₂ 饱和增压装置实现的,岩石力学试验采用 TATW2000 岩石三轴试验系统,如图 1 所示,具体设备明细见表 1。

$\varnothing 50 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ 的圆盘 45 个),为了保障试验结果的可靠性,每 1 组变量下设置 3 个平行试件,具体试验方案如表 2 所示。

表 2 试验方案设计
Table 2 Experimental design

序号	试件编号	温度/℃	浸泡压力/MPa	浸泡时间/h	力学试验	试样尺寸/(mm×mm)
1	CA1/CB1/CC1	25	0	0	单轴压缩	∅50×100
2	CA2/CB2/CC2	100	0	0	单轴压缩	∅50×100
3	CA3/CB3/CC3	150	0	0	单轴压缩	∅50×100
4	CA4/CB4/CC4	200	0	0	单轴压缩	∅50×100
5	CA5/CB5/CC5	250	0	0	单轴压缩	∅50×100
6	OCA1/OCB1/OCA1	25	7.40	2	单轴压缩	∅50×100
7	OCA2/OCB2/OCC2	100	7.40	2	单轴压缩	∅50×100
8	OCA3/OCB3/OCC3	150	7.40	2	单轴压缩	∅50×100
9	OCA4/OCB4/OCC4	200	7.40	2	单轴压缩	∅50×100
10	OCA5/OCB5/OCC5	250	7.40	2	单轴压缩	∅50×100
11	DA1/DB1/DC1	25	0	0	巴西劈裂	∅50×25
12	DA2/DB2/DC2	100	0	0	巴西劈裂	∅50×25
13	DA3/DB3/DC3	150	0	0	巴西劈裂	∅50×25
14	DA4/DB4/DC4	200	0	0	巴西劈裂	∅50×25
15	DA5/DB5/DC5	250	0	0	巴西劈裂	∅50×25
16	ODA1/ODB1/ODC1	25	7.40	2	巴西劈裂	∅50×25
17	ODA2/ODB2/ODC2	100	7.40	2	巴西劈裂	∅50×25
18	ODA3/ODB3/ODC3	150	7.40	2	巴西劈裂	∅50×25
19	ODA4/ODB4/ODC4	200	7.40	2	巴西劈裂	∅50×25
20	ODA5/ODB5/ODC5	250	7.40	2	巴西劈裂	∅50×25
21	PC081/PC082/PC083	150	8.40	2	单轴压缩	∅50×100
22	PC091/PC092/PC093	150	9.40	2	单轴压缩	∅50×100
23	PC101/PC102/PC103	150	10.40	2	单轴压缩	∅50×100
24	PD081/PD082/PD083	150	8.40	2	巴西劈裂	∅50×25
25	PD091/PD092/PD093	150	9.40	2	巴西劈裂	∅50×25
26	PD101/PD102/PD103	150	10.40	2	巴西劈裂	∅50×25
27	TC11/TC12/TC13	150	7.40	1	单轴压缩	∅50×100
28	TC31/TC32/TC33	150	7.40	1	单轴压缩	∅50×100
29	TD11/TD12/TD13	150	7.40	1	巴西劈裂	∅50×25
30	TD31/TD32/TD33	150	7.40	1	巴西劈裂	∅50×25

1) 挑选满足要求的岩石试件, 并将其切割、打磨至规定的几何形状. 测量页岩试件直径、高度、质量, 并标号, 拍照并记录数据.

2) 将制备好的页岩试件按照设定的温度梯度进行分组, 温度梯度设为 25, 100, 150, 200, 250 ℃ 这 5 个水平. 分别在不同温度梯度下加热试件. 为防止电炉在存放和运输过程中受潮, 在使用前必须进行烘炉干燥.

3) 高温加热试件时, 电炉达到目标温度后恒温保持 2 h, 以使试件内部受热均匀. 重新进行拍照、称重和测量体积, 按标号将试件用保鲜膜封

好, 以防止空气中的水分进入试件.

4) 将加热后的页岩试件置于反应釜料篮中并将反应釜拧紧, 然后采用水浴加热的方式使反应釜内的温度逐渐升高, 通过水浴加热使页岩试件受热均匀.

5) 打开 CO₂ 气瓶向反应釜内注入 CO₂, 使反应釜内充满 CO₂, 试验压力分别设为 7.40, 8.40, 9.40, 10.40 MPa. 在试验过程中及时补充 CO₂ 以抵消由于装置气密性不足而导致压力降低造成的影响. 反应釜配备了减压阀可以实时监测反应釜内的压力, 若压力大于 20 MPa 会自动泄压以保证

试验安全,试验过程中严格佩戴安全帽、护目镜、手套等护具。

6)将反应釜中的页岩试件在超临界 CO₂ 扰动下的浸泡时间分别设定为 1, 2, 3 h, 以探究浸泡时间对试件的影响. 待压力完全释放后, 观察页岩试件的情况. 标记所有页岩试件, 记录试件的直径、高度、质量, 并拍照记录数据, 最后使用保鲜膜将试件包好备用。

7)将超临界 CO₂ 浸泡后的页岩试件自然晾干, 晾干后进行力学试验. 单轴压缩试验以 0.1 mm/s 的速率加载至试件破坏, 记录试验破坏荷载和试验过程中出现的现象, 并对破坏后的试件进行描述. 巴西劈裂测试以 0.3~0.5 MPa/s 的速度加载, 将力学试验仪器的变形传感器与微机系统连接, 可实时采集记录数据, 并利用绘图软件绘制曲线。

2 试验结果与分析

2.1 烧变岩石物理特性变化规律

高温加热后烧变岩样变化情况如图 2 所示. 从图 2 中可以看出, 在不同高温作用后, 燃空区烧变页岩试件的颜色发生了变化. 当烧变页岩试件经过 100 °C 的高温加热后, 各试件颜色变化较小; 当经过 150 °C 的高温加热后, 各试件都向红色转变, 颜色逐渐加深; 当经过 200 °C 的高温烘烤后, 试件的颜色变为红褐色; 此后继续升高温度至 250 °C, 烧变页岩试件的颜色进一步加深。

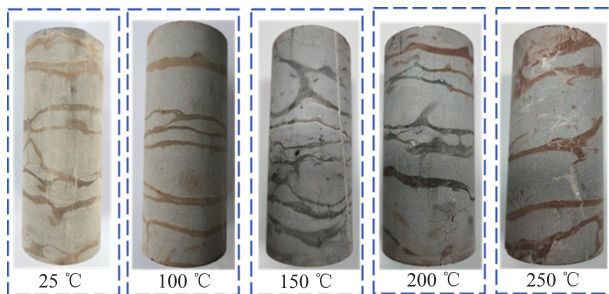


图 2 高温加热后烧变岩样变化
Fig. 2 Changes of cap rock sample after high temperature heating

图 3 为经过不同方式处理后扫描电镜下岩样的微观结构变化. 如图 3a 所示, 未处理页岩表面形态总体较为光滑, 页岩内的孔隙相对较少. 如图 3b, 3c 所示, 页岩岩样分别在经高温处理和超临界 CO₂ 浸泡后表面更加粗糙, 出现更多蜂窝状孔隙. 如图 3d 所示, 页岩岩样在经过高温处理后又经超临界 CO₂ 浸泡后出现明显“坑洞”状的软弱结构面. 相较于原岩, 高温与超临界 CO₂ 作用使页岩的

结构产生了显著变化。

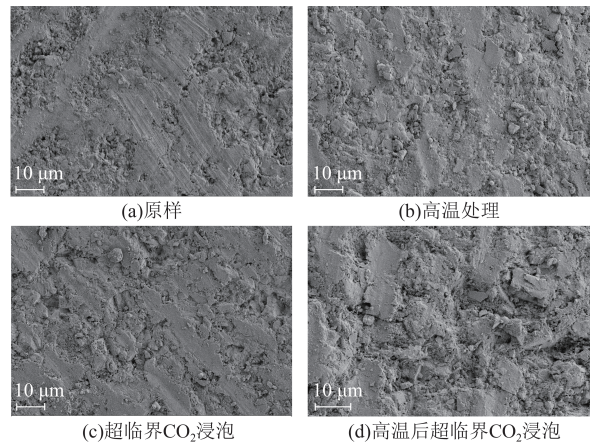


图 3 页岩微观结构
Fig. 3 Microstructure of shale

图 4 展示了原试样、高温处理、超临界 CO₂ 浸泡与经高温处理后又经超临界 CO₂ 浸泡后的页岩矿物组分分析, X 射线衍射 (XRD) 分析结果表明, 岩样的矿物组分在不同处理条件下没有明显差别。

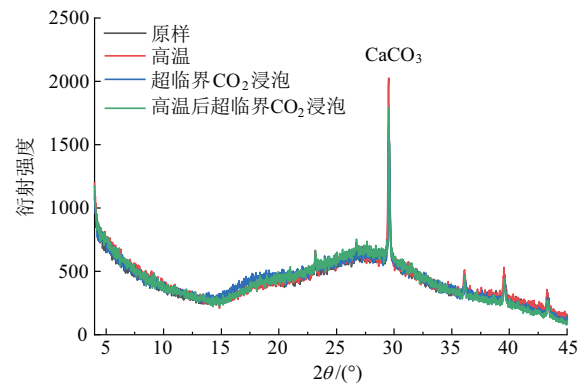


图 4 页岩试件端面的 XRD 曲线
Fig. 4 XRD curve of end face of shale sample

对经过 100, 150, 200, 250 °C 加热处理的燃空区烧变页岩试件, 及超临界 CO₂ 浸泡前后试件的质量变化进行对比分析, 结果如图 5 所示. 初始烧变岩样在经历过气化高温烘烤后, 质量不同程度减轻, 且随着处理温度升高, 质量减轻幅度增大, 经 100 °C 高温处理后减轻 0.17 g, 经 250 °C 高温处理后减轻 0.80 g. 这是由于高温会促使岩石内部微观结构改变, 这些微观结构的改变可能导致岩石整体的密度减小. 此外, 高温还可能引发岩石中的矿物膨胀或挥发性矿物的流失, 从而进一步减轻岩石的质量. 从宏观角度看, 高温会导致岩石中的孔隙水蒸发或气体膨胀, 从而减小了岩石的有效应力, 间接影响了岩石的密度和质量. 此外, 高温还可能造成岩石中的微裂纹扩展, 导致岩石疏松化和破碎, 进而导致其整体密度减小. 而在超临界 CO₂ 浸泡后, 由于岩样对 CO₂ 的吸附作用等原

因,岩样的质量增大.

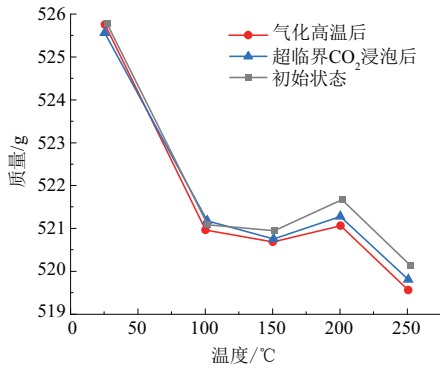


图 5 气化高温、超临界 CO₂ 浸泡前后试件质量变化
Fig. 5 Quality changes of specimens before and after high temperature gasification and supercritical CO₂ immersion.

2.2 抗拉强度

不同初始条件下页岩的载荷-位移曲线如图 6 所示.由图 6 可知,随着载荷的变化,燃空区烧变页岩试件的载荷-位移曲线经历了初始压缩阶段、弹性变形阶段和破坏阶段.随着载荷的不断增加,载荷与位移呈线性关系,体现为弹性变形阶段.当载荷达到峰值后,载荷曲线几乎垂直跌落.超临界 CO₂ 注入压力从 7.40 MPa 增加到 10.40 MPa 的过程中,载荷的峰值明显降低.随着浸泡时间增加,岩体力学性质减弱.

根据圆盘受压的弹性理论解^[36],把破坏时样品中心的拉应力作为抗拉强度,其计算公式为

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi dl}, \quad (1)$$

表 3 经高温处理后烧变页岩试验数据

Table 3 Experimental data of burned shale after high-temperature treatment

温度/°C	是否经超临界 CO ₂ 浸泡	厚度/mm	直径/mm	峰值载荷/kN	抗拉强度/MPa
25	否	25.17	49.83	16.15	8.23
	是	25.70	49.87	14.27	7.27
100	否	24.74	49.81	15.90	8.10
	是	24.02	49.83	14.31	7.29
150	否	24.46	49.80	15.70	8.00
	是	24.96	49.85	12.72	6.48
200	否	24.70	49.87	12.40	6.32
	是	25.54	49.82	11.28	5.75
250	否	25.10	49.80	10.21	5.20
	是	25.02	49.82	9.09	4.63

由表 3 和图 7a 可知,未处理原样抗拉强度为 8.23 MPa.燃空区烧变岩样在超临界 CO₂ 浸泡前,随着处理温度的升高,岩石抗拉强度逐渐降低.由表 4 和图 7b 可知,随着超临界 CO₂ 浸泡压

式中: σ_t 为单轴抗拉强度,MPa; P 为劈裂破坏发生时的最大载荷,N; d 为岩石圆盘样品的直径,mm; l 为岩石圆盘样品的厚度,mm.

根据式(1)计算燃空区烧变页岩试件在不同温度及超临界 CO₂ 浸泡参数下的抗拉强度,并采用数字显示游标卡尺测量烧变页岩的直径和厚度,结果见表 3 和表 4.根据表 3 和表 4 中燃空区烧变页岩的抗拉强度做不同初始条件下的页岩抗拉强度变化图,并对烧变岩样抗拉强度进行曲线拟合,如图 7 所示.

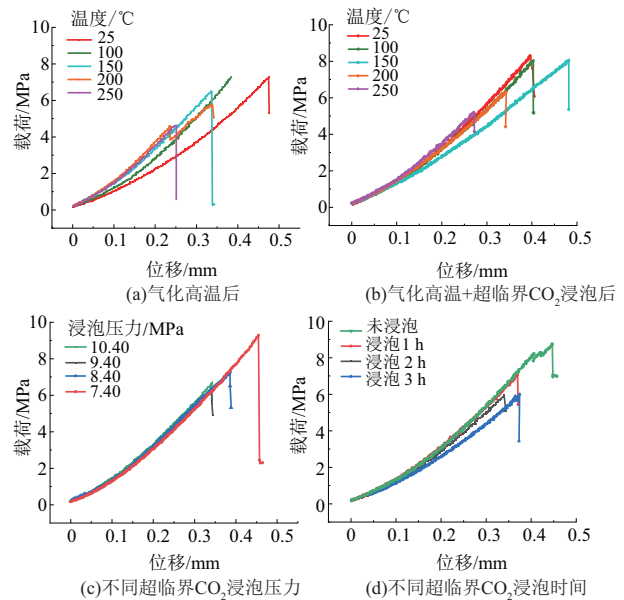


图 6 不同初始条件下页岩的载荷-位移曲线

Fig. 6 Load-displacement curves of shale under different initial conditions

力的提升,燃空区烧变岩石的抗拉强度逐渐降低.由表 4 和图 7c 可知,未经超临界 CO₂ 浸泡的烧变岩样其抗拉强度为 8.78 MPa,经过恒定温度 35 °C、恒定压力 7.40 MPa 的超临界 CO₂ 浸泡 1 h

后,烧变岩样的平均抗拉强度为 7.06 MPa,较未经超临界 CO₂ 浸泡的烧变岩样的抗拉强度降低了 19.59%,降低幅度非常明显。

表 4 超临界 CO₂ 浸泡后烧变页岩试验数据
Table 4 Experimental data of cap rock shale after supercritical CO₂ immersion

浸泡压力/MPa	浸泡时间/h	厚度/mm	直径/mm	抗拉强度/MPa	抗拉强度降低幅度/%
7.40	2	23.84	49.83	9.38	
8.40	2	24.73	49.86	7.22	23.03
9.40	2	25.37	49.80	6.68	7.48
10.40	2	26.05	49.82	6.35	4.94
7.40	0	24.56	49.86	8.78	
7.40	1	25.81	49.83	7.06	19.59
7.40	2	26.20	49.92	5.95	15.72
7.40	3	24.35	49.83	5.99	-0.67

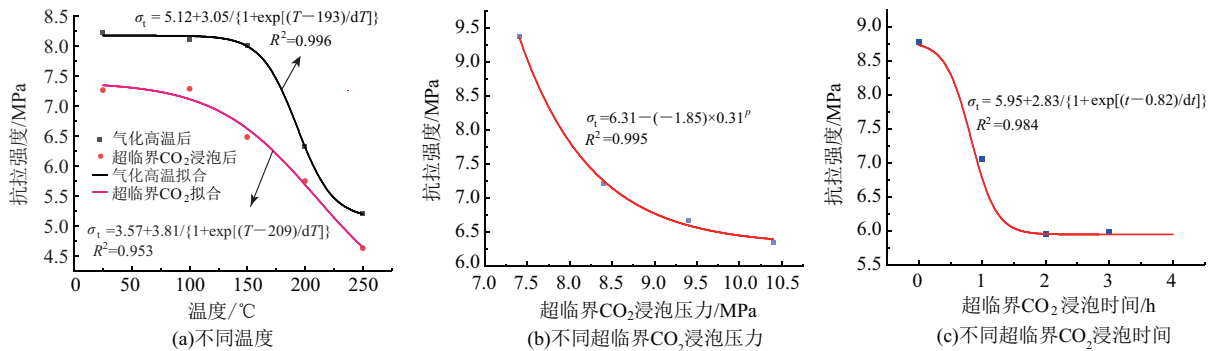


图 7 不同初始条件下页岩的抗拉强度拟合曲线

Fig. 7 Fitting curves of tensile strength of shale under different initial conditions

通过曲线拟合得到超临界 CO₂ 浸泡前后烧变岩样的抗拉强度与气化温度 T 、超临界 CO₂ 浸泡压力 p 、超临界 CO₂ 浸泡时间 t 的函数关系式为

$$\sigma_t = 3.57 + \frac{3.81}{1 + e^{(T-209)/dT}}, \quad (2)$$

$$\sigma_t = 6.31 - (-1.85) \times 0.31^p, \quad (3)$$

$$\sigma_t = 5.95 + \frac{2.83}{1 + e^{(t-0.82)/dt}}. \quad (4)$$

相关系数 R^2 分别为 0.953, 0.995, 0.984, 拟合程度较好。

考虑到 CO₂ 长效封存的需求,随着超临界 CO₂ 浸泡时间增加页岩抗拉强度逐渐趋于稳定,可以不考虑浸泡时间对页岩抗拉强度的影响. 气化温度与超临界 CO₂ 压力对岩体抗拉强度具有较大影响,在工程实际中应考虑气化温度与超临界 CO₂ 压力对岩层抗拉强度的影响。

2.3 单轴抗压强度

通过单轴压缩试验得到了烧变页岩经单轴压缩的载荷-位移曲线,如图 8 所示。

由图 8a, 8b 可知,燃空区烧变页岩在单轴压缩试验过程中存在压实阶段和弹性阶段. 在初始温

度 25 °C 时压实阶段并不明显,但随着气化温度升高,试件的压实阶段越来越明显,且试件经过超临界 CO₂ 浸泡后其压实阶段更为明显,这表明烧变页岩在气化温度升高过程中产生了新裂隙。

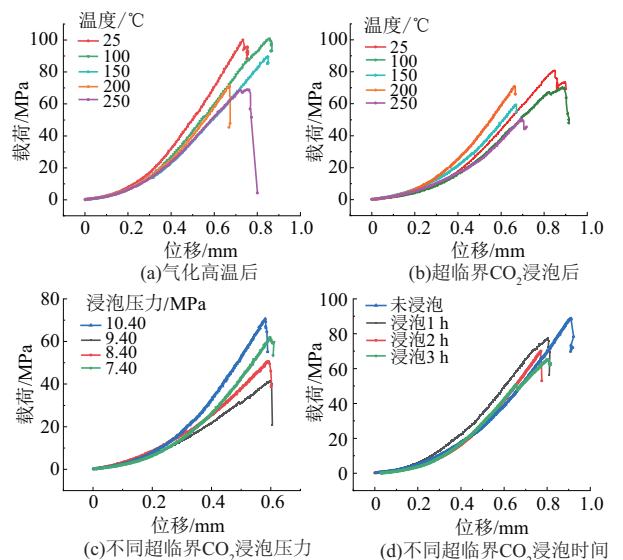


图 8 烧变页岩经单轴压缩的载荷-位移曲线

Fig. 8 Load-displacement curve of cap rock shale under uniaxial compression

图 8c 展示了超临界 CO₂ 注入压力从 7.40 MPa 增加到 10.40 MPa 时经超临界 CO₂ 浸泡后燃空区烧变页岩的载荷-位移曲线. 可以明显看出, 所有烧变岩样的载荷-位移曲线变化趋势相同. 随着浸泡压力和浸泡时间的增加, 载荷的峰值明显降低, 且随着 CO₂ 浸泡压力的增大, 在相同载荷条件下经超临界 CO₂ 浸泡后的烧变页岩位移逐渐增大. 如图 8d 所示, 随着浸泡时间增加, 岩体峰值强度降低.

根据 ISRM 标准, 当对圆柱形试件施加轴向压应力时, 其强度定义为

$$\sigma_y = \frac{F}{A}, \quad (5)$$

表 5 高温处理后烧变页岩单轴压缩试验数据

Table 5 Uniaxial compression experimental data of cap rock shale after high temperature

气化温度/℃	是否经超临界 CO ₂ 浸泡	高度/mm	直径/mm	弹性模量/GPa	抗压强度/MPa
25	否	99.70	49.81	1.57	100.04
	是	99.53	49.80	1.56	81.03
100	否	99.57	49.77	1.54	100.60
	是	99.59	49.86	1.32	69.99
150	否	99.59	49.80	1.48	89.80
	是	99.59	49.85	1.54	70.80
200	否	99.52	49.80	1.65	71.27
	是	99.07	49.80	1.22	59.75
250	否	99.73	49.80	1.43	68.87
	是	99.52	49.79	1.01	50.58

表 6 超临界 CO₂ 浸泡后烧变页岩单轴压缩试验数据

Table 6 Experimental data of cap rock shale uniaxial compression after supercritical CO₂ immersion

浸泡压力/MPa	浸泡时间/h	高度/mm	直径/mm	弹性模量/GPa	抗压强度/MPa
7.40	2	99.49	49.86	1.54	70.63
8.40	2	100.06	49.83	1.59	61.93
9.40	2	99.22	49.92	1.07	50.51
10.40	2	99.52	49.83	0.92	41.60
7.40	0	99.68	49.82	1.43	88.09
7.40	1	99.66	49.79	1.42	77.22
7.40	2	99.46	49.79	1.45	70.09
7.40	3	99.57	49.84	1.33	65.10

由表 5 和图 9a 可知, 未处理原样单轴抗压强度为 100.04 MPa. 在超临界 CO₂ 浸泡前, 随处理温度从 25 ℃ 升高至 100 ℃, 燃空区烧变岩样的抗压强度基本保持不变; 随着温度持续升高, 岩样抗压强度逐渐降低, 当温度从 100 ℃ 升高至 200 ℃ 时, 烧变岩样抗压强度显著降低, 从 100.60 MPa 下降至 71.27 MPa; 处理温度继续升高至 250 ℃ 时, 烧变岩样抗压强度降低至 68.97 MPa, 降低幅

$$E_0 = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\epsilon_b - \epsilon_a}, \quad (6)$$

式中: σ_y 为岩样的单轴抗压强度, N/cm²; F 为加载过程中的最大破坏载荷, N; A 为试件的受压面积, cm²; E_0 为试件的弹性模量, GPa; σ_a 和 σ_b 分别为起始应力与峰值应力, MPa; ϵ_a 和 ϵ_b 分别为对应于 σ_a 和 σ_b 的应变值.

根据式(5)~(6)计算燃空区烧变页岩试件在不同初始条件下的抗压强度以及弹性模量, 并采用数字显示游标卡尺测量烧变页岩直径和厚度, 计算结果见表 5 和表 6; 不同初始条件下页岩的单轴抗压强度拟合曲线见图 9.

度明显减小. 烧变岩样经过超临界 CO₂ 浸泡后, 在相同气化温度下其抗压强度显著降低. 此外, 燃空区烧变岩样的弹性模量也大体上随着温度的升高而降低; 经过超临界 CO₂ 浸泡后, 相同气化温度下岩样的弹性模量显著降低.

由表 6 和图 9b 可知, 当超临界 CO₂ 浸泡压力从 7.40 MPa 增加至 8.40、9.40、10.40 MPa 时, 燃空区烧变岩样的抗压强度从 70.63 MPa 逐渐降低

至 61.93, 50.51, 41.60 MPa, 降低的幅度大致相同, 符合线性规律. 烧变岩样的弹性模量也随着超

临界 CO₂ 浸泡压力的提升而呈现出大体下降的趋势.

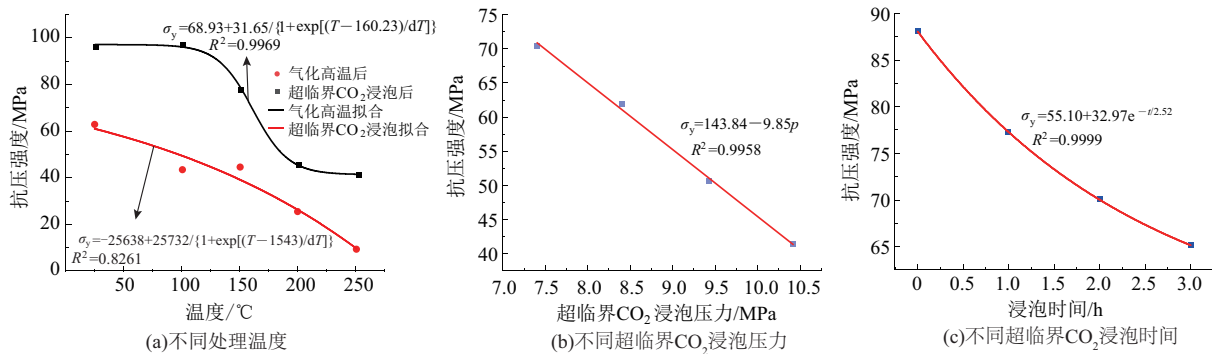


图9 不同初始条件下页岩的单向抗压强度拟合曲线

Fig. 9 Fitting curves of uniaxial compressive strength of shale under different initial conditions

由表6和图9c可知, 作为空白对照的未经超临界 CO₂ 浸泡的燃空区烧变岩样其抗压强度为 88.09 MPa. 经过恒定温度 35 °C、恒定压力 7.40 MPa 的超临界 CO₂ 浸泡 1 h 后, 烧变岩样平均抗压强度为 77.22 MPa, 较未经超临界 CO₂ 浸泡的烧变岩样的抗压强度降低了 12.34%; 超临界 CO₂ 浸泡 2 h 后的烧变岩样抗压强度为 70.09 MPa, 降幅为 9.23%; 超临界 CO₂ 浸泡 3 h 后的烧变岩样抗压强度为 65.10 MPa, 降幅为 7.12%, 可见随着浸泡时间梯度的提升, 烧变岩样的抗压强度降幅逐渐降低. 烧变岩样的弹性模量随着超临界 CO₂ 浸泡时间的升高基本保持不变.

根据表5和表6中的数据, 对烧变岩样抗压强度进行曲线拟合. 通过曲线拟合得到超临界 CO₂ 浸泡前后烧变岩样的抗压强度与气化后温度 T 、超临界 CO₂ 浸泡压力 p 、超临界 CO₂ 浸泡时间 t 的函数关系式为

$$\sigma_y = -25638 + \frac{25732}{1 + e^{(T-1543)/dT}}, \quad (7)$$

$$\sigma_y = 143.84 - 9.85p, \quad (8)$$

$$\sigma_y = 55.10 + 32.97e^{-t/2.52}. \quad (9)$$

相关系数 R^2 分别为 0.8261, 0.9958, 0.9999, 拟合程度较好.

岩体的抗压强度易受到气化温度以及超临界 CO₂ 压力的影响, 在煤炭地下气化耦合 CO₂ 封存选址时宜选择较厚的盖层以减少气化温度对岩层力学性质的影响.

2.4 裂隙破坏特征

温度效应及超临界 CO₂ 封存扰动除了会影响燃空区烧变岩石的力学强度特性外, 也会影响其破坏特征, 进而影响破坏过程中裂隙的产生和扩张. 如图10、图11所示, 在经过巴西劈裂试验破坏

过后燃空区烧变页岩基本上都沿着径向方向被劈裂成两半, 且随着初始条件的改变, 烧变页岩形成的裂隙形态、裂隙数量以及裂隙破坏程度都有所变化. 对于未经过高温烘烤的页岩试件, 劈裂破坏后基本上只形成了一条贯通圆盘中心的主裂隙, 经过 100 °C 高温烘烤后的烧变页岩同样形成贯通径向两端的主裂隙且出现少量次生裂隙; 经过 150 °C 高温烘烤的岩样, 形成更多次生裂隙且岩样边缘颗粒掉落; 温度升高至 200, 250 °C 时, 烧变页岩试件主裂隙出现“折线形”“弧形”形态, 次生裂隙进一步增加.

当烧变页岩经过超临界 CO₂ 浸泡后, 经巴西劈裂试验破坏, 由于应力集中同样会形成一条径向贯穿岩样的主裂隙, 同时伴随着岩样边缘颗粒脱落并产生少量次生裂隙; 当超临界 CO₂ 浸泡压力增加至 8.40 MPa 时, 烧变岩样径向主裂隙进一步横向扩展, 并产生贯穿岩样两端的次生裂隙且伴随着边缘颗粒脱落; 当超临界 CO₂ 浸泡压力增加至 9.40 MPa 时, 产生更多贯穿岩样两端的次生裂隙, 同时岩样边缘颗粒脱落现象更为明显; 当超临界 CO₂ 浸泡压力增加到 10.40 MPa 时, 烧变岩样径向主裂隙呈现“折线形”, 次生裂隙进一步横向扩展并伴随着岩样边缘颗粒脱落, 同时主裂隙中间位置也出现颗粒脱落现象; 从超临界 CO₂ 浸泡时间角度分析可知, 随着浸泡时间的增加, 烧变岩样的次生裂隙逐渐增加且岩样边缘出现颗粒掉落现象, 当浸泡时间增加到 3 h 时, 岩样的主裂隙中间也出现了颗粒掉落现象.

结果表明: 烧变岩样未经过高温烘烤和超临界 CO₂ 浸泡处理, 巴西劈裂试验过后形成的主裂隙形态较为单一且基本上未产生次生裂隙; 随着处理温度的升高和浸泡压力及浸泡时间的增加,

高温和超临界 CO₂ 对烧变页岩的劣化作用增加,烧变岩样的承载能力下降,导致烧变页岩出现较为复杂的多样化形态且产生了较多的次生裂隙,并且伴随着岩样周围及主裂隙周围颗粒脱落现象,随着这些变量的增加,这种劣化趋势更加明显。

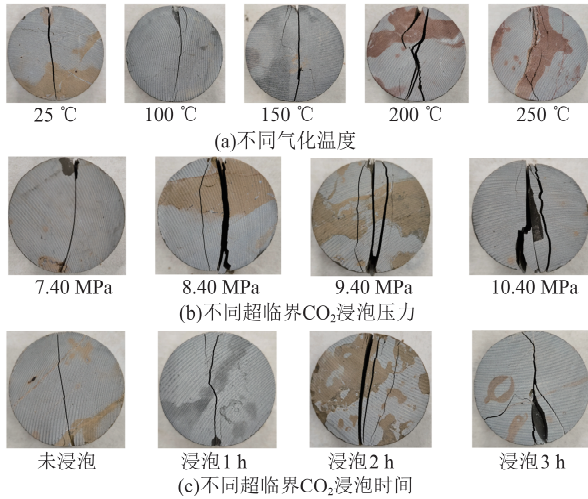


图 10 不同条件下页岩劈裂后裂隙形态
Fig. 10 Fracture morphology of shale after splitting under different conditions

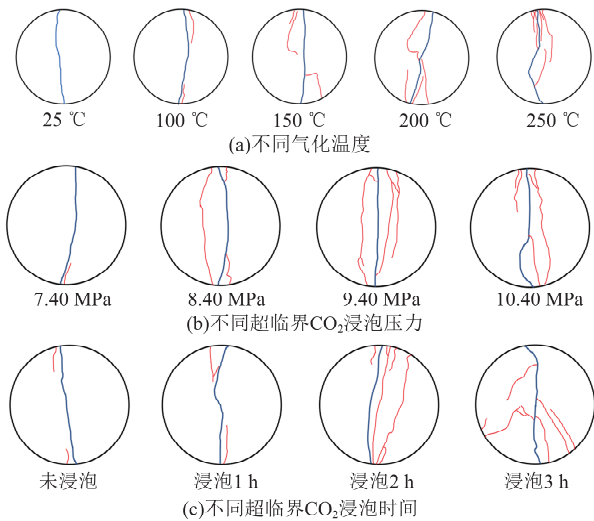


图 11 不同条件下页岩劈裂后裂隙形态模拟示意
Fig. 11 Simulation diagram of fracture morphology after shale splitting under different conditions

进一步分析不同初始条件下烧变岩石裂隙的宏观破坏形态. 图 12 为烧变页岩试件经单轴压缩破坏后的裂隙形态,根据试件破坏情况作裂隙形态模拟图,如图 13 所示. 可见,气化温度效应及超临界 CO₂ 封存扰动均会影响烧变岩样的裂隙产生和扩展. 未经气化高温烘烤以及超临界 CO₂ 浸泡的烧变页岩试件受压破坏后,形成的裂隙较为简单,基本上只形成了一条贯穿圆柱中心的主裂隙;

经过 100 °C 气化高温烘烤后的烧变岩样同样形成了一条贯穿圆柱中心的主裂隙且迂曲度上升,同时表面形成一条贯穿径向两端的次生裂隙且贯通主裂隙;经过 150 °C 高温烘烤后的烧变岩样主裂隙贯通横向两端将试件一分为二,次生裂隙增加且圆柱表面出现少许颗粒剥落现象;当温度升高到 200,250 °C 时,烧变页岩试件主裂隙沿着层理方向扩张,且圆柱表面及端面出现大面积颗粒脱落现象。

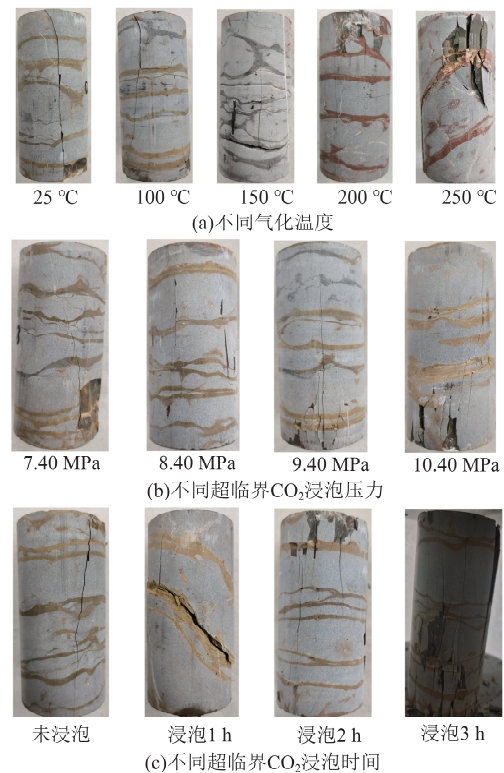


图 12 不同条件下页岩单轴压缩后裂隙形态
Fig. 12 Fracture morphology of shale after uniaxial compression under different conditions

将燃空区烧变岩样放入超临界 CO₂ 反应釜中浸泡,再经单轴压缩破坏后,由于应力集中,烧变岩样中同样会形成一条主裂隙,同时圆柱表面有大面积颗粒脱落;当超临界 CO₂ 浸泡压力升高至 8.40 MPa 时,烧变岩样出现少量次生裂隙且贯通主裂隙;当超临界 CO₂ 浸泡压力升高至 9.40,10.40 MPa 时,由于单轴挤压作用,圆柱试件表面除了形成主裂隙之外,还形成了裂隙网格,超临界 CO₂ 浸泡压力越大,裂隙网格越复杂,主裂隙宽度越大. 从超临界 CO₂ 浸泡时间角度分析可知,随着浸泡时间的增加,烧变圆柱试件的次生裂隙越来越多,形成的裂隙网格也越来越复杂,主裂隙随着径向或者层理方向贯通圆柱试件,破坏过程中岩样颗粒脱落产生大量碎屑。

在 UCG-CCS 项目进行过程中,要综合考虑气化过程结束后,燃空区盖层的裂隙破坏程度以及封存的超临界 CO₂ 对烧变岩石的侵蚀和破坏作用,防止 CO₂ 沿着烧变裂隙方向逃逸,进而提升封存过程的安全性。

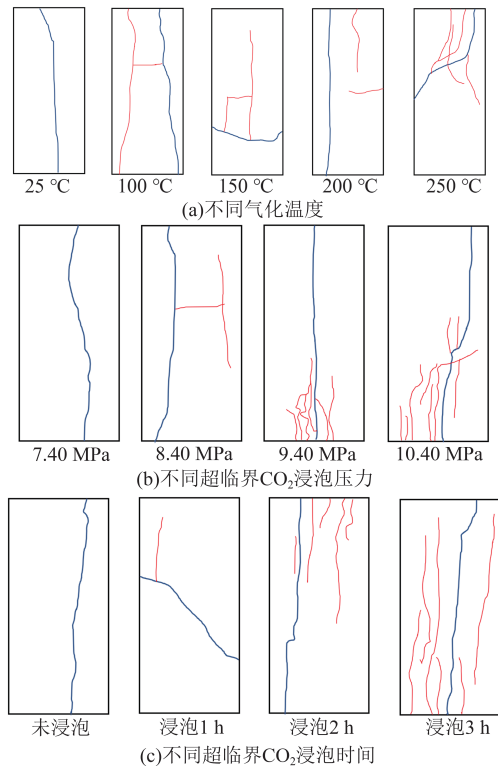


图 13 不同条件下页岩单轴压缩后裂隙形态模拟示意
Fig. 13 Simulation diagram of fracture morphology of shale after uniaxial compression under different conditions

2.5 讨论

为保证 CO₂ 处于超临界状态,温度需要达到 35 °C 以上,压力需要达到 7.38 MPa(近似为 7.40 MPa). 为保证试验安全且使 CO₂ 处于超临界态,本文试验压力设为 7.40,8.40,9.40,10.40 MPa,设计的压力变化相对较小.同时考虑到 CO₂ 封存过程中深部岩层温度较为稳定,因此在试验过程中未考虑超临界 CO₂ 温度变化.但是实际工程中气化高温将引起岩体热膨胀等物理变化甚至成分变化,同时超临界 CO₂ 高压作用后岩体的孔隙度和渗透率会发生变化,且存在 CO₂ 与周围环境发生矿化反应的可能.因此,温度和压力的变化对超临界 CO₂ 浸泡作用下烧变页岩的力学性质有影响,需要进一步深入研究温度变化与高压差状态下烧变页岩力学响应特征.另外 SEM 与 XRD 结果表明,岩体力学性质变化主要是由于高温与超临界 CO₂ 引起的页岩的物理性质变化.后续需要进一步探究烧变页岩经超临界 CO₂ 浸泡后孔隙

结构及形态等微观结构的变化,进而揭示不同温度、压力条件下页岩微观结构的演化机制;同时分析不同温度、压力条件下烧变页岩经超临界 CO₂ 浸泡后矿物成分的变化规律,进一步深入探索页岩微观结构变化与超临界 CO₂ 的作用机理。

3 结论与展望

3.1 结论

1) 经过气化高温烘烤后,烧变岩样质量减轻,且随着温度的升高,质量减轻幅度增大,岩石抗拉强度和单轴抗压强度逐渐降低,大体呈阶梯状下降.在经过超临界 CO₂ 饱和和高压浸泡后,燃空区烧变页岩试件质量增加,相同气化温度下抗拉强度和单轴抗压强度显著降低。

2) 超临界 CO₂ 弱化了页岩的抗拉强度、抗压强度和弹性模量,超临界 CO₂ 浸泡后,试件的抗拉强度和单轴抗压强度显著降低;随着浸泡压力提升,盖岩的抗拉强度逐渐降低,但降低幅度逐渐减小,抗压强度、弹性模量逐渐减小;随着浸泡时间的提升,盖层岩样的抗拉、抗压强度逐渐降低;

3) 温度效应及超临界 CO₂ 封存扰动除了会影响燃空区烧变岩石的力学强度特性,也会影响其破坏特征,进而影响破坏过程中裂隙的产生和扩张.随着气化温度、超临界 CO₂ 浸泡压力 and 时间的提升,烧变岩样的原生裂隙逐渐扩展,次生裂隙逐渐增多。

4) 根据试验结果拟合得到了烧变页岩抗拉强度-温度、抗拉强度-浸泡压力、抗拉强度-浸泡时间、抗压强度-温度、抗压强度-浸泡压力和抗压强度-浸泡时间的拟合函数.研究成果可为煤炭地下气化耦合 CO₂ 封存工业性试验设计提供基础。

3.2 展望

煤炭地下气化耦合 CO₂ 封存(UCG-CCS)是煤炭行业实现碳达峰、碳中和的重要手段. UCG-CCS 实现 CO₂ 长效安全封存的关键是保证上覆盖层长期稳定,而煤炭地下气化高温与超临界 CO₂ 作用引起盖层岩石力学性质变化,极易诱发盖层失稳并在盖层中生成 CO₂ 的泄漏通道,因此探究超临界 CO₂ 对气化燃空区盖层烧变页岩力学性质影响规律具有重要意义.在未来煤炭地下气化耦合 CO₂ 封存工业性试验中,可以帮助工程师评估盖层泄露风险,进而为 UCG-CCS 地质选址提供参考.目前国内外众多学者对超临界 CO₂ 作用岩石力学性质变化展开研究,然而现未有煤炭地下气化高温后在超临界 CO₂ 扰动下页岩力学性

质变化的研究. 本文根据室内力学试验探究了页岩在高温与超临界 CO_2 作用下的物理力学特性, 对于 UCG-CCS 的泄露风险评估具有重要意义. 后续可开展系列的 SEM 和 XRD 试验, 从微观角度进一步揭示不同温度、压力条件下页岩结构演化机制, 进一步深入探索页岩微观结构变形与超临界 CO_2 的作用机理.

参考文献:

- [1] 葛世荣, 刘淑琴, 樊静丽, 等. 低碳化现代煤基能源开发关键技术体系[J]. 煤炭学报, 2024, 49(7): 2949-2972.
GE Shirong, LIU Shuqin, FAN Jingli, et al. Key technologies for low-carbon modern coal-based energy [J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(7): 2949-2972.
- [2] 谢和平, 鞠 杨, 高明忠, 等. 煤炭深部原位流态化开采的理论与技术体系[J]. 煤炭学报, 2018, 43(5): 1210-1219.
XIE Heiping, JU Yang, GAO Mingzhong, et al. Theories and technologies for in-situ fluidized mining of deep underground coal resources [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(5): 1210-1219.
- [3] 张 朋, 王作棠, 黄温钢, 等. 窄条带气化地质条件云模型的构建与应用[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(6): 1231-1238.
ZHANG Peng, WANG Zuotang, HUANG Wengang, et al. Construction and application of cloud model of geological conditions of underground coal gasification with narrow strip [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(6): 1231-1238.
- [4] 郭广礼, 李怀展, 查剑锋, 等. 无井式煤炭地下气化岩层及地表移动与控制[J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2539-2546.
GUO Guangli, LI Huaizhan, ZHA Jianfeng, et al. Movement and control of strata and surface during UCG without shaft [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2539-2546.
- [5] 蒋秀明, 吴财芳. 煤炭地下气化地质可行性和工艺适用性研究现状与进展[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(5): 1-12.
JIANG Xiuming, WU Caifang. A review: Geological feasibility and technological applicability of underground coal gasification [J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(5): 1-12.
- [6] 王 凡, 徐 冰, 谌伦建, 等. UCG 污染物苯酚在 PRB 中穿透行为及数值反演[J]. 洁净煤技术, 2024, 30(5): 155-161.
WANG Fan, XU Bing, CHEN Lunjian, et al. Break through behavior and numerical inversion of UCG organic pollutant phenol through PRB [J]. Clean Coal Technology, 2024, 30(5): 155-161.
- [7] 谌伦建, 徐 冰, 叶云娜, 等. 煤炭地下气化过程中有机污染物的形成[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(1): 150-156.
CHEN Lunjian, XU Bing, YE Yunna, et al. Formation of organic contaminants during underground coal gasification [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(1): 150-156.
- [8] CHEN F, LI H Z, DAI G L, et al. The new way for realizing carbon neutrality of coal and analysis of bearing characteristics and stability of coal pillar in production [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 415: 137766.
- [9] JIANG L L, CHEN S S, CHEN Y P, et al. Underground coal gasification modelling in deep coal seams and its implications to carbon storage in a climate-conscious world [J]. Fuel, 2023, 332: 126016.
- [10] 冯国瑞, 白锦文, 曹光明, 等. 残采区关键域充填储碳空间重构的科学内涵[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(3): 432-445.
FENG Guorui, BAI Jinwen, CAO Guangming, et al. Scientific connotation on the key location backfilling for carbon storage space reconstruction in the residual mining area [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52(3): 432-445.
- [11] 李怀展, 唐 超, 郭广礼, 等. 地下气化场地地基稳定性评价及燃空区封存超临界二氧化碳初探[J]. 采矿与安全工程学报, 2024, 41(2): 326-340.
LI Huaizhan, TANG Chao, GUO Guangli, et al. Stability evaluation of underground gasification site foundation and preliminary investigation on supercritical CO_2 storage in combustion space [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2024, 41(2): 326-340.
- [12] 徐友友. 煤炭地下气化耦合二氧化碳封存围岩变形与裂隙发育模拟研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
XU Youyou. Surrounding rock deformation and fracture developing numerical simulation study for underground coal gasification coupling carbon dioxide storage [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [13] 桑树勋, 华凯敏, 屠坤坤, 等. 生物质能高效利用与二氧化碳捕集利用封存耦合技术体系(BECCS)的发展方向与研究进展[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(5): 845-867.

- SANG Shuxun, HUA Kaimin, TU Kunkun, et al. The development direction and research progress of the coupled technology system of biomass energy efficient utilization and carbon dioxide capture, utilization and storage (BECCS) [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2023, 52(5): 845-867.
- [14] 李龙龙, 方惠军, 葛腾泽, 等. 煤炭地下气腔 CO₂ 埋存的研究进展及发展趋势[J]. *力学学报*, 2023, 55(3): 732-743.
- LI Longlong, FANG Huijun, GE Tengze, et al. CO₂ sequestration in UCG cavities; Research progress and future development trends [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2023, 55(3): 732-743.
- [15] 秦勇, 易同生, 周永锋, 等. 煤炭地下气态碳减排技术研究进展与未来探索[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(1): 495-512.
- QIN Yong, YI Tongsheng, ZHOU Yongfeng, et al. Research progress and future study of carbon emission reduction for UCG [J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(1): 495-512.
- [16] 高帅, 魏宁, 李小春, 等. 层状非均质对 CO₂ 在盖层中迁移泄漏规律的影响[J]. *岩土力学*, 2017, 38(11): 3287-3294.
- GAO Shuai, WEI Ning, LI Xiaochun, et al. Effect of layered heterogeneity on CO₂ migration and leakage mechanism in the cap rock [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(11): 3287-3294.
- [17] 盛丹娜, 王惠民, 盛金昌, 等. CO₂ 地质封存中随机裂隙网络走向对盖层密封性影响[J/OL]. *地球科学*, 1-18 (2023-12-07) [2024-07-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20231206.1302.002.html>.
- SHENG Danna, WANG Huimin, SHENG Jinchang, et al. Effect of random fracture network orientations on sealing performance of caprock in CO₂ geological sequestration [J/OL]. *Earth Science*, 1-18(2023-12-07) [2024-07-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20231206.1302.002.html>.
- [18] 李颖, 李茂茂, 李海涛, 等. 纳米 SiO₂ 强化 CO₂ 地质封存页岩盖层封堵能力机制试验[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2024, 48(2): 92-98.
- LI Ying, LI Maomao, LI Haitao, et al. Experiment on nano-SiO₂ enhancing sealing capacity of shale caprocks for CO₂ geological storage [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2024, 48(2): 92-98.
- [19] 刘苗苗, 孟令东, 王海学, 等. 二氧化碳地质封存中盖层力学完整性数值模拟研究综述[J]. *特种油气藏*, 2020, 27(2): 8-15.
- LIU Miaomiao, MENG Lingdong, WANG Haixue, et al. Review on mechanical integrity simulation of caprock in the geological storage of CO₂ [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2020, 27(2): 8-15.
- [20] AN Q Y, ZHANG Q S, ZHANG X, et al. Influence of mineralogy on rock mechanical behaviour considering dynamic alteration damage caused by SC-CO₂: A comparative study on different rock types [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2022, 55(6): 3129-3151.
- [21] AN Q Y, ZHANG Q S, LI X H, et al. Experimental study on alteration kinetics for predicting rock mechanics damage caused by SC-CO₂ [J]. *Energy*, 2022, 259: 125026.
- [22] 彭新品, 刘孟骐, 夏祥斌, 等. 储层砂岩-盐水-超临界 CO₂ 体系相互作用[J]. *中国矿业大学学报*, 2013, 42(2): 302-307.
- PENG Xinjing, LIU Mengqi, XIA Xiangbin, et al. Interaction of rock-brine-supercritical CO₂ in sandstone reservoir [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2013, 42(2): 302-307.
- [23] 薛卉, 舒彪, 陈君洁, 等. 高温高压下超临界二氧化碳作用对花岗岩力学性质影响的试验研究[J]. *岩土力学*, 2022, 43(2): 377-384.
- XUE Hui, SHU Biao, CHEN Junjie, et al. Mechanical properties of granite after reaction with ScCO₂ at high temperature and high pressure [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(2): 377-384.
- [24] 张小强, 王文伟, 姜玉龙, 等. 超临界 CO₂ 作用下煤岩组合体力学特性损伤及裂隙演化规律[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(11): 4049-4064.
- ZHANG Xiaoqiang, WANG Wenwei, JIANG Yulong, et al. Mechanical properties and fracture damage law of coal-rock composition under the action of supercritical CO₂ [J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(11): 4049-4064.
- [25] HE W, LIAN H J, LIANG W G, et al. Experimental study of supercritical CO₂ fracturing across coal-rock interfaces [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2023, 56(1): 57-68.
- [26] 韦婕, 陈跃都, 梁卫国. 超临界 CO₂ 作用下煤体结构面剪切硬化特征与本构模型[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(12): 4487-4498.
- WEI Jie, CHEN Yuedu, LIANG Weigu. Shear hardening characteristics and constitutive model of coal structural plane after supercritical CO₂ soaking [J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(12):

- 4487-4498.
- [27] WANG K, TAYLOR K G, MA L. CO₂-induced micro-mechanical alterations of mudstone caprock: Examples from the mercia mudstone group, East Irish Sea Basin [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2024, 135:104131.
- [28] 苟波, 王琨, 李骁, 等. 超临界 CO₂ 对致密碳酸盐岩力学特性影响[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2024, 46(2): 65-76.
GOU Bo, WANG Kun, LI Xiao, et al. Effect of supercritical CO₂ on mechanical properties of tight carbonate rocks[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2024, 46(2): 65-76.
- [29] ZHANG X F, ZHANG F S, SONG X H, et al. Laboratory investigation on injection of supercritical CO₂ into basalt: Implication for CO₂ sequestration via mineralization [J]. Geoshanghai 2024 International Conference, 2024, 1331:012021.
- [30] XU L Y, YUE Y Z, CHEN Y P, et al. Effect of supercritical CO₂ on limestone's pore structure based on NMR and SEM [J]. Petroleum Science and Technology, 2023, 41(15): 1510-1525.
- [31] 李宁, 金之钧, 张士诚, 等. 水/超临界二氧化碳-岩石作用下的页岩微观力学特性[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(4): 872-882.
LI Ning, JIN Zhijun, ZHANG Shicheng, et al. Micro-mechanical properties of shale due to water/supercritical carbon dioxide-rock interaction [J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(4): 872-882.
- [32] 李一波, 陈耀旺, 赵金洲, 等. 超临界二氧化碳与页岩相互作用机制[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(4): 1180-1194.
LI Yibo, CHEN Yaowang, ZHAO Jinzhou, et al. Interaction mechanism between supercritical carbon dioxide and shale [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(4): 1180-1194.
- [33] 田时锋, 周军平, 鲜学福, 等. 超临界 CO₂ 作用下页岩抗拉强度的变化规律[J]. 煤炭学报, 2023, 48(7): 2728-2736.
TIAN Shifeng, ZHOU Junping, XIAN Xuefu, et al. Effect of supercritical CO₂ on alteration of tensile strength of shale[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(7): 2728-2736.
- [34] 汤积仁, 卢义玉, 陈钰婷, 等. 超临界 CO₂ 作用下页岩力学特性损伤的试验研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(3): 797-802.
TANG Jiren, LU Yiyu, CHEN Yuting, et al. Experimental study of damage of shale mechanical properties under supercritical CO₂ [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(3): 797-802.
- [35] 崔振东, 乔群, 刘大安, 等. CO₂ 地质封存盖层岩石物性封闭能力评价[J]. 工程地质学报, 2017, 25(增 1): 428-433.
CUI Zhendong, QIAO Qun, LIU Da'an, et al. Evaluation on the physical sealing capacity of caprocks in CO₂ sequestration sites [J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(Sup 1): 428-433.
- [36] 杨征. 页岩的物理力学各向异性及拉伸剪切破裂特征研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
YANG Zheng. Study on physical and mechanical characteristics in anisotropy tension-shear state [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.

(责任编辑 沈春妮 全 腾)