

CO₂和CH₄二元混合气体对页岩 渗透特性的影响

冯骋

(贵州民族大学 建筑工程学院, 贵州 贵阳 550000)

摘要:针对CO₂强化页岩气开采新技术中CO₂-CH₄二元混合气体在页岩层中的渗透特性变化的问题,选取四川盆地志留统龙马溪组页岩试样,基于自主研发的“三轴渗流实验系统”,开展不同配比的CO₂-CH₄二元混合气体在2类地应力条件下的渗流试验.试验结果表明:保持二元气体混合比例恒定,页岩渗透率随气体压力的增加而减小;保持气体压力恒定,页岩的渗透率随二元气体混合比例的改变而变化,纯CO₂时渗透率最低,纯CH₄最大,在混合气中CH₄浓度越低,页岩渗透率越低;在注气过程中,气体加压和卸压引起页岩喉道、孔隙产生塑性变形和吸附滞后,造成页岩渗透率的滞后.

关键词:页岩;CO₂;CH₄;二元气体;渗透特性

中图分类号:P618.1

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2017)02-0001-05

Effects of CO₂ and CH₄ mixture binary gas on permeability of shale

Feng Cheng

(Architectural Engineering College, Guizhou Minzu University, Guiyang 550000, China)

Abstract: To investigate the influence of binary gas (CO₂ and CH₄) on the permeability of shale for enhancing production from shale gas and CO₂ sequestration. A study on shale sample from longmaxi Formation of lower Silurian in Sichuan Basin is presented. The laboratory experiments under two types of stress and different proportion of binary gas are conducted by the system named “triaxial seepage experimental system”. The results showed that: When the mixing binary gas ratio is constant, shale permeability decreased with the increase of gas pressure; Maintaining the constant pressure, the permeability of shale will change with the changing mixing binary gas ratio; the permeability of shale with pure CO₂ is minimum, while the permeability of shale with pure CH₄ is maximum. In the mixed binary gas, the lower CH₄ concentration means the lower the permeability of shale; In the process of gas injection, gas pressure and pressure relief cause shale shunted, porous plastic deformation and adsorption hysteresis, which will cause the shale permeability change.

Keywords: shale; CO₂; CH₄; binary gas; permeability

由于CO₂注入页岩层可以强化页岩气开采,并实现CO₂的地下封存而受到国内外学者的广泛关注^[1-2].含气页岩富含有机质和黏土矿物,其对CH₄和CO₂的吸附能力各异,导致页岩层产生“选择性”吸附,可实现强化页岩气开采和CO₂封存^[3-6].但是CO₂造成页岩的矿物成分和孔隙结构发生改变,改变了页岩的渗透特性,影响采收率与气体封存量^[2-7].所以研究CO₂-CH₄二元混合气体在页岩层中的渗透特性具有重要意义.

目前,国内外学者对页岩层的渗透特性进行了一定量的研究.Sakhaee-Pour^[8]通过实验研究得到含滑脱效应页岩吸附 CH_4 对渗透特性的影响.汪吉林等^[9]通过实验得到有效应力对页岩渗透特性的影响.姚同玉等^[10]通过理论分析得到页岩气在超低渗介质中的渗流行为.以上学者主要是对 CH_4 这一单一气体在页岩层中的渗流方面进行研究,而对于 CO_2 和 CH_4 二元气体对储层的渗透特性的改变,并未见相关报道.

本文基于以上实验与理论研究,采用自主研发的渗流装置,拟开展同等温度条件下,不同比例的 CO_2 和 CH_4 二元混合气体在两类地应力条件下的渗流试验,以此探讨 CO_2 - CH_4 二元混合气体在页岩中渗透特性.

1 试验装置与方法

1.1 试验装置

本次试验采用自主研发的“三轴渗流系统”.该装置轴压和围压由双路伺服液压站提供,孔隙压力由各类气瓶提供(混合气体气瓶由厂家直接采用压力法配置).该装置可以用自带的恒温油浴装置控制温度.装置使用体积流量计测量气体流量,使用引伸计测量试件径向应变.试验装置轴向最大加载载荷 500 kN,围压最大 10 MPa,孔隙压力最大 10 MPa,温度最高 100 $^{\circ}\text{C}$,流量计精度 0.000 1 L/min,引伸计精度 0.001 mm.该装置示意图以及样品如图 1 和图 2 所示.

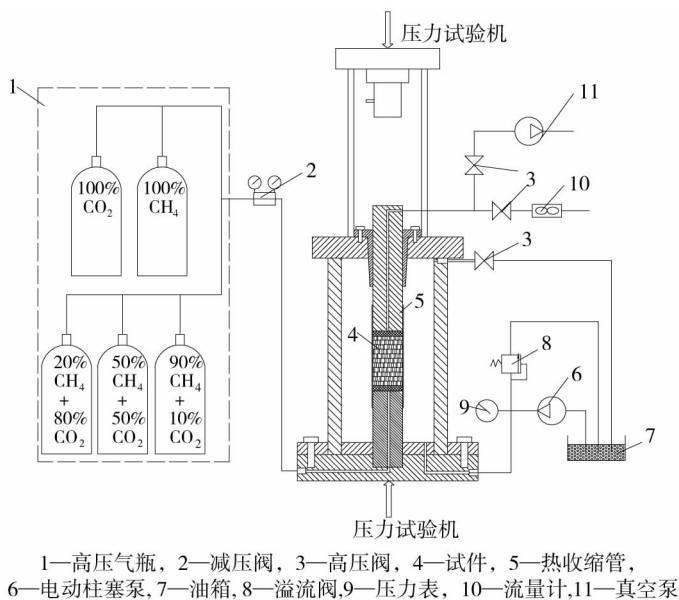


图1 系统装置示意图



图2 试验样品图

1.2 试验试件

已有研究表明,四川盆地龙马溪组黑色页岩是一套富含有机质的烃源岩,能较好地代表南方龙马溪组页岩气储层特征^[11-12].本次试验所用的样品取自四川盆地志留统龙马溪组页岩.对样品的镜质组反射率(R_0)和有机碳含量(TOC)分别为 2.02% 和 2.24%.在页岩气藏产生最有利条件范围($\text{TOC} \geq 2\%$, $3\% \geq R_0 \geq 1\%$)内^[13].

页岩试件的制备参照国标《煤的高压等温吸附试验方法》.将页岩粉粹,通过筛子选出 0.177~0.250 mm 的岩粉,加入适量的水,利用 200 t 成型机制备 $\Phi 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 的型岩试件,选取 160 t 压力(计算压强为 200 MPa)稳定保压 40 min,然后放入烤箱,温度调至 80 $^{\circ}\text{C}$ 烘 24 h,冷却后用保鲜袋密封保存.

1.3 试验方法

由于本试验主要是通过研究 3 组不同浓度的 CO_2 和 CH_4 混合气体在页岩中的渗流情况,来探讨 CO_2 - CH_4 二元气体对储层渗透特性的影响.因此通过控制轴压和围压保持不变模拟地应力,并采用实验设备自带的恒温油浴装置消除温度对渗透率的影响.试验步骤如下:

1) 由于西南地区的地质构造比较复杂,极有可能出现垂直应力比水平应力小的情况,在考虑实验仪器的条件下设计了围压小于轴压(轴压:围压=10 MPa:5 MPa)和围压大于轴压(轴压:围压=5 MPa:10 MPa)2 套实验方案.

2) 试验分别采用 10%CO₂+90%CH₄ 混合气,50%CO₂+50%CH₄ 混合气,80%CO₂+20%CH₄ 混合气和 100%CO₂+100%CH₄ 进行页岩渗流试验.试验过程中按 1.00 MPa→1.50 MPa→2.00 MPa→2.50 MPa→3.00 MPa→3.50 MPa 顺序增加气体压力,每个压力点气体流动稳定后记录气体流量和径向变形.

3) 另外,在利用 100%CO₂+100%CH₄ 进行试验时,在气体压力加载至 3.50 MPa 后,按照 3.50 MPa→3.00 MPa→2.50 MPa→2.00 MPa→1.50 MPa→1.00 MPa 卸压,同时进行相同的实验.

2 试验结果分析与讨论

渗流试验所得页岩的流量可通过下式得到渗透率:

$$K = \frac{2Q\mu LP_a}{S(P_1^2 - P_2^2)} \times 10^{11}. \tag{1}$$

式中:K 为渗透率,mD;Q 为流量,cm³/s;μ 为气体的黏度,MPa·s;L 为试件的长度,cm;P_a 为大气压,取 0.1 MPa;S 为页岩试件横截面积,cm²;P₁ 为试验入口处气体压力,MPa;P₂ 为试验出口处气体压力,MPa.

通过查表^[14]和计算^[15]得到所有气体的动力粘度,如表 1 所示.

	MPa·s					
	1 MPa	1.5 MPa	2 MPa	2.5 MPa	3 MPa	3.5 MPa
CH ₄	11.031 6	11.111 2	11.197 4	11.290 6	11.391 0	11.498 9
CO ₂	14.785 3	14.864 6	14.967 0	15.098 1	15.265 7	15.481 1
90%CH ₄ +10%CO ₂	11.653 0	11.731 6	11.819 5	11.918 0	12.028 5	12.153 0
50%CH ₄ +50%CO ₂	13.375 5	13.454 8	13.551 2	13.668 0	13.810 4	13.985 4
20%CH ₄ +80%CO ₂	14.294 6	14.373 9	14.474 2	14.600 4	14.759 2	14.960 6

2.1 页岩渗透率随吸附气体压力的变化规律

通过计算得到,在两类应力条件下页岩渗透率与不同气体作用的变化规律如图 3 所示.

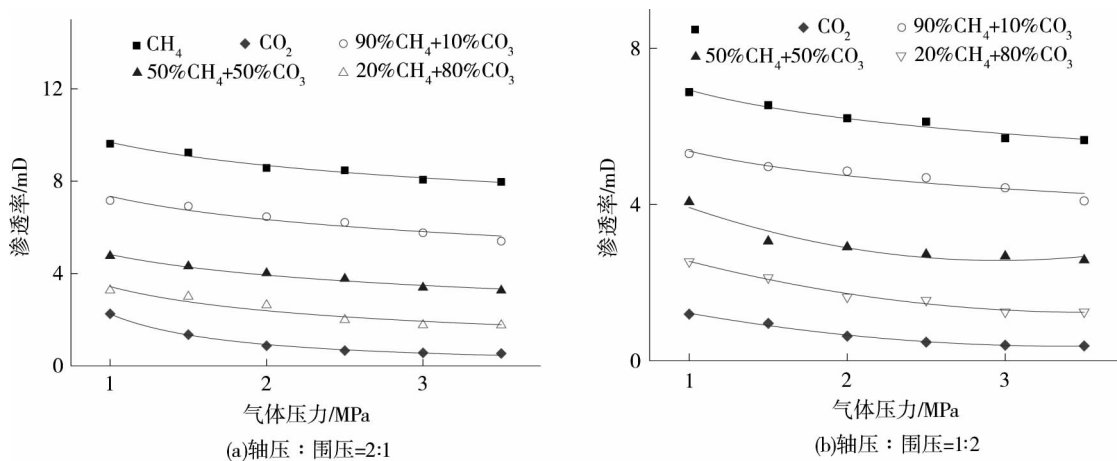


图 3 气体压力与气体组分与页岩渗透率的关系

从图 3 可以看出,在所做的气体压力条件下,无论是水平应力大于竖直应力,还是竖直应力大于水平应力,在通入气体成分一定的条件下,页岩渗透率随气体压力的变化规律是相同的,所做的压力范围内页岩的渗透率随着气体压力的升高而降低.

在考虑吸附膨胀应力的条件下,页岩的渗透率和有效应力的关系为

$$K = f(\sigma_{eff}) = f[\sigma_{ii} - (P_c - \sigma_s)]. \tag{2}$$

式中: σ_{ii} 是页岩的整体应力; P_c 是气体压力; σ_s 是页岩吸附气体而产生的应力。

在气体压力增加时,页岩中有机质和黏土矿物吸附气体的量也变大.由此导致了页岩产生的吸附应力也变大,并抵消了一部分气体的压力.在通入气体压力增大后页岩产生的吸附膨胀量也变大,这就使页岩中的孔隙产生一定量的减少,使得气体渗流的通道变小.这与作者 Pan 等^[16]基于热力学和弹性力学的原理,通过 Langmuir 吸附,利用 Day 等^[17]的实验数据,所得到渗透率与气体压力的趋势一致.

2.2 页岩渗透率随气体组分的变化规律

从图 3 可以看出,保持气体压力恒定,页岩的渗透率随二元气体混合比例的改变而变化.通入 CH_4 后页岩渗透率最大, CO_2 最小,混合气体的渗透率介于 CH_4 和 CO_2 之间,并且混合气中 CH_4 浓度越低,页岩的渗透率越低.由于页岩吸附 CO_2 的能力比 CH_4 的大^[18],有学者研究得到页岩吸附 CO_2 的极限吸附量和吸附平衡常数大概是 CH_4 的 5 倍.由式(3)可知在同一气体压力下,页岩吸附 CO_2 的膨胀量比吸附 CH_4 产生的膨胀量大,造成渗流通道减小,所以渗透率就较小一些.

$$\varepsilon = \frac{2a\rho RT(1 - 2\mu) \ln(1 - 2\mu) \ln(1 + bp)}{3EV_m} \quad (3)$$

式中: T 为绝对温度; R 为摩尔气体常数; a 为极限吸附量; E 为页岩的弹性模量; ρ 为页岩的视密度; b 为吸附平衡常数; p 为吸附气体压力; V_m 为摩尔体积^[18].

从图 3 还可以看到,对于 3 种不同比例的混合气与纯 CO_2 和 CH_4 相比,渗透率不呈线性变化,其中 CO_2 浓度为 10% 时,渗透率变化幅度尤其明显,而 CO_2 组分为 50% 和 80% 渗透率下降率较小.这说明在注气的过程中,一开始注入纯 CO_2 气体对储层渗透率变化相对较大,而以后注入气体对储层的渗透率影响相对较小.

图 4 表示气体在加载与卸载时的渗透率相差不大,也就表示图 3 得到不同浓度气体在页岩加载过程中渗透率变化的趋势与卸载时是一致的.结果表明将纯 CO_2 气体注入页岩层,虽然对气体封存有利,但是会改变储层的渗透率,这会直接影响气井的产量.在注气强化开采页岩气时尽量不要使用纯的 CO_2 气体,应该考虑加入一些可以防止储层渗流特性改变的气体.

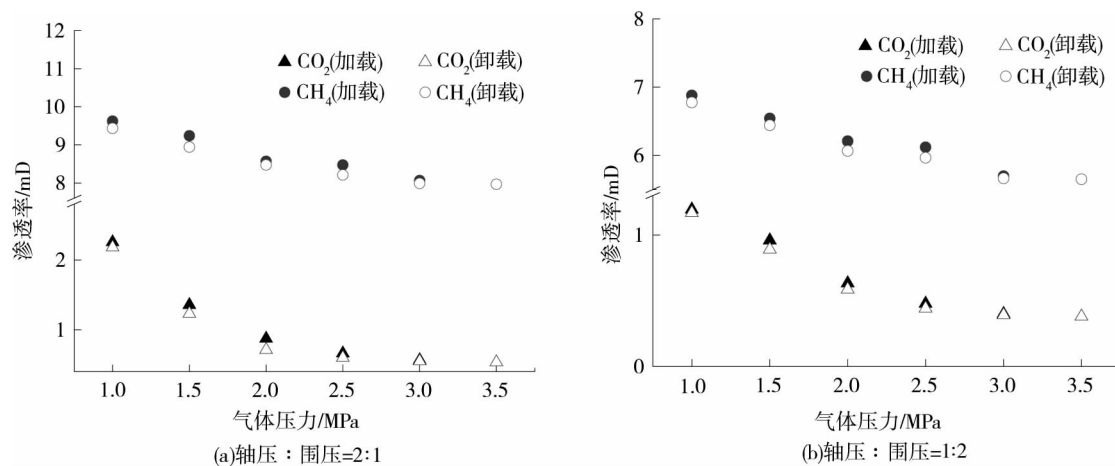


图 4 页岩渗透率与气体压力加载、卸载过程中的关系

3 结论

本文通过对四川盆地志留统龙马溪组页岩进行二元气体渗流试验,得到以下结论:

1) 在 2 类应力情况下,页岩的渗透率与气体压力、混合气体比例均相关.保持混合气体比例恒定,页岩孔隙表面吸附气体引起孔隙变小,随着气体压力的增大孔隙度也逐渐降低,导致页岩渗透率随气体压力的增加而减小.

2) 改变混合气体比例,引起页岩表面吸附气体的量发生改变, CO_2 在页岩上的吸附量大于 CH_4 在页岩上的吸附量,导致页岩渗透率发生变化纯 CO_2 时渗透率最低,纯 CH_4 最大.

3)页岩的渗透率随CO₂比例的增大而呈非线性降低,其中CO₂浓度为10%时,渗透率变化幅度尤其明显.

参考文献:

- [1] Engelder T, Lash G, Uzcategui S. Joint sets that enhance production from Middle and Upper Devonian gas shale of the Appalachian Basin[J]. *Aapg Bulletin*, 2009, 93(7): 857-889.
- [2] Lahann R, Mastalerz M, Rupp J A, et al. Influence of CO₂ on New Albany Shale composition and pore structure[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2013(108):2-9.
- [3] White C M, Smith D H, Jones K H, et al. Sequestration of carbon dioxide in coal with enhanced coalbed methane recovery—a review[J]. *Energy and Fuels*, 2005, 19(3):659-724.
- [4] Chalmers G R L, Bustin R M. The organic matter distribution and methane capacity of the Lower Cretaceous strata of Northeastern British Columbia, Canada[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2007, 70(1/3): 223-239.
- [5] Manger K C, Oliver S J P, Curtis J B, et al. Geological influences on the location and production of Antrim Shale gas, Michigan Basin[C]// *Society of Petroleum Engineers, Alberta, Canada*, 1991:511-519.
- [6] Ross D J K, Bustin R M. Shale gas potential of the Lower Jurassic Gordondale Member, Northeastern British Columbia, Canada[J]. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 2007, 55(1):51-75.
- [7] Liu Y Y, Wilcox J. CO₂ adsorption on carbon models of organic constituents of gas shale and coal[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(2):809-814.
- [8] Sakhaee-Pour A, Bryant S. Gas permeability of shale[J]. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 2012, 15(4):401-409.
- [9] 汪吉林,刘桂建,王维忠,等.川东南龙马溪组页岩孔裂隙及渗流性特征[J]. *煤炭学报*, 2013, 38(5):772-777.
- [10] 姚同玉,黄延章,李继山.页岩气在超低渗介质中的渗流行为[J]. *力学学报*, 2012, 44(6):990-995.
- [11] 朱炎铭,陈尚斌,方俊华,等.四川地区志留系页岩气成藏的地质背景. *煤炭学报*[J]. 2010, 35(7):1160-1164.
- [12] 陈尚斌,朱炎铭,王红岩,等.四川盆地南缘下志留统龙马溪组页岩气储层矿物成分特征及意义[J]. *石油学报*, 2011, 32(5):775-781.
- [13] 张卫东,郭敏,姜在兴.页岩气评价指标与方法[J]. *天然气地球科学*, 2011, 22(6):1093-1099.
- [14] 国家质量技术监督局.GB/T 11 062-1998 天然气发热量、密度、相对密度和沃泊指数的计算方法[S]. 1998:143-166.
- [15] 魏凯丰,宋少英,张作群.天然气混合气体粘度和雷诺数计算研究[J]. *计量学报*, 2008, 29(3):248-250.
- [16] Pan Z J, Connell L D. Modelling of anisotropic coal swelling and its impact on permeability behaviour for primary and enhanced coalbed methane recovery[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2011, 85(3):257-267.
- [17] Day S, Fry R, Sakurovs R. Swelling of Australian coals in supercritical CO₂[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2008, 74(1):41-52.
- [18] 成景焯,邢漪冉,何岩峰,等.页岩气储层基质纳米孔隙渗流模型研究进展[J]. *常州大学学报(自然科学版)*, 2017(2):86-92.