矿业科学学报
JOURNAL OF MINING SCIENCE AND TECHNOLOGY

不同CO_2吸附时间下煤体力学特性及裂隙扩展规律

王磊, 吴雨轩, 陈礼鹏, 王勇, 廖志鹏, 杨震宇

Mechanical properties and crack propagation law of coal under different CO_2 adsorption time

引用本文:
王磊, 吴雨轩, 陈礼鹏, 等. 不同CO_2吸附时间下煤体力学特性及裂隙扩展规律[J]. 矿业科学学报, 2024, 9(6): 964–976.
WANG Lei, WU Yuxuan, CHEN Lipeng, et al. Mechanical properties and crack propagation law of coal under different CO_2 adsorption time[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2024, 9(6): 964–976.

您可能感兴趣的其他文章

1. 复杂地形地貌对下伏煤岩层应力影响规律研究
引用本文: 张大明, 付松, 李刚. 复杂地形地貌对下伏煤岩层应力影响规律研究[J]. 矿业科学学报, 2023, 8(4): 548–559.

2. 煤层孔隙结构多尺度联合表征及其对可动流体的影响
引用本文: 李天, 任大忠, 甯波, 等. 煤层孔隙结构多尺度联合表征及其对可动流体的影响[J]. 矿业科学学报, 2023, 8(4): 569–582.

3. 特厚煤层综放开采多口同时放煤三维实验研究
引用本文: 李猛, 魏炜杰, 张鑫. 特厚煤层综放开采多口同时放煤三维实验研究[J]. 矿业科学学报, 2023, 8(2): 180–189.

4. 中间主应力影响下含瓦斯复合煤岩体变形渗流及能量演化特征研究
引用本文: 王凯, 赵恩彪, 郭阳阳, 等. 中间主应力影响下含瓦斯复合煤岩体变形渗流及能量演化特征研究[J]. 矿业科学学报, 2023, 8(1): 74–82.

5. 氧化煤低温氧化特性及演化规律
引用本文: 陈荣芳, 郭志国, 张俊, 等. 氧化煤低温氧化特性及演化规律[J]. 矿业科学学报, 2022, 7(4): 498–504.

王磊,吴雨轩,陈礼鹏,等. 不同 CO_2 吸附时间下煤体力学特性及裂隙扩展规律[J]. 矿业科学学报,2024,9(6):964-976. DOI:10.19606/j.cnki.jmst.2024916

WANG Lei,WU Yuxuan,CHEN Lipeng,et al. Mechanical properties and crack propagation law of coal under different CO_2 adsorption time[J]. Journal of Mining Science and Technology,2024,9(6):964-976. DOI:10.19606/j.cnki.jmst.2024916

不同 CO_2 吸附时间下煤体力学特性及裂隙扩展规律

王　磊[1],吴雨轩[1],陈礼鹏[1],王　勇[2],廖志鹏[1],杨震宇[1]

1. 安徽理工大学深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室,安徽淮南　232001;
2. 煤炭工业合肥设计研究院有限责任公司,安徽合肥　230041

摘　要:CO_2 吸附引起的结构变形对煤层稳定性有显著影响。利用自主研发的气-固耦合实验系统结合 MTS 力学试验系统,研究了 CO_2 吸附时间对煤体力学特性及力学参数变化规律的影响;通过工业 CT 扫描和三维重构技术构建了煤体裂隙结构模型,阐明了 CO_2 吸附时间对裂隙结构的影响,并利用 COMSOL 软件开展了 CO_2 在煤体中的流体动力学模拟,探讨了 CO_2 吸附作用下煤体裂隙扩展规律。结果表明:① 不同 CO_2 吸附时间下煤体应力-应变曲线可分为 3 个阶段,受吸附时间影响显著,且峰值强度与弹性模量随吸附时间增加呈下降趋势,最大劣化幅度可达 29.82%,劣化度呈上升趋势,但存在“时效性”,在 5、7 d 时劣化度幅度最大变化仅约 0.5%;② 受到 CO_2 吸附时间的影响煤体裂隙呈由外向内的扩展趋势,且先快后慢,煤体裂隙率及连通度在 7 d 时分别达到 14.03%、1.59;③ CO_2 在煤体内运移方向是由外向内,裂隙与基质间出现的应力集中区会造成裂隙发生扩展,使得煤体结构疏松化、抵抗荷载能力降低。

关键词:CO_2 吸附时间;力学特性;裂隙扩展;CT 扫描;COMSOL

中图分类号:TD 313　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:2096-2193(2024)06-0964-13

Mechanical properties and crack propagation law of coal under different CO_2 adsorption time

WANG Lei[1],WU Yuxuan[1],CHEN Lipeng[1],WANG Yong[2],LIAO Zhipeng[1],YANG Zhenyu[1]

1. State Key Laboratory of Mining Response and Disaster Prevention and Control in Deep Coal Mine, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China;
2. Hefei Design and Research Institute of Coal Industry Co., Ltd, Hefei Anhui 230041, China

Abstract: The structural deformation caused by CO_2 adsorption has a significant effect on the stability of coal seam. The authors studied the effect of CO_2 adsorption time on the mechanical properties of coal and analyzed the variation of mechanical parameters of coal with adsorption time by using the gas-solid coupling test system and the MTS mechanical test system. By using the industrial CT scanning system and 3D reconstruction technology, the authors built a coal crack structure model to clarify the influence of CO_2 adsorption time on the crack structure. Through data interaction with the COMSOL simulation software, the authors carried out the fluid dynamics simulation of CO_2 in coal to discuss the influence of CO_2 adsorption on the crack propagation law of coal. The results show that: ① The stress-strain curves

收稿日期:2024-06-14　　**修回日期**:2024-07-02

基金项目:安徽省科技重大专项(202203a07020010);省属企业国有资本经营预算(HM23719030)

作者简介:王磊(1980—　),男,山东济宁人,博士,教授,主要从事煤矿地下安全开采和深部开采动力灾害等方面的研究工作。Tel:0554-6631588,E-mail:leiwang723@126.com

of coal under different CO_2 adsorption time can be divided into three stages, with each stage significantly influenced by the adsorption time. Both the peak strength and elastic modulus exhibit a decreasing trend as the adsorption time increases, with a maximum reduction up to 29.82%. The degree of deterioration increases correspondingly but shows a time-dependent characteristic. Between 5 and 7 days, the change in the deterioration effect is only about 0.5%, indicating a stabilization trend over time. ② The CT scan results show that the cracks in coal propagate from the outside to the inside, and this trend is influenced by the CO_2 adsorption time, exhibiting a pattern of initially rapid change followed by slower change. At 7 days, the cracking rate and coalescence rate of coal reach 14.03% and 1.59, respectively, indicating that CO_2 has a certain damaging effect on the coal structure. ③ The authors carried out migration modeling for CO_2 on the representative volume element (REV) of coal. The results show CO_2 migrates in coal from the outside to the inside, and there is a stress concentration area between the crack and the matrix, which causes the crack to propagate, resulting in loosened coal structure and reduced load resistance.

Key words: CO_2 adsorption time; mechanical property; crack propagation; CT scan; COMSOL

根据 IPCC 气候变化报告,全球 CO_2 浓度达近 10 年以来最大值,所造成的全球气候问题给人类生存和发展带来了巨大挑战[1-2]。为遏制这一趋势,研究提出了利用废弃矿井进行 CO_2 封存,不仅能够有效地将其存储于地下,还能够驱替煤层内部所赋存的瓦斯气体,实现“封碳增气”的双重效益[3-5]。然而,煤层中 CO_2 吸附会造成煤体基质膨胀[6]。随着吸附时间的增加,这种膨胀作用可能会愈加显著,造成煤层力学性质弱化,影响煤层完整性,尤其在走滑、断层等地质构造情况下,有可能会影响煤层封存 CO_2 效果[7]。因此,探究 CO_2 吸附时间对煤体力学性能及内部结构的影响,可为废弃矿井封存 CO_2 提供一定的理论参考。

当前在 CO_2 对煤体的损伤作用方面出现了丰富的研究成果。ZHOU 等[8]通过对吸附 CO_2 后的煤体进行单轴压缩实验,发现煤体抗压强度均有所下降,降低幅度为 13%~26%,说明 CO_2 对煤体产生了明显的劣化影响;牛庆合[9]通过对煤体开展不同 CO_2 吸附压力下的三轴力学实验,发现煤体力学性质的改变和 CO_2 注入压力有关,且围压对含 CO_2 煤体力学特性劣化具有一定抑制作用;吴韬等[10]通过利用不同准静态应变加载率对比吸附 CO_2 前后的煤岩开展单轴实验,发现吸附 CO_2 后煤体的劣化效果更强;RANATHUNGA 等[11]通过对吸附 CO_2 后的褐煤与烟煤进行单轴压缩,得出随着煤阶的提高,煤体力学性能弱化效应受 CO_2 的影响就越大;杜秋浩[12]、DU 等[13]通过建立理论模型,发现煤体在 CO_2 吸附压力下会出现强度下降,并将 CO_2 注入不同含水率的煤体内部,发现煤体在 CO_2-水的相互作用下力学特性劣化更加明显;LIU 等[14]对注入液态 CO_2 后的煤体开展了单轴压缩试验,得出液态 CO_2 会加剧煤体裂隙增长,使得力学性能劣化的结论。

裂隙变化作为煤岩结构细观损伤的表征参量之一,目前已有多种观测方法可以进行无损检测,如声发射技术、SEM 电镜扫描技术、X 射线立体重构技术、核磁共振技术及工业 CT 扫描技术[15]。工业 CT 扫描技术作为新一代检测手段,不仅可以进行非接触式扫描,还可构建相应的数字岩芯模型进行数值模拟。针对 CT 扫描技术在裂隙表征上的应用,朱红光等[16]借助 CT 扫描技术,通过对同一位置点的密度变化及灰度值分形指标分析了微裂隙演化规律;彭瑞东等[17]利用 CT 扫描技术通过将分形维数与 CT 扫描切片结合,阐述了计盒维数能够较好地描述煤岩的细观破坏过程;李果等[18]利用体分形维数对煤体内部进行了定量分析,得出体分形维数与煤体各参数之间具有较高的关联性。

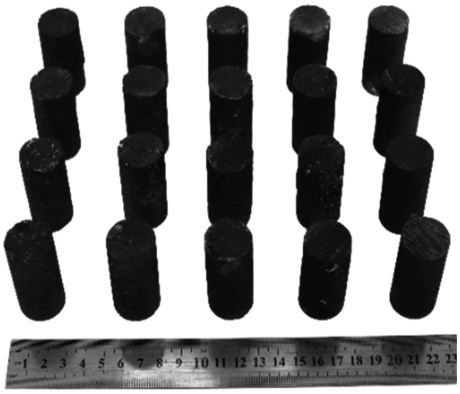
CT 扫描技术普遍采用代表体积元(REV)进行三维重构后的数值模拟。REV 通常被定义为岩体结构的最小单元,具有均质化、计算占比内存小等特点[19],所求解的物理学参数可作为实验尺度、工程尺度下的物理学参数,能较合理地反映实际实验、工程下的岩体特性[20]。ZHOU 等[21]通过应用 CT 成像和三维重构技术、COMSOL 软件,发现煤体抗压强度会随着含水率增加而减少。张村等[22]将 CT 扫描后的重构模型导入 $FLAC^{3D}$ 中,模拟分析了不同宽高比下煤体的强度损伤特征,结果表明,煤体破坏时所释放的能量会随着宽高比的上升而增加。李静等[23]通过对重构后 REV 尺度下的页岩储层岩石开展了岩石塑性损伤的单轴压缩模拟,发现受压状态下损伤会优先从孔隙集中区产生,且拉

伸损伤相较于压缩损伤明显滞后性;李小彬[24]通过对数字岩芯技术结合不同尺度下 REV 选取,探讨了 REV 不同尺度参数对数字岩芯物理学参数的影响。

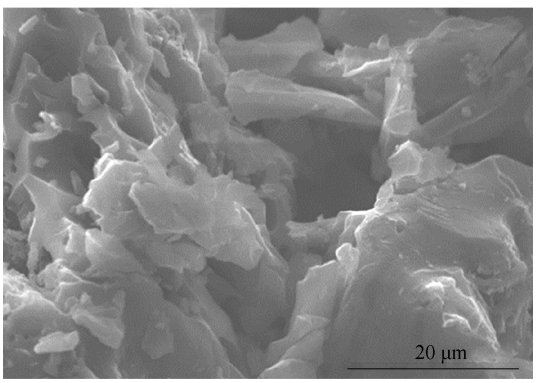
虽然关于 CO_2 作用下不同赋存环境的煤体力学特性及裂隙演化研究已取得了丰富成果,然而,对 CO_2 吸附时间作用下煤体的力学特性变化及 CO_2 在煤体内部的分布所导致的裂隙变化规律的认识,仍需进一步完善。因此,利用 MTS 力学试验系统及自主研发的气-固耦合实验系统对煤体进行单轴压缩实验,分析 CO_2 吸附时间作用对煤体力学特性的影响,并结合工业 CT 扫描技术对不同吸附时间的煤体进行扫描,研究了煤体内部的裂隙扩展发育规律,同时利用 COMSOL 软件模拟了 CO_2 在煤体中的气体分布。

1 试样制备及实验方法

试样取自完整性较好的原煤,使用取芯机对大块原煤进行取芯,取样标准为 ϕ25 mm × 50 mm。为减少端部效应带来的误差,对试样端部进行打磨,保证样品尺寸偏差不大于 1 mm,试样如图 1(a)所示。试样具有孔径不一的多孔结构特征,孔隙呈不规则状,表面形貌粗糙,结构开放性较好,有利于气体在煤体内部流动[25],如图 1(b)所示。



(a) 试样实物



(b) 电镜扫描结果

图 1 试样及微观结构

Fig. 1 Sample and microstructure

采用安徽理工大学深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室自主研发的气-固耦合实验系统[26](图 2),对煤样开展 CO_2 压力 4 MPa、吸附时间 0、1、3、5 和 7 d 的吸附实验[27],采用 3 块平行试样,试验编号设置为 S-m(吸附时间)-x(试样编号),各试样参数见表 1。待达到预设吸附时间后,确保罐体处于密封状态下将其整体移至 MTS 力学试验系统中,对煤体开展保压状态下单轴压缩试验,加载速率设置 0.002 mm/s。

表 1 试样测量参数

Table 1 Measured parameters of coal sample

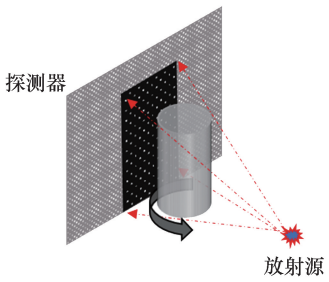
编号	直径/mm	高/mm	质量/g	波速/(km·s^{-1})
S-0-1	25.05	50.1	34.9	1.42
S-0-2	24.98	49.9	35.1	1.46
S-0-3	25.01	50.0	35.4	1.41
S-1-1	24.95	50.0	35.7	1.44
S-1-2	25.02	50.1	35.3	1.45
S-1-3	25.0	49.9	36.1	1.43
S-3-1	24.99	49.8	35.4	1.42
S-3-2	25.26	50.2	35.6	1.41
S-3-3	25.02	50.1	34.7	1.43
S-5-1	25.1	49.9	34.8	1.43
S-5-2	25.05	50.1	35.4	1.40
S-5-3	25.16	50.1	35.2	1.44
S-7-1	24.96	50.2	36.2	1.42
S-7-2	25.03	50.2	36.1	1.45
S-7-3	25.1	50.3	35.8	1.44

图 2 气-固耦合实验系统——吸附罐体结构

Fig. 2 Gas-solid coupling experiment system—adsorption tank structure

为进一步探究 CO_2 吸附时间对煤体裂隙的影响,选取 1 块试样,充入 CO_2 压力后,将罐体安装至 CT 扫描系统内,开展不同吸附时间下的间隔扫描,间隔扫描时间采用与吸附实验相同天数,待吸附至 7 d 后结束扫描试验并对罐体进行泄压处理,保证试验操作的安全性。CT 扫描系统[28]管路电压最高可达 300 kV,电流最大为 3 mA,分辨率可精准到 2 μm 以下,可以有效检测煤体内部裂隙分布及扩展情况,如图 3 所示。根据预试验效果设定具体扫描参数为电压 180 kV、电流 190 μA、采集张数 1 500 张、曝光时间 1 000 ms,且每次扫描参数保持一致。

(a) CT设备实物



(b) CT扫描原理

图 3　高精度工业 CT 扫描系统

Fig. 3　High-precision industrial CT scanning system

2　实验结果与分析

2.1　不同吸附时间下煤体力学特性

不同 CO_2 吸附时间条件下单轴压缩应力-应变曲线如图 4 所示。不同吸附时间下单轴压缩过程均包含压密(OA)、线弹性(AB)和屈服阶段(BC)3 个阶段[29]。各阶段均受到 CO_2 吸附时间影响:在压密阶段(OA),吸附后试样的阶段区间占比均高于未吸附时的试样,且随着吸附时间的增加而不断增大,表明煤体内部结构逐渐疏松化,使得可压缩性提高[30];线弹性阶段(AB),随着吸附时间的增加而缩短,说明煤体在吸附时间作用下弹性性能减弱,抗变形能力下降;屈服阶段(BC),由于线弹性阶段的缩短,使得煤体更容易产生塑性破坏。

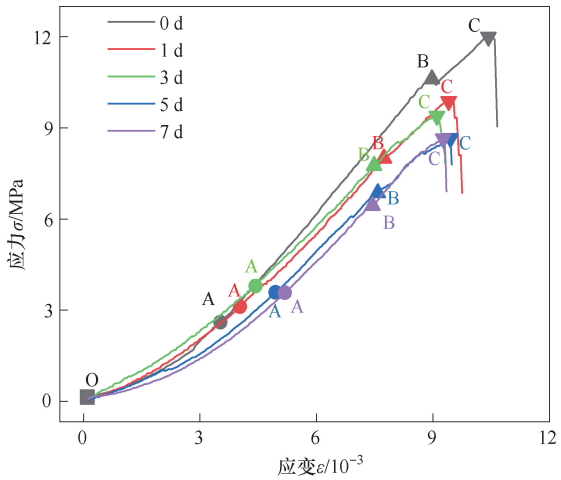


图 4　不同吸附时间下煤体应力-应变曲线

Fig. 4　Stress-strain curves of coal under different adsorption time

根据图 4,可获取各条件下平行试样峰值强度与弹性模量等特征参数,结果见表 2。煤体在吸附 CO_2 后,力学参数均有不同程度的劣化,随着吸附时间由 0 d 增长至 7 d,煤体峰值强度和弹性模量平均值各降低了 3.19、0.52 GPa。为进一步表征 CO_2 对煤体力学参数的劣化作用,引入劣化度[31]:

$$D_t = \frac{T_0 - T_i}{T_0} \times 100\% \tag{1}$$

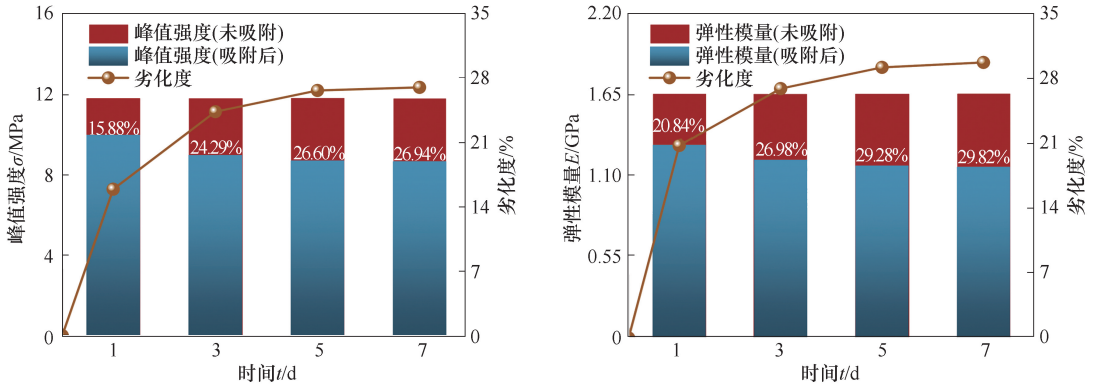
式中,D_t 为不同 CO_2 吸附时间作用下煤体力学参数劣化度;T_0 为未吸附 CO_2 的试样平均力学参数;T_i 为不同 CO_2 吸附时间下的试样平均力学参数;t、i 分别为对应劣化度与平均力学参数下的不同吸附时间,d。

表 2　不同吸附时间下煤体物理特征参数结果

Table 2　Physical and mechanical parameters of coal under different adsorption time

编号	峰值强度/MPa	峰值强度平均值/MPa	弹性模量/GPa	弹性模量平均值/GPa
S-0-1	11.81		1.68	
S-0-2	11.72	11.84	1.64	1.66
S-0-3	11.99		1.66	
S-1-1	9.99		1.31	
S-1-2	9.92	9.96	1.29	1.31
S-1-3	9.97		1.32	
S-3-1	8.92		1.21	
S-3-2	8.96	8.96	1.22	1.21
S-3-3	9.00		1.19	
S-5-1	8.71		1.16	
S-5-2	8.68	8.69	1.19	1.17
S-5-3	8.69		1.18	
S-7-1	8.66		1.16	
S-7-2	8.64	8.65	1.17	1.16
S-7-3	8.65		1.15	

相较于第 0 d 煤体峰值强度与弹性模量,吸附后均有所下降,二者劣化度分别从 15.88%、20.84%上升至 26.94%、29.82%,体现出 CO_2 吸附时间对煤体存在损伤加剧的影响,如图 5 所示。



(a) 峰值强度劣化度 (b) 弹性模量劣化度

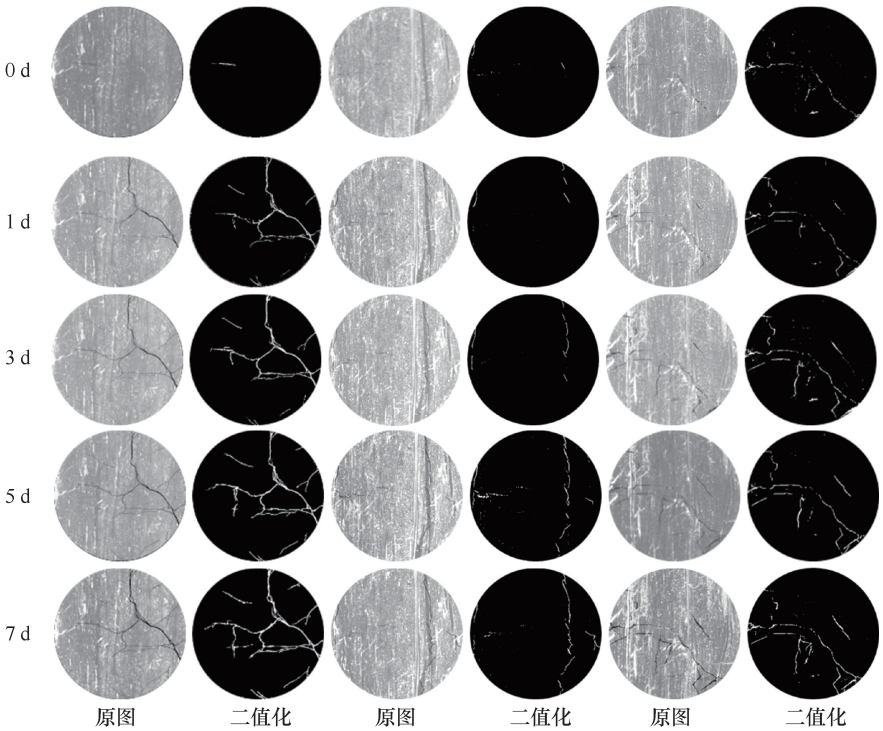
图 5 特征参数与吸附时间的关系

Fig. 5 Relationship between characteristic parameters and adsorption time

当吸附时间为 1 d 时,煤体峰值强度和弹性模量下降幅度最大,二者劣化度分别为 15.88%、20.84%;当吸附时间为 5、7 d 时,CO_2 对煤体的影响程度呈现出相对平缓的上升趋势,劣化度幅度最大变化仅约 0.5%,表明 CO_2 吸附作用在 1 d 时劣化效果最强,并以 1 d 为转折点开始逐步减缓。究其原因,当 0、1 d 时煤体内部与外部 CO_2 存在相对较高的压力差,导致 CO_2 大量进入煤体内部,破坏了煤体原有的稳定性;而在吸附至 1 d 后,煤体与环境压力差逐步减少,CO_2 在煤体内的运移会逐渐减缓,使得煤体结构在后续时间内变化趋势逐渐降低,进入新的稳定平衡状态。此外,峰值强度和弹性模量的劣化趋势还表现出了一致性,说明煤体吸附 CO_2 后抗压及抗变形性能均发生衰减,煤体更容易达到破坏临界条件。总之,随着 CO_2 吸附作用时间的延长,煤体力学特性进一步劣化,同时这种劣化作用效果又会逐渐减弱,表明了 CO_2 对煤体力学劣化的时效性。

2.2 不同吸附时间下二维裂隙演化规律

为便于观察,以试样轴向为基准选取上、中、下三层切片图,并对 CT 扫描后的切片进行二值化处理[32],结果如图 6 所示。原图中,黑色区域代表煤



(a) 上层面 (b) 中层面 (c) 下层面

图 6 不同吸附时间下煤体 CT 扫描切片

Fig. 6 CT scan sections of coal at different adsorption times

体裂隙;灰色区域代表基质;白色区域代表不同矿物组分;二值化中,白色代表裂隙,黑色代表基质和矿物等无关信息。

由图 6 可看出,随着煤体吸附时间的增加,煤体内部原生裂隙不断扩展,新生裂隙开始萌发,裂隙分布逐渐复杂化。在吸附 1 d 后,原生裂隙扩张与新生裂隙萌发程度相对其他时间的更明显,越靠近煤体轴向/切向外部,新生裂隙越容易萌发,表现出裂隙由外向内的发展趋势;虽然在靠近煤体轴心处也出现少量的新生裂隙,但这种内部新生裂隙通常会伴生于原生裂隙附近,并逐渐与原生裂隙连通;当吸附至 3、5、7 d 时,原生裂隙发育变化趋势减缓,新生裂隙发生扩展,各裂隙间开始连通,形成单一连通裂隙[图 6(b)]或相对复杂的裂隙网[图 6(a)(c)];还可以发现,吸附时间在 5、7 d 时,裂隙扩展变化不再明显,煤体各裂隙间基本连通。

由于煤体裂隙的扩展演化过程具有统计自相似性特征,因此利用分形维数可以有效地量化分析裂隙的复杂程度。基于计盒维数法,通过设定不同大小的盒子覆盖整个损伤区,计算每一个盒子内裂隙的个数,可定量表征裂隙的复杂度[33]:

$$A_g = \frac{\ln(N_\alpha)}{\ln(1/\alpha)} \tag{2}$$

式中,A_g 为计盒维数求解数值;N_α 为盒子数量;α 为盒子半径,mm。

通过 MATLAB 软件逐层计算试样切片的分形维数,结果如图 7 所示。可见,试样在同一吸附时间作用下各切片层数分形维数表现出两边上翘、中部下沉的下凹曲线分布特点,且随着吸附时间的增加,这种下凹程度逐步减缓,说明煤体中部区域裂隙复杂度上升,整体损伤加剧。相较于未吸附时的分形维数,越靠近煤体两端的切片分形维数变化越明显,同时,在位于 200~400、440~600、650~820 层数内,初始分形维数 1.0 的区域在吸附至 3 d 时,200~400 切片层的分形维数变化先于 440~600、650~820 层,说明煤体的裂隙发育趋势具有由轴向两端面朝轴向中部发展的特征。

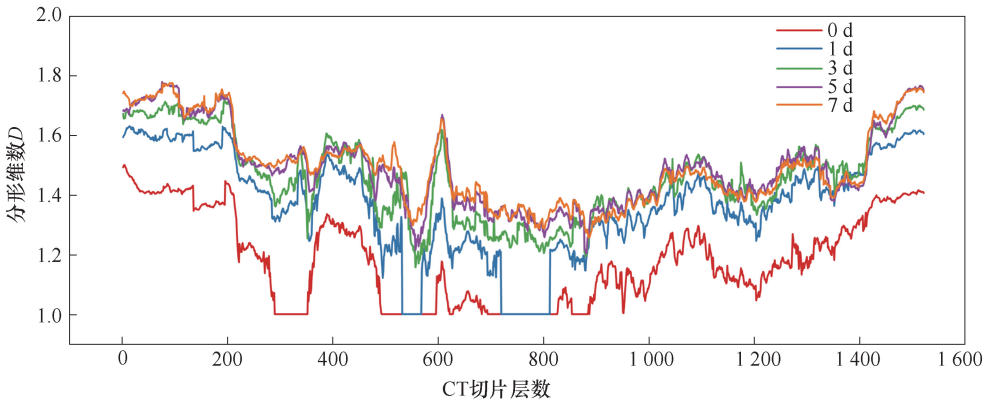


图 7　分形维数分布

Fig. 7　Distribution of fractal dimensions

不同吸附时间下曲线分布所出现的异常情况:① 曲线交叉,不同 CO_2 吸附时间下二维分形维数几乎重合在一块,是由于切片裂隙变化程度轻,分形维数变化小所造成的;② 曲线反涨,分形维数不增反降,是因为该部分裂隙因基质膨胀发生挤压闭合,使得较大裂隙挤压为细小裂隙甚至闭合而造成该区域裂隙复杂度降低,同时,细小裂隙扩展贯通合并为单一较大裂隙,多裂隙分布变为单一裂隙分布而使得分形维数下降,也造成裂隙复杂程度降低。

进一步对各时间下分形维数均值分析可知,随着吸附时间的增加,分形维数的整体均值上升幅度达到 26.54%,说明 CO_2 对煤体具有明显的劣化作用,且在吸附初期阶段(0、1 d)呈最大上升幅度,变化达到了 15.70%;吸附 1 d 后,分形维数在 5、7 d 时上升幅度变化仅有 0.38%,如图 8 所示。这表明,在 CO_2 作用下煤体内部裂隙复杂化程度会随着时间增长而加剧,但裂隙发育趋势逐步减缓。

2.3　不同吸附时间下三维裂隙演化规律

煤样的二维切片(图 6)存在一定的局限性,所反映的信息仅代表某一层面的裂隙扩展特征,难以对三维裂隙的空间分布特点进行呈现。为更细致地描述煤体裂隙在不同条件下的发育情况,将不同吸附时间下二维切片文件导入 CT 扫描后处理软件进行处理。

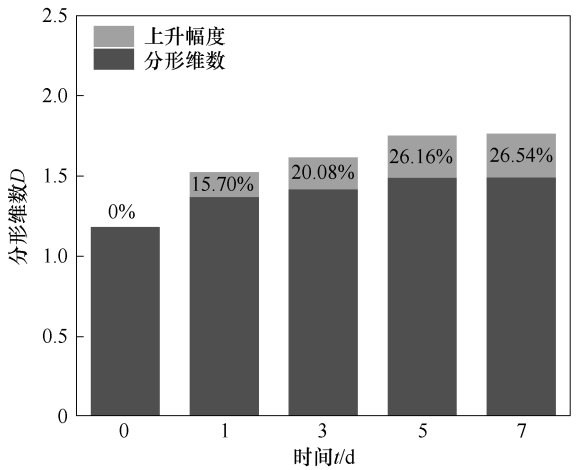


图 8 裂隙分形维数均值随时间的变化

Fig. 8 Change of the mean fractal dimension of cracks over time

为保证多次扫描模型处于同一坐标下,采用 CT 扫描后处理软件的图像矫正功能对图片位置校准;利用降噪滤波处理提高图像对比度,保证切片在进行分水岭阈值分割时具有较好的阈值边界;根据分水岭算法标定裂隙阈值为 8 451,进行裂隙-基质划分并提取裂隙区域,即感兴趣区域(ROI);通过 CT 扫描后处理软件的体积绘制渲染功能对提取的 ROI 进行堆叠重构渲染处理,获取不同吸附时间下三维裂隙演化过程,如图 9 所示。

图 9 三维裂隙演化

Fig. 9 3D crack evolution

从图 9 可以看出,煤体内部的原生裂隙分布较为离散,裂隙多呈现出不规则态,表现出明显的各向异性;当吸附 CO_2 后,煤体内部裂隙不仅有原生裂隙的扩展,还出现了不同大小的新生裂隙,且随着时间的增加,新生裂隙和原生裂隙扩张程度普遍加深,并最终相互连通,形成分布相对复杂的裂隙网络;此外,5、7 d 时的裂隙变化程度相较于 0、1 d 不明显,这与二维裂隙扩展规律中时间作用对裂隙发育呈先骤增后缓增的特点基本相符。结合图 7 不仅可以看出三维裂隙的分布复杂程度与各切面的二维分形维数曲线分布大致吻合,还可以更直观地看出轴向两端裂隙复杂度高于中部的裂隙扩展规律,同时,三维裂隙还呈现出切向外部裂隙先于切向内部裂隙扩展的现象,结合轴向和切向裂隙扩展规律,说明在 CO_2 吸附时间作用下,裂隙扩展呈现出由外向内的发育趋势。

为定量分析吸附时间对煤体裂隙扩展结构规律的影响,从裂隙图像中提取三维裂隙体积并计算裂隙率。裂隙率通常利用煤样的裂隙体积与其总体积的比值来进行表征[34]:

$$q = \frac{V_m}{V} \times 100\% \tag{3}$$

式中,q 为试样的裂隙率;V_m 为试样内部裂隙总体积,cm^3;V 为煤样的总体积,cm^3;m 为对应裂隙体积下的不同吸附时间,d。

引入三维裂隙连通系数对试样裂隙扩展连通性进行评价[35]:

$$c = \frac{V'_m}{V} \times 100\% \tag{4}$$

式中,c 为试样的三维连通系数,值越大代表裂隙连通性越高;V'_m 为连通裂隙体积,cm^3。

使用 CT 扫描后处理软件对试样内部信息进行处理,提取其裂隙体积(表 3),并根据式(3)、式(4)计算并得到在不同 CO_2 吸附时间下的裂隙扩展规律,如图 10 所示。

表 3 不同吸附时间下煤体三维裂隙总体积及连通裂隙体积

Table 3 Total volume of 3D cracks and coalesced crack volume of coal at different adsorption time

时间/d	试样总体积/cm^3	裂隙总体积/cm^3	连通裂隙体积/cm^3
0		0.034	0.002
1		1.990	0.070
3	24.28	2.870	0.260
5		3.310	0.350
7		3.410	0.380

未吸附 CO_2 状态下的裂隙体积为 0.034 cm^3,裂隙率与连通系数分别为 0.14%、0.008,说明初始状态下试样内部不存在大范围的裂隙,裂隙分布零散,几乎无连通。随着 CO_2 吸附时间增加,试样内部裂隙体积开始扩展,裂隙体积分别为初始体积的 58.53、84.32、97.19、100.23 倍。同时,裂隙率和连通系数也在不同时间作用下呈现出不同的变化

趋势,0、1 d 时,裂隙率变化最大,幅度为 8.05%,但连通系数却在 1、3 d 时变化最大,幅度达到 0.79;在 7 d 时,二者数值达到最大,分别为 14.03%和 1.59。这表明:在 0、1 d 时,裂隙多为新生裂隙萌发和原生裂隙扩展,此时裂隙分布相对离散,未能有效连通;至 3 d 时,裂隙扩展进一步加深,各裂隙之间开始逐步连通,使得连通系数开始上升;至 7 d 时,随着单一裂隙体积的增加,导致试样相邻区域裂隙煤体连通性更强,多条体积相对较大的裂隙更容易合并成一条体积更大的裂隙。因此,煤体内部裂隙体积及裂隙间的连通性会随着吸附时间的推移而加大。

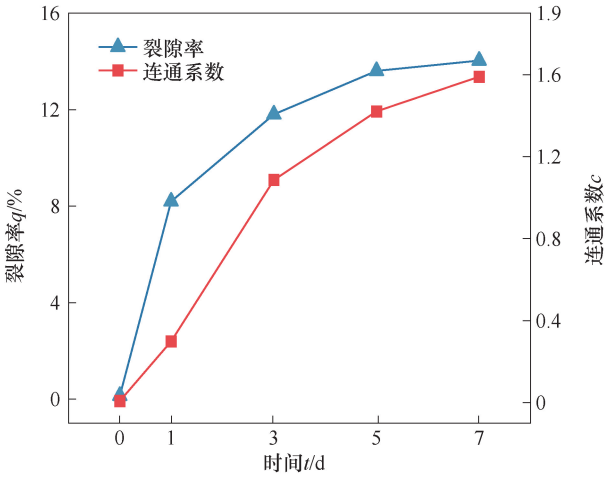


图 10　CO_2 吸附时间下的裂隙扩展规律

Fig. 10　Crack propagation law under different CO_2 adsorption time

3　讨　论

尽管上述分析得出 CO_2 对煤体裂隙演化存在一定影响,并造成力学特性劣化加剧的情况,但现有手段对于 CO_2 在煤体内的分布情况难以有效度量。因此,通过工业 CT 扫描重构的数字岩芯与 COMSOL 软件数据对接技术,还原 CO_2 在煤体内部的分布状态,以探究 CO_2 吸附时间对煤体的劣化作用机制。

3.1　数字岩芯重构及 COMSOL 软件数据对接

通过 CT 扫描后处理软件对煤体进行三维重构时,由于扫描所产生的微小噪点会被误构成大量的独立微孔(图 11),且裂隙开度相较于煤体过于狭窄,极易形成裂隙面相接,使得模拟计算报错,因此引入体积元(REV)对煤体进行裁剪。利用裂隙率与数字图像裁剪尺寸之间的变化关系得到 REV 分析结果,如图 12 所示。随着立方体尺寸的增大,裂隙率逐渐减小,且在 60 体素时开始逐渐趋于稳定。采用梯度误差分析法可以有效消除不合理 REV 尺寸对仿真结果的影响[36]。当梯度误差相对稳定并趋于 0 时,最小模型尺寸为 REV 尺度,梯度误差 e_r 可表示为[37]

$$e_r = \frac{k_{j+1} - k_{j-1}}{\delta(k_{j+1} + k_{j-1})} \tag{5}$$

式中,k_{j+1}、k_{j-1} 分别为 $j+1$、$j-1$ 个样本对应的输出;δ 为相邻样本间的输出值差异。

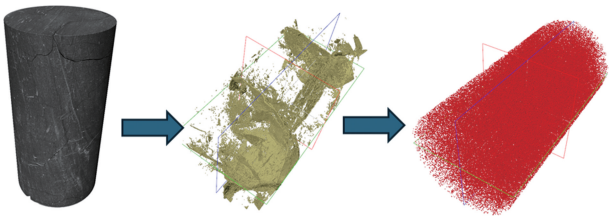


图 11　数字岩芯噪点提取

Fig. 11　Noise extraction for digital rock core

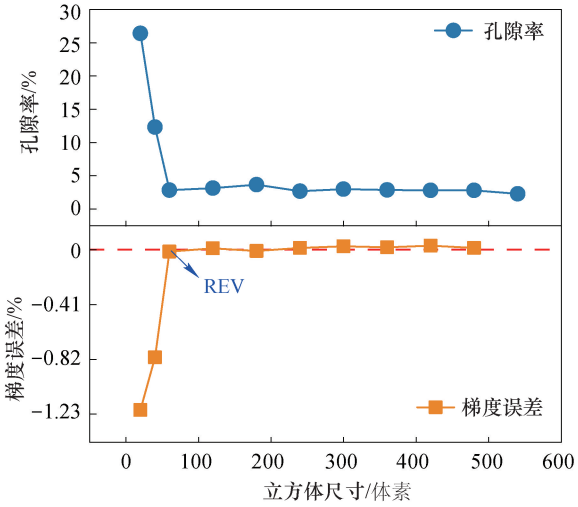


图 12　REV 分析结果

Fig. 12　REV analysis results

根据梯度误差结果可知,当立方体尺度为 60 体素时,梯度误差开始稳定,因此将仿真模型 REV 尺寸设定为 60 体素×60 体素×60 体素。

进行煤体重构时,内部裂隙结构通常存在 3 种[38],即 Ⅰ 型连通裂隙、Ⅱ 型内部孤立裂隙与 Ⅲ 型单边界接触孤立裂隙,如图 13 所示。但除了 Ⅰ 型裂隙外,其余裂隙类型会将基质域分割为多个零散区域,造成解算冗余并使得计算结果的步调不一致。因此,需要对这类孤立裂隙进行预处理,如图 14 所示。

COMSOL 软件模拟核心是利用有限元分析将复杂几何划分成一个个简单的网格单元进行离散化计算。因此,需对裁切后的 REV 进行网格划分(图 15)。考虑到本试验基于基质与裂隙条件下的

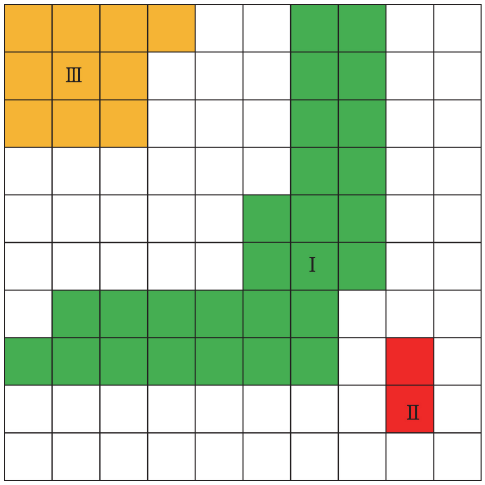
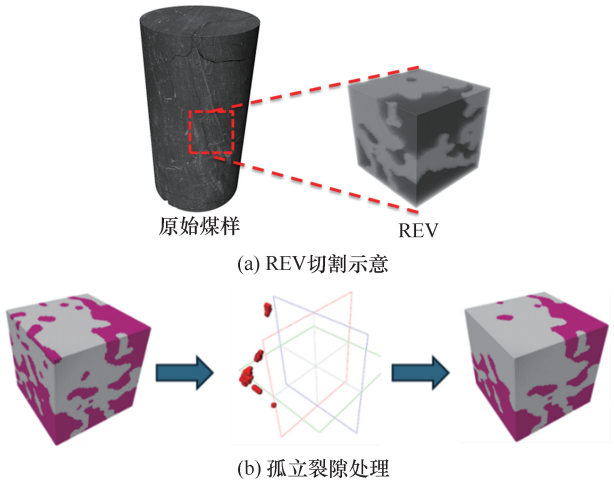


图 13 裂隙连通性示意图[38]

Fig. 13 Schematic diagram of crack coalescence



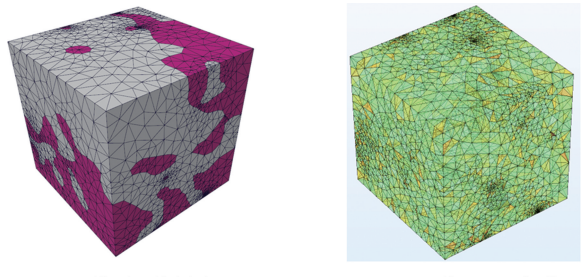
(a) REV切割示意

(b) 孤立裂隙处理

图 14 模型裂隙预处理

Fig. 14 Model crack pretreatment

CO_2 气体分布仿真,因此将煤体内部的矿物作为基质的一部分,整体划分为裂隙和基质两部分。利用网格质量可视化[图 15 (b)]检测网格有无 0 值色块,若发现低质量网格,则需要二次修复与优化,直至模型实体无红色网格时,模型网格划分才具备模拟运算的可行性。



(a) 模型网格划分 (b) 网格质量可视化

图 15 数字岩芯网格化处理

Fig. 15 Meshing of digital rock core

3.2 CO_2 吸附时间对煤体裂隙扩展的影响

由于基质内部的气体流动可以视为缓慢流动,CO_2 在内部的流动规律符合达西定律[39]:

$$u = -\frac{\kappa}{\mu}\nabla p \tag{6}$$

式中,κ 为渗透率,m^2;μ 为流体动力黏度,Pa·s;∇ 为 Hamilton 算子;p 为压力,Pa。

假定 Z 轴为气体运移方向,模型的边界条件设定为 2 个相对面作为压力入口与压力出口,剩余 4 个面设定为自由滑移壁面,内壁面则设定为无滑移壁面,如图 16 所示。在 COMSOL 软件中,流体模块设置基本参数采用瞬态求解器进行解算,设定时间步长为(0,1,7),关键参数设定见表 4。

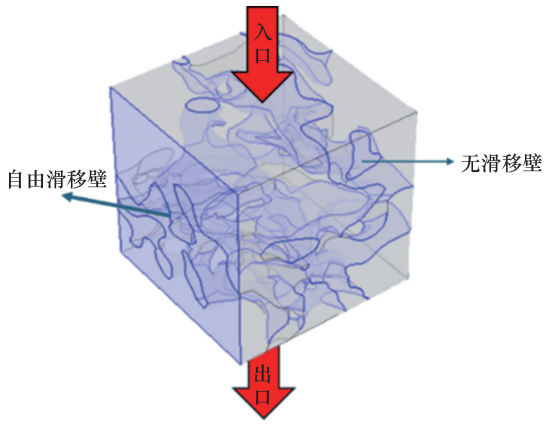


图 16 边界设置示意图

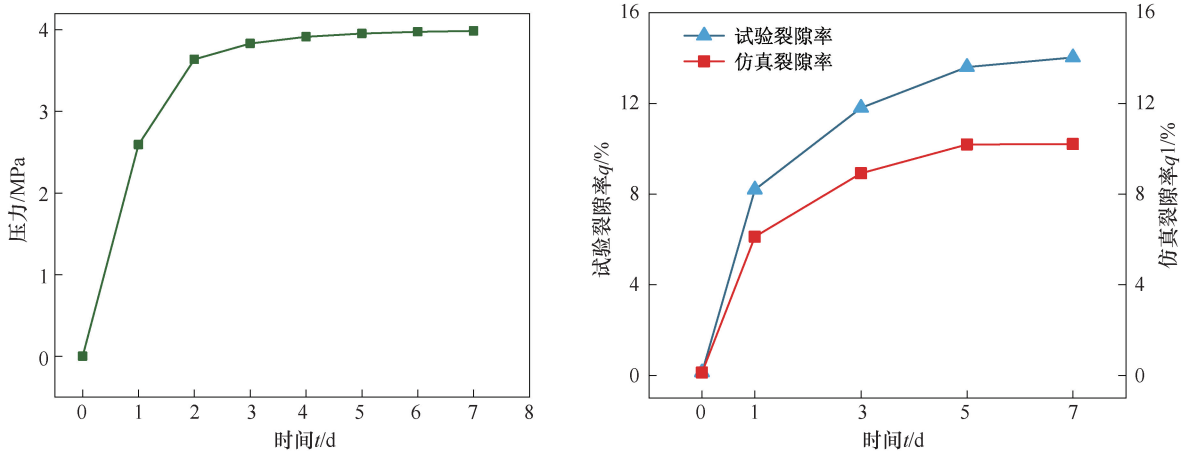
Fig. 16 Schematic diagram of boundary setting

表 4 仿真关键参数设定

Table 4 Setting of key simulation parameters

渗透率 κ_0/m^2	流体密度 ρ_w/($kg \cdot m^{-3}$)	动力黏度 μ/(Pa·s)	入口压力 p_{in}/MPa	出口压力 p_{out}/MPa
1×10^{-18}	1.784	1.380×10^{-5}	4	0

利用 COMOSL 软件中的积分模块结合区域探针计算基质内部 CO_2 压力变化趋势与内部裂隙率变化趋势,结果如图 17(a)所示。REV 吸附模型在 0~2 d 时压力呈现出快速上升趋势,3、5、7 d 时变为平缓,表明 REV 内部吸附时间在 7 d 时能够达到试验所需的吸附平衡状态;对比试验与仿真结果中的裂隙率数据[图 17(b)]可以发现,真实煤样的裂隙率相对偏大,二者最大偏差约为 3.82%,主要是由于 REV 考虑新生裂隙的萌发,所产生的裂隙体积仅有初始裂隙的扩展,因此数值会小于真实数据,但整体变化趋势及数据量级与试验数据基本一致,表明仿真结果具备一定的参考价值。



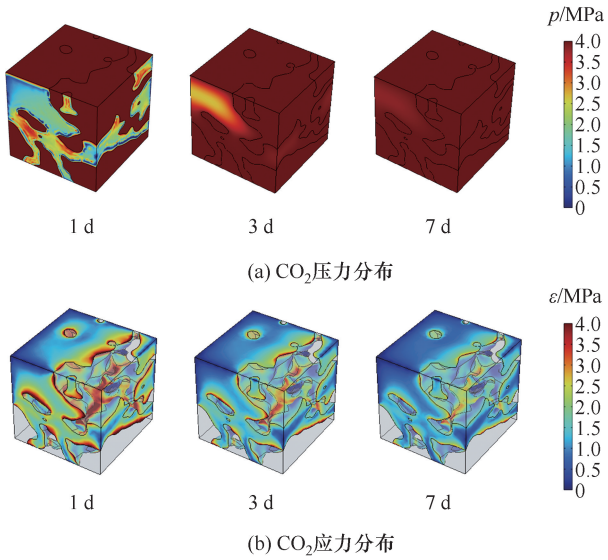
(a) 煤体内部CO_2压力变化趋势　　(b) 裂隙率变化趋势对比

图 17　仿真计算结果

Fig. 17　Simulation results

采用后处理模块构建不同条件下的气体压力场与应力分布,结果如图 18 所示。在吸附初期(0、1 d)REV 基质中的 CO_2 压力覆盖范围要远低于裂隙,吸附至 7 d 时,基质内 CO_2 压力才全部覆盖,表现出煤体基质对 CO_2 的运移具有一定的阻碍作用。同时分析气体作用在基质-裂隙边界处的应力分布[图 18(b)]可以看出,在吸附初期阶段由于裂隙内大量的 CO_2 涌入对基质形成边界应力集中效应,进而发生裂隙扩展,但伴随着 CO_2 吸附后期在基质内的覆盖范围增大,内部开始发生膨胀效应;这种膨胀应力会逐步加大并与裂隙外部挤压应力形成一对反作用力,造成裂隙-基质边界处的应力随吸附时间减弱。此外,通过仿真后期的应力分布[图 18(b)]可见,尽管吸附初期裂隙膨胀所造成的体积扩展会被后期的基质膨胀影响,但挤压应力仍然占优,因而基质膨胀后煤体内裂隙不减反增。通过对比仿真结果(图 17)中整体 CO_2 吸附饱和曲线及在基质内的运移特性与宏-细劣化趋势发现,二者变化趋势具有一定程度的相似性,表明煤体内部劣化是由于随着吸附时间增加内部 CO_2 压力变化所造成的。

结合上述不同 CO_2 吸附时间下的煤体裂隙发育趋势与力学强度变化规律及 REV 仿真结果,其宏观过程表现为:① 在吸附前期,基质内的 CO_2 缓慢向内部覆盖,当遇到内部原生裂隙边界时,CO_2 压力会快速涌入裂隙内部,造成裂隙压力整体高于附近基质区域,进而发生扩展;当吸附至中后期时,裂隙附近区域基质 CO_2 压力与裂隙内基本一致时,裂隙发育趋势逐渐平缓,且裂隙发育的空间变化与基质中 CO_2 的运移方向具有一致性,即裂隙扩展呈现由外向内的扩展规律。② 在煤体静力学方面,随着吸附时间增长,由于整体裂隙率的增大,煤体整体劣化程度加剧,使得煤体结构在受载前逐渐疏松,并在受载状态下压密阶段占比增大,抗压性能开始下降;同时,由于煤体与外部环境间的压力差不断减小,导致裂隙所带来的力学劣化效果也随之减弱。



(a) CO_2压力分布

(b) CO_2应力分布

图 18　CO_2不同分布状态仿真结果

Fig. 18　Simulation results of CO_2 at different distribution states

4　结　论

针对不同 CO_2 吸附时间作用下的煤体,利用自主研发的气-固耦合实验系统与 MTS 力学试验系统开展了单轴压缩试验,分析了其煤体力学参数随吸附时间变化的规律。通过工业 CT 扫描与三

维重构技术,探讨了 CO_2 吸附时间对煤体裂隙结构的影响。同时,利用 COMSOL 软件开展了 CO_2 在煤体中的流体动力学模拟,研究了 CO_2 吸附作用下煤体裂隙的扩展规律。得到主要结论如下:

(1) 吸附 CO_2 煤体的应力-应变曲线与未吸附煤体具有类似的形态,但随 CO_2 吸附时间增加,压密阶段占比增加,线弹性阶段会缩短,屈服阶段屈服点不断前移。煤体的抗压强度及弹性模量均呈下降趋势,而二者劣化度均表现出上升趋势,最大可至 26.94%、29.82%,劣化度增幅降低,最小幅度变化仅 0.5%,说明 CO_2 吸附对煤体损伤劣化作用具有一定的"时效性"。

(2) 煤体内部的裂隙扩展受 CO_2 吸附时间影响显著。不同 CO_2 吸附时间作用下裂隙扩展呈现靠近轴、切向外部的裂隙发育程度更高,裂隙由外向内的发育趋势,且其变化在 0~1 d 内最大,变化幅度 8.05%;吸附至 5~7 d 时降至最低,仅 0.4% 的涨幅。裂隙体积及连通程度随着吸附时间的增加而逐渐加大,连通度最高可至 1.59,表明 CO_2 对煤体结构具有损伤作用。

(3) 随吸附时间增加,CO_2 由外向内进行运移,原始裂隙与基质间形成应力集中区,使得煤体裂隙发生扩展。随着 CO_2 向下运移,裂隙附近区域基质压力上升,导致基质-裂隙边界处出现应力下降。吸附饱和时,裂隙与基质间压力差进一步降低,裂隙体积增幅降低,煤体损伤加剧导致力学性能衰减。

参考文献

[1] CALVIN Katherine, DASGUPTA Dipak, KRINNER Gerhard, et al. IPCC, 2023: climate change 2023: synthesis report. Contribution of working groups i, ii and iii to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2023.

[2] 钱鸣高,缪协兴,许家林. 资源与环境协调(绿色)开采[J]. 煤炭学报,2007,32(1): 1-7.
QIAN Minggao, MIAO Xiexing, XU Jialin. Green mining of coal resources harmonizing with environment[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(1): 1-7.

[3] 袁亮,张通,张庆贺,等. 双碳目标下废弃矿井绿色低碳多能互补体系建设思考[J]. 煤炭学报,2022,47(6): 2131-2139.
YUAN Liang, ZHANG Tong, ZHANG Qinghe, et al. Construction of green, low-carbon and multi-energy complementary system for abandoned mines under global carbon neutrality[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(6): 2131-2139.

[4] 李龙龙,方惠军,葛腾泽,等. 煤炭地下气化腔 CO_2 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. CO_2 sequestration in ucg cavities: research progress and future development trends[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2023, 55(3): 732-743.

[5] 祖秉辉,李长松. "双碳"背景下煤炭生产企业碳减排路径研究[J]. 矿业科学学报, 2024, 9(3): 464-474.
ZU Binghui, LI Changsong. Research on carbon emission reduction pathways for coal production enterprises to meet the "dual carbon" targets[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2024, 9(3): 464-474.

[6] SINGH R K, NAYAK N P, KUMAR S. Effect of microfractures on gas flow behavior in coal for enhanced coal bed methane recovery and CO_2 storage[J]. Heliyon, 2024, 10(4): e25914.

[7] 吴江莉,马俊杰. 浅议 CO_2 地质封存的潜在风险[J]. 环境科学导刊,2012,31(6): 89-93.
WU Jiangli, MA Junjie. A discussion about potential risks of geological storage of CO_2[J]. Environmental Science Survey, 2012, 31(6): 89-93.

[8] ZHOU W, GAO K, XUE S, et al. Experimental study of the effects of gas adsorption on the mechanical properties of coal[J]. Fuel, 2020, 281: 118745.

[9] 牛庆合. 超临界 CO_2 注入无烟煤力学响应机理与可注性试验研究[D]. 徐州: 中国矿业大学,2019.
NIU Qinghe. Experimental study on mechanical response mechanism and injectability of anthracite injected with supercritical CO_2[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.

[10] 吴韬,梁卫国,于永军,等. 超临界 CO_2 浸泡作用下煤岩力学特性应变率效应实验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2023,42(11):2727-2738.
WU Tao, LIANG Weiguo, YU Yongjun, et al. Experimental study of loading strain rate effect on mechanical properties of the supercritical CO_2 soaked coal rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(11): 2727-2738.

[11] RANATHUNGA A S, PERERA M S A, RANJITH P G, et al. Super-critical CO_2 saturation-induced mechanical property alterations in low rank coal: an experimental study[J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2016, 109: 134-140.

[12] 杜秋浩. CO_2-水-煤作用对煤渗透性和力学特性影

响的试验研究[D]. 北京: 清华大学,2019.
DU Qiuhao. Experimental study on the influence of CO_2-water-coal interaction on coal permeability and mechanical properties[D]. Beijing: Tsinghua University,2019.

[13] DU Q H,LIU X L,WANG E Z,et al. Strength reduction of coal pillar after CO_2 sequestration in abandoned coal mines[J]. Minerals,2017,7(2): 26.

[14] LIU X F,JIA X Q,NIU Y,et al. Alterations in coal mechanical properties and permeability influenced by liquid CO_2 phase change fracturing[J]. Fuel, 2023, 354: 129254.

[15] 杨更社,申艳军,贾海梁,等. 冻融环境下岩体损伤力学特性多尺度研究及进展[J]. 岩石力学与工程学报,2018,37(3): 545-563.
YANG Gengshe, SHEN Yanjun, JIA Hailiang, et al. Research progress and tendency in characteristics of multi-scale damage mechanics of rock under freezing-thawing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2018,37(3): 545-563.

[16] 朱红光,谢和平,易成,等. 岩石材料微裂隙演化的 CT 识别[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(6): 1230-1238.
ZHU Hongguang, XIE Heping, YI Cheng, et al. Ct identification of microcracks evolution for rock materials [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2011,30(6): 1230-1238.

[17] 彭瑞东,杨彦从,鞠杨,等. 基于灰度 CT 图像的岩石孔隙分形维数计算[J]. 科学通报,2011,56(26): 2256-2266.
PENG Ruidong,YANG Yancong,JU Yang,et al. Computation of fractal dimension of rock pores based on gray CT images[J]. Chinese Science Bulletin,2011,56(26): 2256-2266.

[18] 李果,张茹,徐晓炼,等. 三轴压缩煤岩三维裂隙 CT 图像重构及体分形维研究[J]. 岩土力学,2015,36(6): 1633-1642.
LI Guo,ZHANG Ru,XU Xiaolian,et al. CT image reconstruction of coal rock three-dimensional fractures and body fractal dimension under triaxial compression test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(6): 1633-1642.

[19] XIA L,ZHENG Y H,YU Q C. Estimation of the REV size for blockiness of fractured rock masses[J]. Computers and Geotechnics,2016,76: 83-92.

[20] 高艳华. 等效岩体 REV 确定及节理力学行为研究[D]. 北京: 北京科技大学,2016.
GAO Yanhua. Determination of equivalent rock mass REV and study on joint mechanical behavior[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing,2016.

[21] ZHOU X P,JIANG D C,ZHAO Z. Digital evaluation of micro-pore water effects on mechanical and damage characteristics of sandstone subjected to uniaxial,cyclic loading-unloading compression by 3D reconstruction technique[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022,55(1): 147-167.

[22] 张村,方尚鑫,贾胜,等. 基于 CT 扫描的三维重构煤体加载损伤演化特征及尺寸效应[J]. 矿业科学学报,2024,9(3):413-425.
ZHANG Cun, FANG Shangxin, JIA Sheng, et al. Damage evolution characteristics of 3D-reconstructed coal during loading and its size effects based on CT scanning[J]. Journal of Mining Science and Technology,2024,9(3):413-425.

[23] 李静,刘晨,刘惠民,等. 基于数字岩心的页岩储层岩石细观损伤机制研究[J]. 岩石力学与工程学报,2022,41(6): 1103-1113.
LI Jing,LIU Chen,LIU Huimin,et al. Study on meso-damage mechanism of shale reservoir rock based on digital cores[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2022,41(6): 1103-1113.

[24] 李小彬. 基于三维数字岩心的岩石孔隙结构表征及弹渗属性模拟研究[D]. 武汉: 中国地质大学,2021.
LI Xiaobin. Characterization of rock pore structure and simulation of elastic-permeability properties based on three-dimensional digital cores[D]. Wuhan: China University of Geosciences,2021.

[25] 李骐. 含瓦斯煤蚀损效应及扩容致灾机制研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京),2021.
LI Qi. Study on erosion effect of gas-bearing coal and disaster-causing mechanism of expansion[D]. Beijing: China University of Mining and Technology-Beijing,2021.

[26] 王磊,陈礼鹏,谢广祥,等. CO_2-荷载耦合作用下煤体细观统计损伤本构模型及验证[J]. 煤炭学报,2024,49(6): 2630-2642.
WANG Lei,CHEN Lipeng,XIE Guangxiang,et al. Meso-statistical damage constitutive model and validation of coal under CO_2-load coupling[J]. Journal of China Coal Society,2024,49(6): 2630-2642.

[27] ZHANG G L,RANJITH P G,LI Z S,et al. Long-term effects of CO_2-water-coal interactions on structural and mechanical changes of bituminous coal[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering,2021,207: 109093.

[28] 王磊,陈礼鹏,刘怀谦,等. 不同初始瓦斯压力下煤体动力学特性及其劣化特征[J]. 岩土力学,2023,44(1): 144-158.

WANG Lei, CHEN Lipeng, LIU Huaiqian, et al. Dynamic behaviors and deterioration characteristics of coal under different initial gas pressures[J]. Rock and Soil Mechanics,2023,44(1): 144-158.

[29] 刘保县,黄敬林,王泽云,等. 单轴压缩煤岩损伤演化及声发射特性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(S1): 3234-3238.
LIU Baoxian, HUANG Jinglin, WANG Zeyun, et al. Study on damage evolution and acoustic emission character of coal-rock under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009,28(S1): 3234-3238.

[30] LARSEN J W. The effects of dissolved CO_2 on coal structure and properties[J]. International Journal of Coal Geology,2004,57(1): 63-70.

[31] 张小强,王文伟,姜玉龙,等. 超临界 CO_2 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.

[32] 刘高峰,关文博,张震,等. 基于 CT 扫描的 CO_2 相变致裂煤裂隙演化特征[J]. 矿业科学学报,2024,9(3):342-350.
LIU Gaofeng,GUAN Wenbo,ZHANG Zhen, et al. Evolution characteristics on coal fractures induced with CO_2 phase transition fracturing based on CT scanning [J]. Journal of Mining Science and Technology,2024, 9(3):413-425.

[33] 张慧梅,袁超,慕娜娜,等. 冻融岩石 CT 图像处理及细观特征分析[J]. 西安科技大学学报,2022,42(2): 219-226.
ZHANG Huimei,YUAN Chao,MU Nana,et al. CT image processing and mesoscopic characteristics analysis of freeze-thaw rock[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology,2022,42(2): 219-226.

[34] 王磊,王安铖,陈礼鹏,等. 含瓦斯煤循环冲击动力学特性与裂隙扩展特征[J]. 岩石力学与工程学报,2023,42(11): 2628-2642.
WANG Lei,WANG Ancheng,CHEN Lipeng,et al. Dynamic characteristics and crack propagation characteristics of gas-bearing coal under cyclic impact[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023,42(11): 2628-2642.

[35] ZHU Q Z,WANG X L,ZUO Y Q,et al. Numerical simulation of matrix swelling and its effects on fracture structure and permeability for a high-rank coal based on X-ray micro-CT image processing techniques[J]. Energy & Fuels,2020,34(9): 10801-10809.

[36] MIN K B,JING L R,STEPHANSSON O. Determining the equivalent permeability tensor for fractured rock masses using a stochastic REV approach: method and application to the field data from sellafield, UK[J]. Hydrogeology Journal,2004,12(5): 497-510.

[37] LI J H,ZHANG L M,WANG Y,et al. Permeability tensor and representative elementary volume of saturated cracked soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009,46(8): 928-942.

[38] 苗杰. 低渗煤岩大孔隙结构三维重构及渗流模拟[D]. 焦作: 河南理工大学,2017.
MIAO Jie. 3D reconstruction and seepage simulation of macropores structure in low permeability coal[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University,2017.

[39] 王永康. 注二氧化碳驱替甲烷实验及数值模拟分析[D]. 徐州:中国矿业大学, 2016.
WANG Yongkang, Experiment and numerical simulation analysis of displacing CH_4 by CO_2injection[D]. Xuzhou:China University of Mining and Technology, 2016.

(责任编辑:张彩艳)