

中文引用格式:安丰华,丁远东,丁彦宁,等. 煤体吸附-解吸 CO_2 、 CH_4 、 N_2 变形特征及差异 [J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(7): 98-105.

英文引用格式:AN Fenghua, DING Yuandong, DING Yanning, et al. Differential dynamic patterns of CO_2 , CH_4 and N_2 deformation by adsorption-desorption in coal bodies[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(7): 98-105.

煤体吸附-解吸 CO_2 、 CH_4 、 N_2 变形特征及差异^{*}

安丰华^{1,2}副教授, 丁远东², 丁彦宁², 王立国²副教授, 刘军²教授

(1 中国矿业大学 力学与土木工程学院, 江苏 徐州 221116;

2 河南理工大学 安全科学与工程学院, 河南 焦作 454000)

中图分类号:X936; TD712

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.07.1648

基金项目:国家自然科学基金面上资助(52474266, 52174172); 河南省自然科学基金资助(232300420076)。

【摘要】 为研究煤对不同气体吸附-解吸全过程中变形动态特征及差异响应, 利用煤体吸附-解吸变形动态测试试验平台, 开展原生煤吸附-解吸 CO_2 、 CH_4 、 N_2 条件下变形测试。结果表明: 各气体吸附应变与时间关系呈 Langmuir 形式变化, 强吸附性气体煤体变形量大、响应快; 解吸过程中不同吸附气体的体应变均随着解吸量的增加而近似线性减小, 强吸附性气体解吸收缩更显著, 但是残余变形也更大, CO_2 残余体应变是 CH_4 的 2 倍, 而 CH_4 几乎是 N_2 的 2 倍; 相同解吸量条件下 CH_4 引起的收缩变形最明显, CO_2 和 N_2 引起收缩变形为其 1/3 左右; 在吸附-解吸全过程中吸附应变表现出各向异性且不断变化, 垂直层理方向吸附应变始终大于平行层理方向, CO_2 各向异性系数变化最大, N_2 次之, CH_4 变化最小。

【关键词】 吸附-解吸; 变形特征; 各向异性; 解吸量; 残余变形

Differential dynamic patterns of CO_2 , CH_4 and N_2 deformation by adsorption-desorption in coal bodies

AN Fenghua^{1,2}, DING Yuandong², DING Yanning², WANG Ligu², LIU Jun²

(1 School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology,

Xuzhou Jiangsu 221116, China; 2 School of Safety Science and Engineering, Henan

Polytechnic University, Jiaozuo Henan 454000, China)

Abstract: In order to study the dynamic law and differential response of coal deformation for different gases in the whole process of adsorption-desorption, the deformation test was carried out under the conditions of adsorption-desorption of CO_2 , CH_4 and N_2 in primary coal by utilizing the dynamic test platform for adsorption / desorption deformation of coal bodies. The results show that the adsorption strain of each gas changes with time in Langmuir form, and the coal bodies with the strong adsorption gases exhibit larger deformation and faster response. The body strain of different adsorbed gases in the process of desorption decreases with the increase of desorption amount in a nearly linear manner, and the desorption shrinkage of the strong adsorption gas is more significant, but the residual deformation is also larger, and the residual body strain of CO_2 is twice that of CH_4 , and that of CH_4 is almost twice that of N_2 . With the

same desorption gas amount, the shrinkage deformation caused by CH_4 is the most obvious, and the shrinkage deformation caused by CO_2 and N_2 is about 1/3 of it. In the whole process of adsorption and desorption, the adsorption strain is anisotropic and changing constantly, and the adsorption strain in the direction perpendicular to the bedding is always larger than that parallel to the bedding. The change of anisotropy coefficient of CO_2 is the largest, that of N_2 is the next, and that of CH_4 is the smallest.

Keywords: adsorption-desorption; deformation characteristics; anisotropy; desorption amount; residual deformation

0 引言

气体吸附/解吸过程中煤体变形会改变裂隙开度,引起煤层渗透率改变,是影响煤层气驱替及 CO_2 封存效果的重要因素。在此过程中涉及到 CO_2 、 CH_4 、 N_2 等多种气体的动态变形,深入研究不同气体吸附/解吸全过程动态变形特征有助于瓦斯灾害防治^[1-2]、清洁能源采收^[3]和地下空间碳封存^[4]。

针对气体吸附变形特征,梁冰^[5]、张宝鑫^[6]等发现甲烷吸附/解吸过程中产生的煤体变形的增量随着时间的增长逐渐减小,垂直层理方向变形量大于平行层理方向,变形量与吸附/解吸量呈现正相关关系。郭平^[7]、吴学海^[8]等也观测到不同瓦斯压力条件下,煤体吸附/解吸变形具有明显的各向异性特征。祝捷^[9]、邢俊旺^[10]等试验研究表明煤体的吸附膨胀变形量大于解吸收缩变形量,煤体存在一定的残余变形。周动^[11]、NIE Baisheng^[12]等通过 CT 扫描验证了煤吸附过程中膨胀和压缩作用同时存在,吸附变形具有尺度效应。基于煤表面自由能变化,文献[13-15]建立了吸附平衡状态下煤岩吸附变形模型。随着驱替增产、 CO_2 封存等技术的发展,对多元气体吸附变形演化规律也陆续开展了研究工作。文献[16-18]对不同气体的吸附膨胀应变试验表明:应变量的增加而增大,符合 Langmuir 方程。FAN Jingjing 等^[19]的 CO_2 驱替甲烷试验表明:竞争性气体的体积应变与吸附气体体积之间的关系是线性函数。文献[20-21]试验表明: CO_2 膨胀量及速度要高于 CH_4 ,给 CO_2 封存带来困难。与 CO_2 不同, N_2 仅利用分压实现煤样中 CH_4 的解吸,导致煤样发生收缩变形^[22-23]。季鹏飞等^[24]进一步发现 CH_4/N_2 二元混合气体产生的变形具有时效性、空间性及各向异性特征。陈结等^[25]测试了三轴应力下软、硬煤吸附变形动态演化,划分为初始快速变形、缓慢变形和变形稳定 3 个阶段。

以上研究得出煤体吸附或解吸过程中变形规律

和特征,但是对不同气体吸附-解吸全过程动态变形特征及差异响应尚未完全明确。鉴于此,笔者将采用自主搭建的煤体吸附/解吸变形动态测试试验平台,研究不同吸附性气体吸附-解吸变形动态全过程特征及差异,以期为煤层气注气驱替、 CO_2 贮存效果提高提供指导。

1 煤体吸附-解吸变形动态测试试验

1.1 煤样制备与处理

试验煤样为河南省焦作赵固二矿无烟煤。采集煤样后,筛取 0.07~0.2 mm 粉煤利用热重分析法进行工业分析:煤样水分为 2.18%,灰分为 17.97%,挥发分 17.97%。同时采用落锤法测量了坚固性系数,为 1.16。

将采集的原煤沿平行层理切割成小圆柱试件,尺寸为 $\Phi 25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$,然后进行应变片粘贴和固定处理,如图 1 所示。将 4 条应变片分别从煤样的轴向应变(垂直层理方向)和纵向应变(平行层理方向)对称粘贴于煤体表面,依次监测煤样平行/垂直层理应变。使用防水胶带将连接线固定在同一端,防止加压将导线夹断。

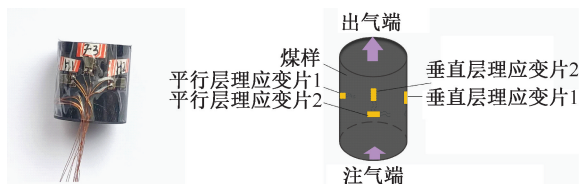


图1 应变片粘贴

Fig. 1 Strain gauge pasting

1.2 吸附-解吸变形试验流程

试验装置采用自主搭建的煤体吸附/解吸变形动态测试试验平台,如图 2 所示,该装置主要由充气系统、应力加载系统、数据采集系统 3 个部分组成。

试验气体分别为 CO_2 、 CH_4 、 N_2 ,试验温度为 30°C ,注气压力为 1 MPa,轴压/围压为 5 MPa。具体试验步骤为:

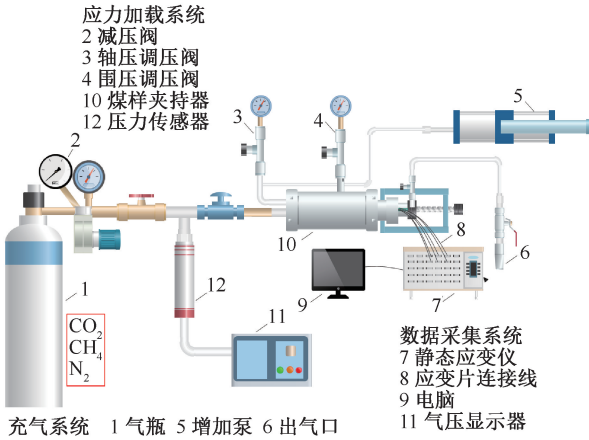


图2 煤体吸附/解吸变形测试平台

Fig. 2 Coal body adsorption / desorption deformation test platform

- 1) 煤样应力加载。将制备好的煤样放入夹持器中,利用应力加载系统将轴压、围压逐渐同步加载至 5 MPa。
- 2) 检查装置气密性。对试验系统抽真空 8 h 后向系统注入 2 MPa He,然后关闭进、出口阀门,间隔 6 h 观测压力传感器读数,若读数与初始压力值相差小于 0.001 MPa,则证明系统气密性良好。
- 3) 抽真空。检查气体放空后将试验系统出口阀与真空泵连接,抽真空 24 h 以上。
- 4) 煤体吸附阶段动态变形测试。分别采用

CO₂、CH₄、N₂ 作为吸附气体,压力逐渐加至 1 MPa 后进行吸附平衡,并连接静动态应变仪实时采集煤样各向应变。

5) 煤体解吸阶段动态变形测试。在膨胀变形量达到稳定后,关闭进气阀,打开发出气阀,实时采集煤样在解吸阶段的各向应变变化;同时,采用排水集气法结合皂泡流量计进行气体解吸量观测。当解吸量低于 0.1 mL/d、应变率小于每小时 2×10^{-5} 时,可认为煤样达到解吸平衡。

6) 重复步骤 2)~步骤 5),测定不同气体条件下煤样吸附-解吸应变。

2 煤体吸附-解吸变形特征及差异分析

2.1 煤体吸附-解吸全过程变形动态

不同吸附气体等温吸附-解吸全过程各向应变随时间变化如图 3 所示。各气体在吸附过程中各向应变与时间表现出 Langmuir 函数关系(相关系数 $R^2 > 0.81$),应变量随着时间的增加而逐渐增大,应变速率逐渐迟缓趋于稳定。而在解吸过程中各向应变与时间却近似为线性函数关系($R^2 > 0.70$)。同时,在解吸试验中发现,煤样膨胀变形与解吸存在滞后效应,表明:由煤体解吸带来的膨胀变形复原是缓慢的,煤体变形的滞后效应会弱化其对渗透率影响,减小煤层气采收速率。

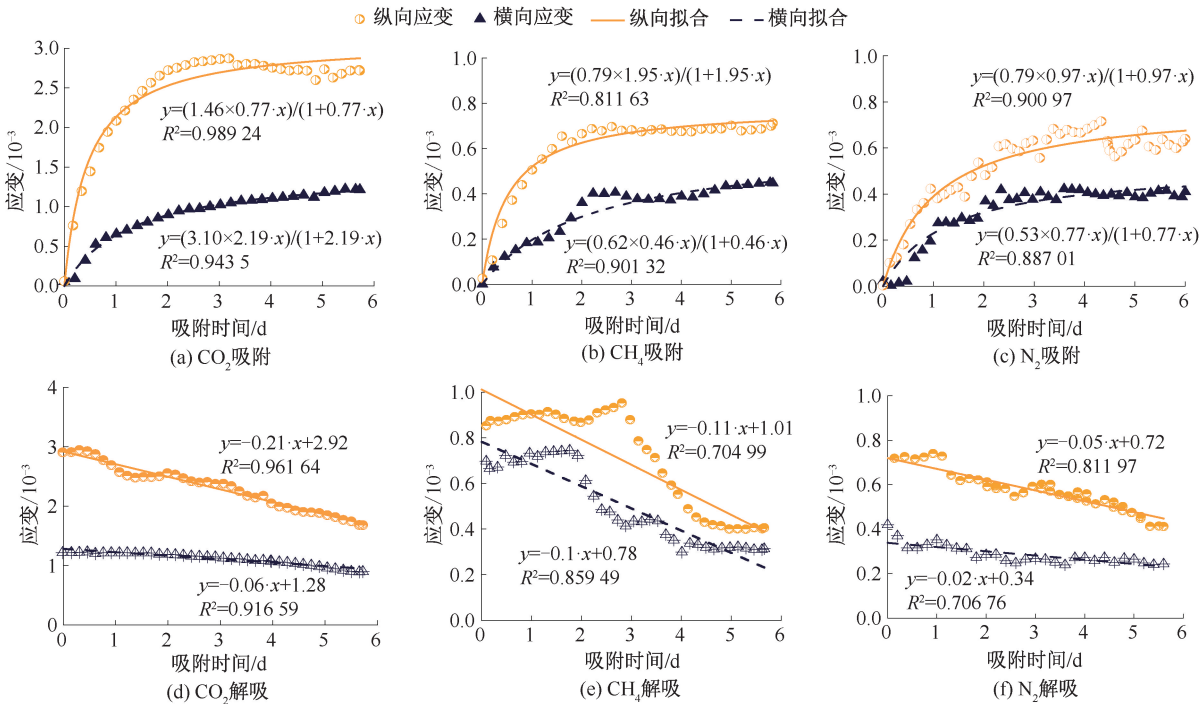


图3 煤样吸附-解吸过程应变-时间关系曲线

Fig. 3 Strain-time curve of adsorption-desorption process of coal samples

在相同吸附平衡压力下,不同气体应变量和响应速率差异显著。在吸附过程中 CO₂ 横向均值为 0.908‰,CH₄ 横向均值为 0.32‰,N₂ 横向均值为 0.328‰,CO₂ 吸附膨胀变形要显著高出 CH₄ 和 N₂,接近二者的 3 倍,而 CH₄ 和 N₂ 横向应变值相似。在方向上,CO₂ 横向均值为 0.908‰。此外,N₂ 吸附应变随时间达到平衡最快,其次是 CH₄,CO₂ 达到稳定变形最慢。这表明了 N₂ 注入驱替 CH₄ 强化采收机制和 CO₂ 注入封存中渗透率减小机制。

受吸附性强弱影响,不同气体残余变形均差异显著。CO₂ 在解吸后趋于稳定时残余横向均值为 1.114‰,CH₄ 残余横向均值为 0.508‰,N₂ 残余横向均值为 0.285‰。

崔永君等^[26]对不同煤阶煤多元气体吸附试验研究表明:CO₂/CH₄ 和 CH₄/N₂ 吸附量比值近似为随煤阶和压力变化的 2 倍关系。因此,不同气体的残余吸附变形与吸附能力密切相关,CO₂/CH₄ 和 CH₄/N₂ 也接近为 2 倍关系。

在吸附-解吸过程中,CH₄ 与 N₂ 吸附-解吸各向应变值相近,而 CO₂ 在吸附-解吸过程中变形量最大。

为整体性衡量煤体吸附/解吸应变变化,采用体应变作为煤体变形特征表征指标,可表示为:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_j + 2\varepsilon_x \tag{1}$$

式中:ε_v 为煤体应变;ε_j 为垂直层理应变;ε_x 为平行层理应变。

根据煤体垂直层理、平行层理应变监测数据,得到不同气体吸附-解吸过程中体应变随时间变化,如图 4 所示。可以看到,同一平衡压力条件下 CH₄ 和 N₂ 吸附-解吸体应变的变化趋势相近,CO₂ 吸附-解吸体应变要变大许多,在吸附-解吸平衡时间下,煤体吸附-解吸体应变整体上变形量为:CO₂>CH₄>N₂,与气体解吸量、各向应变关系一致,说明吸附/解吸量是影响煤体变形的主要因素。

从图 4 看出,等温吸附过程中不同吸附气体体积应变与时间呈 Langmuir 变化趋势,解吸过程中近似呈线性相关。采用下式分别拟合吸附、解吸过程中体应变。

$$\varepsilon_{av} = \frac{ABt}{1+Bt} \tag{2}$$

式中:ε_{av} 为吸附体应变,下标 av 表示吸附阶段;A 为煤吸附气体后的极限应变变量;B 为体应变随时间发生快慢的参数,d⁻¹;t 为时间,d。

$$\varepsilon_{dv} = D + Ct \tag{3}$$

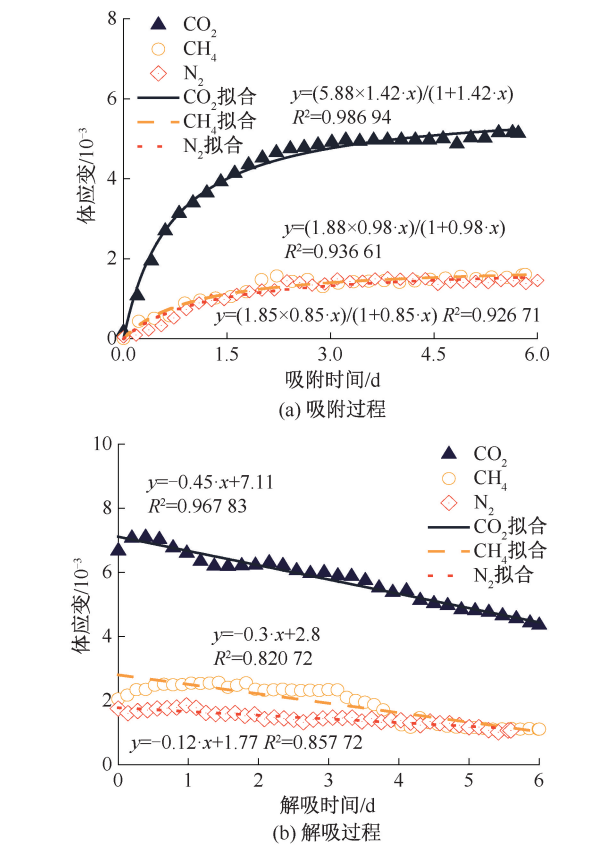


图 4 煤样吸附-解吸过程体应变-时间关系曲线
Fig. 4 Body strain-time relationship curve of adsorption/desorption process of coal samples

式中:ε_{dv} 为解吸体应变,下标 dv 表示解吸阶段;D 为完全解吸后的残余应变;C 为拟合参数,d⁻¹。

拟合结果见表 1,可以看到各气体吸附极限应变变量 A 与应变随时间发生快慢的参数 B 均表现受到吸附性影响,表现为:CO₂>CH₄>N₂;在解吸过程中各气体线性拟合参数 C 表现为:CO₂<CH₄<N₂,表明吸附性强的气体解吸收缩更快、更显著,但是残余变形也更大。

表 1 煤样吸附-解吸体应变拟合参数

Table 1 Fitting parameters of adsorption-desorption volumetric strain for coal samples

气体	吸附过程			解吸过程		
	Langmuir			线性函数		
	A/10 ⁻³	B/d ⁻¹	R ²	C/d ⁻¹	D/10 ⁻³	R ²
CO ₂	5.88	1.42	0.99	-0.45	7.11	0.97
CH ₄	1.88	0.98	0.94	-0.3	2.8	0.82
N ₂	1.85	0.85	0.93	-0.12	1.77	0.86

2.2 煤体解吸特征及体应变-解吸量关系

2.2.1 不同气体下煤体解吸特征及变异

为分析煤体解吸量与收缩变形关系,测试吸附

不同气体煤样解吸量随解吸时间的变化,等温解吸过程曲线如图 5 所示。3 种气体解吸量随着时间的变化出现相同的特征:随着解吸时间延长,气体解吸量逐渐增加,最终趋于稳定。 CH_4 在解吸初始时刻解吸量的增长速率最大, CO_2 次之, N_2 最小。 CO_2 、 CH_4 、 N_2 解吸量最大值分别为 0.35、0.10、0.08 mL/g ; CO_2 解吸总量是 CH_4 解吸总量的 3.0 倍, N_2 的 2.97 倍, N_2 解吸量最少。

2.2.2 不同气体下体应变-解吸量关系对比分析

为分析煤体吸附-解吸变形特征,分析解吸过程中气体解吸量与体应变关系,如图 6 所示。可以看出,等温解吸过程中不同吸附气体的体应变均随着解吸量的增加而减小,且呈现为线性相关趋势。可表现为:

$$\varepsilon_{dv} = \varepsilon_r + \eta \times Q_d \tag{4}$$

式中: ε_r 为残余应变; η 为解吸量与体应变关系系数; Q_d 为解吸量, mL/g 。

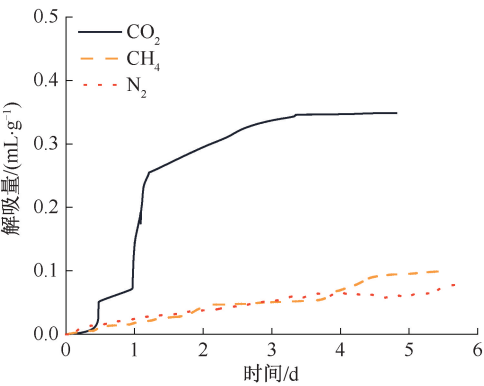
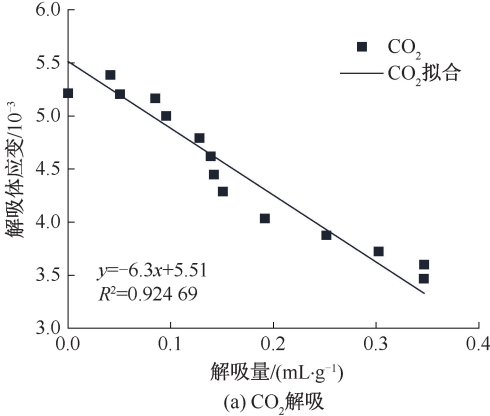
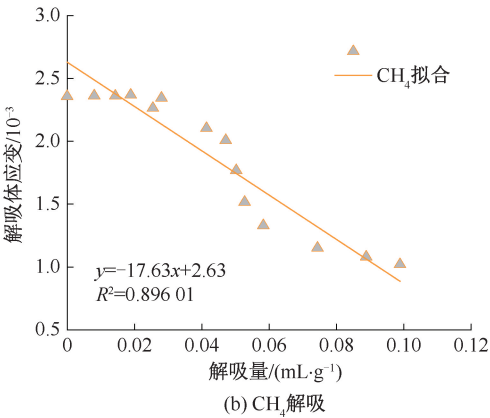


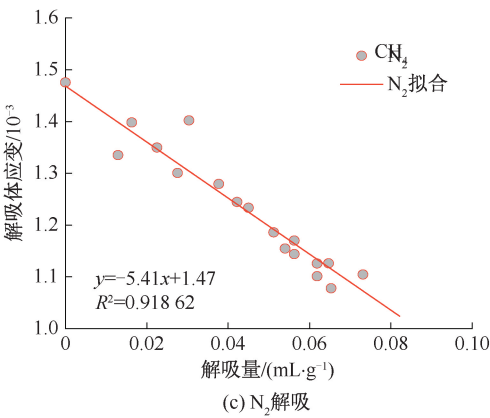
图 5 煤样等温解吸全过程曲线
Fig. 5 Curve of whole process of isothermal desorption of coal samples



(a) CO_2 解吸



(b) CH_4 解吸



(c) N_2 解吸

图 6 煤样解吸体应变-解吸量的关系曲线

Fig. 6 Strain-desorption volume relationship curve for desorbed body of coal samples

体应变-解吸量关系拟合结果见表 2,可以看出,初始应变表现为: $\text{CO}_2 > \text{CH}_4 > \text{N}_2$,这表明:相同吸附压力条件下 CO_2 引起的体应变比 CH_4 高, CH_4 比 N_2 多。这是由于吸附能力越强的气体分子越容易进入煤体微小孔,与煤分子相互作用越强,引起的吸

附变形越明显。

不同气体解吸量与体应变关系有差异,且表现出 CH_4 关系系数最大, CO_2 次之, N_2 最小。这表明:在发生解吸时相同解吸量条件下 CH_4 引起的收缩变形最明显,而 CO_2 和 N_2 引起收缩变形仅为其 1/3

表 2 煤样解吸体应变-解吸量拟合参数

Table 2 Coal sample desorption body strain-desorption volume fitting parameters

气体	拟合函数		
	$\varepsilon_i/10^{-3}$	η	R^2
CO ₂	5.51	-6.3	0.92
CH ₄	2.63	-17.63	0.90
N ₂	1.47	-5.41	0.92

左右。因此,在煤层气注气采收中,CH₄ 减少会导致更大的收缩变形,能提高煤体渗透率。注入的 CO₂ 会导致煤体有更大膨胀变形,导致渗透率降低,同时 CO₂ 减少时煤体收缩变形量较少,有利于 CO₂ 在煤层中封存。

2.3 不同气体下煤体变形各向异性特征

尽管不同气体条件下煤体在吸附-解吸过程中动态变形特征有相似性,其各向应变在空间上表现出差异性。受到层理力学弱面的影响,与型煤不同^[27],原煤吸附/解吸各气体的垂直层理应变与平行层理应变不同。为此,将吸附/解吸过程中不同时间下各气体的垂直层理应变与平行层理应变的比值 $\varepsilon_j/\varepsilon_x$,即各向异性系数,作为衡量煤样变形各向异性强弱的指标,不同气体吸附-解吸应变全过程中各向异性系数随时间变化如图 7 所示,不同气体吸附-解吸过程中各向异性系数最终值均大于 1,表明:吸附变形各向异性一直存在。

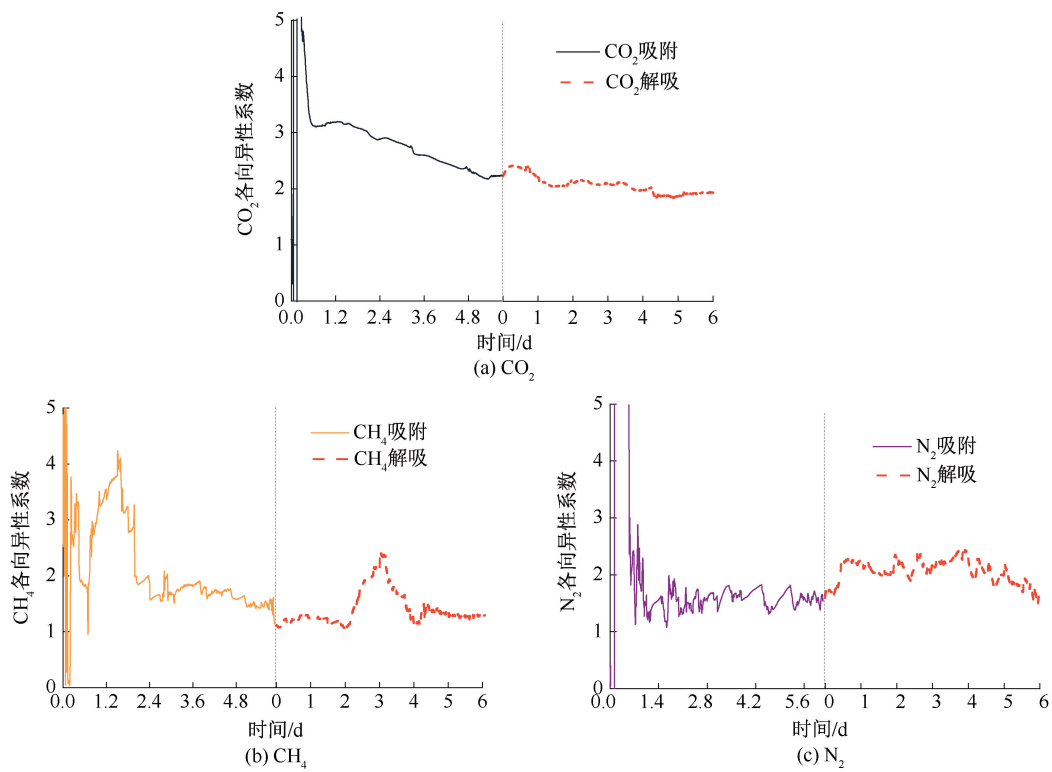


图 7 煤体吸附-解吸各向异性系数

Fig. 7 Coal body adsorption-desorption anisotropy coefficient

不同吸附性气体各向异性在吸附-解吸阶段一直发生变化,且变化规律各有不同。在吸附初始阶段,CO₂ 的各向异性最显著,且波动性较强,各向异性系数在初期可达到 5,然后逐渐降低至 2.5 左右;在解吸阶段各向异性变化趋缓,系数值持续降低至 2 左右。CH₄ 吸附-解吸各向异性系数在吸附初期为 3 左右,之后逐渐稳定于 1.5~2,而在解吸阶段为 1.5 左右;同时,在吸附和解吸阶段各向异性系数都表现出 1 个明显波动,表明:煤体在甲烷吸附-解吸过程中变形复杂性。N₂ 吸附-解吸各向异性系数在

吸附初期随时间的增加迅速趋于平衡,由 2~3 降至 1.5 左右;在解吸阶段,与 CO₂、CH₄ 不同,各向异性系数高于吸附过程,为 2 左右。因此,气体类型对吸附-解吸变形各向异性程度及变化影响较大,强吸附性气体具有更明显的各向异性,弱吸附性气体各向异性则较为一致。

试验表明:不同吸附气体在吸附-解吸变形中都表现为各向异性,这是由煤体的孔裂隙结构决定的。由于煤体的非均质性,煤体内的孔裂隙主要沿平行层理方向发育,平行层理方向的渗透率比垂直

层理方向的渗透率大,较高的渗透率使得更多的吸附气体进入平行层理的孔裂隙中,使垂直孔裂隙的延展方向产生较大变形,导致垂直层理方向的应变速率要大于平行层理方向。而随着吸附-解吸平衡,平行层理方向上进入煤体的气体也逐渐达到平衡,此时各向异性系数逐渐趋于稳定。

3 结 论

1) 不同吸附气体在吸附阶段吸附应变与时间呈 Langmuir 变化,且吸附能力越强,垂直层理和平行层理膨胀变形越大,变形响应越快。而在解吸过程中解吸变形近似呈线性变化,不同吸附气体均具

有解吸滞后特性,且吸附性越高,解吸收缩更快、更显著,但是残余变形也更大。

2) 解吸过程中不同吸附气体的体应变均随着解吸量的增加而减小,近似呈现为线性趋势,且表现出 CH_4 的体应变-解吸量关系系数 η 最大, CO_2 次之, N_2 最小。相同解吸量条件下 CH_4 引起的收缩变形最明显,而 CO_2 和 N_2 引起收缩变形仅为其 $1/3$ 左右,有利于煤层 CH_4 采收和 CO_2 封存。

3) 无论气体吸附性强弱,煤体吸附-解吸变形中均存在各向异性,最终值均大于 1,且煤体垂直层理应变大于平行层理应变。同时, CO_2 具有更明显的各向异性, CH_4 和 N_2 各向异性则较为一致。

参 考 文 献

- [1] 宋鑫,舒龙勇,王斌,等. 低瓦斯赋存高强度开采煤层驱替促抽技术研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(4): 847-856.
SONG Xin, SHU Longyong, WANG Bin, et al. Replacement and pumping technology for coal seams with low gas content and high intensity mining [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2023, 40 (4): 847-856.
- [2] 季鹏飞,林海飞,孔祥国,等. 注氮促排煤体瓦斯数值模拟研究[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(11): 127-134.
JI Pengfei, LIN Haifei, KONG Xiangguo, et al. Numerical simulation research on coal gas drainage by nitrogen injection [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2021, 31(11): 127-134.
- [3] 苏现波,黄津,王乾,等. CO_2 强化煤层气产出与其同步封存实验研究[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(1): 176-184.
SU Xianbo, HUANG Jin, WANG Qian, et al. Experimental study on CO_2 -enhanced coalbed methane production and its simultaneous storage[J]. Coal Geology and Exploration, 2023, 51(1):176-184.
- [4] 谢和平,任世华,谢亚辰,等. 碳中和目标下煤炭行业发展机遇[J]. 煤炭学报, 2021, 46(7): 2197-2211.
XIE Heping, REN Shihua, XIE Yachen, et al. Development opportunities of the coal industry towards the goal of carbon neutrality[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7): 2197-2211.
- [5] 梁冰,贾立锋,孙维吉,等. 横观各向同性煤等温吸附变形试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(1): 60-66.
LIANG Bing, JIA Lifeng, SUN Wei, et al. Experimental study of isothermal adsorption deformation of transversely isotropic coal[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2018, 47(1): 60-66.
- [6] 张宝鑫,邓泽,傅雪海,等. 温度对中高阶烟煤甲烷吸附-常压/带压解吸过程中煤体变形影响实验[J]. 天然气地球科学, 2020, 31(12): 1826-1836.
ZHANG Baoxin, DENG Ze, FU Xuehai, et al. Characteristics of medium-high rank bituminous coal deformation during methane adsorption-desorption with atmospheric pressure/with successively decreasing outlet pressure at different temperatures[J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31(12): 1826-1836.
- [7] 郭平. 瓦斯压力对煤体吸附-解吸变形特征影响试验研究[J]. 煤矿安全, 2019, 50(9): 13-16.
GUO Ping. Experimental study on influence of gas pressure on coal adsorption/desorption deformation characteristics[J]. Safety in Coal Mines, 2019, 50(9): 13-16.
- [8] 吴学海,李波波,高政,等. 气体压力降低对煤岩变形和渗流的影响机制[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(4): 129-134.
WU Xuehai, LI Bobo, GAO Zheng, et al. Influence mechanism of gas pressure reduction on coal deformation and seepage[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(4): 129-134.
- [9] 祝捷,张敏,姜耀东,等. 煤吸附解吸 CO_2 变形特征的试验研究[J]. 煤炭学报, 2015, 40(5): 1081-1086.
ZHU Jie, ZHANG Min, JIANG Yaodong, et al. Experimental study of coal strain induced by carbon dioxide sorption/desorption[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(5): 1081-1086.
- [10] 邢俊旺,杨栋,康志勤,等. 应力约束下煤体吸附解吸瓦斯变形特性的试验研究[J]. 煤矿安全, 2018, 49(10): 9-12.
XING Junwang, YANG Dong, KANG Zhiqin, et al. Experiment study on deformation characteristics of gas adsorption and desorption of confined coal[J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(10):9-12.
- [11] 周动,冯增朝,王辰,等. 煤吸附甲烷结构变形的多尺度特征[J]. 煤炭学报, 2019, 44(7): 2159-2166.
ZHOU Dong, FENG Zengchao, WANG Chen, et al. Multi-scale characteristics of coal structure deformation during methane adsorption[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(7): 2159-2166.
- [12] NIE Baisheng, FAN Penghong, LI Xiangchun. Quantitative investigation of anisotropic characteristics of methane-induced strain in coal based on coal particle tracking method with X-ray[J]. Fuel, 2018, 214: 272-284.

- [13] 吴世跃, 赵文, 郭勇义. 煤岩体吸附膨胀变形与吸附热力学的参数关系[J]. 东北大学学报:自然科学版, 2005, 26(7): 683-686.
WU Shiyue, ZHAO Wen, GUO Yongyi. Parametric correlation between expansion deformation of coal mass and adsorption thermodynamics[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2005, 26(7): 683-686.
- [14] 周军平, 鲜学福, 姜永东, 等. 基于热力学方法的煤岩吸附变形模型[J]. 煤炭学报, 2011, 36(3): 468-472.
ZHOU Junping, XIAN Xuefu, JIANG Yongdong, et al. A model of adsorption induced coal deformation based on thermodynamics approach[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(3): 468-472.
- [15] 郭平, 曹树刚, 张遵国, 等. 煤体吸附膨胀变形模型理论研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(12): 3 467-3 472.
GUO Ping, CAO Shugang, ZHANG Zunguo, et al. Theoretical study of deformation model of coal swelling induced by gas adsorption[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(12): 3 467-3 472.
- [16] 张遵国, 齐庆杰, 曹树刚, 等. 煤层吸附 He 、 CH_4 和 CO_2 过程中的变形特性[J]. 煤炭学报, 2018, 43(9): 2 484-2 490.
ZHANG Zunguo, QI Qingjie, CAO Shugang, et al. Characteristics of coal deformation during its adsorption of He , CH_4 and CO_2 [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(9): 2 484-2 490.
- [17] ZOU Jie, FAN Chunyan, ZHANG Junfang, et al. Effect of adsorbent properties on adsorption-induced deformation[J]. Langmuir, 2021, 37(51): 14 813-14 822.
- [18] 侯东升, 梁卫国, 张倍宁, 等. CO_2 驱替煤层 CH_4 中混合气体渗流规律的研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(11): 3 463-3 471.
HOU Dongsheng, LIANG Weiguo, ZHANG Beining, et al. Seepage law of mixed gases in CO_2 displacement of coal seam CH_4 [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(11): 3 463-3 471.
- [19] FAN Jingjing, FENG Ruimin, WANG Jin, et al. Laboratory investigation of coal deformation behavior and its influence on permeability evolution during methane displacement by CO_2 [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, 50: 1 725-1 737.
- [20] STAIB G, SAKUROVS R, GRAY M G. Kinetics of coal swelling in gases: influence of gas pressure, gas type and coal type[J]. International Journal of Coal Geology, 2014, 132: 117-122.
- [21] SHI Farui, DENG Bozhi, NIE Baisheng, et al. Deformation kinetics of coal-gas system during isothermal and dynamic non-isothermal processes[J]. Gas Science and Engineering, 2023, 117: DOI:10.1016/j.jgsce.2023.205027.
- [22] XIN Lyu, LIU Qinjie, YANG Ke, et al. Experimental study of adsorption characteristics and deformation of coal for different gases[J]. ACS Omega 2022, 7(13): 11 415-11 421.
- [23] ZHANG Baoxin, FU Xuehai, LI Guofu, et al. An experimental study on the effect of nitrogen injection on the deformation of coal during methane desorption[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2020, 83: DOI:10.1016/j.jngse.2020.103529.
- [24] 季鹏飞, 林海飞, 孔祥国, 等. 三轴应力下煤体对 CH_4/N_2 的吸附-解吸-扩散-渗流规律及变形特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(10): 2 496-2 514.
JI Pengfei, LIN Haifei, KONG Xiangguo, et al. Study on the law of CH_4/N_2 adsorption-desorption-diffusion-seepage and the coal deformation characteristics under triaxial stress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(10): 2 496-2 514.
- [25] 陈结, 潘孝康, 姜德义, 等. 三轴应力下软煤和硬煤对不同气体的吸附变形特性[J]. 煤炭学报, 2018, 43(增1): 149-157.
CHEN Jie, PAN Xiaokang, JIANG Deyi, et al. Adsorption deformation characteristics of soft coal and hard coal to different gases under triaxial stress condition[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(S1): 149-157.
- [26] 崔永君, 张群, 张泓, 等. 不同煤级煤对 CH_4 、 N_2 和 CO_2 单组分气体的吸附[J]. 天然气工业, 2005, 25(1): 61-65, 211.
CUI Yongjun, ZHANG Qun, ZHANG Hong, et al. Adsorption of different rank coals to single component gases[J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(1): 61-65, 211.
- [27] 张遵国, 陈毅, 赵丹, 等. 原煤与型煤 CO_2 吸附/解吸及变形特征对比研究[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(4): 793-803.
ZHANG Zunguo, CHEN Yi, ZHAO Dan, et al. Comparative study of adsorption/desorption and deformation characteristics of raw and briquette coals under CO_2 [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2021, 50(4): 793-803.

作者简介: 安丰华 (1984—), 男, 山东临沂人, 博士, 副教授, 主要从事工程安全管理、风险防控等方面的研究。E-mail: fenghuazm009@126.com。

