

多场耦合作用下页岩渗透特性实验研究^{*}

张道川^{1,2}, 周军平^{1,2}, 鲜学福^{1,2}, 姜永东^{1,2}, 刘国军^{1,2}

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 重庆大学 资源及环境科学学院, 重庆 400044)

摘 要:页岩气开采过程,其储层页岩渗透率受多重因素的影响。采用自主研发的多场耦合作用下不同相态 CO₂致裂驱替 CH₄ 实验装置,实验研究了有效应力、孔隙压力、温度以及吸附膨胀效应等因素对裂隙页岩体与型岩渗透特性的影响。结果表明:(1)页岩渗透率随有效应力增加呈负指数关系减小,且型岩对于有效应力变化具有更强的敏感性;(2)在相同应力状态下,由于吸附引起的差异性膨胀效应会降低页岩渗透率,不同气体作用下测得的页岩渗透率表现为 He>N₂>CO₂。(3)两种页岩中渗透率随孔隙压力变化规律具有差异性。SC-CO₂致裂页岩在低压条件下 Klingenberg 效应不明显,渗透率随平均孔隙压力的增大而增大,型岩在低压阶段由于 Klingenberg 效应对渗透率变化起主导作用,随着孔隙压力增加,其渗透率降低,在达到极小值后,随着孔隙压力的增加,Klingenberg 效应减弱,有效应力起主导作用,渗透率随孔隙压力增加而增加;(4)温度作用通过改变页岩的孔隙结构、力学性质等控制页岩渗透率的变化,随着温度增加,页岩渗透率降低。因此,在页岩气开采过程以及 CO₂强化页岩气开采过程需要考虑多因素耦合作用对页岩渗透率的影响。

关键词:页岩气;渗透率;有效应力;孔隙压力;温度;基质膨胀

中图分类号:TE312

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2018)03-0613-09

Experiment Study on the Coupling Multi-field Effect on the Dynamic Variation of Permeability in Shale

Zhang Daochuan^{1,2}, Zhou Junping^{1,2}, Xian Xuefu^{1,2}, Jiang Yongdong^{1,2}, Liu Guojun^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, P.R. China;
2. College of Resource and Environment Science, Chongqing University, Chongqing 400044, P.R. China)

Abstract: During the exploitation of shale gas, the permeability of reservoirs influenced by multiple factors. Using the self-developed experimental device for displacing CH₄ by different phase of CO₂ in multi-field coupling conditions, the study of the percolation mechanism of shale, which can be influenced by effective stress, pore pressure, temperature and swell/shrinkage effect, are done. The experimental results show that: (1) With the effective stress increased, the permeability decreased as negative exponent relation; and the influence law of permeability with different loading path of effective stress is different. (2) In the stage of low pore pressure, Klinkenberg effect is remarkable for moulded shale; on the contrary, with pore pressure increase, the permeability of fractured shale increase. (3) The permeability of shale is sensitive to temperature which could transform pore structure and mechanical properties. (4) The permeability of shale decrease because of the matrix swelling, and there

^{*} 收稿日期:2018-01-15(修改稿)

作者简介:张道川(1990-),男,安徽蚌埠人,硕士生,主要从事煤层气、页岩气渗流力学方面的研究工作。

E-mail:zdc910531@163.com

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)项目(2014CB239204);国家自然科学基金青年基金(51204218);重庆市院士基金(CSTC 2013jcyj90001);教育部创新团队发展计划项目(IRT13043)

is otherness of adsorption swelling for different kinds of gas; and the matrix adsorption swelling impact the permeability together with effective stress and temperature The experiment results is instructive for the study of percolation mechanism and exploitation of shale gas.

Keywords: shale gas; permeability; effective stress; pore pressure; temperature; adsorption induced swelling

0 引言

我国页岩气储量十分丰富,资源可采量达 25 万亿立方米,勘探开发潜力巨大,其高效开发对于保障我国能源安全意义重大。我国页岩气储层普遍低孔、低渗,需要进行水力压裂才能获取商业开采价值。目前,压裂主要采用滑溜水,由于我国页岩黏土含量普遍较高,容易遇水膨胀,导致孔隙结构堵塞,伤害储层,从而影响致裂效果。超临界二氧化碳由于其既有气体的低界面张力和易扩散性,也有液体的高密度和溶解性好的特点,具有超强的流动、渗透和传递性能^[1],可最大限度地沟通天然裂缝,同时,可避免水力压裂过程页岩层中黏土的水化作用,提高裂缝的导流能力,从而在页岩气开发中表现出非常好的应用前景^[2-4]。已有研究表明,超临界 CO₂ (SC-CO₂) 压裂能够形成复杂裂隙网络^[5-6],并且由于页岩对于 CO₂ 的吸附能力强于 CH₄,因此,CO₂ 可有效置换页岩中的 CH₄,提高页岩气采收率,同时实现 CO₂ 的地质封存。

页岩压裂后流体在裂隙岩体中的渗流特性对于页岩气产能预测至关重要。页岩气开采过程中,其储层渗透率受众多因素(地应力、温度、压力、吸附/解吸特性)的影响^[7-12],目前,针对页岩,已有一些学者对不同影响因素开展了相应研究。段永刚等^[13]考虑页岩气藏在渗流过程中的吸附解吸特性,利用 Langmuir 等温吸附方程建立双重介质压裂井渗流数学模型。李治平等^[14]、吴剑等^[15]从纳米级孔隙尺度着手,研究了吸附气解吸对页岩渗透率的影响,建立了页岩气在基质纳米级孔隙中的渗流模型。李亚洲等^[16]认为页岩气渗流的双重基质模型应同时考虑吸附气解吸和基质孔隙中游离气。侯磊等^[17]通过实验研究表明,吸附气体的溶胀作用和支撑剂的嵌入作用对页岩渗透率影响显著。杨泽皓等^[18]通过岩心径向渗流实验,提出页岩径向渗透率的计算方法。张宏学等^[19]利用脉冲法测量了煤系页岩的裂隙渗透率,并对建立的有效应

力-渗透率模型进行拟合分析。研究结果表明,该模型可以较好地描述页岩气开采过程中储层裂隙渗透与孔隙压力之间的关系。陈天宇等^[20]研究了牛蹄塘组含气页岩的渗流特性,其渗透率表现出各向异性特征,且随围压增大呈幂函数减小;随围压升高,渗透率对其敏感性降低。张文等^[21]认为微裂缝是提高页岩渗透率的关键,随着有效应力增大,微裂缝闭合,页岩渗透率呈指数关系减小。以上研究大多基于理论假设分析,实验研究考虑的渗透率影响因素也较为单一。针对多场耦合作用下超临界 CO₂ 致裂置换页岩气过程流体渗流规律的实验研究还不多,页岩气初级开采过程以及注 CO₂ 强化开采过程储层渗透率受应力、温度、压力,以及吸附变形共同作用的影响,其各自的影响程度以及耦合机理如何,都还需要进一步深入研究。

本文利用自主研发的多场耦合作用下不同相态 CO₂ 致裂驱替 CH₄ 实验装置,首先进行了 SC-CO₂ 压裂页岩的实验,获取了裂隙页岩体试件。在此基础上,进行了有效应力、孔隙压力、温度、滑脱效应以及吸附膨胀效应对页岩渗透特性影响的实验研究,综合分析不同因素对页岩渗透率的影响程度,并进行了页岩型岩试件的渗流实验,对比分析了裂隙对于页岩渗透特性的影响机理。研究成果可以为 CO₂ 强化页岩气开发过程储层渗透率的动态预测以及页岩气产能预测提供科学依据。

1 实验方法

1.1 页岩试件采集加工

压裂实验所用页岩取自四川盆地长宁地区,属志留系—龙马溪组页岩。利用取芯机在大块页岩上垂直层理方向钻取圆柱体页岩试件,并切割打磨成 $\phi 100\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ 的圆柱体试件,采用如图 1(a)所示采用注入管进行压裂试件的制作,利用自主研发的多场耦合作用下不同相态 CO₂ 致裂驱替 CH₄ 实验装置进行页岩试件的 SC-CO₂ 压裂实验。压裂后的页岩 CT 扫描图像如图 2 所示。从图 2 可

以看出,SC-CO₂压裂后页岩具有明显的复杂裂隙网络结构,可采用该试件进行裂隙页岩体渗流实验。此外,为了对比分析致裂页岩与破碎页岩颗粒压制而成的页岩型岩试件渗流规律的异同,采用同一区域、同一层位的页岩试样制作了页岩型岩试件。型岩具体制作过程如下:首先把页岩人工粉碎,筛选粒径为40~60目的页岩颗粒,加适量水并搅拌混合均匀,在材料试验机上采用100 MPa压力压制成型,保压时间为40 min,从而获得φ100 mm×200 mm型岩试件,获得的型岩试件如图1(b)所示。将加工好的型岩试件置于80℃恒温箱中烘24 h,烘干后的试件存放于干燥处备用。

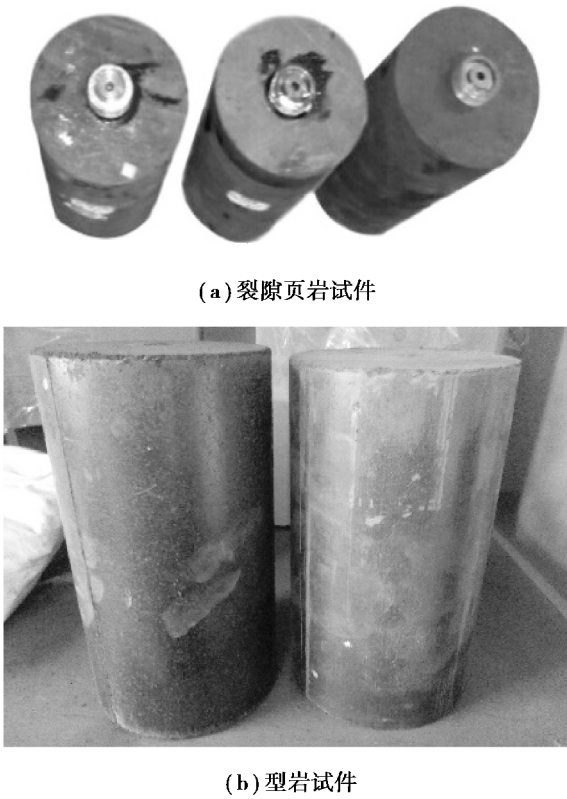


图1 页岩试件

Fig. 1 Samples of shale

对比图1和图2可以看出,SC-CO₂压裂后的页岩具有贯穿整个试件的人工裂缝,裂缝作为气体渗流的主要通道。页岩的型岩试件由粒径均匀的页岩颗粒压制而成,不具备明显的裂隙,试件具有较好的均一性,在压制成型过程中颗粒间形成的粒间孔为流体在页岩中的主要渗流通道。通过进行两种类型页岩的渗流实验研究,可以对比分析裂隙对于流体在页岩中渗流特性的影响。

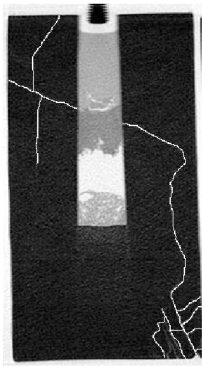


图2 压裂试件裂隙分布图

Fig. 2 The cracks of fractured shale

1.2 实验装置

实验采用自主研发的多场耦合作用下不同相态CO₂致裂驱替CH₄实验装置进行,该装置由三轴应力加载系统、CO₂加压系统(采用美国Teledyne公司生产的ISCO(260D)柱塞泵)、恒温油浴控制系统和数据采集系统组成,能够模拟不同地应力、不同储层压力以及不同地温条件下CO₂致裂页岩过程储层渗透率的动态变化,实验过程相关数据采用数据采集系统进行实时采集。其三轴加载系统能提供的最大轴向应力为100 MPa,最大围压为25 MPa。温度控制范围为0~100℃。该装置实物图和原理图分别如图3和图4所示。



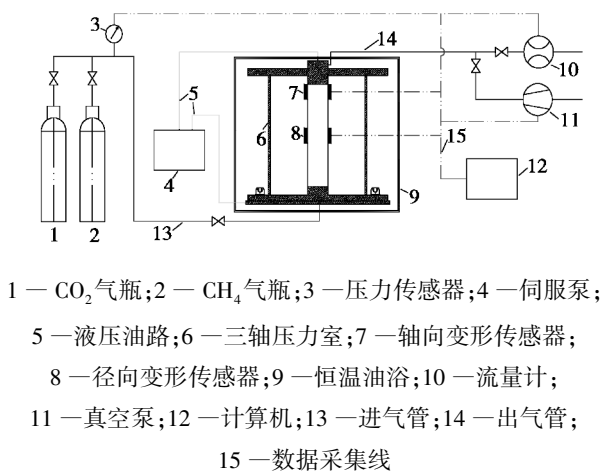
图3 实验装置实物图

Fig. 3 Experimental facilities

1.3 实验方案

页岩渗透率影响因素众多,实验采用控制自变量的方法,分别研究孔隙压力、有效应力、温度对渗透率的影响。具体实验步骤如下:

- (1) 将页岩试件放在干燥箱内,以80℃恒温干燥24 h。
- (2) 为了保证实验过程试件的密封性,在圆柱体试件表面均匀涂抹适当厚度的硅胶。



1 — CO₂气瓶;2 — CH₄气瓶;3 — 压力传感器;4 — 伺服泵;
5 — 液压油路;6 — 三轴压力室;7 — 轴向变形传感器;
8 — 径向变形传感器;9 — 恒温油浴;10 — 流量计;
11 — 真空泵;12 — 计算机;13 — 进气管;14 — 出气管;
15 — 数据采集线
图 4 实验原理图

Fig. 4 Diagram of experimental facilities

(3)待硅胶常温下风干后,将试件装入三轴室,采用热缩管进行试件密封,试件安装过程如图 5 所示。

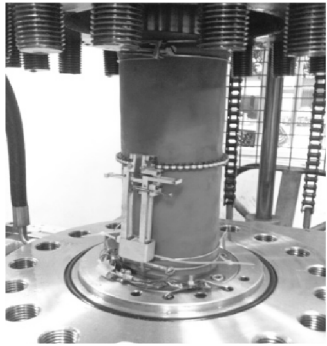


图 5 试件安装示意图

Fig. 5 The installation diagram of shale sample

(4)采用温度传感器、径向变形传感器对实验

表 1 实验方案

Table 1 Experimental program

影响因素	σ/MPa	$T/^{\circ}\text{C}$	试件	气体	P_1
孔隙压力	7	50	致裂页岩	N ₂ 、CO ₂	0.5~4.5
		30	致裂页岩	He、CO ₂	
			型岩		
有效应力	3~11	50	致裂页岩	He、N ₂ 、CO ₂	1.0
		30	致裂页岩	CO ₂	0.5
			型岩		
温度	3	20~50	致裂页岩	N ₂	0.5
	5				

2 实验结果

实验采用稳态法对页岩渗透率进行测试,根据达西定律,渗透率的计算公式为:

$$K = \frac{2P_0Q_0\mu L}{A(p_1^2 - p_2^2)} \times 1\,000 \tag{1}$$

式中: K 为渗透率, $10^{-3}\,\mu\text{m}^2$; Q_0 为气体流量, ml/s ; P_0 为当地大气压强, MPa ; μ 为气体的黏度系数, $10^{-3}\,\text{Pa}\cdot\text{s}$; L 为试样长度, cm ; A 为试样横截面积, cm^2 ; P_1 为入口气体压力, MPa ; P_2 为出口气体压力, $P_2=P_0$ 。

过程温度以及应变进行采集,将三轴压力室放入恒温油浴,实验前对整个系统抽真空。

(5)按照实验方案设定油浴温度、轴压、围压、入口气体压力,进行渗流实验,采用流量计对 He、N₂、CO₂或 CH₄在页岩中流量进行采集。

具体实验参数如表 1 所示。

2.1 孔隙压力对渗透率的影响

在温度为 50 ℃,轴压、围压均为 7 MPa 条件下,N₂、CO₂在 SC-CO₂致裂页岩中渗透率与孔隙压力之间的关系如图 6(a)所示;在温度 30 ℃,轴压、围压为 7 MPa 时,He、CO₂在 SC-CO₂致裂页岩中渗透率与孔隙压力之间的关系如图 6(b)所示。

由图 6 可以看出,在温度恒定,轴压、围压不变时,致裂页岩渗透率与孔隙压力之间的关系有如下规律:

(1)致裂页岩渗透率与孔隙压力之间关系符合正指数函数关系,在一定范围内,页岩渗透率随

孔隙压力增大而增大,这是因为孔隙压力增大使得有效应力减小,页岩孔裂隙张开使得渗透率增加。同时,在孔隙压力增大到一定值时,渗透率曲线的斜率减小,表明随着孔隙压力的增大,渗透率的增速放缓。这是由于随着孔隙压力的增加,有效应力减小,此时有效应力对于孔裂隙的压缩性趋于稳定,在高孔隙压力条件下,孔隙率的变化趋缓,从而使得表现为渗透率曲线斜率减小,渗透率无限逼近某个恒定值。

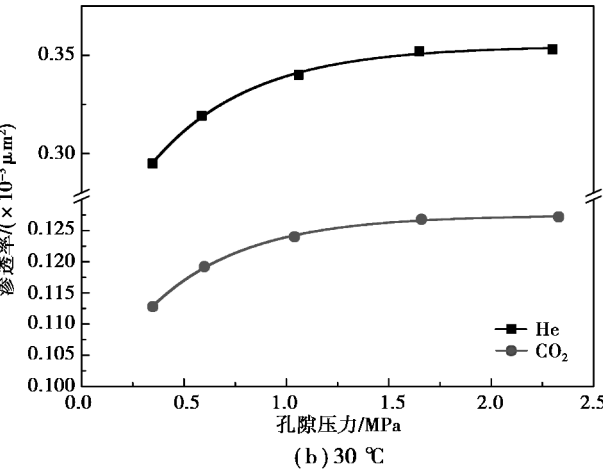
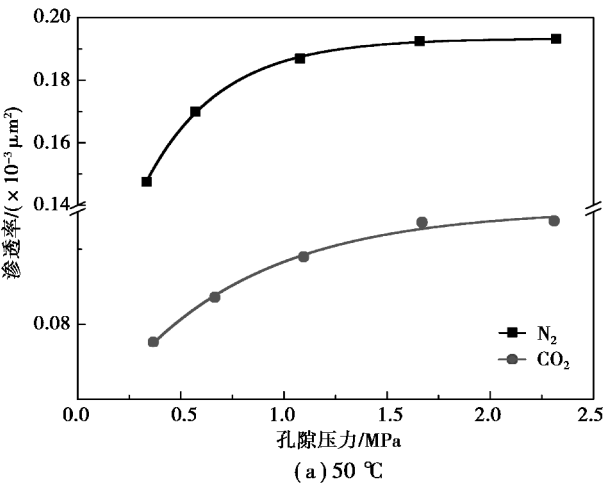


图6 致裂页岩渗透率与孔隙压力间关系

Fig. 6 Curves of permeability vs. average pore pressure in fractured shale

(2)在低孔隙压力时,致裂页岩的气体渗流特性没有出现低渗介质常有的“滑脱效应”现象。根据达西定律:

$$Q = \frac{kA}{\mu} \cdot \frac{dp}{dL} \tag{2}$$

满足达西定律的达西流气体体积流量与气体黏度乘积 Q_{μ} 与压力梯度成线性关系。图7为轴

压、围压均为7 MPa时,页岩渗流体积流量与压力梯度之间的关系曲线图。由图可知,在低压力梯度阶段, Q_{μ} 与压力梯度呈斜率逐渐增大的非线性关系;在高压梯度时, Q_{μ} 与压力梯度趋向线性关系。此结果与朱益华等^[22]给出的“滑脱效应”的曲线特征不同(如图8),说明本次实验页岩渗流在低孔隙压力阶段“滑脱效应”不明显。

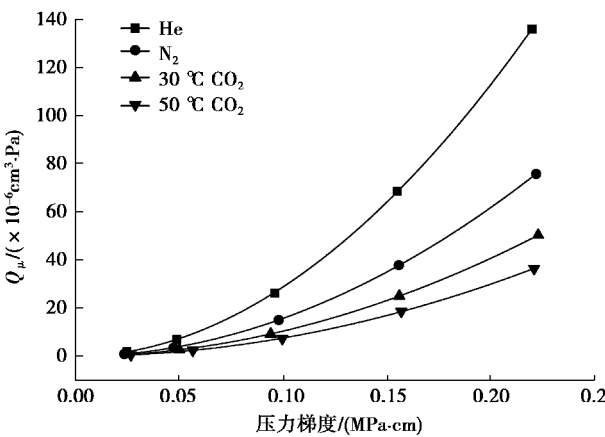


图7 致裂页岩 Q_{μ} 与压力梯度关系

Fig. 7 Curves of Q_{μ} vs. pressure gradient of fractured shale

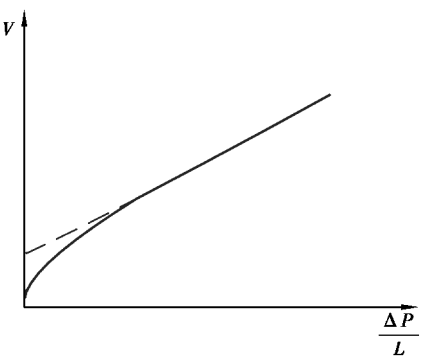


图8 Klinkenberg 效应示意图^[22]

Fig. 8 Diagram of Klinkenberg effect^[22]

为对比分析低孔隙压力条件下,致裂页岩与型岩的渗流特性的异同,在相同轴压、围压(7 MPa)、温度为30 °C的条件下,进行了He、CO₂在页岩型岩中的渗流实验。型岩渗透率与孔隙压力之间的关系如图9所示。由图9可知,型岩的渗流规律与致裂页岩不同,其渗透率随孔隙压力的变化存在一个极小值,在较低压力范围内,型岩试件的气测渗透率随平均孔隙压力的增大而逐渐减小,呈负幂函数关系。孔隙压力增大到一定值后,型岩渗透率出现转折,随孔隙压力增大而增大。

可以看出两种页岩试件的渗流规律随孔隙压力的变化具有较大差异性,这是由两种页岩试件的不同孔裂隙结构决定的。型岩由破碎页岩颗粒压制而成,孔隙半径、孔隙总数、孔隙发育程度以及孔隙分布均匀程度等参数受颗粒粒径控制^[23]。对于型岩而言,在低孔隙压力阶段 Klingkenberg 效应(“滑脱”效应)对渗透率的影响占据主导作用,从而使得随着孔隙压力的增加,页岩渗透率降低,在达到极小值后,随着孔隙压力的增加,Klingkenberg 效应的影响逐渐降低,这是有效应力起主导作用,从而表现为随着孔隙压力增加,有效应力降低,渗透率升高;对于 SC-CO₂致裂的裂隙页岩体,由于有裂缝的存在,降低了低孔隙压力阶段扩散作用、解吸作用、“滑脱”作用等对其渗透率的影响,使得有效应力的压缩效应一直占据主导作用,使渗流更接近线性渗流。

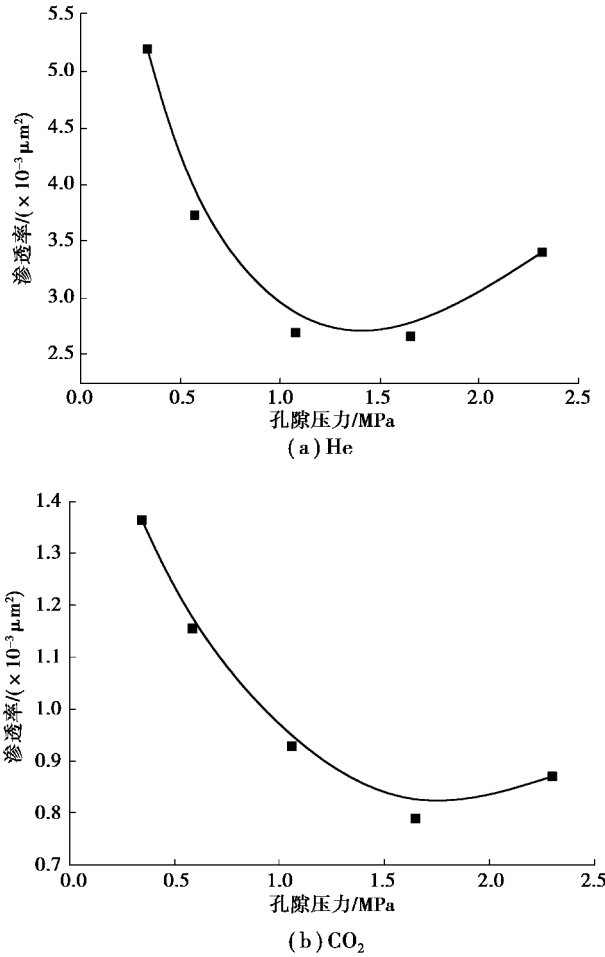


图 9 页岩型岩渗透率与孔隙压力间关系
Fig. 9 Relationship of the permeability vs. pore pressure in reconstituted shale

(3) 相同孔隙压力以及相同应力条件下,不同气体的渗透率不一样,表现为 $\text{He} > \text{N}_2 > \text{CO}_2$ 。这是由于页岩对于不同气体之间的吸附势能不一样,其对于 CO₂ 的吸附能力最强, N₂ 次之,一般认为 He 不吸附。吸附产生的膨胀变形效应会降低页岩渗透率,不同气体之间产生的吸附膨胀具有差异性,从而使得不同气体的渗透率大小呈现出差异性。

2.2 有效应力对渗透率的影响

在温度为 50 ℃,入口气体压力 (P_1) 为 1.0 MPa 的条件下,通过改变轴压、围压来实现有效应力的控制,得到 He、CO₂ 或 N₂ 在 SC-CO₂ 致裂页岩中的渗透率与有效应力的关系如图 10 所示。

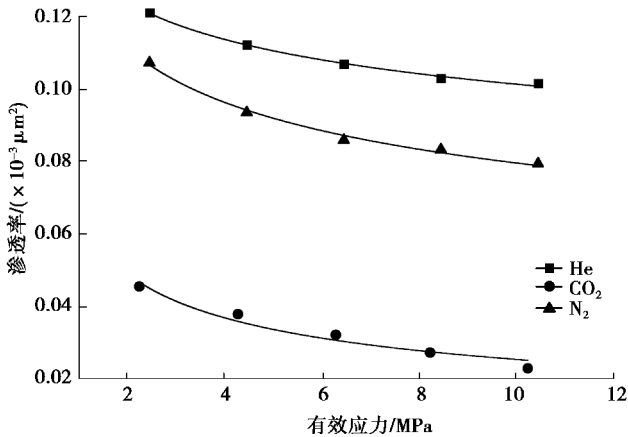


图 10 致裂页岩渗透率与有效应力关系
Fig. 10 Curves of permeability vs. effective stress in fractured shale

由图 10 可以得出页岩渗透率随有效应力变化的规律如下:

(1) 在温度、孔隙压力恒定条件下,页岩的渗透率随有效应力的增大呈负指数减小,且随着有效应力的增加,渗透率曲线变换的斜率逐渐减小。这是由于随着有效应力的增加,页岩孔裂隙结构的变化趋于稳定,表现为渗透率曲线斜率随着有效应力的增大而逐渐减小。

(2) 相同有效应力条件下,不同气体的渗透率为 $\text{He} > \text{N}_2 > \text{CO}_2$, 同样,这是由于吸附引起的差异性膨胀效应引起的。

相同温度、孔隙压力条件下型岩与裂隙页岩体渗透率随有效应力变化规律的对比结果如图 11 所示。由图 11 可知,超临界二氧化碳致裂页岩以及型岩气体渗透率与有效应力均呈负指数关系。但是,当有效应力介于 3 MPa 到 6 MPa 时,与致裂页岩

岩相比,型岩表现出对有效应力更高的敏感性,随着有效应力增大,型岩的渗透率下降速度更大。

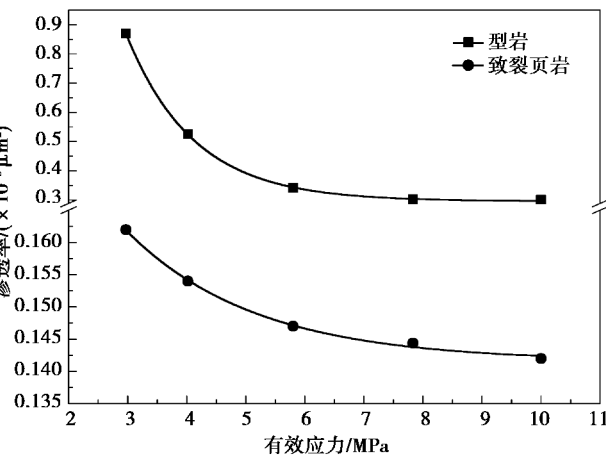


图 11 两种页岩渗流规律对比图

Fig. 11 The comparison curves of permeability vs. effective stress

2.3 温度对渗透率的影响

在轴压、围压恒定(3 MPa),以及 N₂ 压力(P₁)恒定(0.5 MPa)的条件下,温度与渗透率之间的关系如图 12 所示。

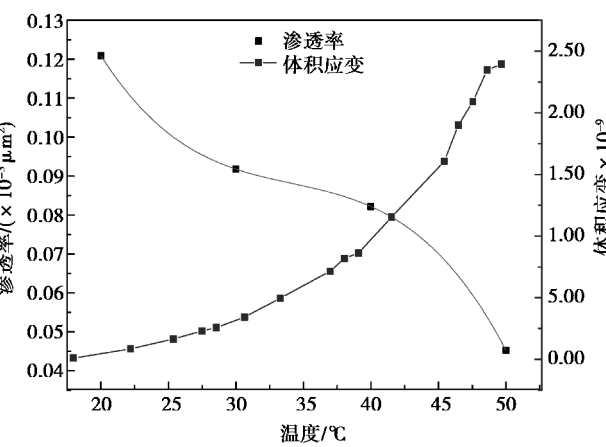


图 12 温度与页岩渗透率间关系

Fig. 12 Curve of permeability vs. temperature

由图 12 可知,在轴压、围压恒定的条件下,随着温度的升高,N₂ 在页岩中的渗透率逐渐减小。这是由于页岩具有复杂的矿物组分,不同矿物组分在温度的作用下会产生差异性热膨胀,使页岩孔隙结构改变,从而使得孔隙率降低,导致渗透率随温度的升高而降低。而且,页岩的体积应变随温度的升高而增大。体积应变除了由热膨胀引起外,还与温度升高弱化页岩的力学性质有关,温度升高会使

页岩由脆性向塑性转化^[24],使得页岩在同一有效应力作用下变得更容易压缩,这也会导致页岩孔隙率降低,从而影响页岩渗透率的变化。

图 13 为相同应力条件下,页岩分别在温度为 30 ℃ 和 50 ℃ 时 CO₂ 渗透率随孔隙压力的变化图。同样可以看出,在相同应力条件下,温度越高,渗透率越低。在 CO₂ 注入储层驱替 CO₂ 过程,伴随着 CO₂ 相态的变化,CO₂ 与储层之间也存在温度差,这些都会产生热应力,从而影响页岩渗透率。因此,在页岩气开采过程中,需要考虑温度对其渗透率的影响。

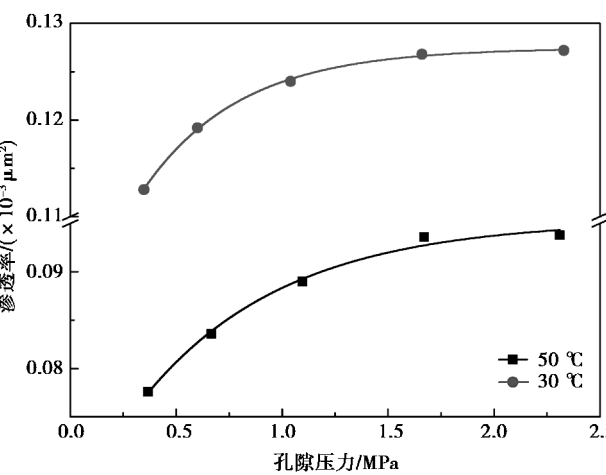


图 13 不同温度下页岩渗透率随孔隙压力变化规律

Fig. 13 Curve of permeability with pore pressure under different temperature conditions

3 结论

采用 SC-CO₂ 致裂页岩以及页岩型岩进行了多场耦合作用下渗流实验研究,获得了如下结论:

- (1) 在相同应力状态下,由于吸附引起的差异性膨胀效应,不同气体的渗透率为 He>N₂>CO₂,且 He、N₂、CO₂ 在两种页岩中渗透率随孔隙压力变化规律具有差异性。SC-CO₂ 致裂页岩在低压条件下 Klingenberg 效应不明显,渗透率随平均孔隙压力的增大而增大,型岩在低压阶段由于 Klingenberg 效应对渗透率变化起主导作用,随着孔隙压力增加,其渗透率降低,在达到极小值后,随着孔隙压力的增加,Klingenberg 效应减弱,有效应力起主导作用,渗透率随孔隙压力增加而增加。
- (2) 页岩渗透率随有效应力的增大呈负指数

减小,但裂隙页岩体与型岩试件的气体渗流规律不同,型岩比 SC-CO₂致裂页岩具有更大的应力敏感性。

(3)随着温度增加,页岩渗透率降低。这与温度作用下,页岩中不同矿物组分产生的差异性热膨胀变形,以及温度作用下页岩力学性质弱化,塑性增强,使得页岩更易压缩有关。

参考文献 (References)

[1] 彭英利, 马承愚. 超临界流体技术应用手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005. (Peng Yingli, Ma Chengyu. The application notes of supercritical fluid technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005. (in Chinese))

[2] 王海柱, 沈忠厚, 李根生. 超临界 CO₂开发页岩气技术[J].石油钻探技术, 2011, 39(3): 30-35. (Wang Haizhu, Shen Zhonghou, Li Gensheng. Feasibility analysis on shale gas exploitation with supercritical CO₂ [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(3): 30-35. (in Chinese))

[3] 沈忠厚, 王海柱, 李根生. 超临界 CO₂连续油管钻井可行性分析[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(6): 743-747. (Shen Zhonghou, Wang Haizhu, Li Gensheng. Feasibility analysis of coiled tubing drilling with supercritical carbon dioxide [J]. Petroleum exploration and development, 2010, 37(6): 743-747. (in Chinese))

[4] Middleton R, Viswanathan H, Currier R, et al. CO₂ as a fracturing fluid: Potential for commercial-scale shale gas production and CO₂ sequestration [J]. Energy Procedia, 2014, 63:7780-7784.

[5] 程宇雄, 李根生, 王海柱, 等. 超临界二氧化碳喷射压裂孔内流场特性[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38(4): 81-86. (Cheng Yuxiong, Li Gensheng, Wang Haizhu, et al. Flow field character in cavity during supercritical carbon dioxide jet fracturing [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38(4): 81-86. (in Chinese))

[6] 黄飞, 卢义玉, 汤积仁, 等. 超临界二氧化碳射流冲刷页岩实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(4): 787-793. (Huang Fei, Lu Yiyu, Tang Jiren, et

al. Research on erosion of shale impacted by supercritical carbon dioxide jet[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(4): 787-793. (in Chinese))

[7] 谷达圣, 鲜学福, 周军平, 等. 有效应力和不同气体对煤的渗透性影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(6): 1296-1301. (Gu Dasheng, Xian Xuefu, Zhou Junping, et al. Experiment study of the influence of effective stress and different gases on coal permeability[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(6): 1296-1301. (in Chinese))

[8] 王臣, 鲜学福, 周军平, 等. 含不同气体煤岩全应力-应变渗透特性试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(3): 492-496. (Wang Chen, Xian Xuefu, Zhou Junping, et al. Experimental study on permeability of coal during the complete stress-strain process with different gases [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(3): 492-496. (in Chinese))

[9] 郭擎, 鲜学福, 周军平. 煤岩全应力应变过程体应变对渗透率的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(5): 1137-1143. (Guo Qing, Xian Xuefu, Zhou Junping. Effect of volumetric strain on permeability of coal in complete stress-strain process [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(5): 1137-1143. (in Chinese))

[10] 李志强, 鲜学福, 隆晴明. 不同温度应力条件下煤体渗透率实验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38(4): 524-528. (Li Zhiqiang, Xian Xuefu, Long Qingming. Experiment study of coal permeability under different temperature and stress [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2009, 38(4): 524-528. (in Chinese))

[11] 邓世冠, 鲁力, 刘海娇, 等. 一种孔隙裂隙网络模型及页岩气渗流模拟[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(增1): 76-79. (Deng Shiguan, Lu Li, Liu Haijiao, et al. Pore-Fractal network model for compacted geomaterials and simulation of shale gas seepage [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(Supp.1): 76-79. (in Chinese))

[12] 尹光志, 李小双, 赵洪宝, 等. 瓦斯压力对突出煤瓦斯渗流影响试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,

- 2009, 28 (4): 697-702. (Yin Guangzhi, Li Xiaoshuang, Zhao Hongbao, et al. Experimental study of effect of gas pressure on gas seepage of outburst coal [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(4): 697-702. (in Chinese))
- [13] 段永刚,魏明强,李建秋,等.页岩气藏渗流机理及压裂井产能评价[J].重庆大学学报,2011,34(4):62-66. (Duan Yonggang, Wei Mingqiang, Li Jianqiu, et al. Shale gas seepage mechanism and fractured wells' production evaluation [J]. Journal of Chongqing University, 2011, 34(4):62-66. (in Chinese))
- [14] 李治平,李智锋.页岩气纳米级孔隙渗流动态特征[J].天然气工业,2012,32(4):50-53. (Li Zhiping, Li Zhifeng. Dynamic characteristics of shale gas flow in nanoscale[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(4):50-53. (in Chinese))
- [15] 吴剑,常毓文,梁涛,等.页岩气在基质纳米孔隙中的渗流模型[J].天然气地球科学,2015,26(3):575-579. (Wu Jian, Chang Yuwen, Liang Tao, et al. Shale gas flow model in matrix nanoscale pore [J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26 (3): 575-579. (in Chinese))
- [16] 李亚洲,李勇明,罗攀,等.页岩气渗流机理与产能研究[J].断块油气田,2013,20(2):186-190. (Li Yazhou, Li Yongming, Luo Pan, et al. Study on seepage mechanism and productivity of shale gas [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2013, 20(2):186-190. (in Chinese))
- [17] 侯磊, Derek Elsworth,孙宝江,等.页岩支撑裂缝中渗透率变化规律实验研究[J].西南石油大学学报(自然科学版),2015,37(3):31-37. (Hou Lei, Derek Elsworth, Sun Baojiang, et al. Experimental study on permeability evolution in propped shale fracture [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2015, 37 (3): 31-37. (in Chinese))
- [18] 杨泽皓,董明哲,宫厚健,等.测量页岩径向渗透率和孔隙度的新方法[J].石油学报,2015,36(4):482-489. (Yang Zehao, Dong Mingzhe, Gong Houjian, et al. A new method to measure radial permeability and porosity of shale [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36 (4): 482-489. (in Chinese))
- [19] 张宏学,刘卫群,朱立.页岩储层裂隙渗透率模型和试验研究[J].岩土力学,2015,36(3):719-729. (Zhang Hongxue, Liu Weiqun, Zhu Li. Fracture permeability model and experiments of shale gas reservoirs [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36 (3): 719-729. (in Chinese))
- [20] 陈天宇,冯夏庭,杨成祥,等.含气页岩渗透率的围压敏感性和各向异性研究[J].采矿与安全工程学报,2014,31(4):639-642. (Chen Tianyu, Feng Xiating, Yang Chengxiang, et al. Research on confining pressure sensitivity and anisotropy for gas shale permeability [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(4):639-642. (in Chinese))
- [21] 张文,王勤,杨晓松,等.扬子地块古生界泥页岩孔隙度和渗透率特征[J].天然气地球科学,2015,26(8):1534-1539. (Zhang Wen, Wang Qin, Yang Xiaosong, et al. Porosity and permeability of Paleozoic mudstone and shale in the Yangtze block [J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26 (8): 1534-1539. (in Chinese))
- [22] 朱益华,陶果,方伟,等.低渗气藏中气体渗流 Klinkenberg 效应研究进展[J].地球物理学进展,2007,22(5):1591-1596. (Zhu Yihua, Tao Guo, Fang Wei, et al. Research progress of the Klinkenberg effect in tight gas reservoir [J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(5): 1591-1596. (in Chinese))
- [23] 许江,陆漆,吴鑫,等.不同颗粒粒径下型煤孔隙及发育程度分形特征[J].重庆大学学报,2011,34(9):81-89. (Xu Jiang, Lu Qi, Wu Xin, et al. The fractal characteristics of the pore and development of briquettes with different coal particle sizes [J]. Journal of Chongqing University, 2011, 34 (9): 81-89. (in Chinese))
- [24] 赵阿兴.岩石软化温度及其在地球深部岩石力学性质研究中的意义[J].地球物理学进展,1993,8(2):94-100. (Zhao Axing. The softening temperature of rocks and its implication in rock mechanics of earth's deep interior [J]. Progress in Geophysics, 1993, 8(2): 94-100. (in Chinese))