

# 超临界 CO<sub>2</sub> 作用下煤岩组合体力学特性损伤及 裂隙演化规律

张小强<sup>1</sup>, 王文伟<sup>1</sup>, 姜玉龙<sup>1</sup>, 王 开<sup>1</sup>, 闫建兵<sup>2</sup>, 岳少飞<sup>2</sup>, 蔚默然<sup>1</sup>

(1. 太原理工大学 矿业工程学院, 山西 太原 030024; 2. 太原理工大学 原位改性采矿教育部重点实验室, 山西 太原 030024)

**摘 要:** 将 CO<sub>2</sub> 注入到深部不可采煤层是实现 CO<sub>2</sub> 地质封存的有效途径之一, 但 CO<sub>2</sub> 在高压、高温作用下会处于超临界状态, 为了探究超临界 CO<sub>2</sub> 作用对煤系储层结构的影响, 基于自主研发的超临界 CO<sub>2</sub> 浸泡实验系统, 结合声发射测试系统及 RFPA<sup>3D</sup> 数值模拟, 研究了 3 种煤层厚度和 3 种顶底板岩性的“岩-煤-岩”(RCR) 组合试件在超临界 CO<sub>2</sub> 作用下的力学损伤特性及其裂隙扩展演化规律。研究结果表明: ① 超临界 CO<sub>2</sub> 作用后, 随煤厚增加 RCR 组合体抗压强度劣化幅度逐渐增大, 弹性模量劣化幅度逐渐降低, 而当岩煤强度比不同时, 抗压强度和弹性模量劣化幅度基本一致, 未呈现较大差异; ② 超临界 CO<sub>2</sub> 作用会促进煤体塑性破坏, 加剧 RCR 组合体由拉伸劈裂破坏向剪切塑性破坏转变的趋势, RCR 组合体塑性破坏程度与煤厚和岩煤强度比均成正相关关系; ③ 超临界 CO<sub>2</sub> 浸泡作用促使 RCR 组合体更早进入弹性变形阶段, 且经历更为短暂的弹性变形后发生失稳破坏, 煤厚越大影响越大, 而岩煤强度比影响较小; ④ RCR 组合体失稳态势与煤厚成正比、与岩煤强度比成反比, 破坏时动力显现强度与煤厚成反比, 与岩煤强度比成正比; ⑤ RCR 组合体总能量、耗散能、弹性能、盈余能随煤体厚度增加而逐渐降低, 随岩煤强度比的增大而逐渐增大, 超临界 CO<sub>2</sub> 作用会使 RCR 组合体试件弹性能占比降低, 耗散能占比升高, 盈余能占比降低。综合上述研究成果可知, 煤层越厚的地层越容易发生失稳, 顶底板岩层强度越高的地层越不容易发生失稳, 地层失稳破坏时动力显现强度与煤厚成反比、与岩煤强度比成正比。故在满足 CO<sub>2</sub> 注入封存量前提的一定区域地层内, 应选择顶底板岩层强度较高、煤层厚度较薄的区域地层封存 CO<sub>2</sub> 安全性更高。该研究成果可为 CO<sub>2</sub> 注入到深部不可采煤层进行地质封存的安全性提供一定的理论借鉴。

**关键词:** 超临界 CO<sub>2</sub>; 煤岩组合体; 力学损伤; 能量演化; 失稳破坏; 裂隙扩展

**中图分类号:** TD313 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2023)11-4049-16

## Mechanical properties and fracture damage law of coal-rock composition under the action of supercritical CO<sub>2</sub>

ZHANG Xiaoqiang<sup>1</sup>, WANG Wenwei<sup>1</sup>, JIANG Yulong<sup>1</sup>, WANG Kai<sup>1</sup>, YAN Jianbing<sup>2</sup>, YUE Shaofei<sup>2</sup>, YU Moran<sup>1</sup>

(1. College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Key Laboratory of In-situ Property-improving Mining of Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

收稿日期: 2023-02-04 修回日期: 2023-04-03 责任编辑: 钱小静 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.0118

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52104097, 51974194); 山西省基础研究计划资助项目 (20210302124352)

作者简介: 张小强 (1984—), 男, 内蒙古巴彦淖尔人, 副教授, 博士。E-mail: 13835194355@163.com

通讯作者: 姜玉龙 (1990—), 男, 吉林松原人, 讲师, 博士。E-mail: 13485368423@163.com

引用格式: 张小强, 王文伟, 姜玉龙, 等. 超临界 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(11): 4049-4064.



移动阅读

**Abstract:** The injection of CO<sub>2</sub> into deep unrecoverable coal seams is one of the effective ways to achieve CO<sub>2</sub> geological sequestration, but CO<sub>2</sub> will be in a supercritical state under the action of high pressure and high temperature. In order to investigate the effect of supercritical CO<sub>2</sub> action on coal reservoir structure, based on the self-developed supercritical CO<sub>2</sub> immersion experimental system, combined with acoustic emission test system and RFPA<sup>3D</sup> numerical simulation, we studied the three coal seam thicknesses and three top and bottom lithologies of the mechanical damage characteristics and the fracture extension evolution of “Rock-Coal-Rock” (RCR) composite specimens under the action of supercritical CO<sub>2</sub> were investigated. The results show that: ① After the action of supercritical CO<sub>2</sub>, the degradation of compressive strength and elastic modulus of the RCR composite gradually increases and decreases with the increase of coal thickness, while the degradation of compressive strength and elastic modulus are basically the same when the strength ratios of rock and coal are different and do not show large differences; ② The action of supercritical CO<sub>2</sub> will promote the plastic damage of the coal body and intensify the transformation of the RCR composite from tensile splitting damage to shear plastic damage, and the degree of plastic damage of RCR assemblage is positively correlated with both coal thickness and rock-to-coal strength ratio; ③ The supercritical CO<sub>2</sub> immersion promoted the RCR assemblage to enter the elastic deformation stage earlier, and the destabilization damage occurred after a more brief elastic deformation, the greater the coal thickness, the greater the influence, while the rock-to-coal strength ratio has less influence; ④ The instability potential of RCR assemblage is proportional to coal thickness and inversely proportional to rock-coal strength ratio, and the power intensity of damage is inversely proportional to coal thickness and proportional to rock-coal strength ratio; ⑤ The total energy, dissipative energy, elastic energy and surplus energy of RCR assemblage gradually decrease with the increase of coal thickness and gradually increase with the increase of rock-coal strength ratio, and the supercritical CO<sub>2</sub> effect will cause the elastic energy ratio of RCR assemblage specimens to decrease, the dissipative energy ratio to increase and the surplus energy ratio to decrease. Combining the above research results shows that the thicker the coal seam is, the more likely it is to be destabilized, and the higher the strength of the top and bottom rock layer is, the less likely it is to be destabilized, and the dynamic strength of the seam destabilization is inversely proportional to the coal thickness and positively proportional to the rock-to-coal strength ratio. Therefore, in a certain area of stratum that meets the premise of CO<sub>2</sub> injection and storage, the area of stratum with higher top and bottom rock strength and thinner coal seam thickness should be selected to store CO<sub>2</sub> with higher safety. The research results can provide some theoretical reference for the safety of geological storage of CO<sub>2</sub> injected into deep unmineable coal seams.

**Key words:** supercritical CO<sub>2</sub>; coal-rock composition; mechanical damage; energy evolution; instability destruction; crack extension

温室气体的过量排放是导致全球变暖的主要原因,而 CO<sub>2</sub> 则是其罪魁祸首之一,寻求能有效控制并减少空气中 CO<sub>2</sub> 的方法是当前国际社会的聚焦点。CO<sub>2</sub> 捕集与封存技术作为减少大气中 CO<sub>2</sub> 的重要方法,被认为是当前及未来阶段处置 CO<sub>2</sub> 的安全、有效手段<sup>[1-3]</sup>。CO<sub>2</sub> 注入深部煤层既可实现对甲烷的驱替,又起到对 CO<sub>2</sub> 地质封存的目的,拥有开采能源和保护环境的双重效益<sup>[4-5]</sup>。但值得注意的是,随着储层深度的增加,压力与温度不断升高,当开采深度达到 1 500 m 时(温度  $T > 31.1$  °C,压力  $P > 7.38$  MPa),CO<sub>2</sub> 注入过程中由气态逐渐过渡到超临界状态。已有研究表明:随着 CO<sub>2</sub> 的不断注入,煤体力学特性大幅弱化,容易引发煤岩破裂、盖层破坏,甚至诱发断层滑移,进而导致 CO<sub>2</sub> 泄漏,造成封存失败且引起一系列伴生地质灾害<sup>[6]</sup>。因此,研究不同煤岩组合体在超临界 CO<sub>2</sub>(简称

“ScCO<sub>2</sub>”)作用下煤岩组合体力学性能的劣化损伤、裂隙演化扩展规律、失稳破坏特征和能量演化规律对 ScCO<sub>2</sub> 地质封存具有重要意义。

近年来,众多学者通过室内试验、数值模拟等研究手段针对 ScCO<sub>2</sub> 作用后煤体的损伤特性展开较为详细的研究。张倍宁<sup>[7]</sup>研究了不同变质程度煤体在 ScCO<sub>2</sub> 作用后力学特性的损伤规律。张俊超<sup>[8]</sup>研究了不同注气压力下 ScCO<sub>2</sub> 对煤体力学性能的劣化程度,发现随着注气压力的升高煤体的力学强度逐渐降低。何立国等<sup>[9]</sup>发现煤体在 ScCO<sub>2</sub> 作用下,不同的浸泡时间和温度会改变其破坏形式和失稳类型。杨磊等<sup>[10]</sup>研究了不同强度比组合煤岩的力学响应和能量演化规律,发现组合煤岩的力学强度和应变能密度与煤岩强度比有着密切关系。李波等<sup>[11]</sup>研究了 ScCO<sub>2</sub> 作用下煤的孔隙结构变化规律。王磊、孙可明等<sup>[12-13]</sup>研究

了 ScCO<sub>2</sub> 作用下煤岩体压裂时的裂缝扩展规律, 发现其对起裂压力弱化较大且裂隙扩展更复杂。樊玉峰、肖晓春等<sup>[14-15]</sup>研究了煤高度对组合煤岩力学性质、冲击倾向性和能量耗散特征的影响, 发现岩石或煤的高度和弹性模量对组合煤岩力学性质和能量累积-耗散情况有重要影响。李回贵等<sup>[16]</sup>研究了不同煤厚煤岩体破裂过程的声发射特征, 发现煤厚与声发射累积计数呈正相关关系。左建平、鞠文君等<sup>[17-18]</sup>对组合体的冲击倾向性进行了研究, 指出煤岩组合体冲击倾向性指数大于纯煤样。还有一些学者<sup>[19-22]</sup>研究了真三轴下不同倾角组合体损伤失稳过程和界面效应, 不同加载速率下煤岩体的失稳过程。付斌等<sup>[23]</sup>通过 RFPA<sup>2D</sup> 数值模拟对煤岩体冲击倾向性进行了研究, 分析了煤岩高度比和组合体倾角对冲击能量指数的影响。郭伟耀等<sup>[24]</sup>采用 PFC<sup>2D</sup> 颗粒流软件开展了不同煤岩强度比、高度比的煤岩组合体压缩试验, 分析了其对组合体冲击倾向性、破坏形态及极限抗压强度的影响。

已有研究成果对揭示 CO<sub>2</sub> 注入后煤岩体的力学损伤特性规律具有重要的工程实际意义, 但值得注意的是, CO<sub>2</sub> 地质封存过程中, 随着时间的迁移, CO<sub>2</sub> 不断向顶、底板岩体运移, 因此考虑 CO<sub>2</sub> 地质封存对地层的影响时, 不能单一考虑其对煤体或岩体的力学弱化, 而是将顶板岩体-煤体-底板岩体看成一个整体结构。目前, 已有的研究主要分为 2 个方面: 一方面针对单一煤体或岩体进行 ScCO<sub>2</sub> 浸泡实验, 探究其损伤演化特性; 另一方面, 研究未进行 ScCO<sub>2</sub> 浸泡的煤岩组合体试件的力学特性。然而针对岩体-煤体-岩体 (RCR) 组合体 ScCO<sub>2</sub> 浸泡条件下力学损伤特性及裂隙演化扩展规律的研究较少。为此, 笔者通过室内试验与数值模拟, 研究不同 RCR 组合体在 ScCO<sub>2</sub> 浸泡前后力学性能的劣化程度与能量演化规律, 并结合声发射系统对试件失稳破坏时的形态和裂隙扩展规律进行研究。

## 1 CO<sub>2</sub> 地质封存原理及前景

CO<sub>2</sub> 地质封存作为一种典型的负碳排放技术, 将 CO<sub>2</sub> 注入到油气田、咸水层或不可采煤层等封闭构造中可实现长时间或永久性的地质封存。煤炭是 CO<sub>2</sub> 的天然吸附剂, 吸附能力约为 CH<sub>4</sub> 的 2 倍<sup>[25-26]</sup>, 据统计不可采煤层 CO<sub>2</sub> 地质封存量可达 120×10<sup>8</sup> t<sup>[27]</sup>, 通过 CO<sub>2</sub> 的竞争吸附不仅可实现其地质封存, 还能实现煤层气的高效开采。而当煤层埋藏深度达 1 500 m 时, 在高温-高压作用下 CO<sub>2</sub> 注入煤层后将处于超临界状态, 储层结构以“岩-煤-岩”组合体结构型为主, 如图 1 所示。

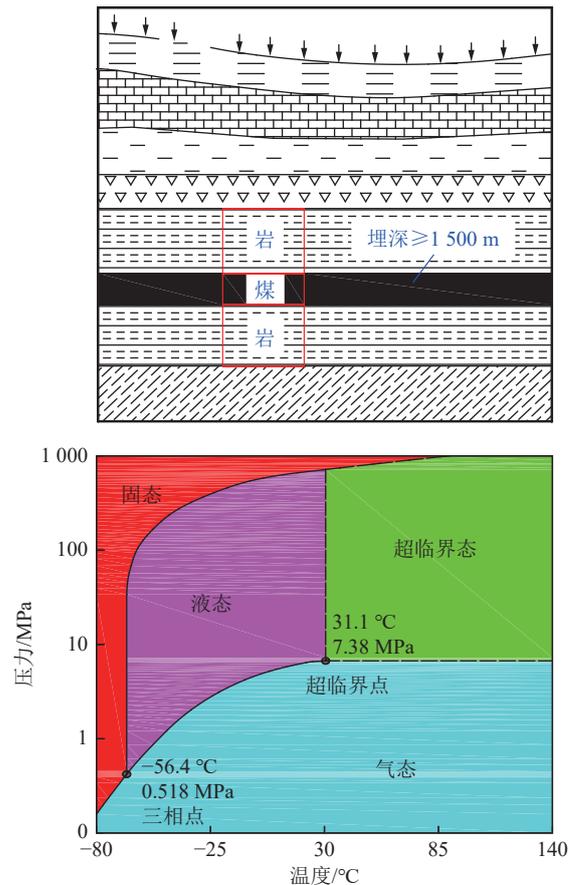


图 1 组合体结构及 CO<sub>2</sub> 相态

Fig.1 Composition structure and CO<sub>2</sub> phase diagram

已有研究表明<sup>[7, 28]</sup>, ScCO<sub>2</sub> 浸泡条件下, 煤体 0~5 d 内强度劣化损伤较大; 而岩体在 30 d 以后才逐渐发生损伤, 一般在 60 d 时达到最大。故 CO<sub>2</sub> 注入到深不可采煤层中, 可将 ScCO<sub>2</sub> 对“岩-煤-岩”组合结构体的损伤作用划分为 3 个阶段研究: ① 0~7 d, 煤体损伤阶段; ② 8~60 d, 煤体损伤后及岩体损伤阶段; ③ 60 d 后, 煤岩体损伤后阶段。本文重点针对第 1 阶段展开研究, 故将试件进行 ScCO<sub>2</sub> 浸泡时间定为 7 d。

## 2 RCR 组合体单轴压缩试验方案

### 2.1 RCR 组合体试件加工分组

试验煤、岩样品均取自同一矿区, 煤样为沁水煤田无烟煤, 岩样为对应煤系顶底板岩层 (泥岩、中粗砂岩和石灰岩)。取样时钻取方向垂直煤岩层理, 采用切割机将煤岩样品制备成直径为 50 mm, 高度分别为 10、20、30 mm 的煤样和直径为 50 mm, 高度分别为 35、40、45 mm 的岩石样品。将制作好的单元试件端面打磨, 使其平整度在 0.05 mm 以内, 断面垂直度小于 0.25°。RCR 组合体直径为 50 mm, 高度为 100 mm 的标准圆柱试样。为减小试验误差, 对制作好的所有

RCR 组合体试件进行纵波波速测定,将同一类型 RCR 组合体试件波速离散较大的值予以剔除。

将试件依次编号,形式如 S10-Y,其中,S 代表砂岩 (SH 代表石灰岩,N 代表泥岩),10 表示煤层厚度为 10 mm,Y 表示进行了 ScCO<sub>2</sub> 浸泡 (N 则为未进行 ScCO<sub>2</sub> 浸泡),RCR 组合体标准试样如图 2 所示。



图 2 RCR 组合体标准试样

Fig.2 Standard sample of coal-rock combined specimen

分组方案为:

A: 砂岩-煤-砂岩 (煤厚分别为 10、20、30 mm)

3 组,每组 3 个;

B: 泥岩/石灰岩-煤-泥岩/石灰岩 2 组,每组 3 个;

C: 砂岩-煤-砂岩 (煤厚分别为 10、20、30 mm)

3 组,每组 3 个;

D: 泥岩/石灰岩-煤-泥岩/石灰岩 2 组,每组

3 个。

试验分组方案见表 1。

表 1 RCR 组合体试验分组  
Table 1 RCR assembly test group

分组	试件编号	数量/个	浸泡时间/d
A	S10-N	3	0
	S20-N		
	S30-N		
B	N20-N	3	0
	SH20-N		
C	S10-Y	3	7
	S20-Y		
	S30-Y		
D	N20-Y	3	7
	SH20-Y		

## 2.2 试验仪器

试验采用太原理工大学自主研制的 ScCO<sub>2</sub> 浸泡试验系统,如图 3 所示。试验测试系统主要包括单轴加载系统及声发射监测系统,如图 4 所示。

试验系统简介如下:

(1) 加载系统为 TSE105D 型微机控制电液伺服岩

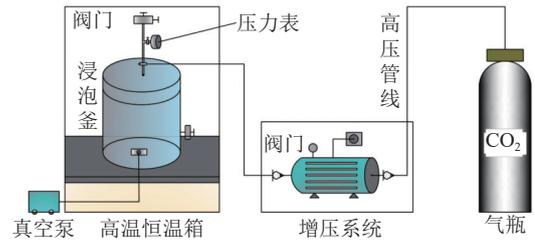


图 3 ScCO<sub>2</sub> 浸泡系统

Fig.3 Supercritical CO<sub>2</sub> immersion system

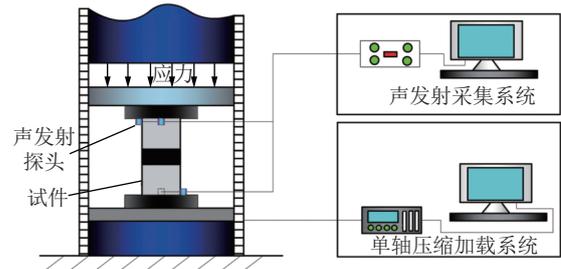


图 4 试验系统

Fig.4 Experimental system

石试验系统,实验时采用位移加载控制,加载速率为 1.2 mm/min。

(2) 声发射监测系统采用北京声华科技生产的 SWAE4 型声发射,对 RCR 组合体损伤失稳全过程进行实时监测,试验时采用 4 个 SR105M 型传感器采集声发射信号,声发射探头工作频率设为 60~400 kHz。为了减少试件表面弹性波的损失,使声发射探头和试件更好的接触,在探头与试件接触处涂抹凡士林并用胶带固定。每个传感器均配置 PAI 型号的前置放大器,试验中声发射测试系统的阈值值设为 45 dB,主放设为 40 dB,采样频率设为 10 mHz。

## 2.3 试验步骤

(1) 将 C、D 两组试件置于 60 ℃ 的恒温箱中干燥 24 h,取出后放入 CO<sub>2</sub> 高压浸泡釜中,启动真空泵,将浸泡釜抽真空后并注入 CO<sub>2</sub>,通过增压泵将釜内增压至 8 MPa,然后将浸泡釜放入恒温箱,加热至 40 ℃,使 CO<sub>2</sub> 处于超临界状态,浸泡 7 d。

(2) 浸泡结束取出试件后用酒精擦拭试件表面并用保鲜膜包裹,然后逐个开展单轴压缩试验,并通过声发射对试件进行实时监测。

(3) 对破坏后的 RCR 组合体试件拍照,分析其裂纹扩展规律。

## 3 RCR 组合体试件力学损伤特性

### 3.1 抗压强度和弹性模量演化规律

室内试验和模拟所得力学参数见表 2,单轴抗压强度、弹性模量随煤厚和岩煤强度比变化的曲线如

表 2 RCR 组合体单轴压缩试验结果  
Table 2 RCR composite uniaxial compression test results

编号 (强度比)	实测值				模拟值	
	抗压强度/MPa	抗压强度平均值/MPa	弹性模量/GPa	弹性模量平均值/GPa	抗压强度/MPa	弹性模量/GPa
S10-N-1(3 : 1)	20.654		3.001			
S10-N-2(3 : 1)	22.375	21.32	3.311	3.12	22.05	3.21
S10-N-3(3 : 1)	23.128		3.054			
S20-N-1(3 : 1)	19.331		2.287			
S20-N-2(3 : 1)	21.178	20.05	2.601	2.41	21.05	2.51
S20-N-3(3 : 1)	19.636		2.327			
S30-N-1(3 : 1)	14.297		1.540			
S30-N-2(3 : 1)	17.114	15.61	1.734	1.61	16.14	1.71
S30-N-3(3 : 1)	15.411		1.574			
N20-N-1(1 : 1)	14.013		0.785			
N20-N-2(1 : 1)	11.347	11.36	0.892	0.82	11.95	0.91
N20-N-3(1 : 1)	9.709		0.786			
S20-N-1(3 : 1)	19.331		2.287			
S20-N-2(3 : 1)	21.178	20.05	2.601	2.41	21.05	2.51
S20-N-3(3 : 1)	19.636		2.327			
SH20-N-1(5 : 1)	27.038		3.436			
SH20-N-2(5 : 1)	31.269	28.85	3.613	3.45	29.54	3.62
SH20-N-3(5 : 1)	29.251		3.304			
S10-Y-1(3 : 1)	16.235		2.010			
S10-Y-2(3 : 1)	18.019	17.18	2.410	2.23	17.80	2.31
S10-Y-3(3 : 1)	17.310		2.270			
S20-Y-1(3 : 1)	13.935		1.754			
S20-Y-2(3 : 1)	14.491	14.79	1.933	1.81	15.39	1.93
S20-Y-3(3 : 1)	14.947		1.752			
S30-Y-1(3 : 1)	10.077		1.355			
S30-Y-2(3 : 1)	10.832	10.71	1.397	1.43	11.32	1.51
S30-Y-3(3 : 1)	11.684		1.532			
N20-Y-1(1 : 1)	7.294		0.587			
N20-Y-2(1 : 1)	8.331	8.69	0.673	0.62	9.14	0.70
N20-Y-3(1 : 1)	10.468		0.606			
S20-Y-1(3 : 1)	13.935		1.754			
S20-Y-2(3 : 1)	14.491	14.79	1.933	1.81	15.39	1.93
S20-Y-3(3 : 1)	14.947		1.752			
SH20-Y-1(5 : 1)	20.534		2.321			
SH20-Y-2(5 : 1)	24.147	22.13	2.688	2.45	23.61	2.59
SH20-Y-3(5 : 1)	21.717		2.353			

图 5 所示。

从图 5 可知, 数值模拟与室内试验结果吻合度较高。依据试验与模拟结果, 不同煤厚和岩煤强度对 RCR 组合体试件抗压强度及弹性模量的影响呈现如

下规律:

(1) 随煤厚增加, RCR 组合体试件抗压强度和弹性模量逐渐减小。煤体作为组合体试件薄弱载体, 其力学强度是组合体试件力学强度的主导因素, 故煤层

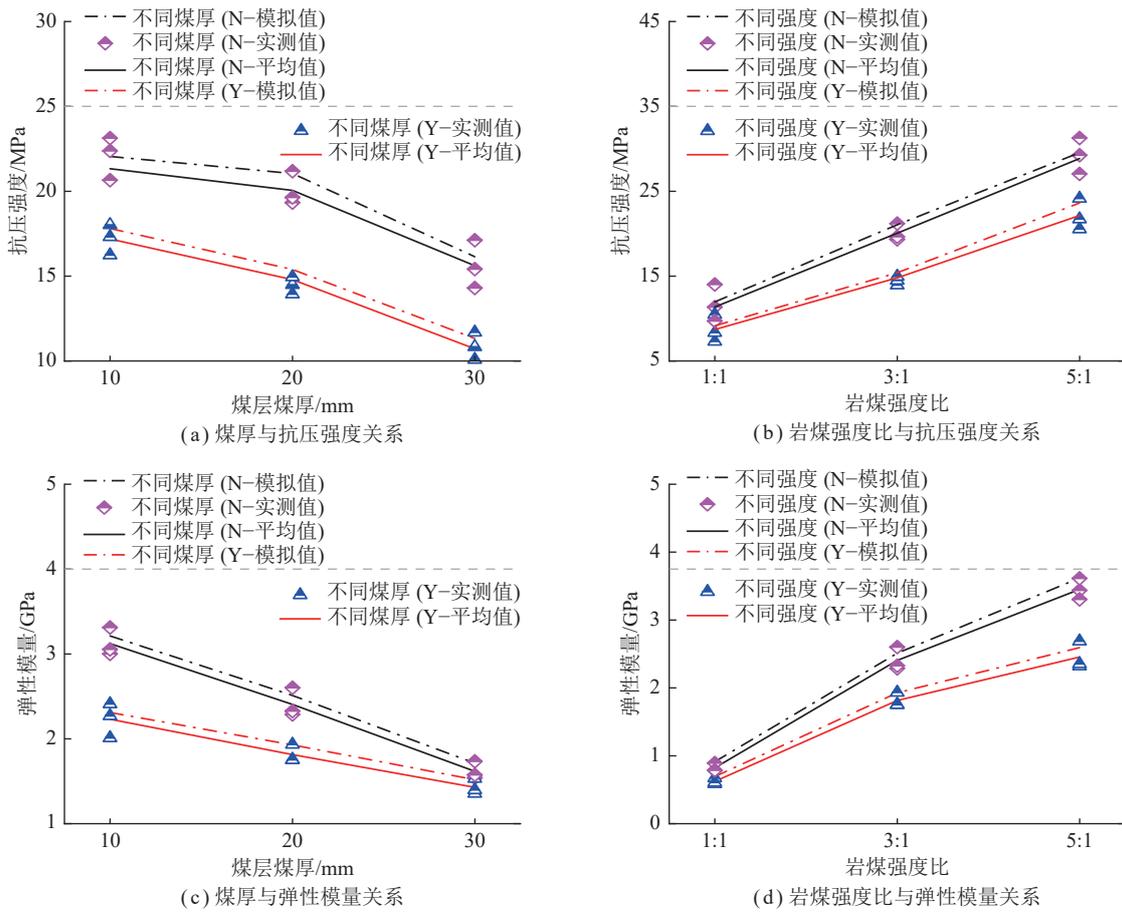


图5 RCR 组合体力学参数

Fig.5 Mechanical parameters of RCR combinations

越厚 RCR 组合体抗压强度和弹性模量越低。ScCO<sub>2</sub> 浸泡 7 d 后煤体力学强度大幅下降, 但岩体基本无较大变化, 故组合体试件整体趋势变化较小。

(2) 随岩煤强度比增加, RCR 组合体试件抗压强度和弹性模量逐渐增大, 当岩煤强度比从 1:1 增至 5:1 时, 其试件力学强度几乎呈线性增长, 其主要因是岩-煤-岩结构型的组合体相较于岩-煤和煤-岩更具稳定性, 且由于煤厚较小, 作为薄弱载体的煤层变形不会引起组合体试件整体的瞬间失稳, 故岩煤强度比对 RCR 组合体整体力学强度影响较大。

(3) ScCO<sub>2</sub> 未浸泡时, 当煤厚从 10 mm 增至 20 mm 时, RCR 组合体试件抗压强度下降较小, 但在煤体厚度增大至 30 mm 时, 其抗压强度显著下降, 出现这一现象的主因是煤厚为 10 mm 和 20 mm 时组合体发生整体破坏, 而煤厚为 30 mm 时破坏基本只发生在煤体中。值得注意的是, 当 RCR 组合体试件采用 ScCO<sub>2</sub> 浸泡后, 随煤厚增加, 其组合体试件抗压强度均显著下降, 其中煤体强度降幅明显, 当煤厚为 10 mm 时煤岩均发生破坏, 当煤厚为 20 mm 时岩体破坏较小, 此后, 随着煤厚的增加, RCR 组合体强度受煤厚影响

较大。

### 3.2 抗压强度和弹性模量劣化度

试件在水岩作用后力学参数降低程度称为劣化度<sup>[29]</sup>, 其在 ScCO<sub>2</sub> 作用后的力学参数降低程度也可用劣化度表征, 它可以在一定程度上反映试件经历 ScCO<sub>2</sub> 作用的损伤程度。其中,  $T_0$  为 ScCO<sub>2</sub> 作用前的力学参数;  $T_i$  为 ScCO<sub>2</sub> 作用后的力学参数, 则试件力学参数的劣化度  $S$  可表示为

$$S = \frac{T_0 - T_i}{T_0} \times 100\% \quad (1)$$

为进一步分析 ScCO<sub>2</sub> 浸泡对 RCR 组合体试件力学强度的影响, 根据图 5 与表 2 所得结果, 绘制 RCR 组合体力学特性劣化规律, 如图 6 所示。

由图 6 可知, S10、S20、S30 在 ScCO<sub>2</sub> 浸泡后其抗压强度和弹性模量劣化度分别为 19.42%、23.23%、31.39% 和 28.53%、24.90%、12.59%。煤作为一种非均匀分布封闭裂缝的特殊岩体, 经过 ScCO<sub>2</sub> 的浸泡, 其内部有机物会被萃取, 使原有封闭裂隙增多并延伸扩展, 新裂纹增加和旧裂纹扩展使得裂隙间接触面系数降低, 造成接触面滑移阻力降低, 煤体表面能开始

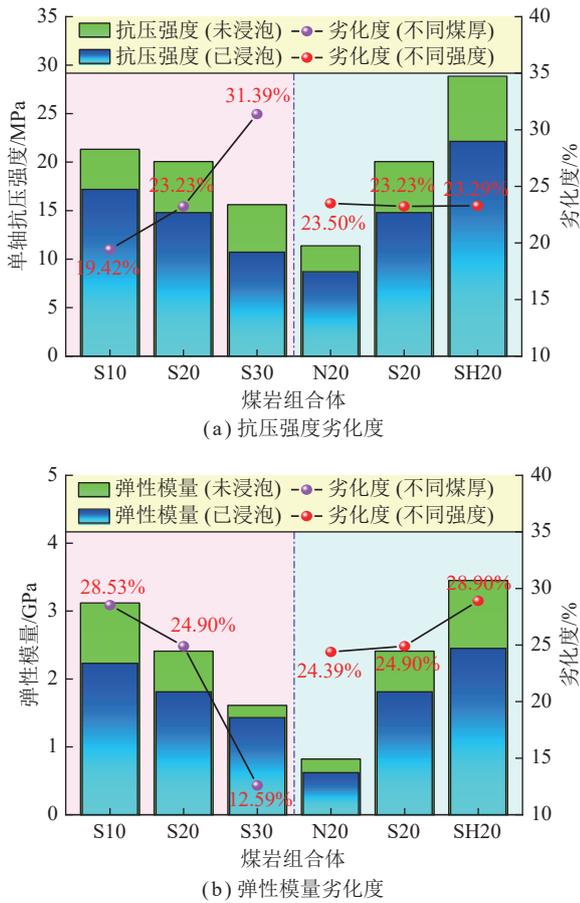


图 6 RCR 组合体力学特性劣化度

Fig.6 Deterioration of mechanical properties of RCR composition

下降,从而导致煤体抗压强度和弹性模量降低。故 RCR 组合体煤层越厚整体力学性能越低,抗压强度随煤层增加劣化幅度逐渐增大,但由于岩-煤-岩组合体的特殊结构型,弹性模量受整体变形影响,其劣化幅度呈现随煤厚的增加而逐渐降低。

此外, N20、S20、SH20 组合体试件在 ScCO<sub>2</sub> 浸泡后其抗压强度和弹性模量劣化度分比为 23.50%、23.23%、23.29% 和 24.39%、24.90%、28.90%,表明在煤层厚度为 20 mm 时,抗压强度和弹性模量劣化幅度与岩煤强度比无关联,劣化幅度基本一致。

### 3.3 单轴压缩应力-应变曲线演化规律

RCR 组合体试件在 ScCO<sub>2</sub> 浸泡前后的应力-应变曲线如图 7 所示。

总体而言,RCR 组合体试件在单轴压缩破坏过程中符合经典岩石力学 4 阶段破坏特征,但煤层厚度、岩煤强度比对其应变变形及破坏时间影响较大。

由图 7(a)可知,如 S10、S20、S30 试件浸泡前应变分别为 0.0125、0.0131、0.0155,浸泡后应变分别为 0.0117、0.0107、0.0118,分别下降了 6.40%、18.32%、23.87%。可见,未浸泡时,不同煤厚的 RCR

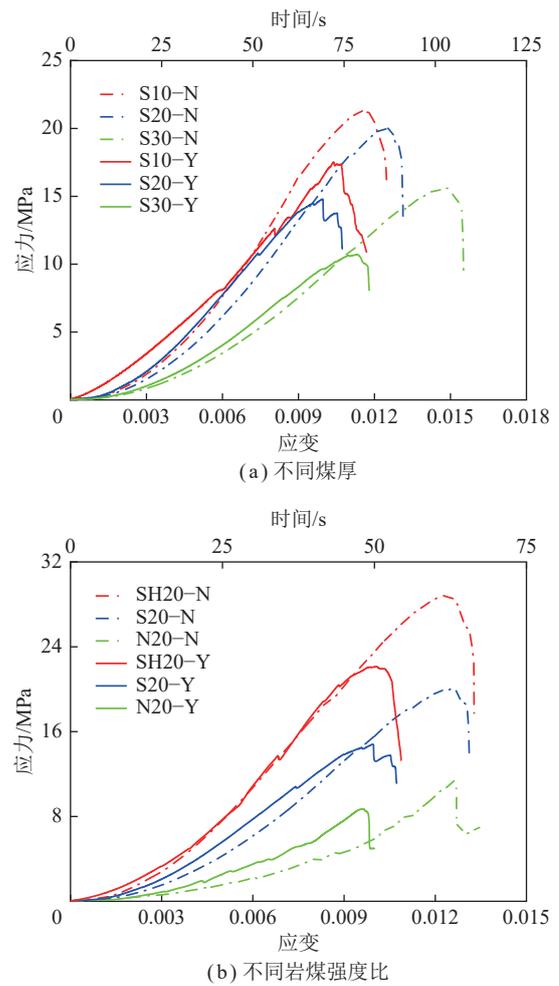


图 7 RCR 组合体轴向应力-应变曲线

Fig.7 Axial stress-strain curves of RCR composite

组合体失稳破坏时的应变变形和时间随煤厚增大而增大。但对于同一煤厚试件,当采用 ScCO<sub>2</sub> 浸泡后,其失稳破坏时的应变变形和时间明显变小。这是由于 ScCO<sub>2</sub> 对煤体的损伤使得裂隙发育,导致组合体试件更早进入弹性变形阶段,且经历短暂的弹性变形后发生失稳破坏。

由图 7(b)可知, N20(1 : 1)、S20(3 : 1)、SH20(5 : 1) 在浸泡前后失稳破坏时的应变分别为 0.0135、0.0131、0.0133 和 0.0100、0.0107、0.0109,下降幅度为 25.93%、18.32%、18.05%。由此可见,当试件未浸泡时,岩煤强度比对组合体失稳破坏的应变变形和时间影响较为微弱,但采用 ScCO<sub>2</sub> 浸泡后,组合体试件失稳破坏的应变变形和时间显著减小。

## 4 RCR 组合体破坏能量演化规律

### 4.1 RCR 组合体单轴破坏声发射特征

目前常用的声发射定位算法有最小二乘法<sup>[30]</sup>、Bayesian 算法<sup>[31]</sup>、相对定位法<sup>[32]</sup>、单纯性定位算法<sup>[33]</sup>

及 Geiger 定位算法<sup>[34]</sup>。Geiger 定位法是 Gauss-Newton 最小拟合函数的应用之一,适用于小区域地震事件。本文为实验室尺度的煤岩组合体破坏,故采用 Geiger 定位算法反演确定声发射事件空间位置。由于 RCR 组合体材料的不同,导致其声波波速存在差异,而波速又对于声发射的响应特征至关重要,在进行震源定位时,通常计算方法是通过探头接收相应信号的时间差进行反演,由于材料波速不同从而导致了时间上存在误差。但本文重点通过声发射研究 ScCO<sub>2</sub> 作用前后 RCR 组合体的最终声发射事件累积情况及裂隙在煤岩界面的扩展情况,又因 ScCO<sub>2</sub> 作用 7 d 主要为煤体损伤,故着重考虑煤体中声发射源定位的准确性。因此,将波速设置为煤体的传播波速,即 2 200 m/s。此外,为了减小监测误差,试验前将声发射探头按照相应的布置方式(图 4)置于上下部煤体两侧,然后通过断铅实验进行声发射源定位误差校验,进步保证试验结果的准确性。

基于 RFPA<sup>3D</sup> 数值模拟对 RCR 组合体单轴压缩破裂时的声发射情况进行模拟,RFPA<sup>3D</sup> 可将表征拉伸破坏和压剪破坏的声发射进行区别分类<sup>[35]</sup>,通过对相应声发射数据导出处理可反演并分类 RCR 组合体声发射三维定位图内表征拉伸和剪切破坏的声发射事件。其中,绿色球体代表拉伸破坏和裂隙压密时产

生的声发射事件,红色球体代表剪切破坏时产生的声发射事件。

笔者基于声发射(AE)事件数分析 RCR 组合体的损伤程度、能量的积聚和释放。以 S20 为例,其在单轴压缩过程中 AE 时空演化规律与应力-应变曲线关系如图 8 所示。不同煤厚和岩煤强度比 RCR 组合体在 ScCO<sub>2</sub> 浸泡前后失稳破坏时的声发射三维定位如图 9 所示。

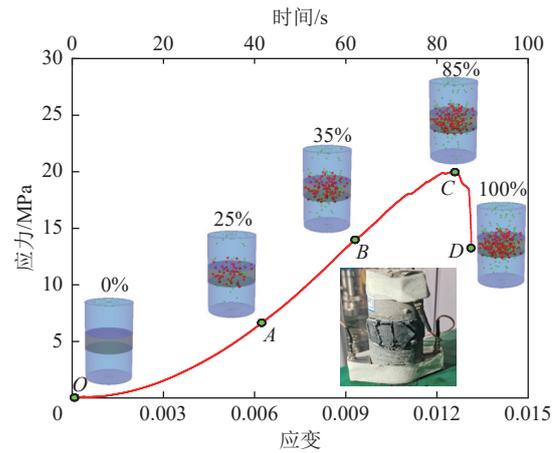


图 8 RCR 组合体声发射时空演化 (S20-N)

Fig.8 Spatial and temporal evolution diagram of RCR composite AE(S20-N)

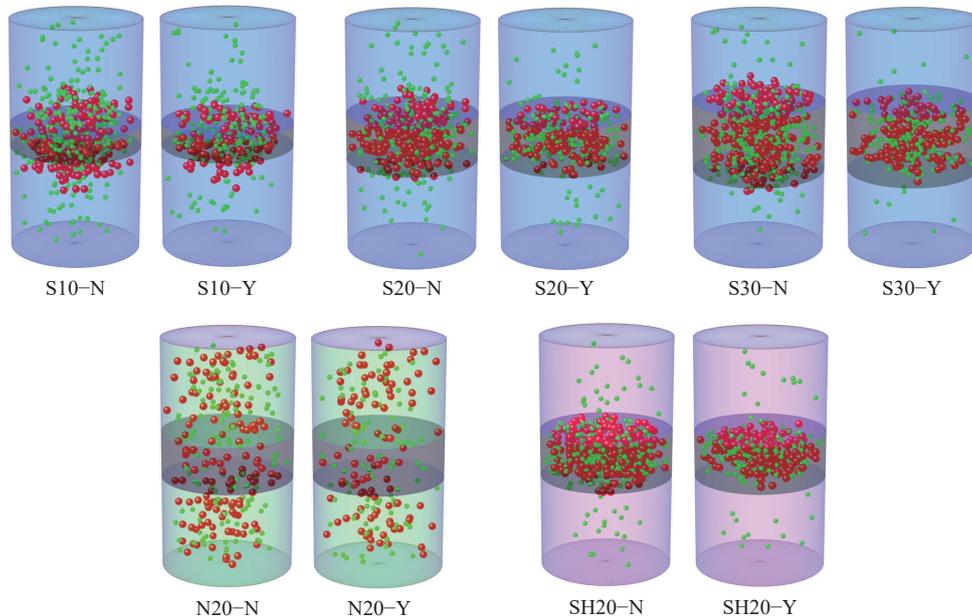


图 9 不同 RCR 组合体浸泡前后破坏时声发射数

Fig.9 Number of acoustic emission before and after soaking of different coal-rock combinations

由图 8 可知,OA 段为试件的裂隙压密阶段,此时 AE 事件主要由试件内部原生裂隙闭合和微小裂隙扩展发出的弹性波引起,其 AE 事件大部分位于煤体,累计占比可达 25%;AB 段为弹性变形阶段,该阶段主要

为弹性能积累阶段,并未产生明显裂隙,此时 AE 事件数增长缓慢,且大部分位于煤体,累计占比达 35%;BC 段为屈服破坏阶段,此时煤体中产生大量裂隙,并向岩体中扩展,AE 事件数急剧增加,直到到达峰值载

荷点 C, AE 事件数占比达 85%; CD 段为破坏后阶段, 试件失稳破坏, 产生微小裂隙, 此时 AE 事件数仍有增长, 直到完全破坏, AE 事件数占比达 100%。

由图 9 可知, S10、S20、S30 试件在 ScCO<sub>2</sub> 浸泡前后其破坏时 AE 事件大部分发生在煤体中, 这是由于煤体强度远低于砂岩且自身松散破碎所致。此外, RCR 组合体在单轴压缩时岩石与煤体间存在变形协调过程, 这一过程也是吸收能量的过程, 变形协调结束时已有部分声发射积聚在煤岩交界处, 之后随着载荷达到峰值煤体发生大面积劈裂破坏, 释放的动态断裂能导致上部岩体破坏及裂隙延伸扩展, 直至能量消耗殆尽时裂隙扩展结束, 大量 AE 事件积聚在煤岩交界面处并上下贯穿, 这也是自煤体产生的裂隙延展到岩体的有力证据。

值得注意的是, 对比分析 S10-N、S20-N 和 S30-N 试件的 AE 事件分布可知, 随煤厚的增大, AE 事件在煤中逐渐增多, 在岩体中逐渐减少, 并由开始的贯穿煤岩交界面逐渐演变到积聚在煤岩交界面附近。当采用 ScCO<sub>2</sub> 浸泡后, 煤体损伤劣化, 致使 AE 事件数较未浸泡时显著下降, 且由于煤体弹性应变能变小, 失稳破坏时的动态断裂能变小, 表现出以下规律: 在 S10-Y 试件中, AE 事件可伴随裂隙的扩展贯穿煤岩交界面, 在 S20-Y 试件中大部分 AE 事件明显止步于煤岩交界面, 只有小部分可穿过煤岩交界面, 而在 S30-Y 试件中 AE 事件集中于煤体, 并不能伴随裂隙扩展延伸到岩体。此外, 分析 N20、S20、SH20 三个试件声发射事件规律可知, 在岩煤强度比为 1:1 的 N20-N 试件中, 由于泥岩质地松软, 破坏时煤体与岩体裂隙各自延伸交互扩展, 采用 ScCO<sub>2</sub> 浸泡后, AE 试件略微减少, 但煤体与岩体仍呈贯穿破坏; 对于岩煤强度比为 3:1 时的 S20 试件浸泡前 AE 事件由煤体贯穿煤岩交界面, 浸泡后集中于煤体和煤岩交界面附近; 当岩煤强度比为 5:1 时 (试件 SH20-N), 声发射事件同样大部分位于煤体内, 而岩体中少量 AE 事件主要是由于原生裂隙的压密和微小裂隙的细微扩展导致。

#### 4.2 RCR 组合体变形破坏能量演化规律

RCR 组合体的变形破坏是由能量驱动引起的一种形态失稳现象, 其能量的变化规律及力学强度损伤与试样整体的破坏情况和失稳状态联系密切。故此, 本文通过 RCR 组合体的能量演化规律表征试件破坏的本质特征和强度变化特性。

如图 10 所示, 外界对组合试件所做功之和等于系统输入的总能量  $U$ , 根据热力学第一定律<sup>[36]</sup>得

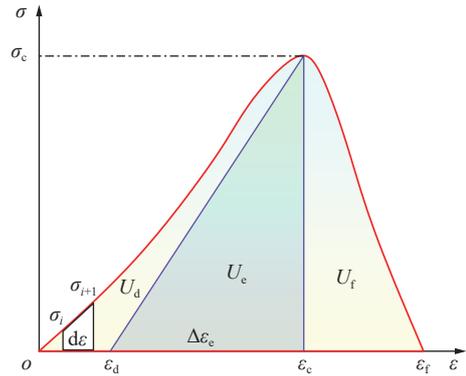


图 10 煤岩体单元中能量转化关系

Fig.10 Energy transformation relationship in coal and rock mass unit

$$U = U_d + U_e \quad (2)$$

式中,  $U_d$  为组合体自身的耗散能,  $\text{kJ/m}^3$ ;  $U_e$  为组合体储存的弹性应变能,  $\text{kJ/m}^3$ 。

故在单轴压缩过程中外部输入的能量可表示为

$$U = \int_0^{\varepsilon_c} \sigma_i d\varepsilon \quad (3)$$

$$U_e = \frac{1}{2E} \sigma_c^2 = \frac{1}{2} \sigma_c \Delta \varepsilon_e \quad (4)$$

$$U_d = U - U_e = \int_0^{\varepsilon_c} \sigma_i d\varepsilon - \frac{1}{2} \sigma_c \Delta \varepsilon_e \quad (5)$$

式中,  $\sigma_i$  为应力应变曲线上任一点的应力,  $\text{kPa}$ ;  $\varepsilon$  为试件所发生应变;  $\varepsilon_c$  为峰值应力对应的应变;  $\varepsilon_e$  为可恢复应变;  $E$  为组合体的弹性模量,  $\text{kPa}$ ;  $\sigma_c$  为试件峰值强度,  $\text{kPa}$ 。

组合试样破坏后的峰后释放能  $U_f$  由应力-应变曲线可得

$$U_f = \int_{\varepsilon_c}^{\varepsilon_f} \sigma_i d\varepsilon \quad (6)$$

式中,  $\varepsilon_f$  为试件完全破坏时发生的最大应变, 即应力-应变曲线的最大应变。

组合体发生承载失效后<sup>[37]</sup>, 峰前弹性应变能  $U_e$  一部分转化为峰后释放能  $U_f$ , 一部分转化为盈余能  $U_y$ , 盈余能大小与煤岩组合体破坏时动力显现强度直接相关。盈余能  $U_y$  计算式为

$$U_y = U_e - U_f = \frac{1}{2} \sigma_c \Delta \varepsilon_e - U_f = \int_{\varepsilon_c}^{\varepsilon_f} \sigma_i d\varepsilon \quad (7)$$

由式 (3)~(7) 可计算组合体加载过程中各能量, 其能量取每组试件平均值, 详见表 3。

不同煤岩组合体 ScCO<sub>2</sub> 浸泡前后耗散能占比、弹性能占比、盈余能占比的变化规律曲线如图 11 所示。

表 3 RCR 组合体加载破坏过程能量

Table 3 Energy of RCR composite loading failure process

RCR组合体	总能量均值/ (kJ · m <sup>-3</sup> )	耗散能均值/ (kJ · m <sup>-3</sup> )	弹性能均值/ (kJ · m <sup>-3</sup> )	盈余能均值/ (kJ · m <sup>-3</sup> )	耗散能占比/%	弹性能占比/%	盈余能占比/%
S10-N	99.53	38.39	61.14	36.38	38.57	61.43	36.56
S20-N	96.51	37.68	58.83	20.98	39.04	60.96	21.73
S30-N	88.36	34.19	54.17	13.56	38.69	61.31	15.35
N20-N	41.59	14.71	26.88	7.34	35.37	64.63	17.65
S20-N	96.51	37.68	58.83	20.98	39.04	60.96	21.73
SH20-N	153.92	61.03	92.89	32.88	39.65	60.35	21.36
S10-Y	77.98	33.79	44.19	24.73	43.33	56.67	31.71
S20-Y	53.22	22.34	30.88	9.60	41.98	58.02	18.04
S30-Y	49.67	20.88	28.79	4.45	42.04	57.96	8.96
N20-Y	27.37	10.50	16.87	4.10	38.36	61.64	14.98
S20-Y	53.22	22.34	30.88	9.60	41.98	58.02	18.04
SH20-Y	97.46	43.51	53.95	18.67	44.64	55.36	19.16

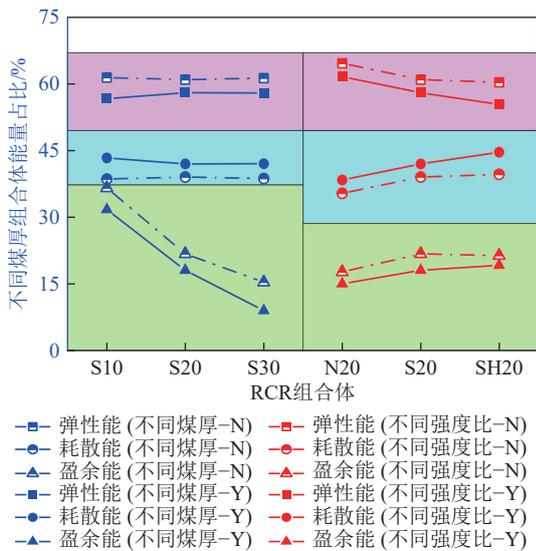


图 11 不同煤岩组合体能量演化曲线

Fig.11 Energy evolution curves of different coal-rock assemblage

由表 3 和图 11 可知,随着煤厚增加,组合体总能量、耗散能、弹性能、盈余能均逐渐降低;随着岩煤强度比增高,组合体总能量、耗散能、弹性能、盈余能均逐渐增大,ScCO<sub>2</sub> 浸泡对不同组合体的各类能量劣化明显。

对比 S10、S20、S30 试件可知,ScCO<sub>2</sub> 浸泡前后弹性能和耗散能占比基本在 60% 和 40% 左右,说明煤厚与组合体试件弹性能和耗散能占比无线性关系,但 ScCO<sub>2</sub> 作用会使弹性能占比降低,耗散能占比升高。此外,盈余能占比随着煤厚的增加逐渐变小,且降幅较大。随着煤厚增加,RCR 组合体内存储的弹性能、

耗散能和盈余能均逐渐降低,说明 RCR 组合体达到峰值强度发生宏观破坏时所需输入的外界能量逐渐降低,即越来越容易失稳,失稳时的动力强度显现也逐渐降低。

为分析岩煤强度比的影响,以 N20、S20、SH20 试件为例。由上述结果可知 ScCO<sub>2</sub> 浸泡前后弹性能和耗散能占比也均维持在 60% 和 40% 左右,随着岩煤强度比增大,弹性能占比略微降低,耗散能占比略微升高,盈余能占比略微增大。ScCO<sub>2</sub> 作用会使弹性能占比降低,耗散能占比升高,这与不同煤厚 RCR 组合体规律一致。由于随岩煤强度比增加 RCR 组合体内存储的弹性能、耗散能和盈余能均逐渐升高,说明 RCR 组合体达到峰值强度发生宏观破坏时所需输入的外界能量逐渐升高,即岩煤强度比越大,RCR 组合体越不易失稳,而失稳时的动力强度显现也越高。

综上所述可知,RCR 组合体失稳态势与煤厚成正比、与岩煤强度比成反比,RCR 组合体破坏时动力显现强度与煤厚成反比、与岩煤强度比成正比;峰值前能量占比与煤厚及岩煤强度比无直接线性关系;ScCO<sub>2</sub> 作用会使 RCR 组合体试件弹性能占比降低,耗散能占比升高,盈余能占比降低,分别表征破坏前用于试件内部裂隙压密的能量变大,用于弹性势能积累变小,试件破坏更为完全即破坏形态更为细碎。

## 5 RCR 组合体裂隙扩展规律及破坏失稳形态

### 5.1 RCR 组合体数值模拟参数校正

利用 RFPA<sup>3D</sup> 软件对不同煤厚及岩煤强度比 RCR 组合体试件开展单轴压缩模拟研究,并与单轴压

缩试验结果对比分析。RFPA<sup>3D</sup> 数值模拟可将 RCR 组合体模型转化为平面应变问题来研究, 考虑到加载方式及组合体的非均质性, 需确定均质度  $m$ , 通过将模拟结果与室内单轴压缩试验结果不断比对并重复进行模拟试验以矫正参数的选取, 最终确定岩体的均质度为 3(泥岩、砂岩、石灰岩均质度一致取 3), 煤体的均质度为 2。为准确建立 ScCO<sub>2</sub> 作用前后的 RCR 组合体模型, 需对抗压强度、弹性模量、泊松比、内摩擦角、拉压比、残余强度参数不断校正, 最终确定细观参数。根据已有研究结果表明<sup>[38]</sup>, 损伤后模型细观参数转化关系为

$$f_{cs}/f_{cso} = 0.260 \ln m + 0.023 \quad (1.2 \leq m \leq 50) \quad (8)$$

$$E_s/E_{so} = 0.141 \ln m + 0.647 \quad (1.2 \leq m \leq 10) \quad (9)$$

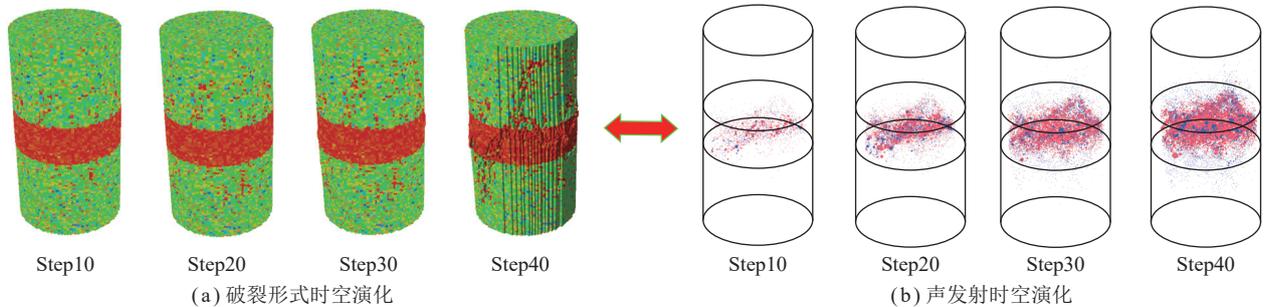


图 12 S20-N 单轴压缩破坏裂隙及声发射演化规律

Fig. 12 S20-N uniaxial compression breaks and AE evolution

由图 12 可知, 加载初期 (Step 10), 煤体中产生少许裂隙, 且拉伸和压剪破坏并存; 当载荷逐渐增大 (Step 20), 试件裂隙显著增多, 声发射也明显增多, 此时试件煤体内的压剪破坏快速上升; 当 Step 为 30 时, 产生明显裂缝, 且从煤体渐渐延伸至岩体, 发生明显的压剪破坏并伴生许多微小裂隙, 声发射从无序向有序发展, 在主裂隙上出现明显的聚集带; 当 Step 为 40 时, 试件失稳破坏, 声发射聚集在主裂隙附近。这表明煤厚 20 mm 的 RCR 组合体单轴压缩破坏时能量释放以煤体为主并伴随极小部分岩体弹性势能释放, 即能量伴随主裂隙在煤体中的扩展并穿过煤岩交界面延伸至部分岩体而进行释放。

### 5.3 RCR 组合体裂隙扩展与数值模拟对比

图 13 为不同 RCR 组合体试件的室内实验 (其中, 破坏形式-1、裂隙素描图-2、声发射模拟图-3、数值模拟破坏形式-4、增加辅助线后的数值模拟破坏形式-5 和数值模拟破坏形式切片-6。由于 N20 中泥岩和煤弹性模量较近, 建模后煤岩体不易区分, 故在煤岩交界面处添加了黑色辅助线)。

由图 13 可知, 随着煤体厚度的增加, RCR 组合体

式中,  $f_{cs}$  和  $E_s$  分别为宏观的强度 (MPa) 和弹性模量 (GPa);  $f_{cso}$  和  $E_{so}$  分别为细观按 Weibull 分布时的强度 (MPa) 和弹性模量 (GPa)。

通过式 (8)、(9) 得到的煤岩体损伤后细观参数需代入模型重复模拟, 直至数值模拟与室内试验测量的抗压强度和弹性模量相近, 选取此时的细观参数作为后续数值模拟的参考值。

### 5.2 RCR 组合体裂隙扩展模拟及声发射演化特征分析

RFPA<sup>3D</sup> 数值模拟 RCR 组合体单轴压缩破裂及声发射时空演化如图 12 所示, 此处以 S20-N 为例分析。在图 12(b) 中以球点大小代表声发射强度大小, 蓝色和红色分别代表产生拉伸破坏和压剪破坏时的声发射。

试件失稳破坏时呈现不同的形式, 裂隙扩展路径由贯穿整个试件逐渐变为止于煤岩交界面, 裂隙剪切角度逐渐减小。此外, 对比分析数值模拟与室内实验结果, 其破坏形态吻合度较高。

从 S10-N 试件破坏形态可知, 其首先在煤体中观测到主裂隙, 角度接近 90°, 煤体主裂隙间观测到横向贯通的裂隙带和大角度剪切带, 然后煤体中裂隙逐步向煤岩界面扩展, 呈现“八”字型拉伸劈裂, 并最终贯穿上部岩体。对比数值模拟与室内试验, 2 者均呈现“H”型破坏。

S20-N 试件中裂隙同样先于煤体中产生, 但由于煤层变厚且受其端面效应影响主裂隙倾角减小, 呈 70° 的剪切破坏, 主裂隙附近煤体崩出且较为破碎, 除煤体中衍生的次生裂隙外, 主裂隙穿越煤岩交界面并在岩体中产生 70° 的剪切裂缝, 这主要是煤体剪切破坏角度较大, 剪切错动时直接作用于上部岩体内部, 当岩体黏聚力不足以抵消剪切力, 导致主裂隙沿岩体进一步延伸产生剪切破坏。模拟破裂形式为煤体中产生多条剪切破坏裂隙, 并由主裂隙延伸至岩体产生单裂隙剪切破坏, 与实际破裂形式基本相符, 较 S10-N

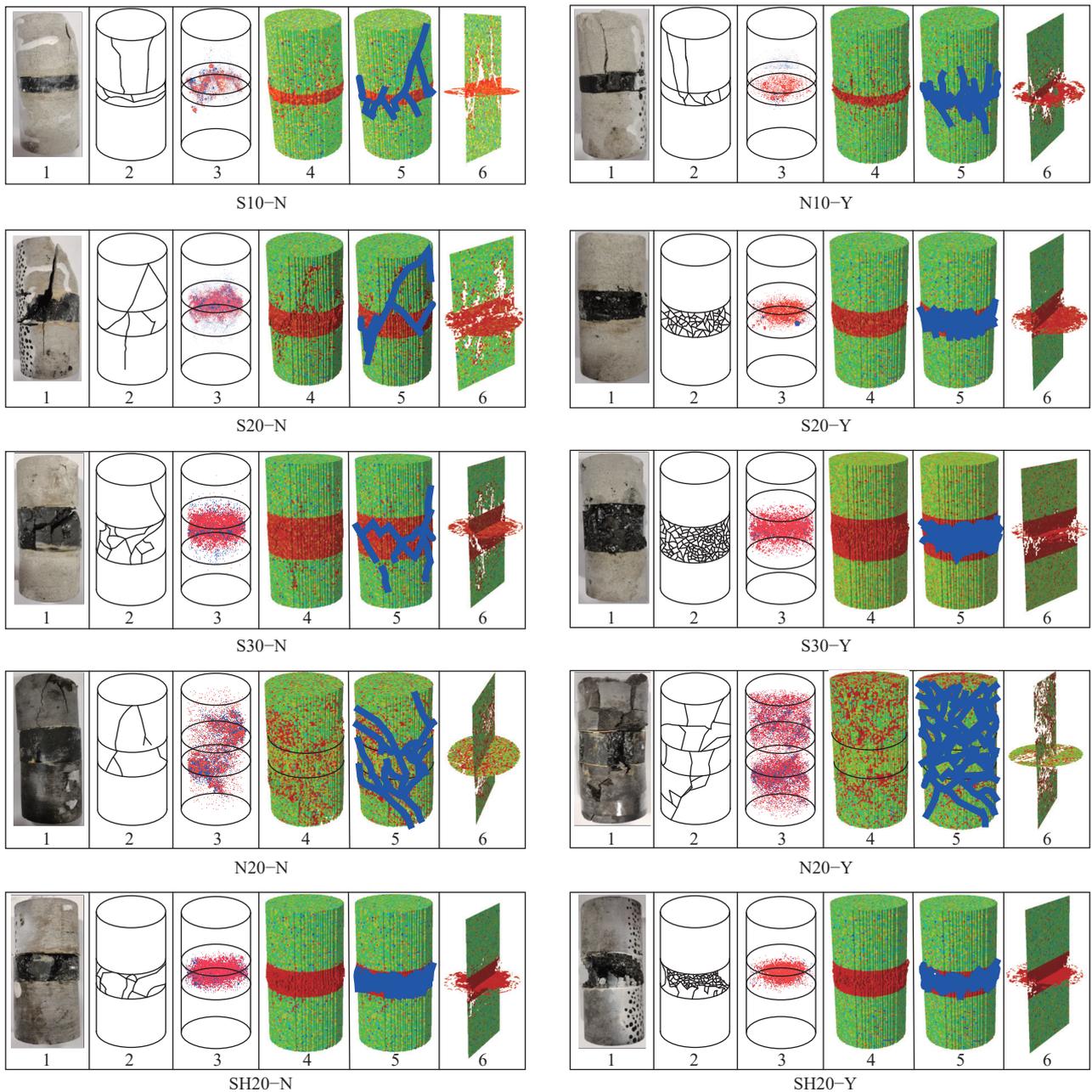


图 13 不同组合体试件破坏形式及声发射模拟

Fig.13 Failure forms and AE simulation of different assembly specimens

试件中煤体 AE 变得多且集中。

S30-N 试件中煤体呈  $45^\circ$  剪切破坏, 主裂隙贯穿整个煤体, 并产生众多次生裂隙, 主裂隙延伸至煤岩交界面的外侧, 导致岩体外帮有部分薄片剥落, 但岩体本身无明显裂隙产生, 产生这种现象的原因是 RCR 组合体试件受煤体尺寸效应影响, 煤体剪切破坏角度变小, 破坏时主裂隙产生的剪切错动仅导致岩体外侧片落。

当组合体试件未采用  $\text{ScCO}_2$  浸泡时, 随着岩煤强度比的增大, RCR 组合体失稳破坏形式由试件整体充分破坏逐渐转变为只有煤体的单体破坏。在 N20-N

试件中, 由于岩煤强度比接近, 试件破坏时煤岩体中裂隙无主次之分, 煤体和上部岩体中裂隙几乎同时产生, 之后裂隙贯通呈“V”型。此外, 通过 AE 事件分布可知, 不仅在主裂隙附近观测到大量声发射事件数, 而且在煤体及上部破裂岩体中同样观测到较多的声发射事件, 说明 RCR 组合体内部裂隙已发育完全, 不再只限于表面的宏观裂隙; 对于 SH20-N 试件, 岩煤强度比 5 : 1, 强度差值大, 破坏时自煤体产生的裂隙无法穿越煤岩界面, 煤体发生剪切张拉而岩体中并未产生裂隙。

当组合体试件采用  $\text{ScCO}_2$  浸泡处理后, 其失稳时

破坏形式发生显著改变。如 S10-Y 试件中煤体裂隙明显增多, 岩体破裂形式呈大角度剪切破坏, 但主裂隙仍能贯穿组合体, 声发射数较未浸泡前明显下降, 且分布较为离散; 对于 S20-Y 试件, 煤体中无明显主裂隙, 仅观测到众多微裂隙, 碎裂块体小且呈流体状, 表现出典型的塑性破坏, 煤体作用于岩体的回弹能量不足以使得岩体破裂, 只有内部微小裂隙滋生和外侧部分剥落。AE 除集聚于明显裂隙附近外, 在煤体各处离散分布; S30-Y 试件中岩体无裂隙及 AE, 煤体依旧表现为典型的塑性破坏, 碎裂煤体呈流体状, AE 集中于煤体中部, 于周围扩散环绕且离散分布。

综上所述可得:

(1) 随煤层厚度的增加, RCR 组合体裂隙由贯穿试件逐渐止于煤岩界面, 破坏形式逐渐由“H”型拉伸劈裂破坏转变为“X”型共轭剪切破坏, 主裂隙剪切角由接近 90°逐渐趋于 45°。当采用 ScCO<sub>2</sub> 浸泡处理后, 煤体弹性变形时间较为短暂, 更多的是塑性破坏, 且随着煤层厚度的增加, RCR 组合体裂隙更早止于煤岩界面, 破坏形式由大角度剪切破坏逐渐向无明显主裂隙的破碎流体状碎屑转变。

(2) 随岩煤强度比的增大, RCR 组合体裂隙由贯穿型逐渐止于试件煤岩交界面, 破坏形式由“V”型剪切破坏逐渐转变为只有煤体的剪切破坏, 主裂隙剪切角度也逐渐变小。采用 ScCO<sub>2</sub> 浸泡处理后, 其岩煤强度比越低, RCR 组合体破裂形式越破碎, 而岩煤强度比越高, 破坏失稳时岩体较为完整, 煤体较为破碎。

(3) 在未进行 ScCO<sub>2</sub> 浸泡时, RCR 组合体破坏时伴随着煤体碎片的崩落和飞溅, 并发出巨大声响, 尤以岩煤强度比高的 SH20-N 试件最为明显; 当浸泡处理后, 煤体碎屑呈流体状“垮落”, 导致 RCR 组合体破坏失稳, 且无较大声响, 这说明 ScCO<sub>2</sub> 作用会降低煤体的黏聚力和内部的胶结性能, 降低其弹性势能, 增加塑性破坏, 进而影响整个组合体的破裂形式、力学强度、能量释放和失稳态势及时间。

## 6 讨论与展望

### 6.1 讨论

不同煤厚和岩煤强度比 RCR 组合体在 ScCO<sub>2</sub> 作用下力学性质及其破坏特征关系如图 14 所示。

由图 14(a) 可知, 在 ScCO<sub>2</sub> 作用前后 RCR 组合体抗压强度和弹性模量随着煤厚的增加逐渐降低, 其与煤厚的拟合优度  $R^2$  也相对较高。在 ScCO<sub>2</sub> 作用后, 煤厚 10、20、30 mm 时破坏特征形式分别为: 由岩煤整体拉伸破坏转向岩体拉伸煤体剪切破坏; 由岩体拉伸煤体剪切破坏转向只有煤体的剪切破坏; 由煤体整体

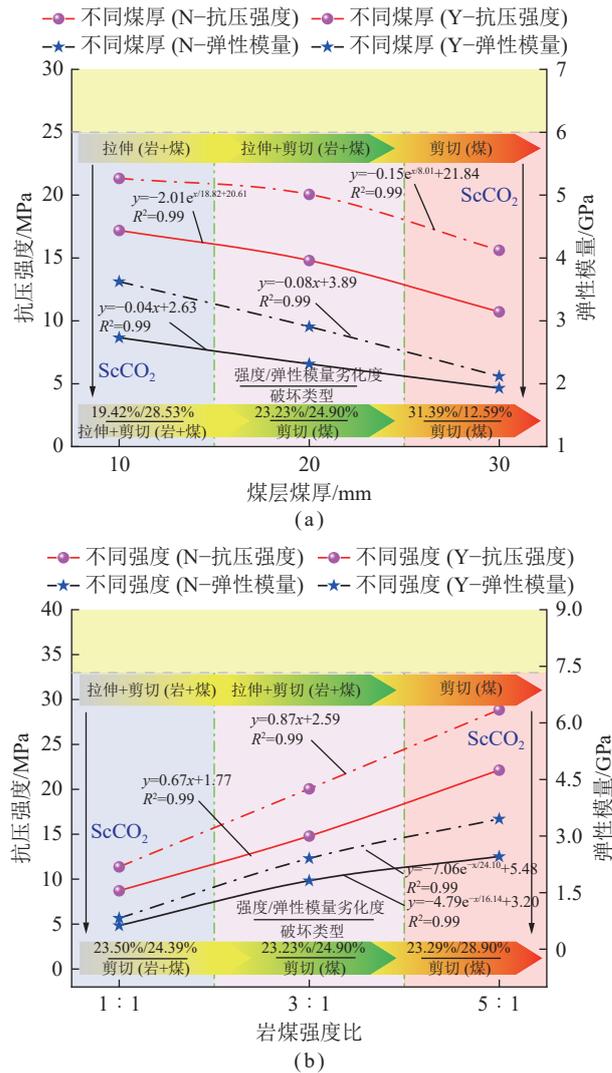


图 14 ScCO<sub>2</sub> 作用下 RCR 组合体力学性质与破坏特征关系  
Fig.14 Relationship between mechanical properties and damage characteristics of RCR assemblies under the action of ScCO<sub>2</sub>

体剪切破坏转向煤体塑性剪切破坏。由图 14(b) 可知, 在 ScCO<sub>2</sub> 作用前后 RCR 组合体抗压强度和弹性模量随着岩煤强度比的增加逐渐升高, 其与岩煤强度比的拟合优度  $R^2$  也相对较高。在 ScCO<sub>2</sub> 作用后, 岩煤强度比 1:1、3:1、5:1 时破坏特征形式分别为: 由岩体拉伸煤体剪切破坏转向岩煤整体剪切破坏; 由岩体拉伸煤体剪切破坏转向只有煤体的剪切破坏; 由煤体整体剪切破坏转向煤体塑性剪切破坏。

综上所述, ScCO<sub>2</sub> 作用会大幅弱化煤体力学强度, 基于本文特定实验条件下研究成果表明, 煤层越厚的地层越容易发生失稳, 顶底板岩层强度越高的地层越不容易发生失稳, 地层失稳破坏时动力显现强度与煤层厚度成反比、与岩煤强度比成正比。故在满足 CO<sub>2</sub> 注入封存量前提的一定区域地层内, 应选择顶底板岩层强度较高、煤层厚度较薄的区域地层封存 CO<sub>2</sub> 安全性更高。

## 6.2 展 望

相较于瘦煤、焦煤、贫瘦等低阶煤而言<sup>[39]</sup>,无烟煤作为一种高阶变质煤,其微孔隙发育十分完全,比表面积大,具有更强的储存 CO<sub>2</sub> 能力,故就储存 CO<sub>2</sub> 能力而言,在深部不可采煤层中无烟煤煤系地层为最优。但与此同时,在相同的有效应力下变质程度越大的煤体受 ScCO<sub>2</sub> 作用后,其力学强度劣化程度越大。在无烟煤煤系地层中,盖层岩性不唯一,故选取泥岩、砂岩、石灰岩这 3 种典型盖层进行了研究,研究不同类型“岩-煤-岩”类型组合体在 ScCO<sub>2</sub> 作用下的力学性能劣化程度、能量演化情况、裂隙扩展和失稳态势。因为,在深部不可采煤层注入 CO<sub>2</sub> 后,由于 CO<sub>2</sub> 与 CH<sub>4</sub> 的竞争吸附,煤体中存储大量 Sc 状态的 CO<sub>2</sub>,导致煤体力学特性大幅弱化,引发煤岩破裂,极易导致 CO<sub>2</sub> 泄漏,污染地下水资源。此外,由于储层温度和压力的变化、构造运动所引发的突发地质事件(火山、地震等)等也会对煤岩结构体的稳定性产生影响,故对煤岩组合体在 ScCO<sub>2</sub> 作用前后的系列研究很有必要。

笔者对 ScCO<sub>2</sub> 浸泡 7 d(第 1 阶段)进行了深入的研究,即煤体为主体损伤阶段,对煤体与岩体共同损伤阶段和完全损伤阶段仍需进行深入的探究。此外,煤层对 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 竞争吸附时还存在差异性膨胀效应,煤层所处条件为气-液-固多相耦合环境,在多相环境下煤体的损伤也会导致区域应力场变化<sup>[6]</sup>,这些也是实验需要进一步结合考虑并深入研究的方向。

## 7 结 论

(1) RCR 组合体的抗压强度和弹性模量随煤厚增加而降低,随岩煤强度比增大而升高。ScCO<sub>2</sub> 作用后,随煤厚的增加,RCR 组合体抗压强度劣化幅度逐渐增大,弹性模量劣化幅度逐渐降低;而当岩煤强度比不同时,其抗压强度和弹性模量劣化幅度基本一致,并未呈现较大差异。

(2) ScCO<sub>2</sub> 作用导致 RCR 组合体更早进入弹性变形阶段,且经历短暂的弹性变形后发生失稳破坏,其受煤厚影响较大,受岩煤强度比影响较小。

(3) RCR 组合体总能量、耗散能、弹性能、盈余能随煤体厚度增加而逐渐降低,随岩煤强度比的增大而逐渐增大。此外,ScCO<sub>2</sub> 作用会使 RCR 组合体弹性能占比降低,耗散能占比升高,盈余能占比降低。

(4) 随着煤厚的增加,RCR 组合体破坏形式由“H”型拉伸劈裂破坏转变为“X”型共轭剪切破坏;随着岩煤强度比增大,RCR 组合体破坏形式由整体的“V”型剪切破坏逐渐转变为只有煤体的剪切破坏,而且 ScCO<sub>2</sub> 浸泡会加剧这 2 种趋势的转变进度。

(5) RCR 组合体失稳态势与煤厚成正比、与岩煤强度比成反比,破坏时动力显现强度与煤厚成反比、与岩煤强度比成正比。ScCO<sub>2</sub> 作用会促进煤体发生塑性破坏,其破坏程度与煤厚和岩煤强度比均成正相关关系。

## 参考文献(References):

- [1] 孙腾民,刘世奇,汪涛. 中国二氧化碳地质封存潜力评价研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(11): 10-20.  
SUN Tengmin, LIU Shiqi, WANG Tao. Research advances on evaluation of CO<sub>2</sub> geological storage potential in China[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(11): 10-20.
- [2] 卢义玉,周军平,鲜学福,等. 超临界 CO<sub>2</sub> 强化页岩气开采及地质封存一体化研究进展与展望[J]. 天然气工业, 2021, 41(6): 60-73.  
LU Yiyu, ZHOU Junping, XIAN Xuefu, et al. Research progress and prospect of the integrated supercritical CO<sub>2</sub> enhanced shale gas recovery and geological sequestration[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(6): 60-73.
- [3] 兰天庆,马媛媛,贡同,等. 超临界状态 CO<sub>2</sub> 封存技术研究进展[J]. 应用化工, 2019, 48(6): 1451-1455, 1473.  
LAN Tianqing, MA Yuanyuan, GONG Tong, et al. Research progress on CO<sub>2</sub> storage technology in supercritical state[J]. Applied Chemical Industry, 2019, 48(6): 1451-1455, 1473.
- [4] 刘成龙,王延斌. CO<sub>2</sub> 注入对煤储层特征影响实验研究[J]. 煤炭技术, 2017, 36(5): 47-49.  
LIU Chenglong, WANG Yanbin. Experimental study on influence of CO<sub>2</sub> injection on coal characteristics[J]. Coal Technology, 2017, 36(5): 47-49.
- [5] 张春杰,申建,秦勇. 注 CO<sub>2</sub> 提高煤层气采收率及 CO<sub>2</sub> 封存技术[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(6): 205-210.  
ZHANG Chunjie, SHEN Jian, QIN Yong. Technology of CO<sub>2</sub> injection affected to improve coalbed methane recovery and CO<sub>2</sub> sealed storage[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(6): 205-210.
- [6] 何学秋,田向辉,宋大钊. 煤层 CO<sub>2</sub> 安全封存研究进展与展望[J]. 煤炭科学技术, 2020, 50(1): 212-219.  
HE Xueqiu, TIAN Xianghui, SONG Dazhao. Progress and expectation of CO<sub>2</sub> sequestration safety in coal seams[J]. Coal Science and Technology, 2020, 50(1): 212-219.
- [7] 张倍宁. 超临界 CO<sub>2</sub> 在不同阶煤层中的渗流规律及煤体变形特征研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2019.  
ZHANG Beining. Investigation of supercritical CO<sub>2</sub> flow behaviour and mechanical deformation in different rank coals[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2019.
- [8] 张俊超. 模拟超临界 CO<sub>2</sub> 注入高阶煤体积应变及力学性质变化特征研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.  
ZHANG Junchao. Study on the volume strain and mechanical property variation with simulation of supercritical CO<sub>2</sub> injection into the high rank coal[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2016.
- [9] 何立国,杨栋. 超临界 CO<sub>2</sub> 对煤体力学特性劣化影响研究[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(2): 94-99.

- HE Ligu, YANG Dong. Study on the effect of supercritical CO<sub>2</sub> on the coal mechanical properties[J]. *Mining R&D*, 2021, 41(2): 94–99.
- [10] 杨磊, 高富强, 王晓卿. 不同强度比组合煤岩的力学响应与能量分区演化规律[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(S2): 3297–3305.
- YANG Lei, GAO Fuqiang, WANG Xiaoqin. Mechanical response and energy partition evolution of coal-rock combinations with different strength ratios[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(S2): 3297–3305.
- [11] 李波, 任永婕, 张路路, 等. 超临界 CO<sub>2</sub> 作用下煤的孔隙结构变化规律试验研究[J]. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 2018, 37(5): 33–39.
- LI Bo, REN Yongjie, ZHANG Lulu, et al. Experimental study on variation of coal porosity structures under supercritical carbon dioxide action[J]. *Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science)*, 2018, 37(5): 33–39.
- [12] 王磊, 梁卫国. 超临界 CO<sub>2</sub> 压裂下煤岩体裂缝扩展规律试验研究[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(2): 65–70.
- WANG Lei, LIANG Weigu. Experimental study on crack propagation of coal-rock mass under supercritical CO<sub>2</sub> fracturing[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(2): 65–70.
- [13] 孙可明, 王金彧, 辛利伟. 不同应力差条件下超临界 CO<sub>2</sub> 气爆煤岩体气楔作用次生裂纹扩展规律研究[J]. *应用力学学报*, 2019, 36(2): 466–472, 516.
- SUN Keming, WANG Jinyu, XIN Liwei. Research on the law of secondary cracks propagation in coal and rock caused by gas wedging during supercritical CO<sub>2</sub> explosion under different stress differences[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2019, 36(2): 466–472, 516.
- [14] 樊玉峰, 肖晓春, 徐军, 等. 煤高度对组合岩煤力学性质及冲击倾向性的影响[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(S2): 649–659.
- FAN Yufeng, XIAO Xiaochun, XU Jun, et al. Mechanical properties of coal rock combinations and evaluation of impact tendency considering effects of the height portion of coal[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(S2): 649–659.
- [15] 肖晓春, 樊玉峰, 吴迪, 等. 组合煤岩破坏过程能量耗散特征及冲击危险评价[J]. *岩土力学*, 2019, 40(11): 4203–4212.
- XIAO Xiaochun, FAN Yufeng, WU Di, et al. Energy dissipation feature and rock burst risk assessment in coal-rock combinations[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(11): 4203–4212.
- [16] 李回贵, 李化敏, 高保彬. 不同煤厚煤岩组合体破裂过程声发射特征研究[J]. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 2021, 40(5): 30–37.
- LI Huigui, LI Huamin, GAO Baobin. Study on acoustic emission characteristics in the process of fracture of coal-rock combination body with different thickness of coal[J]. *Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science)*, 2021, 40(5): 30–37.
- [17] 左建平, 陈岩, 崔凡. 不同煤岩组合体力学特性差异及冲击倾向性分析[J]. *中国矿业大学学报*, 2018, 47(1): 81–87.
- ZUO Jianping, CHEN Yan, CUI Fan. Investigation on mechanical properties and rock burst tendency of different coal-rock combined bodies[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2018, 47(1): 81–87.
- [18] 鞠文君, 卢志国, 高富强, 等. 煤岩冲击倾向性研究进展及综合定量评价指标探讨[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(9): 1839–1856.
- JU Wenjun, LU Zhiguo, GAO Fuqiang, et al. Research progress and comprehensive quantitative evaluation index of coal rock bursting liability[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(9): 1839–1856.
- [19] 杨科, 刘文杰, 马衍坤, 等. 真三轴单面凌空下煤岩组合体冲击破坏特征试验研究[J]. *岩土力学*, 2022, 43(1): 15–27.
- YANG Ke, LIU Wenjie, MA Yankun, et al. Experimental study of impact failure characteristics of coal-rock combination bodies under true triaxial loading and single face unloading[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(1): 15–27.
- [20] 左建平, 陈岩, 宋洪强. 深部煤岩组合体破坏行为与非线性模型研究进展[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2021, 52(8): 2510–2521.
- ZUO Jianping, CHEN Yan, SONG Hongqiang. Study progress of failure behaviors and nonlinear model of deep coal-rock combined body[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2021, 52(8): 2510–2521.
- [21] MA Qing, TAN Yunliang, LIU Xuesheng, et al. Experimental and numerical simulation of loading rate effects on failure and strain energy characteristics of coal-rock composite samples[J]. *Journal of Central South University*, 2021, 28(10): 3207–3222.
- [22] 高翔, 梁卫国, 武鹏飞, 等. 不同倾角煤岩组合体三轴力学特性的界面水压效应研究[J]. *矿业研究与开发*, 2021, 41(10): 67–72.
- GAO Xiang, LIANG Weigu, WU Pengfei, et al. Research on the effect of interfacial water pressure on triaxial mechanical properties of coal-rock combination with different inclination angles[J]. *Mining R&D*, 2021, 41(10): 67–72.
- [23] 付斌, 周宗红, 王友新. 煤岩组合体冲击倾向性的 RFA2D 数值模拟[J]. *煤矿机械*, 2016, 37(5): 90–93.
- FU Bin, ZHOU Zonghong, WANG Youxin. Rock burst tendency of coal-rock combined bodies based on RFA2D[J]. *Coal Mine Machinery*, 2016, 37(5): 90–93.
- [24] 郭伟耀, 周恒, 徐宁辉, 等. 煤岩组合体力学特性模拟研究[J]. *煤矿安全*, 2016, 47(2): 33–35.
- GUO Weiyao, ZHOU Heng, XU Ninghui, et al. Simulation study of mechanical properties of coal rock combination[J]. *Safety in Coal Mines*, 2016, 47(2): 33–35.
- [25] 叶建平, 张兵, SAM Wong. 山西沁水盆地柿庄北区块 3# 煤层注入埋藏 CO<sub>2</sub> 提高煤层气采收率试验和评价[J]. *中国工程科学*, 2012, 14(2): 38–44.
- YE Jianping, ZHANG Bing, SAM Wong. Test of and evaluation on elevation of coalbed methane recovery ratio by injecting and burying CO<sub>2</sub> for 3# coal seam of north section of Shizhuang, Qingshui Basin, Shanxi[J]. *Strategic Study of CAE*, 2012, 14(2): 38–44.
- [26] STEVENS S H, SPECTOR D, RIEMER P. Enhanced coalbed methane recovery using CO<sub>2</sub> injection: Worldwide resource and CO<sub>2</sub> sequestration potential[C]//SPE International Oil and Gas Conference and Exhibition in China. Beijing, 1998: 489–501.
- [27] 刘延锋, 李小春, 白冰. 中国 CO<sub>2</sub> 煤层储存容量初步评价[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(16): 2947–2952.
- LIU Yanfeng, LI Xiaochun, BAI Bing. Preliminary estimation of CO<sub>2</sub> storage capacity of coalbeds in China[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(16): 2947–2952.

- [28] 梁卫国, 贺伟, 阎纪伟. 超临界 CO<sub>2</sub> 致煤岩力学特性弱化与破裂机理[J]. 煤炭学报, 2022, 47(7): 2557–2568.  
LIANG Weiguo, HE Wei, YAN Jiwei. Weakening and fracturing mechanism of mechanical properties of coal and rock caused by supercritical CO<sub>2</sub>[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(7): 2557–2568.
- [29] 邓华锋, 肖志勇, 李建林, 等. 水岩作用下损伤砂岩强度劣化规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S1): 2690–2698.  
DENG Huafeng, XIAO Zhiyong, LI Jianlin, et al. Deteriorating change rule test research of damage sandstone strength under water-rock interaction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S1): 2690–2698.
- [30] FEDOROW V V. Regression problems with controllable variables subject to error[J]. *Biometrika*, 1974, 61: 49–55.
- [31] 刘福田. 震源位置和速度结构的联合反演 ( I )——理论和方法[J]. 地球物理学报, 1984, 27(2): 167–175.  
LIU Futian. Simultaneous inversion of earthquake hypocenters and velocity structure(I)—Theory and method[J]. Acta Geophysica Sinica, 1984, 27(2): 167–175.
- [32] 胡新亮, 马胜利, 高景春, 等. 相对定位方法在非完整岩体声发射定位中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2): 277–283.  
HU Xinliang, MA Shengli, GAO Jingchun, et al. Location of acoustic emission in non-integral rock using relative locating method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(2): 277–283.
- [33] 赵兴东, 刘建坡, 李元辉, 等. 岩石声发射定位技术及其试验验证[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(10): 1472–1476.  
ZHAO Xingdong, LIU Jianpo, LI Yuanhui, et al. Experimental study on different rock locating algorithms with acoustic emission[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(10): 1472–1476.
- [34] GEIGER L. Probability method for the determination of earthquake epicenters from the arrival time only[J]. Bulletin of St. Louis University, 1912, 8(1): 60–71.
- [35] 胡斌, 彭锐波, 崔凯. 基于 RFPA~(2D) 岩石渗流剪切破坏过程研究[J]. 有色金属 (矿山部分), 2022, 74(2): 53–60.  
HU Bin, PENG Ruibo, CUI Kai. Research on the shear failure process of stone seepage based on RFPA<sup>2D</sup>[J]. Non-ferrous Metals(Mining Part), 2022, 74(2): 53–60.
- [36] 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: 52–54.
- [37] 杨科, 刘文杰, 窦礼同, 等. 煤岩组合体界面效应与渐进失稳特征试验[J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1691–1700.  
YANG Ke, LIU Wenjie, DOU Litong, et al. Experimental investigation into interface effect and progressive instability of coal-rock combined specimen[J]. Journal of China coal Society, 2020, 45(5): 1691–1700.
- [38] 王云杰, 牛海萍, 段东. 炭质泥岩单轴加载 RFPA<sup>2D</sup> 数值模拟[J]. 煤炭技术, 2017, 36(7): 50–51.  
WANG Yunjie, NIU Haiping, DUAN Dong. RFPA<sup>2D</sup> Numerical simulation of carbonaceous mudstone under uniaxial compression[J]. Coal Technology, 2017, 36(7): 50–51.
- [39] 降文萍, 崔永君, 钟玲文, 等. 煤中水分对煤吸附甲烷影响机理的理论研究[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(4): 576–579, 583.  
JIANG Wenping, CUI Yongjun, ZHONG Lingwen, et al. Quantum chemical study on coal surface interacting with CH<sub>4</sub> and H<sub>2</sub>O[J]. Natural and Geoscience, 2007, 18(4): 576–579, 583.