

引用格式:王志坚. CO<sub>2</sub>相态变化致裂对煤层吸附性影响机理研究[J]. 油气藏评价与开发, 2024, 14(6): 967-974.

WANG Zhijian. Mechanism study on effect of CO<sub>2</sub> phase transition fracturing on methane adsorption in coal[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2024, 14(6): 967-974.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2024.06.019

# CO<sub>2</sub>相态变化致裂对煤层吸附性影响机理研究

王志坚

(山西潞安集团余吾煤业有限责任公司, 山西 长治 046100)

**摘要:** 液态CO<sub>2</sub>相变致裂技术(LCPTF)是一种能够提高煤层气采收率的新型无水压裂技术。为了研究CO<sub>2</sub>相变致裂前后的煤体吸附性变化特征,选取余吾煤矿3号煤层为实验对象,开展高压压汞、低温液氮吸附实验和CH<sub>4</sub>等温吸附实验,分析液态CO<sub>2</sub>相变致裂技术对煤体吸附性的影响。研究表明:液态CO<sub>2</sub>相变致裂后,煤体吸附孔孔容和吸附孔孔比表面积减小;煤体渗流孔孔比表面积减小,渗流孔孔容增大。液态CO<sub>2</sub>相变致裂技术能够通过改变煤体的孔隙结构进而影响煤体Langmuir(朗缪尔)吸附常数的变化。液态CO<sub>2</sub>相变致裂后,Langmuir吸附常数 $a$ 值降低,吸附常数 $b$ 值增加,表明液态CO<sub>2</sub>相变致裂作用对煤体具有吸附能力降低、解吸速率增强作用。研究为液态CO<sub>2</sub>相变致裂技术的改进和现场应用优化提供了理论指导。

**关键词:** 煤层瓦斯;煤体吸附性;煤体孔隙结构;液态CO<sub>2</sub>相变致裂;游离态瓦斯

中图分类号:TE372

文献标识码:A

## Mechanism study on effect of CO<sub>2</sub> phase transition fracturing on methane adsorption in coal

WANG Zhijian

(Yuwu Coal Mining Company, Lu'an Chemical Group, Shanxi Province, Changzhi, Shanxi 046100, China)

**Abstract:** Liquid CO<sub>2</sub> phase transition fracturing (LCPTF) technology is a novel water-free fracturing technique that can enhance coalbed methane recovery. To study the changes in coal adsorption characteristics before and after CO<sub>2</sub> phase transition fracturing, the No. 3 coal seam from the Yuwu coal mine was selected for experimentation. High-pressure mercury intrusion, low-temperature liquid nitrogen adsorption experiments, and CH<sub>4</sub> isothermal adsorption tests were conducted to analyze the impact of liquid CO<sub>2</sub> phase transition fracturing on coal adsorption. The results showed that after liquid CO<sub>2</sub> phase transition fracturing, the pore volume and specific surface area of adsorption pores in coal decreased; the specific surface area of seepage pores decreased while the pore volume of seepage pores increased. The liquid CO<sub>2</sub> phase transition fracturing technique could influence the change in the Langmuir adsorption constant of coal by altering the pore structure. After liquid CO<sub>2</sub> phase transition fracturing, the Langmuir adsorption constant "a" value decreased and the "b" value increased, indicating that the fracturing process reduced the coal's adsorption capacity and enhanced the desorption rate. This study provides theoretical guidance for the improvement and optimization of liquid CO<sub>2</sub> phase transition fracturing technology for field applications.

**Keywords:** coalbed methane; adsorption; pore structure of coal; liquid CO<sub>2</sub> phase transition fracturing; free gas

煤层气作为一种非常规天然气,其回采对提供清洁能源和减少碳排放具有重要意义<sup>[1-2]</sup>。中国主要含煤地层地质构造条件复杂,特别是煤储层的低渗透性极大地限制了煤层气的开采<sup>[3]</sup>。因此,探索更安全、高效与经济的低渗透煤层增产措施具有重要意义<sup>[4-5]</sup>。

液态CO<sub>2</sub>相变致裂技术(LCPTF)是一种新型的无水压裂技术。此技术利用液态CO<sub>2</sub>快速气化所产生的高压气体破坏煤层,来提高煤层气通道的连通性和煤中瓦斯

的运移能力<sup>[6-8]</sup>。近年来,液态CO<sub>2</sub>相变致裂技术得到了广泛的关注,一系列液态CO<sub>2</sub>相变致裂技术的现场应用结果也表明此技术不仅能够提高煤层瓦斯的抽采率,其爆破无火花的技术优势也保证了现场施工的安全性<sup>[9-11]</sup>。煤层气主要吸附在煤基质中,煤体的瓦斯吸附能力是影响液态CO<sub>2</sub>相变致裂技术对煤层气开采影响的关键因素<sup>[12-13]</sup>。基于煤体孔隙结构对甲烷吸附、运移的影响,煤中孔隙可分为吸附孔( $d < 100$  nm,  $d$ 为煤体孔隙直径)和

收稿日期:2023-11-29。

作者简介:王志坚(1972—),男,本科,高级工程师,主要从事瓦斯地质与煤层气开发方面的工作。地址:山西省长治市屯留区余吾镇前庄村01号,邮政编码:046100。E-mail:Wzj7227@163.com

渗流孔( $d > 100$  nm)。煤体的吸附常数可以通过Langmuir(朗缪尔)吸附模型和等温吸附实验数据来获得<sup>[3]</sup>。此外,大量研究表明,煤体孔隙结构的变化可以改变煤体的瓦斯吸附能力<sup>[14-15]</sup>。然而,目前的研究关于液态CO<sub>2</sub>相变致裂作用对煤体孔隙结构和煤体吸附特性影响的研究却很少报道,制约了液态CO<sub>2</sub>相变致裂的效果评价和现场应用。因此,液态CO<sub>2</sub>相变致裂对煤体孔隙结构的影响和液态CO<sub>2</sub>相变致裂后煤体孔隙结构改变进而对煤体瓦斯吸附能力的影响需做进一步探究。

研究对余吾煤矿3号煤层的原生结构煤进行液态CO<sub>2</sub>相变致裂,采用高压压汞、低温液氮吸附和等温吸附实验,测试致裂前后实验煤样的差异,揭示了液态CO<sub>2</sub>相变致裂对煤体孔隙结构和气体吸附能力的影响,为压裂技术现场应用效果评价提供了理论指导。

## 1 实验与理论计算

### 1.1 样品

实验采取山西余吾煤矿3号煤层N1103掘进工作面的原生结构煤作为实验对比煤样,原生结构煤的工业分析、镜质组反射率等基础参数如表1所示。实验煤样为相同地点的液态CO<sub>2</sub>相变致裂施工作业位置的压裂煤。如图1所示,压裂煤呈现黑色、半亮的块状结构。研究设置了2组平行实验以确保研究结果的可靠性。原煤样品分别标记为YW-R1、YW-R2;液态CO<sub>2</sub>相变致裂处理后的压裂煤样品则分别标记为YW-F1、YW-F2。

表1 基础参数

Table 1 Basic Parameters of coal samples

煤样	工业分析/%			$R_{\max}$ /%
	$M_{\text{ad}}$	$A_{\text{ad}}$	$V_{\text{daf}}$	
原煤	0.89	13.19	11.20	2.20

注: $M_{\text{ad}}$ 为空气干燥基水分,%; $A_{\text{ad}}$ 为空气干燥基灰分,%; $V_{\text{daf}}$ 为干燥无灰基挥发分,%; $R_{\max}$ 为最大镜质体反射率,%。

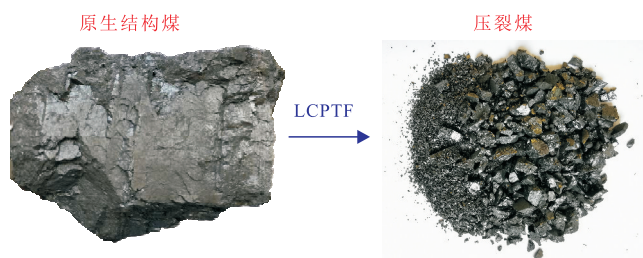


图1 实验煤样  
Fig. 1 Coal samples

### 1.2 液态CO<sub>2</sub>相变致裂

液态CO<sub>2</sub>相变致裂设备主要由压裂管、充气阀和释放管等部件组成<sup>[8,16]</sup>。压裂过程是通过加热压裂管中的液态CO<sub>2</sub>产生高压气体,高压气体从喷气阀中喷出,从而作用于煤体。现场施工中将压裂管置入已施工完毕的巷道预置钻孔中,在完成封孔后连接信号线并启动发爆器引发爆破(图2)。压裂管喷出的高压气体通过破坏周边煤层的煤体结构,从而改变煤体的吸附性能。

### 1.3 孔隙结构测试

压汞法的理论测量值介于 $3.5 \sim 10^6$  nm,当压汞的注入压力超过10 MPa时,煤孔隙结构的损伤会导致测量产生误差<sup>[17]</sup>。因此,实验采用压汞法测试渗流孔的孔隙结构( $d > 100$  nm)。而低温液氮测试法则用来测试吸附孔的孔隙结构( $d < 100$  nm)。压汞法(MIP)采用的AutoPore IV 9505全自动压汞仪测试,测试煤样粒度介于3~6 mm。低温液氮吸附法(LTNA)采用AutoPore ASAP2460吸附仪,测试煤样粒径介于60~80目的煤粉。

### 1.4 等温吸附实验

实验仪器为美国TerraTek(特拉泰克)公司生产的ISO-300型等温吸附仪。实验温度设置为30 °C,实验压力范围介于0~11 MPa,吸附瓦斯为CH<sub>4</sub>,设置8个吸附平衡压力。参照国家标准《煤的高压等温吸附试验方法:GB/T 19560—2008》开展煤的Langmuir吸附常数测试。

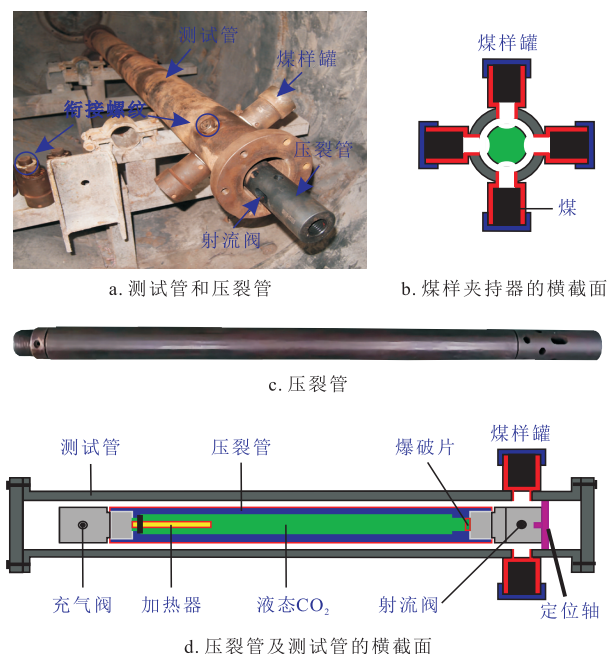


图2 压裂设备示意图  
Fig. 2 LCPTF apparatus

Langmuir吸附常数的计算公式如下<sup>[18]</sup>:

$$V = \frac{abp}{1 + bp} \quad (1)$$

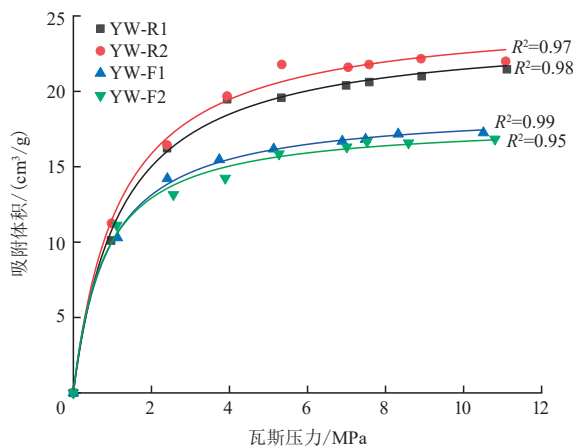
式中:  $V$ 为吸附容量,单位  $\text{cm}^3/\text{g}$ ;  $a$ 为吸附常数,表示最大吸附容量,单位  $\text{cm}^3/\text{g}$ ;  $b$ 为吸附常数,表示在低压状态下瓦斯的解吸速度,单位  $\text{MPa}^{-1}$ ;  $p$ 为瓦斯压力,单位  $\text{MPa}$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 吸附常数变化

图3展示了CO<sub>2</sub>相变致裂前后煤体等温吸附曲线的变化。由图3可知,基于等温吸附数据拟合得到的等温线表现出较高的拟合精度,准确地反映了煤体Langmuir吸附常数的变化。且在相同的瓦斯压力 $p$ 下,液态CO<sub>2</sub>相变致裂后的煤体CH<sub>4</sub>吸附量明显小于原煤样品,同时所实验的2个平行煤样均表现出了相同的变化规律。因此,可以定性地表明液态CO<sub>2</sub>相变致裂作用能够改变煤体的Langmuir吸附常数 $a$ 、 $b$ 值。煤体Langmuir吸附常数可通过式(1)推导得出。

表2显示了液态CO<sub>2</sub>相变致裂前后煤体等温吸附常数的变化。原煤的Langmuir吸附常数 $a$ 值在压裂前分别为24.062 8、25.181 9  $\text{cm}^3/\text{g}$ ;液态CO<sub>2</sub>相变致裂后,压裂煤的Langmuir吸附常数 $a$ 值分别变为18.908 5、17.801 4  $\text{cm}^3/\text{g}$ ,



注:  $R$ 为相关系数。

图3 等温吸附曲线

Fig. 3 Isothermal adsorption curves

吸附常数 $a$ 的均值减少了25.45%。原煤的Langmuir吸附常数 $b$ 值在压裂前分别为0.828 6、0.850 4  $\text{MPa}^{-1}$ ;液态CO<sub>2</sub>相变致裂后,压裂煤的Langmuir吸附常数 $b$ 值分别变为1.133 9、1.271 1  $\text{MPa}^{-1}$ ,吸附常数 $b$ 的均值增加了43.24%。

### 2.2 煤孔隙结构变化

在液态CO<sub>2</sub>相变致裂前,样品YW-R1、YW-R2的渗流孔孔容分别为0.050 7、0.046 9  $\text{cm}^3/\text{g}$ ;液态CO<sub>2</sub>相变致裂后,2个样品的渗流孔孔容分别变为0.061 8、0.058 1  $\text{cm}^3/\text{g}$ 。压裂煤在渗流孔孔容中的汞注入体积明显大于原煤渗流孔孔容中的汞注入体积(表3、图4a、图4b)。进退汞曲线间的椭圆反映滞后环大小(图4a、图4b)。原煤(YW-R1和YW-R2)的进退汞曲线间的滞后环较小,孔隙连通性差,主要为半开放孔隙;CO<sub>2</sub>相变致裂煤(YW-F1和YW-F2)的滞后回线明显增大,表明孔隙由半开放孔向开放孔转化<sup>[19]</sup>。上述表明CO<sub>2</sub>压裂对渗流孔有改造效果。

渗流孔孔容均值由0.048 80  $\text{cm}^3/\text{g}$ 增至0.059 95  $\text{cm}^3/\text{g}$ ,增幅为22.85%(图4c)。液态CO<sub>2</sub>相变致裂后,2个煤样品的渗流孔孔比表面积分别由0.048 4、0.043 5  $\text{m}^2/\text{g}$ 降至0.027 3、0.021 4  $\text{m}^2/\text{g}$ (表3)。渗流孔的孔比表面积均值由0.045 95  $\text{m}^2/\text{g}$ 降至0.024 40  $\text{m}^2/\text{g}$ ,降幅为47.01%(图4d)。液态CO<sub>2</sub>相变致裂作用增加了渗流孔孔容,减少了煤体的渗流孔孔比表面积。

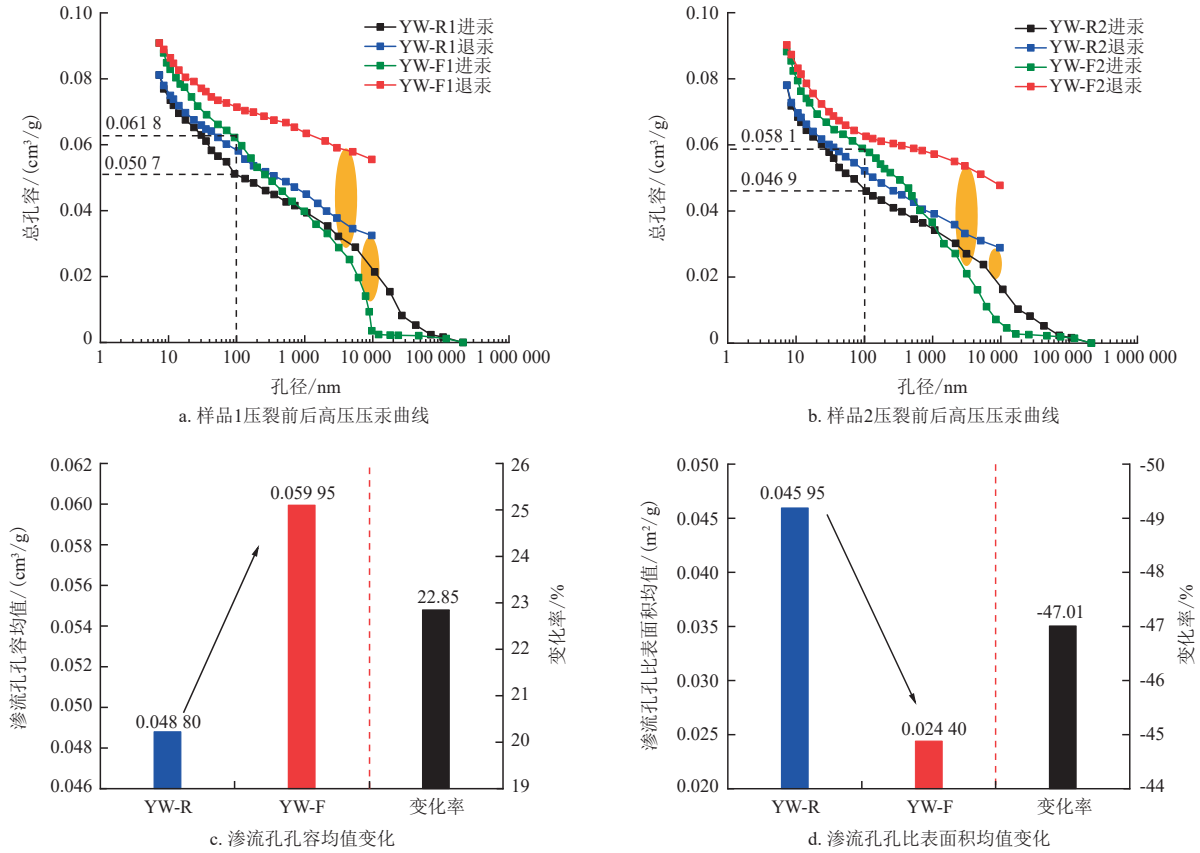
2个原煤样品的氮吸附能力分别为0.71、0.68  $\text{cm}^3/\text{g}$ (图5a、图5b)。液态CO<sub>2</sub>相变致裂后,2个压裂煤样品的氮吸附能力分别变为0.50、0.53  $\text{cm}^3/\text{g}$ (图5c、图5d)。2个压裂煤样品的氮吸附能力要小于液态CO<sub>2</sub>相变致裂之前的2个原煤样品的氮吸附能力。结果表明:液态CO<sub>2</sub>相变致裂作用能够改变煤体的吸附性。图5进一步显示,原始煤样在相对压力为0.5时,解吸曲线存在明显的拐点,反映其内部存在墨水瓶状的孔隙<sup>[16]</sup>。CO<sub>2</sub>压裂后,解吸曲线拐点消失,墨水瓶状孔在压裂后向柱状孔转化。

液态CO<sub>2</sub>相变致裂前的吸附孔孔容分别为0.000 915、0.000 883  $\text{cm}^3/\text{g}$ ;致裂后,YW-F1、YW-F2的吸附孔孔容分别变为0.000 600、0.000 593  $\text{cm}^3/\text{g}$ 。致裂前,YW-R1、YW-R2的吸附孔孔比表面积分别为0.483 97  $\text{m}^2/\text{g}$ 和

表2 Langmuir吸附参数变化

Table 2 Changes in Langmuir adsorption constants

样品	$a/(\text{cm}^3/\text{g})$	$a$ 均值/ $(\text{cm}^3/\text{g})$	$a$ 均值的变化率/%	$b/(\text{MPa}^{-1})$	$b$ 均值/ $(\text{MPa}^{-1})$	$b$ 均值的变化率/%
YW-R1	24.062 8	24.622 35	-25.45	0.828 6	0.839 5	43.24
YW-R2	25.181 9			0.850 4		
YW-F1	18.908 5	18.354 95		1.133 9	1.202 5	
YW-F2	17.801 4			1.271 1		



注:进汞曲线与退汞曲线之间的黄色椭圆区域反映了滞后回线的大小。滞后回线小(黄色椭圆的面积小),反映孔隙连通性差,孔隙主要为半开放孔隙;滞后回线大(黄色椭圆的面积大),表明孔隙由半开放孔向开放孔转化。

图4 液态CO<sub>2</sub>相变致裂前后渗流孔隙结构变化

Fig. 4 Variations in pore structure of seepage pores before and after LCPTF

表3 渗流孔隙结构参数  
Table 3 Parameters of seepage pore structure

样品	渗流孔容积/(cm <sup>3</sup> /g)	渗流孔孔比表面积/(m <sup>2</sup> /g)
YW-R1	0.050 7	0.048 4
YW-R2	0.046 9	0.043 5
YW-F1	0.061 8	0.027 3
YW-F2	0.058 1	0.021 4

表4 吸附孔隙结构参数  
Table 4 Parameters of adsorption pore structure

样品	孔容/(cm <sup>3</sup> /g)	孔比表面积/(m <sup>2</sup> /g)	平均孔径/nm
YW-R1	0.000 915	0.483 97	14.78
YW-R2	0.000 883	0.572 76	15.12
YW-F1	0.000 600	0.216 40	16.46
YW-F2	0.000 593	0.321 12	16.88

0.572 76 m<sup>2</sup>/g;致裂后,YW-F1、YW-F2的吸附孔比表面积分别变为0.216 40 m<sup>2</sup>/g和0.321 12 m<sup>2</sup>/g。致裂前YW-R1、YW-R2的吸附孔平均孔径分别为14.78 nm和15.12 nm;液态CO<sub>2</sub>相变致裂后,YW-R1、YW-R2的吸附孔平均孔径分别变为16.46 nm和16.88 nm(表4)。

吸附孔容积随孔径增加呈线性增长,孔比表面积呈“U”形变化(图6)。压裂前,YW-R1、YW-R2吸附孔容积均值由0.000 899 cm<sup>3</sup>/g降至0.000 602 cm<sup>3</sup>/g,降幅为33.04%(图7a)。吸附孔孔比表面积均值由0.528 37 m<sup>2</sup>/g

降至0.268 76 m<sup>2</sup>/g,降幅为49.13%(图7b)。吸附孔平均孔径均值增幅为11.51%。液态CO<sub>2</sub>相变致裂作用同时减少了吸附孔孔容和吸附孔孔比表面积,增加了吸附孔的均值孔径(图7c)。

### 2.3 煤孔隙结构变化对吸附常数的影响

根据朗缪尔吸附理论,煤体吸附常数的大小与实验温度、吸附质、吸附剂密切相关<sup>[20]</sup>。研究所设置的实验温度(30 ℃)与吸附质(CH<sub>4</sub>)均相同,因此,实验中的煤体孔

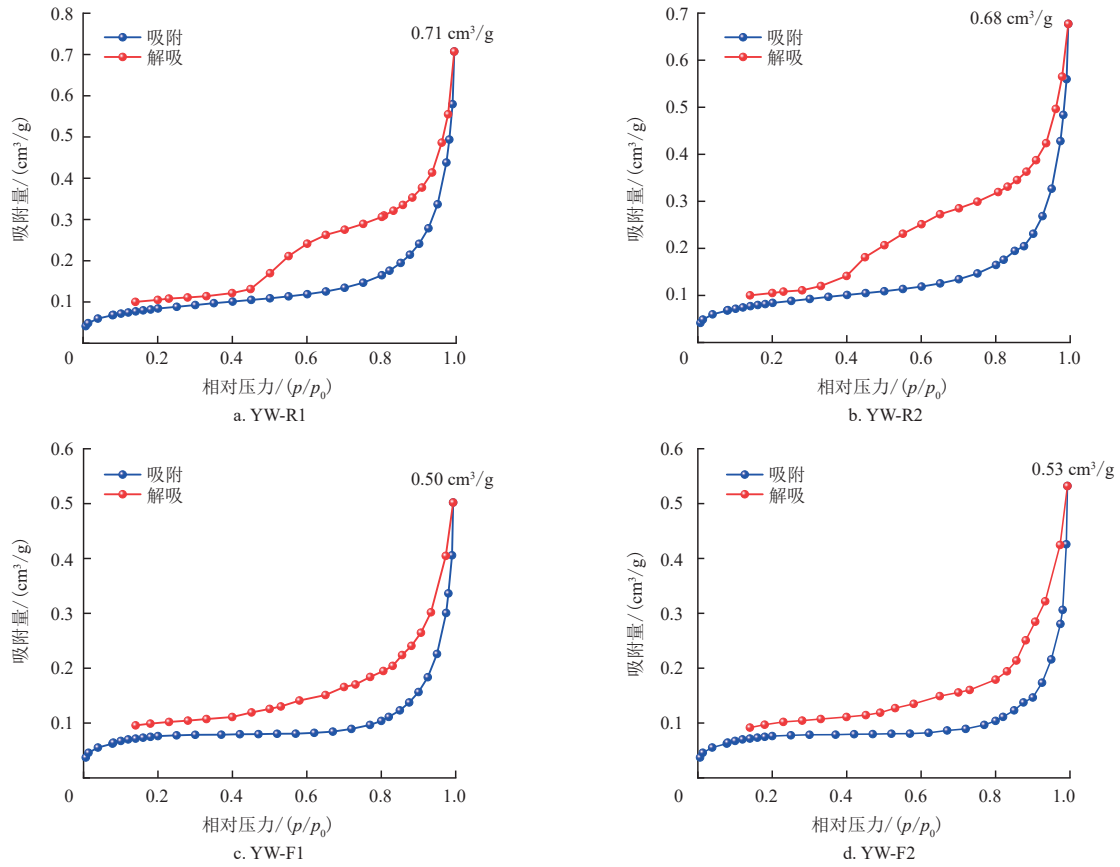


图5 液态CO<sub>2</sub>相变致裂前后低温液氮吸附曲线变化

Fig. 5 Changes in low-temperature liquid nitrogen adsorption curves before and after LCPTF

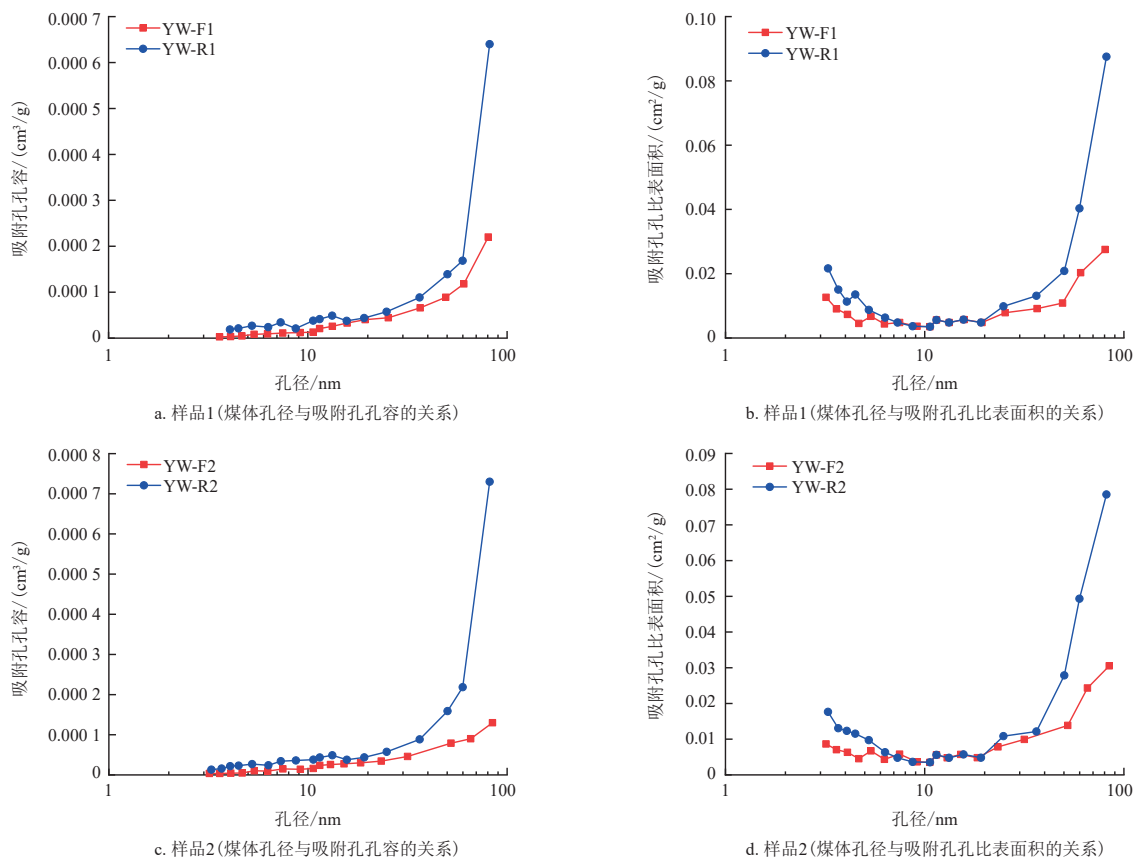


图6 吸附孔容积与孔比表面积随孔径分布

Fig. 6 Pore volume and specific surface area distribution of adsorption pores by pore size

隙结构是影响煤体吸附常数的主要因素。根据体积填充和煤基质表面吸附原理,瓦斯吸附主要依赖于煤基质表面的范德华力<sup>[14,21]</sup>。液态CO<sub>2</sub>相变致裂后,液态CO<sub>2</sub>相变致裂对吸附孔的扩孔和转化作用使得煤体吸附孔孔容和吸附孔孔比表面积减小,使煤体内的瓦斯吸附空间和煤基质表面吸附位减少<sup>[17]</sup>(图8、图9)。结果表明:液态CO<sub>2</sub>相变致裂作用能够使煤基质对甲烷的吸附能力减弱,

Langmuir吸附常数 $a$ 的降低。煤体吸附常数 $a$ 的变化趋势与吸附孔孔容、吸附孔孔比表面积的变化趋势一致(图8a、图8b),这与煤体Langmuir吸附常数 $a$ 主要受煤体吸附孔结构影响的研究结果相同<sup>[22]</sup>。

经过液态CO<sub>2</sub>相变致裂后的Langmuir吸附常数 $b$ 增大,其变化趋势与Langmuir吸附常数 $a$ 的增加趋势相反(表2、图8c、图8d)。液态CO<sub>2</sub>相变致裂后的渗流孔孔容

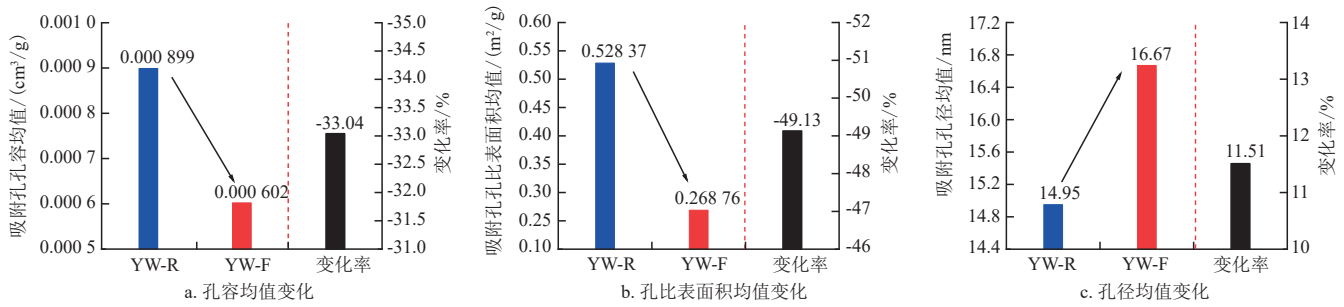


图7 液态CO<sub>2</sub>相变致裂前后煤体吸附孔孔隙结构变化

Fig. 7 Variations in pore structure of adsorption pores before and after LCPTF

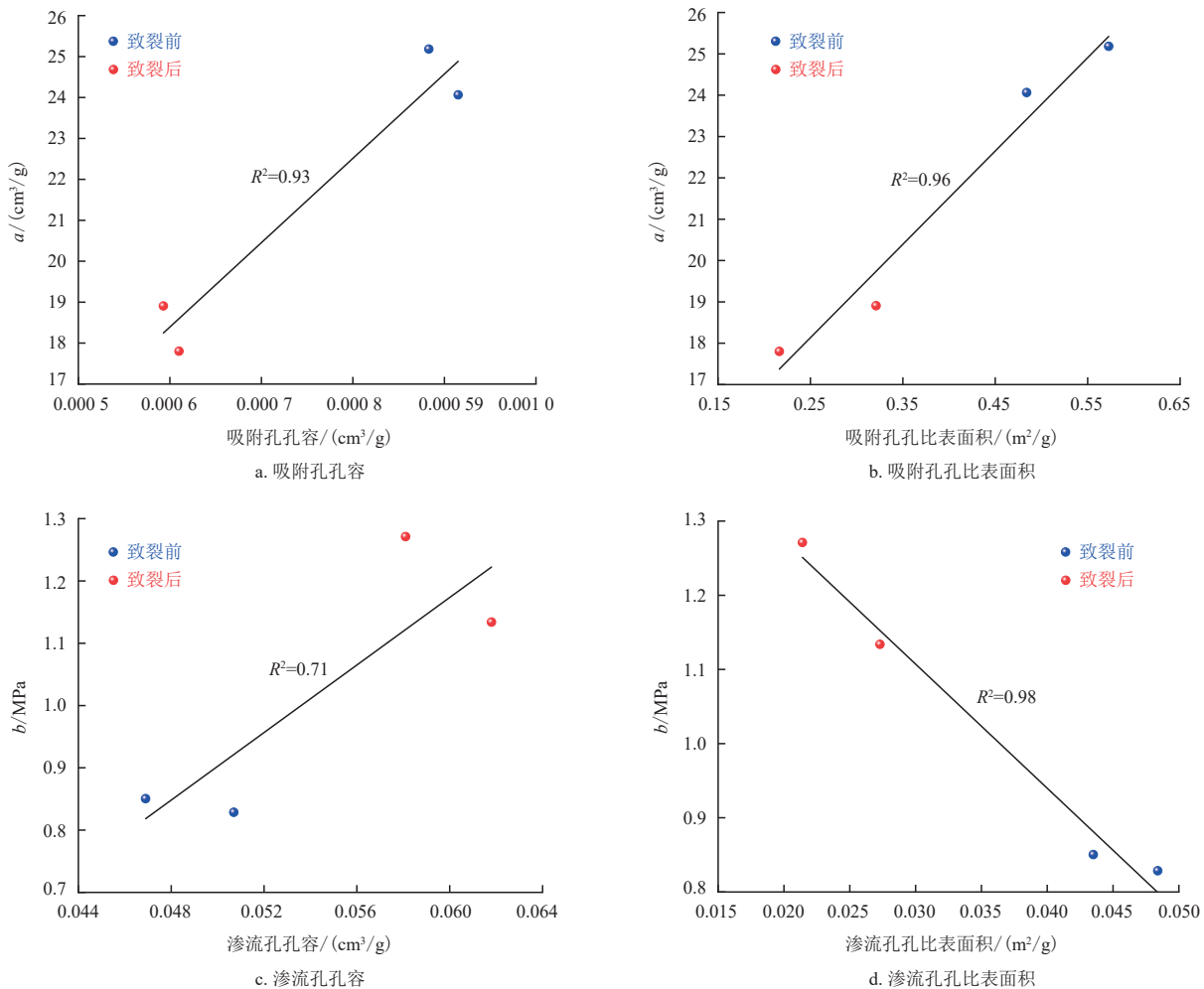


图8 孔隙结构变化对煤吸附常数的影响

Fig. 8 Effects of pore structure on Langmuir adsorption constants

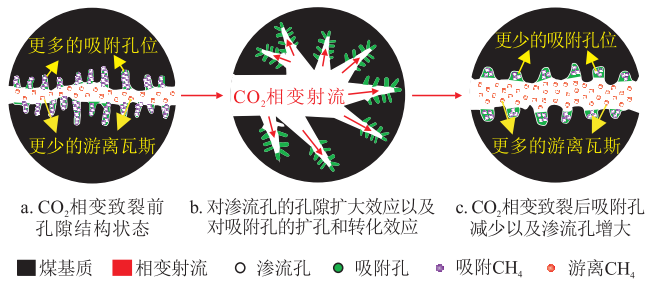


图9 CO<sub>2</sub>相变致裂对煤体孔隙结构影响机理

Fig. 9 Diagram of effects of LCPTF on pore structure of coal

增加,而其孔比表面积减小(图8c、图8d、图9)。渗流孔孔隙结构的变化表明:液态CO<sub>2</sub>相变致裂能有效改善煤基质中瓦斯运移通道的连通性,并使煤体的孔隙结构更加简化<sup>[16-17]</sup>。液态CO<sub>2</sub>相变致裂的扩孔和转化效应不仅减少了煤体吸附孔孔隙,而且增加了煤体渗流孔孔隙,促使大量吸附态瓦斯转变为游离态瓦斯从而储存在渗流孔中<sup>[17]</sup>(图9)。当开采煤层时,由于CO<sub>2</sub>相变致裂改善了煤体的孔隙连通性,并且降低了孔隙结构的复杂性,这将导致渗流孔内大量游离态瓦斯在煤体揭露的一瞬间快速解吸释放。同时,Langmuir吸附常数 $b$ 反映了煤体在低压阶段的解吸速率<sup>[1]</sup>。因此,液态CO<sub>2</sub>相变致裂能够增强煤体的解吸能力,并使Langmuir吸附常数 $b$ 值增加,这与已有研究结果一致<sup>[17]</sup>。研究进一步揭示了液态CO<sub>2</sub>相变致裂对高阶煤( $R_{\max}=2.20\%$ )吸附特性的具体影响规律。

### 3 结论

1) 液态CO<sub>2</sub>相变致裂能够改变煤体的瓦斯吸附性能,并且对煤体Langmuir吸附常数的影响各不相同。煤体的Langmuir吸附常数 $a$ 在相变致裂后呈下降趋势,而煤体的Langmuir吸附常数 $b$ 则在相变致裂后则呈上升趋势。

2) 液态CO<sub>2</sub>相变致裂能够通过高压CO<sub>2</sub>喷射气流破坏煤体孔隙结构。液态CO<sub>2</sub>相变致裂后,煤体的吸附孔孔容和吸附孔孔比表面积降低。煤体渗流孔孔比表面积的变化与吸附孔孔比表面积相同,在相变致裂后也呈降低趋势;而煤体渗流孔孔容则在CO<sub>2</sub>相变致裂后升高。

3) 煤体的Langmuir吸附常数主要受煤体孔隙结构的影响。煤体吸附孔孔容和吸附孔孔比表面积的减小使煤基质内的吸附空间和表面吸附位相应减少,导致Langmuir吸附常数 $a$ 的降低;渗流孔孔容的增大和渗流孔孔比表面积的降低有利于改善煤层气运移通道的连通性,促使煤体孔隙结构变得更简单,致使Langmuir吸附常数 $b$ 增大。

### 参考文献

- [1] MOORE T A. Coalbed methane: A review[J]. International Journal of Coal Geology, 2012, 101, 36–81.
- [2] MASTALERZ M, DROBNIAK A. Coalbed methane: Reserves, production, and future outlook[J]. In Future Energy, 2020: 97–109.
- [3] CHENG Y P, PAN Z J. Reservoir properties of Chinese tectonic coal: A review[J]. Fuel, 2020, 260: 116350.
- [4] PAN Z J, CONNELL L D, CAMILLERI M. Laboratory characterisation of coal reservoir permeability for primary and enhanced coalbed methane recovery[J]. International Journal of Coal Geology, 2010, 82(3–4): 252–261.
- [5] XIAN B A, LIU G F, BI Y S, et al. Coalbed methane recovery enhanced by screen pipe completion and jet flow washing of horizontal well double tubular strings[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2022, 99: 104430.
- [6] HU G Z, HE W R, SUN M. Enhancing coal seam gas using liquid CO<sub>2</sub> phase-transition blasting with cross-measure borehole[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2018, 60: 164–173.
- [7] LIU X F, NIE B S, GUO K Y, et al. Permeability enhancement and porosity change of coal by liquid carbon dioxide phase change fracturing[J]. Engineering Geology, 2021, 287: 106–107.
- [8] LIU H, LIU G F, ZHANG Z, et al. Effects of liquid CO<sub>2</sub> phase transition fracturing on mesopores and micropores in coal[J]. Energy & Fuels, 2022, 36(17): 10016–10025.
- [9] FAN S X, ZHANG D, WEN H, et al. Enhancing coalbed methane recovery with liquid CO<sub>2</sub> fracturing in underground coal mine: From experiment to field application[J]. Fuel, 2021, 290: 119793.
- [10] WANG H D, CHENG Z H, ZOU Q L, et al. Elimination of coal and gas outburst risk of an outburst-prone coal seam using controllable liquid CO<sub>2</sub> phase transition fracturing[J]. Fuel, 2021, 284: 119091.
- [11] CAO Y X, ZHANG J S, ZHANG X S, et al. Micro-fractures in coal induced by high pressure CO<sub>2</sub> gas fracturing[J]. Fuel, 2022, 311: 122–148.
- [12] YAO Y B, LIU D M. Developing features of fissure system in Henan coal reserves seams and research on mining of coal bed methane[J]. Coal Science and Technology, 2006, 34(3): 64–68.
- [13] ZHOU D, WU C F, SONG Y, et al. Evolution characteristic and implication of coalbed methane desorption stages division for tectonically deformed coals[J]. Transport in Porous Media, 2022, 141(3): 713–736.
- [14] YAO Y B, LIU D M, TANG D Z, et al. Fractal characterization of adsorption-pores of coals from North China: An investigation on CH<sub>4</sub> adsorption capacity of coals[J]. International Journal of Coal Geology, 2008, 73(1): 27–42.
- [15] YAO Y B, LIU D M, TANG D Z, et al. Fractal characterization of seepage-pores of coals from China: An investigation on permeability of coals[J]. Computers & Geosciences, 2009, 35(6): 1159–1166.
- [16] 张震, 刘高峰, 李宝林, 等. CO<sub>2</sub>相变致裂煤的纳米孔隙尺度改造效应[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(3): 672–684.
- [17] ZHANG Zhen, LIU Gaofeng, LI Baolin, et al. Transformed effect of nano-pores in coal by CO<sub>2</sub> phase transition fracturing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(3): 672–684.
- [17] LIU G F, LI B L, ZHANG Z, et al. Effects of Liquid CO<sub>2</sub> phase transition fracturing on methane adsorption of coal[J]. Energy & Fuels, 2023, 37(3): 1949–1961.
- [18] 王汉鹏, 张冰, 袁亮, 等. 吸附瓦斯含量对煤与瓦斯突出的影响与能量分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(10): 2449–2456.

- WANG Hanpeng, ZHANG Bing, YUAN Liang, et al. Influence of adsorption gas content on coal and gas outburst and energy analysis [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(10): 2449-2456.
- [19] ZOU Q L, LIN B Q, LIU T, et al. Variation of methane adsorption property of coal after the treatment of hydraulic slotting and methane pre-drainage: A case study[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering 2014, 20(20): 396-406.
- [20] PONGTORN C, SAYEED A M, ROBERT L R, et al. Modeling the temperature dependence of supercritical gas adsorption on activated carbons, coals and shales[J]. International Journal of Coal Geology 2015, 138: 113-126.
- [21] MASTALERZ M, DROBNIAK A, DARIUSZ S, et al. Variations in pore characteristics in high volatile bituminous coals: Implications for coal bed gas content[J]. International Journal of Coal Geology 2008, 76(3): 205-216.
- [22] 刘高峰, 李宝林, 张震, 等. 不同变质煤的瓦斯膨胀能演化特征及其突出预测启示[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(10): 1-8.
- LIU Gaofeng, LI Baolin, ZHANG Zhen, et al. Gas expansion energy of coals with different metamorphic degrees: Evolutionary characteristics and their implications for the outburst prediction[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(10): 1-8.
- (编辑 常燕)
- 
- (上接第966页)
- [13] 桂宝林. 六盘水地区煤层气地质特征及富集高产控制因素[J]. 石油学报, 1999, 20(3): 39-45.
- GUI Baolin. Geological characteristics and enrichment controlling factors of coalbed methane in Liupanshui region[J]. Acta Petroli Sinica, 1999, 20(3): 39-45.
- [14] 王树才, 陈锦海, 覃洪, 等. 贵州水城二塘-大河边晚二叠世煤系上部沉积相与厚煤层分布规律[C]//中国地质科学院宜昌地质矿产研究所文集(15): 地质出版社, 1990, 30.
- WANG Shucai, CHEN Jinhai, QIN Hong, et al. Distribution pattern of thick coal seams and sedimentary facies of the upper part of late Permian coal measures in Ertang Dahebian, Shuicheng area, Guizhou province[C]// Proceedings of Yichang Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences (15): Geological Publishing House, 1990, 30.
- [15] 金军, 杨兆彪, 秦勇, 等. 贵州省煤层气开发进展、潜力及前景[J]. 煤炭学报, 2022, 47(11): 4113-4126.
- JIN Jun, YANG Zhaobiao, QIN Yong, et al. Progress, potential and prospects of CBM development in Guizhou Province[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(11): 4113-4126.
- [16] 曹明亮, 康永尚, 邓泽, 等. 煤阶和构造应力强度对煤岩力学性质的影响作用[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(12): 45-55.
- CAO Mingliang, KANG Yongshang, DENG Ze, et al. Influence of coal rank and tectonic stress intensity on mechanical properties of coal rock[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(12): 45-55.
- [17] SING K S W. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity[J]. Pure and Applied Chemistry, 1984, 54(4): 603-619.
- [18] 降文萍, 张群, 姜在炳, 等. 构造煤孔隙结构对煤层气产气特征的影响[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(1): 173-179.
- JIANG Wenping, ZHANG Qun, JIANG Zaibing, et al. Effect on CBM drainage characteristics of pore structure of tectonic coal [J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(1): 173-179.
- [19] LI Y, TANG D Z, WU P, et al. Continuous unconventional natural gas accumulations of Carboniferous-Permian coal-bearing strata in the Linxing area, northeastern Ordos basin, China[J]. Journal of Natural Gas Science & Engineering, 2016, 36: 314-327.
- [20] 秦勇, 叶建平, 林大扬, 等. 煤储层厚度与其渗透性及含气性关系初步探讨[J]. 煤田地质与勘探, 2000, 48(1): 24-27.
- QIN Yong, YE Jianping, LIN Dayang, et al. Relationship of coal reservoir thickness and its permeability and gas bearing property[J]. Coal Geology & Exploration, 2000, 48(1): 24-27.
- [21] 高为, 韩忠勤, 金军, 等. 六盘水煤田煤层气赋存特征及有利区评价[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(5): 81-89.
- GAO Wei, HAN Zhongqin, JIN Jun, et al. Occurrence characteristics and assessment of favorable areas of coalbed methane exploration in Liupanshui coalfield[J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(5): 81-89.
- [22] 王佟, 王庆伟, 傅雪海. 煤系非常规天然气的系统研究及其意义[J]. 煤田地质与勘探, 2014, 42(1): 24-27.
- WANG Tong, WANG Qingwei, FU Xuehai. The significance and the systematic research of the unconventional gas in coal measures[J]. Coal Geology & Exploration, 2014, 42(1): 24-27.
- [23] 鲍齐文. 大河边向斜煤层气系统及其地质控制[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- BAO Qiwen. Coalbed methane system and its geological controls in Dahebian Syncline, Guizhou, China[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [24] 许浩, 汤达祯, 赵俊龙, 等. 水力封堵型煤层气藏类型及地质意义[J]. 中国煤层气, 2011, 8(2): 32-34.
- XU Hao, TANG Dazhen, ZHAO Junlong, et al. Types of hydraulically sealed CBM reservoir and their geologic significance[J]. China Coalbed Methane, 2011, 8(2): 32-34.
- [25] 朱志良, 高小明. 陇东煤田侏罗系煤层气成藏主控因素与模式[J]. 岩性油气藏, 2022, 34(1): 86-94.
- ZHU Zhiliang, GAO Xiaoming. Main controlling factors and models of Jurassic coalbed methane accumulation in Longdong coalfield[J]. Lithologic Reservoirs, 2022, 34(1): 86-94.
- [26] 李林, 张培河, 武英俊, 等. 沁北盆地太原组煤层地面垂直井抽采储层改造技术研究[J]. 煤炭技术, 2023, 42(6): 88-91.
- LI Lin, ZHANG Peihe, WU Yingjun, et al. Research on surface vertical well drainage reservoir transformation technology of Taiyuan Formation coal seam in northern Qinshui Basin[J]. Coal Technology, 2023, 42(6): 88-91.
- [27] 桑树勋, 皇凡生, 单衍胜, 等. 碎软低渗煤储层强化与煤层气地面开发技术进展[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(1): 1-19.
- SANG Shuxun, HUANG Fansheng, SHAN Yansheng, et al. Technology processes of enhancement of broken soft and low permeability coal reservoir and surface development of coalbed methane[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(1): 1-19.
- [28] 牟全斌. 我国煤层造穴增渗技术研究现状与进展[J]. 煤矿机械, 2023, 44(2): 65-68.
- MOU Quanbin. Research status and progress of cavitation permeability-increasing technology for coal seam in China[J]. Coal Mine Machinery, 2023, 44(2): 65-68.
- (编辑 余聪)