

中文引用格式:梁冰,张世垚,孙维吉,等.不同层理煤 CO₂ 驱替 CH₄ 及封存效果分析[J].中国安全科学学报,2026,36(4):65-74.

英文引用格式:Liang Bing, Zhang Shiyao, Sun Weiji, et al. Analysis of CO₂ displacement CH₄ and storage effect in different stratified coals [J]. China Safety Science Journal, 2026, 36 (4): 65-74.

不同层理煤 CO₂ 驱替 CH₄ 及封存效果分析^{*}

梁冰^{1,2}教授,张世垚¹,孙维吉^{**1}教授,张肖洋¹,聂涛¹

(1 辽宁工程技术大学 力学与工程学院,辽宁 阜新 123000;

2 辽宁工程技术大学 矿业学院,辽宁 阜新 123000)

中图分类号:X936

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.04.1551

资助项目:内蒙古自治区科技重大专项(2021ZD0034-2);国家自然科学基金面上项目资助(52074143);辽宁省教育厅基本科研项目(LJ222410147037);辽宁工程技术大学学科创新团队资助项目(LNTU20TD-11)。

【摘要】 为研究煤的层理角度对提升 CO₂ 强化煤层气开采效率的影响,以山西晋中寺家庄 6 矿煤样为研究对象,利用渗流驱替试验系统,开展不同层理角度下 CO₂ 驱替 CH₄ 试验研究,分析驱替过程中排出气体组分、气体流量、驱替效率、封存能力等随层理角度的变化特征。结果表明:层理面和渗流方向夹角的增大可显著延长 CO₂ 的突破时间,层理角度越大,出口气体组分变化速率越慢。进口与出口流量大小关系均表现出 0>30>60>90°的特征,出口 CH₄ 流量大小关系在试验前期与出口流量一致,后期转变为 90>60>30>0°。驱替第 1 阶段结束时,CH₄ 采收率表现为 0>30>60>90°,第 2 阶段结束时,CH₄ 采收率大小表现为 30>0>60>90°,整个驱替过程结束时,30°层理煤的 CH₄ 采收率达到最大值,为 67%。30°层理煤的驱替置换比最小,置换效果最好。整个驱替过程中 CO₂ 穿透率始终保持 0>30>60>90°的特征,且非 0°层理煤在驱替结束时对 CO₂ 的吸附仍未达到平衡。此外,90°层理煤的封存率达到 81.59%,封存效果最好。

【关键词】 层理角度; CO₂ 驱替 CH₄; 采收率; 驱替置换; 封存效果

Analysis of CO₂ displacement CH₄ and storage effect in different stratified coals

Liang Bing^{1,2}, Zhang Shiyao¹, Sun Weiji¹, Zhang Xiaoyang¹, Nie Tao¹

(1 School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin Liaoning 123000, China; 2 College of Mining, Liaoning Technical University, Fuxin Liaoning 123000, China)

Abstract: To investigate the influence of coal bedding angle on enhancing CO₂ injection-enhanced coalbed methane recovery efficiency, coal samples from Mine 6 in Sijiazhuang, Jinzhong, Shanxi Province were studied. Using a flow displacement experimental system, CO₂ displacement of CH₄ experiments were conducted under different bedding angles. The variation patterns of displaced gas composition, gas flow rate, displacement efficiency, and storage capacity with bedding angle were analyzed during the displacement process. The results indicate: An increase in the angle between the bedding plane and the

* 文章编号:1003-3033(2026)04-0065-10; 收稿日期:2025-11-24; 修稿日期:2026-02-28

** 通信作者:孙维吉(1980—),男,辽宁铁岭人,博士,教授,主要从事矿山环境与灾害力学等方面的研究。E-mail: sunweiji-1231@163.com。

seepage direction significantly prolongs the breakthrough time of CO_2 . The steeper the bedding angle, the slower the rate of change in outlet gas composition. The relationship between inlet and outlet flow rates follows the pattern $0 > 30 > 60 > 90^\circ$. The relationship for outlet CH_4 flow rate aligns with outlet flow rate in the early stage of the experiment, shifting to $90 > 60 > 30 > 0^\circ$ in the later stage. At the end of the first displacement stage, CH_4 recovery rates followed $0 > 30 > 60 > 90^\circ$. By the end of the second stage, recovery rates shifted to $30 > 0 > 60 > 90^\circ$. Upon completion of the entire displacement process, the 30° -layered coal achieved the highest CH_4 recovery rate of 67%. The 30° bedded coal exhibited the lowest displacement ratio and the most effective replacement. Throughout the displacement process, CO_2 penetration consistently followed the pattern $0 > 30 > 60 > 90^\circ$, and non- 0° bedded coal had not reached adsorption equilibrium for CO_2 by the end of displacement. Furthermore, the 90° bed coal achieved a storage rate of 81.59%, demonstrating the best storage effectiveness. These findings provide crucial insights for optimizing CO_2 injection strategies to enhance coalbed methane extraction.

Keywords: bedding angles; CO_2 displacement of CH_4 ; recovery rate; displacement ratio; storage effectiveness

0 引言

煤层气是一种清洁高效的能源^[1-2],也是矿井瓦斯灾害的主要诱因。 CO_2 强化煤层气开采(CO_2 -enhanced coalbed methane recovery, CO_2 -ECBM)技术作为提高瓦斯抽采效率的主要手段之一^[3],可同时实现“ CH_4 强化开采”和“ CO_2 封存”的协同效应,是当前能源、矿业安全与环境领域的研究热点^[4-5]。然而,煤层并非均匀介质,在长期地质演化过程中形成了明显的层理结构^[6],不同埋深煤层的层理角度差异较大^[7]。当前, CO_2 -ECBM 工程设计多基于“煤层均质”的假设,忽略了层理角度的影响。开展不同层理角度煤的驱替试验研究,对强化煤层气抽采效率及提高 CO_2 封存率具有重要的工程价值。

煤体具有明显的层理结构,这种层理结构直接影响其渗流特性,而驱替过程本质上是气体在煤层中流动交换的过程,近年来,为揭示煤储层中 CO_2 驱替 CH_4 的渗流特性,明确不同影响因素对驱替过程的作用机制,学者们开展了大量研究。Du Liang 等^[8]发现,层理裂缝连通性越好,波速越慢,且垂直层理波速大于平行层理,不同层理角度煤的渗透率差异更突出。Niu Qinghe^[9]、Liu Jiajia^[10]、Liu Jianbao^[11]等均发现,煤的平行层理渗透率显著高于垂直层理,前者裂缝易受应力影响,后者裂隙对 CO_2 吸附更敏感。Tang Xiaojun 等^[12]进一步指出,煤样的最小渗透率随层理角度增大而增加。Liu Chao 等^[13]提出变形及渗透性各向异性源于层理面。Li Yong 等^[14]研究发现,在驱替过程中渗透率与孔隙压力呈负相关,围压增大则导致了煤体渗透率下降。

周西华等^[15]证实,置换效率与 CO_2 注气压强、注入温度呈正相关,与煤体含水率呈负相关。Li Zhenbao 等^[16-17]强调,注气压力升高会加剧煤基质膨胀,增加流动阻力,进而影响驱替效率。而 Gao Changjing 等^[18]发现,过高注入压力反而对波及效率不利,且围压可通过改变孔隙-裂缝结构来削弱此效应。安丰华等^[19]发现,在吸附-解吸全过程中吸附应变呈现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。杨宏民等^[20]研究证实,注气压力提高,置换率随之提高,且同一时间内气体滞留率降低。Pan Hongyu 等^[21]发现,温度升高可强化 CO_2 优先吸附,而压力与颗粒尺寸的增大会削弱此效应。Bai Gang 等^[22]将驱替过程划分为 3 个阶段, CH_4 产量与注气压力和温度呈正相关。这些研究主要说明层理角度对煤体的渗流特性有显著影响,而有关驱替效果的研究主要从注气压力、温度等方面开展。由层理角度引发的驱替效果及封存能力的差异性研究鲜有报道。

因此,笔者拟开展不同层理角度煤样 CO_2 驱替 CH_4 试验,动态监测驱替过程的进出口气体流量、出口气体组分,分析不同层理角度煤的驱替效果及 CO_2 封存效率的差异,以期高效抽采煤层气及提高 CO_2 封存效率提供一定的参考。

1 CO_2 驱替 CH_4 试验方案

1.1 不同层理角度煤样制备

煤样取自山西晋中寺家庄 6 矿的无烟煤。为识

别其层理结构,将取得的煤样切割平整并用水浸湿,从平行层理面至垂直层理面,每隔 30°钻取 Φ50 mm×100 mm 的圆柱形煤样若干块(图 1a),定义渗流方向与层理面夹角为试验的层理角(图 1b)。将制备好的煤样置于 105 ℃烘箱中烘干,每隔 4 h 称重

1 次,连续 2 次质量恒定不变时,认为烘干完成。选取表面具有清晰薄层状层理、质量分布均匀、无明显缺陷的 4 种层理角度煤样各 1 块,对煤样进行质量、尺寸和超声波无损检测,完成以上工作后用保鲜膜封装备用,煤样品基本信息见表 1。

表 1 煤样品基本信息

Table 1 Basic information of coal sample						
编号	角度/(°)	尺寸/mm×mm	质量/g	波速/(km/s)	孔隙净容/mL	渗透率/×10 ⁻⁵ μm ²
A ₋₀	0	Φ50.12×100.22	264.5	0.945	21.44	8.392 0
A ₋₃₀	30	Φ49.78×99.46	268.6	0.887	22.81	7.057 0
A ₋₆₀	60	Φ50.04×100.20	266.4	0.706	19.32	6.587 9
A ₋₉₀	90	Φ50.14×100.12	261.2	0.641	21.30	2.538 0

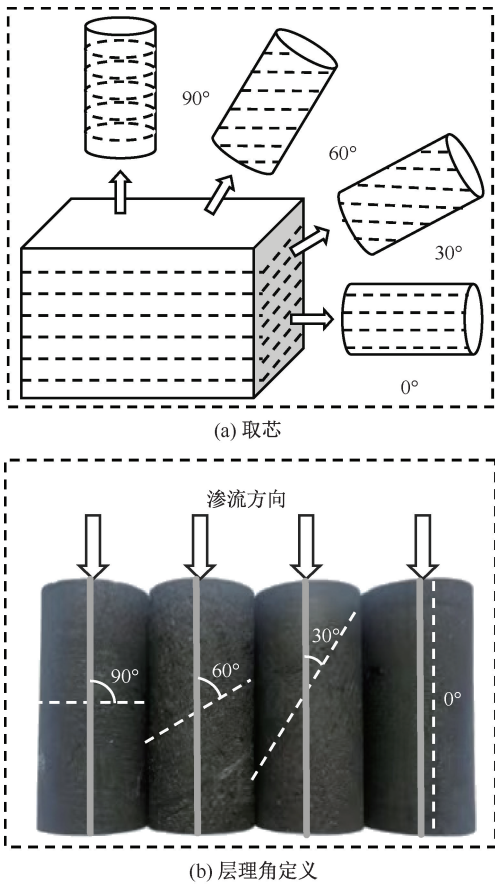


图 1 煤体样品制备过程

Fig. 1 Schematic diagram of coal sample preparation process

1.2 CO₂ 驱替 CH₄ 试验装置

试验装置由供气系统、渗流驱替系统、轴压和围压控制系统、气体组分检测系统以及真空泵和恒温箱组成,如图 2 所示。注气系统包括 He 气瓶、CO₂ 气瓶和 CH₄ 气瓶 3 种高压气瓶,以及配套的减压阀,保证整个试验过程的气体稳定供应;渗流驱替系统包括岩心夹持器和质量流量计,用于驱替试验及

气体流量监测;气体组分检测系统包括集气袋和气体体积分数检测仪,用于检测出口气体组分变化;轴压和围压控制系统包括试压泵和压力传感器等,用于给煤样施加轴压和围压;整个试验过程中渗流驱替系统置于 25 ℃恒温箱中。

1.3 CO₂ 驱替 CH₄ 试验步骤

开展不同层理角度煤注 CO₂ 驱替 CH₄ 的试验,分析层理角度对驱替过程、CH₄ 采收率及 CO₂ 封存效果的影响。试验设定温度为 25 ℃,考虑煤体取样地的实际地应力情况以及前期对样品力学参数测试结果,选取轴围压均为 5 MPa。依据样品所在矿井的 CH₄ 气体赋存压力,设计 CH₄ 吸附压力为 0.45 MPa,设计该压力下的平衡吸附时间为 24 h;依据驱替压力大于 CH₄ 赋存压力原则以及参考现场试验,设计驱替压力为 1.0 MPa。不同层理角度煤的出口 CO₂ 气体组分体积分数达到 99% 以上时驱替结束。具体试验步骤如下:

1) 管路体积测定。将 Φ50 mm×100 mm 的标准金属试样放入渗流驱替系统的岩心夹持器中,打开 He 气瓶,控制减压阀输出压力为 1.0 MPa,监测注入气体流量来测试管路体积,测得管路体积为 19.98 mL。

2) 装入待测煤样。将煤 A₋₀ 放入渗流驱替系统的岩心夹持器中,通过阶梯加载方式分别泵入 5 MPa 的轴压和围压。待压力稳定后,打开真空泵进行抽真空处理,时长为 6 h。

3) 煤样孔隙体积及渗透率测定。关闭真空泵,打开 He 高压气瓶,控制减压阀输出压力为 1.0 MPa,对中间容器进行充气,待压力稳定后,打开岩心夹持器进口,测试孔隙空间,待进气口流量为 0 mL/min 且连续 30 min 以上时,认为孔隙空间已被气体充满。利用步骤 1) 排除管路体积,计算煤的孔隙净容

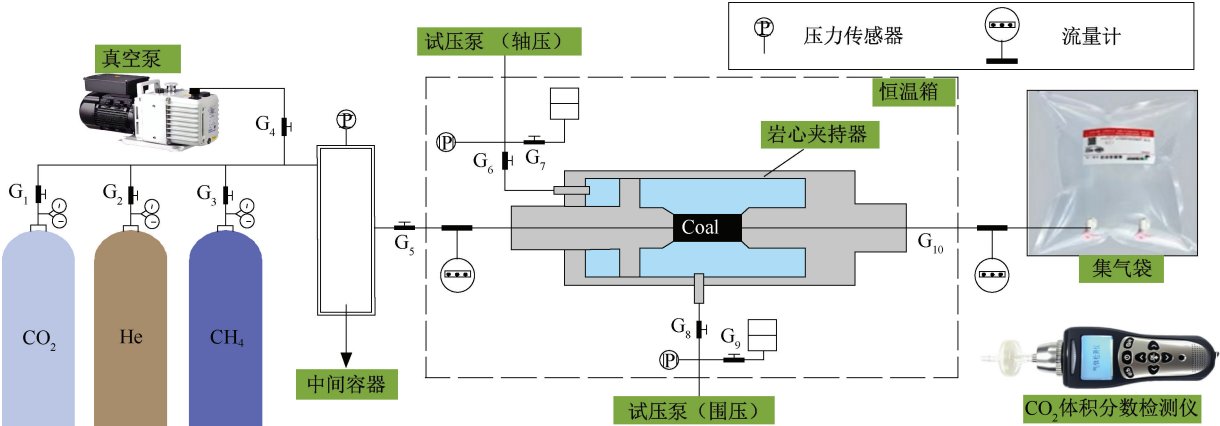


图2 试验装置

Fig.2 Schematic of experimental apparatus

积。接着打开岩心夹持器出口,待出气口流量稳定且接近进气口流量连续 30 min 以上,认为流量稳定,可计算渗透率,层理角度通过改变流体流动路径、层间界面阻力和孔隙连通性,直接影响煤样的渗透率,平行层理时渗透率最高,垂直层理时最低,各层理角度煤样渗透率见表 1。

4) 2 次抽真空并进行 CH₄ 气体吸附。关闭 He 高压气瓶,对中间容器进行放气处理,接着再次进行抽真空处理。打开 CH₄ 高压气瓶,控制减压阀输出压力为 0.45 MPa,对中间容器进行充气,待压力稳定后,只打开岩心夹持器进口进行 24 h 的 CH₄ 吸附。0、30、60、90° 层理煤的 CH₄ 进口量分别为 2 090.54、2 119.38、2 135.12 和 2 059.78 mL。

5) 驱替并记录数据。CH₄ 气体吸附完成后,关闭岩心夹持器进口,释放中间容器中的 CH₄,打开 CO₂ 高压气瓶,控制减压阀输出压力为 1.0 MPa,对中间容器进行充气,待压力稳定后,将出口连接集气袋。同时打开进出口,每隔 5 min 用 CO₂ 体积分数检测仪测试出口气体体积分数值。

6) 完成试验。待出口 CO₂ 体积分数达到 99% 以上时认为驱替结束。重复以上步骤完成 A₋₃₀、A₋₆₀ 和 A₋₉₀ 煤的驱替试验。

2 不同层理煤 CO₂ 驱替 CH₄ 及封存效果分析

2.1 不同层理角度下出口气体体积分数变化分析

图 3 为不同层理角度煤的出口气体组分随时间变化特征。依据出口气体组分体积分数变化将驱替过程划分为 3 个阶段^[23]:①驱赶阶段(出口 CH₄ 体积分从 100%降至 99%);②置换与竞争吸附阶段

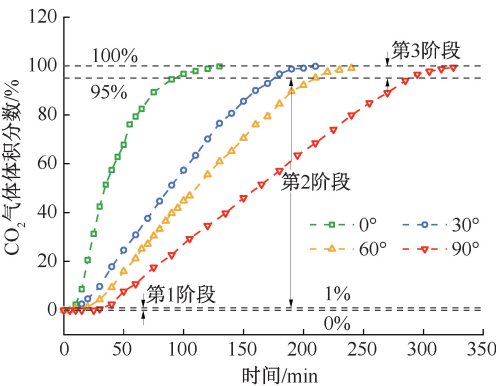
(出口 CH₄ 体积分从 99%降至 5%);③缓慢竞争吸附阶段(出口 CH₄ 体积分从 5%降至 0%)。第 1 阶段出口仅有 CH₄ 排出,如图 3 所示,层理面与渗流方向的夹角不同,导致 CO₂ 在煤体中运移速率存在差异,其中 0°层理煤首先发生 CO₂ 突破,随后 30、60 和 90°层理煤依次发生突破,0、30、60 和 90°层理煤的 CO₂ 突破时间分别为 10、15、20 和 30 min。

CO₂ 突破后,驱替过程进入第 2 阶段,出口 CH₄ 体积分开始显著下降。不同层理角度煤中的气体压力空间分布逐渐稳定,煤体中的 CO₂ 逐渐进入更小的孔隙中,并与孔隙表面的吸附相 CH₄ 发生置换和竞争吸附。且不同层理煤的出口 CH₄ 组分体积分下降速率大小关系表现为 0>30>60>90°。不同层理角度煤的第 2 阶段所需要的时间分别为 90、165、200 和 265 min,见表 2。层理角度的差异会导致 CO₂ 对 CH₄ 的置换效率不同,进而导致 CH₄ 出口气体组分体积分下降速率不同。

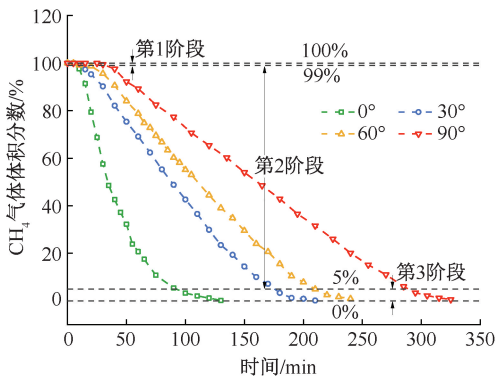
表 2 驱替过程中不同阶段所需时间

层理角度/(°)	时间/min		
	第 1 阶段	第 2 阶段	第 3 阶段
0	10	90	30
30	15	165	30
60	20	200	30
90	30	265	30

随着煤中 CH₄ 不断被置换排出,煤体内 CH₄ 含量不断减少,出口 CH₄ 体积分逐渐降低。当 CH₄ 气体组分体积分小于 5 %时,驱替过程进入缓慢竞争吸附阶段,此阶段不同层理角度煤所需要的时间约为 30 min。进入驱替过程第 3 阶段后,不同层理角度煤的出口 CO₂ 体积分增长速率均放缓。

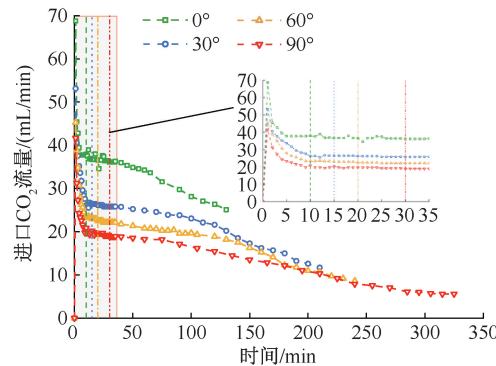


(a) 出口CO₂体积分数随时间的变化

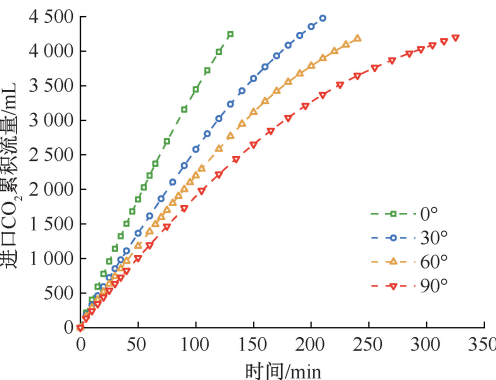


(b) 出口CH₄体积分数随时间的变化

图 3 不同层理角度煤的出口气体组分
Fig. 3 Exhaust gas volume fraction of coal at different bedding angles



(a) 进口流量



(b) 进口累积流量

图 4 不同层理角度煤的进口气体流量和累积流量
Fig. 4 Imported gas flow rate and cumulative flow rate of coal at different bedding angles

2. 2 不同层理角度下驱替气体流量变化分析

2. 2. 1 CO₂ 进口流量及进口累积量

图 4 为不同层理角度煤的进口流量和累积流量随时间变化特征。如图 4a 所示,在驱替过程中,随着层理角度的增大,层理面对气体渗流的阻碍作用增强,进口流量始终保持 0>30>60>90°的特征。注气初期,受压差作用的影响,不同层理角度煤的初始流量均较高,分别为 68.8、53.1、45.3 和 41.7 mL/min。随着 CO₂ 的持续注入,注气压力与煤体内部压力逐渐达到平衡状态,进口流量快速下降至平稳。在 CO₂ 突破后,因煤体对 CO₂ 的吸附能力强于 CH₄,CO₂ 与孔隙表面的 CH₄ 发生置换,导致煤体孔隙收缩,渗透率降低,进口流量进一步下降。驱替过程在第 2 阶段后期及进入第 3 个阶段后,进口流量趋于稳定。整个驱替过程结束时,0、30、60 和 90°层理煤进口流量分别下降至 25.1、17、8.6 和 5.7 mL/min。

2. 2. 2 出口流量和出口 CH₄ 流量

图 5 为不同层理角度煤的出口流量及出口 CH₄ 流量随时间变化,在驱替初始阶段,出口阀门开启伊

始,煤体近出口端压力突然释放,煤体中的气体迅速排出,因此,驱替初始具有较高的总出口流量,0、30、60 和 90°层理煤的初始总出口流量分别为 58.4、51.4、42.3 和 36.9 mL/min。随后,近出口端压力迅速下降,且 CO₂ 驱赶 CH₄ 效应尚未到达出气口端,出口流量在短时间内迅速下降。随着 CO₂ 驱赶 CH₄ 效应逐渐占优,出口流量出现回升的趋势。0°层理煤由于层理面与渗流方向基本一致,CO₂ 驱赶 CH₄ 效应在出口处很快占优,因此 0°层理煤的出口流量下降表现的较为缓慢。0°层理煤发生 CO₂ 突破后,CO₂ 的涌出使其出口流量短暂回升,随后再次下降。而 30、60 和 90°层理煤分别在 10、7 和 10 min 降至最低点,此时尚未到达 CO₂ 突破点,而后因 CO₂ 驱赶 CH₄ 效应逐渐超过煤体中 CH₄ 的自然涌出,出口流量略有上升。待达到 CO₂ 突破点后,出口流量再次下降。驱替第 2 阶段出口流量均呈现下降趋势,下降幅度表现为 0°最大,30、60°次之,90°最小。驱替第 3 阶段,不同层理角度煤的总出口流量逐渐放缓,至驱替结束时,0、30、60 和 90°煤的出口流量分别为 12.3、6.8、5.8 和 3.1 mL/min,整个驱替过

程中出口流量始终保持 $0>30>60>90^\circ$ 的特征。

图 5b 为出口 CH_4 流量随时间的变化特征,在 CO_2 突破之前,由于出口并没有 CO_2 的涌出,出口 CH_4 流量的变化特征与总出口流量一致,呈现下降趋势,不同层理角度煤出口 CH_4 流量大小表现为 $0>30>60>90^\circ$ 。 CO_2 突破后,出口 CH_4 流量逐渐减少;层理角度越大,出口 CH_4 流量下降速度越慢,随着驱替的持续进行,不同层理角度煤的出口 CH_4 流量大小转变为 $90>60>30>0^\circ$ 。

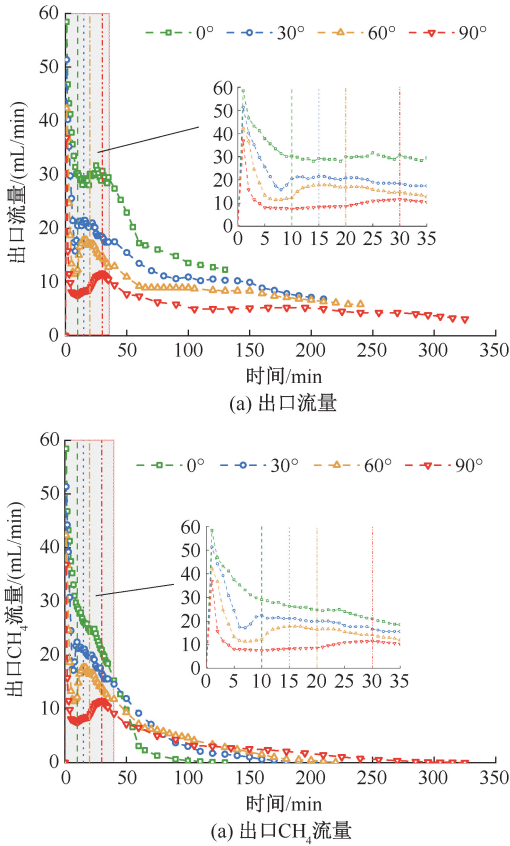


图 5 不同层理角度煤的出口气体流量和出口 CH_4 流量
Fig. 5 Exhaust gas flow rate and exhaust CH_4 flow rate for coal at different bedding angles

2.3 CO_2 驱替 CH_4 效果分析

2.3.1 CH_4 采收率

图 6 为不同层理角度煤采收率随时间变化情况,采收率定义为排出 CH_4 量与煤体中吸附 CH_4 的比值^[24-26]:

$$R = \frac{Q_2(\text{CH}_4)}{Q_1(\text{CH}_4)} \times 100\% \quad (1)$$

式中: R 为 CH_4 采收率,%; $Q_2(\text{CH}_4)$ 为 CO_2 注入后出口排出 CH_4 量,mL; $Q_1(\text{CH}_4)$ 为煤体吸附 CH_4 的量,mL。

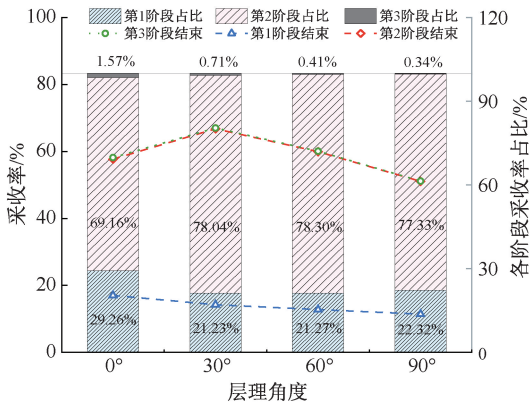


图 7 不同驱替阶段的 CH_4 采收率及占比

Fig. 7 CH_4 recovery rates and proportions at different displacement stages

由于驱替前煤体的 CH_4 吸附量差异较小,因此 CH_4 产出量较大程度的决定采收率。由图 6 可知:由 CH_4 采收率在前期迅速上升,且层理角度越大, CH_4 采收率增长越慢。在驱赶阶段 CH_4 的排出量大小关系为 $0>30>60>90^\circ$ 。采收率大小关系也为 $0>30>60>90^\circ$ 。随着驱替过程进入置换与竞争吸附阶段,由于 0° 层理煤优势通道的存在, CO_2 气体并未充分扩散至较小的孔隙中去置换出附着在煤体小孔隙表面的 CH_4 分子,因此, 0° 层理煤在置换与竞争吸附阶段 CH_4 的排出量很快达到最值,而最终表现出排出量 $30>0>60>90^\circ$ 的试验结果,因此,总体计算的采收率表现出 30° 最大。不同层理角度煤的 CH_4 采收率分别为 58.2%、67%、60%和 51%。

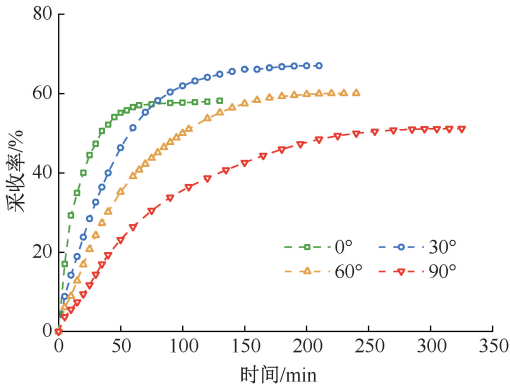


图 6 不同层理角度煤的 CH_4 采收率

Fig. 6 CH_4 recovery rate of coal at different bedding angles

图 7 为不同层理角度煤在不同驱替阶段的 CH_4 采收率变化及占比。在驱替第 1 阶段结束时,不同层理角度煤的 CH_4 采收率分别为 17.02%、14.23%、12.78%和 11.42%,可见:不同层理角度煤的 CH_4 采收率在驱赶阶段表现为 $0>30>60>90^\circ$;在

第2阶段结束时,不同层理角度煤的 CH₄ 采收率分别为 57.71%、66.75%、59.94% 和 51.06%。可见:不同层理角度煤的 CH₄ 采收率在置换与竞争吸附阶段表现为 30>60>0>90°, 驱替结束时,不同层理角度煤的 CH₄ 采收率分别为 58.17%、66.99%、60.06% 和 51.15%。这表明不同层理角度煤在不同驱替阶段对 CH₄ 采收率的贡献存在显著差异。第2阶段的 CH₄ 采收率对总采收率的贡献最大,分别占其总采收率的比例分别为 69.16%、78.14%、78.30% 和 77.33%。其次为第1阶段,分别为 29.26%、21.23%、21.27% 和 22.32%。第3阶段对 CH₄ 采收率的贡献最少分别为 1.57%、0.71%、0.41% 和 0.34%。

2.3.2 驱替置换比

为进一步分析 CO₂ 对 CH₄ 的置换和驱替能力,引入驱替置换比^[27-28]来分析,如下式:

$$D = \frac{Q_3(\text{CO}_2)}{Q_4(\text{CH}_4)} \quad (2)$$

式中: D 为驱替置换比; $Q_3(\text{CO}_2)$ 为滞留在煤体中 CO₂ 的量, mL; $Q_4(\text{CH}_4)$ 为 CO₂ 注入后出口产出的 CH₄ 量, mL。

图8为不同层理角度煤的驱替置换比随时间变化曲线,由图8可知:不同层理角度煤的驱替置换比呈现出2种变化趋势:0°层理煤由于优势渗流通道的形成,其驱替置换比呈现持续上升的趋势;而非0°层理煤由于驱替未突破时 CO₂ 全部滞留在煤体中,且随着时间的推移,CO₂ 滞留量不断增大,因此造成驱替置换比初始快速上升的趋势。且上升阶段保持 90>60>30° 的趋势。30、60 和 90° 层理煤分别在 20、15 和 15 min 时达到峰值点,随着 CO₂ 的突破,出口 CO₂ 开始涌出,驱替置换比开始下降,30、60 和 90° 层理煤分别在 40、50 和 60 min 时降到最低点。随着驱替的进行,CH₄ 涌出量逐渐降低,煤体中滞留的 CO₂ 量仍然在上升,驱替置换比再次上升。整个驱替过程中,非 0° 层理煤的驱替置换比始终表现为 90° 最大,60° 次之,30° 最小。0、30、60 和 90° 煤的驱替置换比最终值分别为 2.157、2.123、2.369 和 3.072,整体表现为 90>60>0>30°, 30° 煤样置换效果最好,这是因为随着驱替过程进入置换与竞争吸附阶段,由于 0° 层理煤优势通道的存在,CO₂ 气体并未充分扩散至较小的孔隙中去置换出附着在煤体小孔隙表面的 CH₄ 分子,在置换与竞争吸附阶段 CH₄ 的排出量很快达到最值,而最终表现出 CH₄ 排出量 30>0° 的试验结果。而整个驱替过程中非 0° 层理煤

的 CH₄ 排出量表现为 30>60>90°, 因此,计算所得的驱替置换比表现为 30° 层理煤最小。

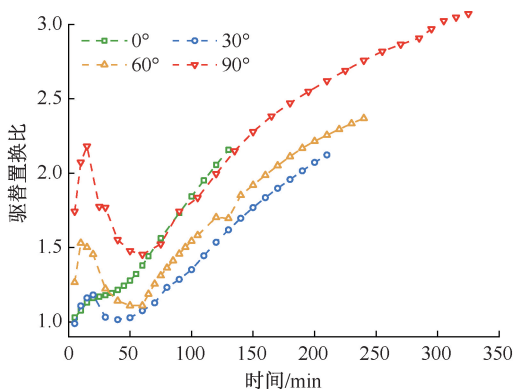


图8 不同层理角度煤的驱替置换比

Fig. 8 Displacement ratio of coal with different bedding angles

2.4 CO₂ 封存效果分析

2.4.1 CO₂ 穿透率

为分析不同层理角度煤 CO₂ 驱替 CH₄ 时滞留在煤体中 CO₂ 量(封存量)的变化特征。首先分析 CO₂ 气体的穿透率。CO₂ 穿透率定义为出口 CO₂ 流量和进口 CO₂ 流量的比值,该曲线反映流动相和固体相的吸附平衡关系^[29]。

图9为不同层理角度煤的 CO₂ 穿透率变化曲线,在 CO₂ 突破前,注入的 CO₂ 全部以吸附态或游离态存在于煤体孔隙中,不同层理角度煤的穿透率均为 0。CO₂ 发生突破后,出口开始有 CO₂ 逐渐涌出,排出 CO₂ 占比逐渐增加。当穿透率接近 100% 时,进出口的 CO₂ 流量趋于一致,储存在煤体中的 CO₂ 接近吸附平衡状态。层理面与渗流方向夹角越大,气体渗流所受阻碍越大,因此滞留在煤体中的 CO₂ 越多,因此不同层理角度煤的穿透率始终保持 0>30>60>90° 的特征。驱替过程结束后,0° 层理煤穿透率达到 98% 以上,认为吸附几乎达到平衡,30、60 和 90° 层理煤穿透率分别为 80.5%、69.6% 和 53.3%,均未达到吸附平衡。

2.4.2 CO₂ 封存量及封存率

图10为不同层理角度煤的 CO₂ 封存量和封存率随时间变化曲线,CO₂ 封存量^[30]为 CO₂ 进出口流量的差值。由图10可知:在整个驱替过程中,不同层理角度煤的 CO₂ 封存量均随时间逐渐增加,且增长速率随着层理角度的增大而减小,各层理角度煤驱替结束时的封存量随着层理角度的增大而增大。这是由于驱替结束时,高角度层理的驱替时间较长,

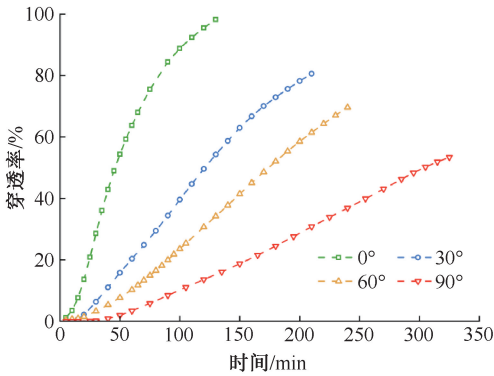


图9 不同层理角度煤的CO₂穿透率

Fig. 9 CO₂ breakthrough rate of coal at different bedding angles

层理角度对气体的阻碍作用较强,因此,在驱替结束时,存留在煤体中的气体量也较高。

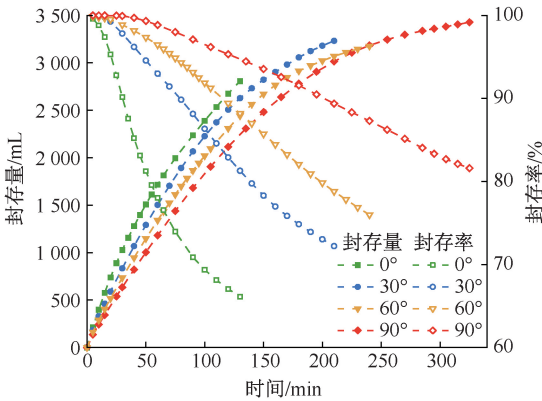


图10 不同层理角度煤的CO₂封存量及封存率

Fig. 10 CO₂ storage capacity and storage efficiency of coal at different bedding angles

封存率定义为CO₂封存量和CO₂总注入量的比值^[31],在驱替初期,由于未突破前出口无CO₂气体溢出,进口注入的CO₂全部存留在煤体中,封存率表现最大。CO₂突破后,出口逐渐有CO₂排出,封存率开始下降,随着CO₂封存逐渐达到平衡状

态,出口流出的CO₂越来越多,封存率越来越小。对比不同层理角度下CO₂的封存率随时间变化趋势,0°层理煤封存率下降最快,其次是30°层理煤和60°层理煤,90°层理煤下降最慢,各层理角度煤的最终封存率随着层理角度的增大而增大。0、30、60和90°煤样最终的封存率分别为66.11%、72.20%、75.98%和81.59%。

3 结 论

1) 层理角度显著影响CO₂突破时间与气体组分变化速率。层理面与渗流方向夹角越大,CO₂运移受阻越明显,突破时间越长,出口气体组分变化越缓慢。驱替过程中,进口与出口流量始终保持0>30>60>90°的特征,而出口CH₄流量在CO₂突破后呈现90>60>30>0°的特征,反映高角度层理对CH₄后期运移的阻滞效应。

2) 驱赶阶段采收率表现为0>30>60>90°;置换与竞争吸附阶段转变为30>60>0>90°,且该阶段对总采收率贡献占比达77%以上;最终30°层理煤的CH₄采收率最高达到67%。0°层理因存在优势渗流通道,CO₂无法充分置换小孔隙中的CH₄,而高角度层理则过度阻滞气体流动,均降低整体驱替效率。

3) 驱替置换比与层理角度呈正相关,30°层理置换效果最优。非0°层理煤的驱替置换比均呈现“上升—峰值—下降—再上升”的变化趋势,驱替置换比最终值大小表现为90>60>0>30°。30°层理煤因兼具适度的渗流通道与阻滞效应,实现CO₂与CH₄的充分接触,置换效率最佳。

4) CO₂封存效果随层理角度增大而提升。驱替过程中CO₂穿透率始终保持0>30>60>90°,封存率则随层理角度的增大而递增,90°层理煤封存率最高,为81.59%,表明高角度层理有较强的渗流阻滞作用,提升了CO₂长期封存潜力。

参 考 文 献

[1] 孙海涛,舒龙勇,姜在炳,等. 煤矿区煤层气与煤炭协调开发机制模式及发展趋势[J]. 煤炭科学技术,2022,50(12):1-13.
Sun Haitao, Shu Longyong, Jiang Zaibing, et al. Progress and trend of key technologies of CBM development and utilization in China coal mine areas[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(12):1-13.

[2] 苏中良,刘曰武,张俊清. 为什么说煤层气是一种清洁高效安全的新型能源[J]. 油气井测试,2010,19(6):23-28,82-83.
Su Zhongliang, Liu Yuewu, Zhang Junqing, et al. Why is coalbed methane considered a clean, efficient, and safe new energy source[J]. Oil and Gas Well Testing,2010,19(6):23-28,82-83.

- [3] 张守仁,桑树勋,吴见,等. CO₂ 驱煤层气关键技术研发及应用[J]. 煤炭学报,2022,47(11):3 952–3 964.
Zhang Shouren, Sang Shuxun, Wu Jian, et al. Progress and application of key technologies for CO₂ enhancing coalbed methane[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(11):3 952–3 964.
- [4] 侯丽,田晶晶,张彦欣. 沁水盆地 CO₂ 地质封存及驱替煤层气选区数值模拟研究[J]. 山西煤炭,2016,36(1):75–78.
Hou Li, Tian Jingjing, Zhang Yanxin. Numerical simulation on geological sequestration of CO₂ and coalbed methane displacement[J]. Shanxi Coal, 2016, 36(1):75–78.
- [5] Wen Haiou, Fan Chaojun, Jiang Xiaofeng, et al. Experimental investigations on enhanced coal seam methane extraction by injecting gas: a review[J]. Energy & Fuels, 2024, 38(5):DOI:10. 1021/acs. energyfuels. 3c04121.
- [6] Laubach S E, Marrett R A, Olson J E, et al. Characteristics and origins of coal cleat: a review[J]. International Journal of Coal Geology, 1998, 35(1/2/3/4):175–207.
- [7] 王鹏翔,张洲,余婉莹,等. 深/浅部煤储层孔裂隙结构及三维空间分布差异特征:以准噶尔盆地为例[J]. 油气藏评价与开发,2025,15(2):227–236.
Wang Pengxiang, Zhang Zhou, Yu Wanying, et al. Characteristics of pore-fracture structure and three-dimensional spatial distribution differences in deep and shallow coal reservoirs: a case study of Junggar basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2025, 15(2):227–236.
- [8] Du Liang, Jia Chao, Wang Haichao, et al. Response patterns of acoustic wave characteristics to reservoir petrophysical parameters in different bedding directions: a case study of low- and middle-rank coals in Xinjiang, China[J]. ACS Omega, 2024, 9(39):DOI:10. 1021/acsomega. 4c05176.
- [9] Niu Qinghe, Cao Liwen, Sang Shuxun, et al. Study on the anisotropic permeability in different rank coals under influences of supercritical CO₂ adsorption and effective stress and its enlightenment for CO₂ enhance coalbed methane recovery[J]. Fuel, 2020;DOI:10. 1016/j. fuel. 2019. 116515.
- [10] Liu Jiajia, Gao Jianliang, Zhang Xuebo, et al. Experimental study of the seepage characteristics of loaded coal under true triaxial conditions[J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 2019, 52(8):DOI:10. 1007/s00603–018–1720–x.
- [11] Liu Jianbao, Song Zhimin, Yang Chengtao, et al. Changing law of permeability of coal reservoirs under variable pressure conditions and its influence on extraction efficiency of coalbed methane[J]. Processes, 2023, 11(8):DOI: 10. 3390/pr11082455.
- [12] Tang Xiaojun, Xu Feng, Bi Yewu, et al. Mechanical and permeability characteristics of gas-bearing coal under various bedding angles[J]. Processes, 2025, 13(1):DOI:10. 3390/pr13010176.
- [13] Liu Chao, Yin Guangzhi, Li Minghui, et al. Deformation and permeability evolution of coals considering the effect of beddings[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2019, 117:49–62.
- [14] Li Yong, Wang Yanbin, Wang Jin, et al. Variation in permeability during CO₂-CH₄ displacement in coal seams: part 1-experimental insights[J]. Fuel,2020,63;DOI:10. 1016/j. fuel. 2019. 116666.
- [15] 周西华,姜鹏飞,白刚,等. CO₂ 驱替 CH₄ 置换效率测试与分析[J]. 中国安全科学学报,2020,30(2):8–13.
Zhou Xihua, Jiang Pengfei, Bai Gang, et al. Test and analysis of displacement efficiency of CO₂ replacing CH₄[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(2):8–13.
- [16] Li Zhenbao, Sun Xiaodong, Zhao Kaikai, et al. Deformation mechanism and displacement ability during CO₂ displacing CH₄ in coal seam under different temperatures[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2022, 108;DOI: 10. 1016/j. jngse. 2022. 104838.
- [17] Li Zhenbao, Wang Shanrui, Wei Gaoming, et al. The seepage driving mechanism and effect of CO₂ displacing CH₄ in coal seam under different pressures[J]. Energy, 2024, 293;DOI: 10. 1016/j. energy. 2024. 130740.
- [18] Gao Changjing, Liu Dameng, Vandeginste V, et al. Effects of CO₂ injection pressure and confining pressure on CO₂-enhanced coalbed methane recovery: experimental observations at various simulated geological conditions[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 483;DOI:10. 1016/j. cej. 2024. 149207.
- [19] 安丰华,丁远东,丁彦宁,等. 煤体吸附-解吸 CO₂、CH₄、N₂ 变形特征及差异[J]. 中国安全科学学报,2025,35(7):98–105.
An Fenghua, Ding Yuandong, Ding Yanning, et al. Differential dynamic patterns of CO₂, CH₄ and N₂ deformation by adsorption-desorption in coal bodies[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(7):98–105.
- [20] 杨宏民,梁龙辉,冯朝阳,等. 注气压力对不同注源气体置换效应的影响[J]. 中国安全科学学报,2017,27(9):

122-128.

Yang Hongmin, Liang Longhui, Feng Chaoyang, et al. Study on influence of injection pressure on replacement effect for different injection gases[J]. China Safety Science Journal, 2017, 27(9):122-128.

- [21] Pan Hongyu, Han Mingrui, Zhang Tianjun, et al. Influencing factors and adsorption process of $N_2/CH_4/CO_2$ competitive adsorption in coal[J]. Energy & Fuels, 2024, 38(22):DOI:10. 1021/acs. energyfuels. 4c04363.
- [22] Bai Gang, Su Jun, Fu Shigen, et al. Effect of CO_2 injection on CH_4 desorption rate in poor permeability coal seams: an experimental study[J]. Energy, 2021:DOI:10. 1016/j. energy. 2021. 121674.
- [23] 李珍宝,王凤双,梁瑞,等. 液态 CO_2 驱替煤体 CH_4 的渗流特性及机制分析[J]. 采矿与安全工程学报,2022, 39(6):1 265-1 271.
- Li Zhenbao, Wang Fengshuang, Liang Rui, et al. Analysis of seepage characteristics and mechanisms of liquid CO_2 displacing coalbed CH_4 [J]. Journal of Mining and Safety Engineering,2022,39(6):1 265-1 271.
- [24] 许江,蒋石宇,彭守建,等. 不同初始储层压力下 CO_2 驱替 CH_4 试验研究[J]. 煤田地质与勘探,2025,53(4): 94-105.
- Xu Jiang, Jiang Shiyu, Peng Shoujian, et al. An experimental study of CH_4 displacement by CO_2 under varying initialreservoir pressures[J]. Coal Geology & Exploration, 2025, 53(4):94-105.
- [25] 唐书恒,马彩霞,叶建平,等. 注二氧化碳提高煤层甲烷采收率的实验模拟[J]. 中国矿业大学学报,2006,35(5): 607-611,616.
- Tang Shuheng, Ma Caixia, Ye Jianping, et al. A modeling experiment of enhancing coalbed methane recovery by carbon dioxide injection[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006, 35(5):607-611,616.
- [26] Fan Chaojun, Elsworth D, Li Sheng,et al. Modelling and optimization of enhanced coalbed methane recovery using CO_2/N_2 mixtures[J]. Fuel, 2019, 253:1 114-1 129.
- [27] 黎力,梁卫国,李治刚,等. 注热 CO_2 驱替增产煤层气试验研究[J]. 煤炭学报,2017,42(8):2 044-2 050.
- Li Li, Liang Weiguo, Li Zhigang, et al. Experimental investigation on enhancing coalbed methane recovery by injecting high temperature CO_2 [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(8):2 044-2 050.
- [28] 郑学召,黄渊,文虎,等. 不同注气压力下 CO_2 驱替置换 CH_4 试验研究[J]. 工矿自动化,2021,47(4):73-78.
- Zheng Xuezhao, Huang Yuan, Wen Hu, et al. Experimental study of CO_2 replacement for CH_4 at different gas injection pressures[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(4):73-78.
- [29] 王玉红,刘晓勤,姚虎卿. 气体中醋酸甲酯在活性炭上的动态吸附[J]. 南京工业大学学报(自然科学版),2004, 26(1):43-47.
- Wang Yuhong, Liu Xiaoqin, Yao Huqing, et al. Dynamic adsorption of methyl acetate on activated carbon in gas phase[J]. Journal of Nanjing Tech University(Natural Science Edition), 2004,26(1):43-47.
- [30] 刁玉杰,刘廷,魏宁,等. 咸水层二氧化碳地质封存潜力分级及评价思路[J]. 中国地质,2023,50(3):943-951.
- Diao Yujie, Liu Ting, Wei Ning, et al. Classification and assessment methodology of carbon dioxide geological storagein deep saline aquifers[J]. Geology in China, 2023, 50(3): 943-951.
- [31] Fan Chaojun, Elsworth D, Li Sheng, et al. Thermo-hydro-mechanical-chemical couplings controlling CH_4 production and CO_2 sequestration in enhanced coalbed methane recovery[J]. Energy, 2019, 173:DOI:10. 1016/j. energy. 2019. 02. 126.



作者简介: 梁冰 (1962—),女,辽宁盘锦人,博士,教授,主要从事岩石力学与工程、矿山环境与灾害力学等研究。E-mail: lbwqx@163.com。