

Experimental Study on the Influence of Slippage Effect on Threshold Pressure Gradient in Low Permeability Gas Reservoir

Bing Liang, Yun Jiang*, Weiji Sun, Qi Liu

Institute of Mechanics & Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin Liaoning
Email: *1129290812@qq.com

Received: May 14th, 2018; accepted: May 28th, 2018; published: Jun. 4th, 2018

Abstract

Gas seepage in dense porous media, threshold pressure gradient and slippage effect exist at the same time. In order to study the effect of slippage effect on the threshold pressure gradient in low permeability gas reservoir, based on the percolation theory, this paper adopts the experimental methodology to study the coal samples in Wangying coal mine in order to conduct seepage test. By the test data fitting, the slippage factor of threshold pressure gradient and slippage effect is obtained respectively. The results show that as the slippage factor increases, the threshold pressure gradient decreases gradually, and there is a good linear negative correlation with the slippage factor. It is indicated that the more obvious the slippage effect is, the more favorable the flow of gas is, and thus the pressure gradient will be reduced. So it is of guiding significance to establish the test model of slippage factor-threshold pressure gradient for improving the mining of coal bed methane.

Keywords

Low Permeability Gas Reservoir, Threshold Pressure Gradient, Slippage Effect, Permeability

低渗气藏滑脱效应对启动压力梯度的影响试验研究

梁冰, 姜云*, 孙维吉, 刘奇

辽宁工程技术大学力学与工程学院, 辽宁 阜新
Email: *1129290812@qq.com

*通讯作者。

摘要

致密多孔介质气体渗流，启动压力梯度和滑脱效应同时存在。为了研究低渗气藏中滑脱效应对启动压力梯度的影响，本文基于渗流力学理论，采用试验的方法对王营煤矿煤样进行渗流试验。通过试验数据拟合分别求得了启动压力梯度和体现滑脱效应的滑脱因子。结果表明，随着滑脱因子的增大，启动压力梯度逐渐减小，并且和滑脱因子呈现很好的线性负相关关系。说明滑脱效应越明显，越有利于气体的流动，从而启动压力梯度减小。因此建立滑脱因子 - 启动压力梯度试验模型，对提高煤层气的开采具有一定的指导意义。

关键词

低渗气藏，启动压力梯度，滑脱效应，渗透率

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

煤层气是赋存于煤层及其围岩中的一种自生自储式非常规天然气。我国煤层气资源极其丰富，但是由于我国普遍属于低渗煤层气藏，对于煤层气的开采十分困难。近年来，许多学者对低渗气藏启动压力梯度的影响因素及其对煤层气开采的难易影响和滑脱效应现象都进行了大量的研究，并且取得了一定的成果。王敬、刘海龙等[1] [2]研究了启动压力梯度对渗流规律、采收率、水平井产能的影响。汪全林等[3]利用岩心实验的方法，探讨了启动压力梯度与渗透率、流体粘度、流度以及岩石微观参数之间的关系。冯其红等[4]通过考虑启动压力梯度和应力敏感效应因素建立的煤层气藏垂直裂缝井气水两相产能方程，利用实例验证了采用优化后的井底流压进行排采，可以获得更高的单井累产气量，从而建立了煤层气水两相流动阶段的排采制度实时优化方案。刘高波等[5]研究了在低渗透气藏中，启动压力和滑脱效应同时存在对渗流规律的影响，通过理论推导并经验证得出，当井底流压在某一值时，非达西效应消失；且井底流压越大，启动压力项对气藏非达西的影响作用越大。肖晓春等[6] [7] [8]进行了低渗气藏不同围压、孔隙水压下滑脱效应的试验研究，对滑脱效应现象进行了分析。葛洪魁等[9]对页岩纳米孔隙流动的滑脱效应进行了分析，证明滑脱效应的存在不容忽视。

致密低渗气藏具有低孔、低渗等特征，导致渗流过程中存在启动压力梯度，不利于煤层气的开采。在低渗透的条件下，气体滑脱效应非常的显著，滑脱效应的存在有利于增加气体的渗透率。而在低渗气藏气体渗流时，启动压力梯度和滑脱效应同时存在，大部分研究主要是分别针对启动压力梯度和滑脱效应进行研究的，而并没有考虑滑脱效应对启动压力梯度的影响，本文针对低渗气藏煤层气渗流过程中同时存在的滑脱效应和启动压力梯度现象进行研究，并且探讨滑脱效应的存在对启动压力梯度的影响，研究滑脱效应对启动压力梯度的影响对煤层气的开采有重要的指导意义，有利于煤层气的开采。

2. 低渗气藏渗流试验

2.1. 试验目的

在大量学者研究的基础上, 本文采用试验方法, 研究低渗气藏的气体渗流特性, 通过试验数据拟合求得启动压力梯度和滑脱因子, 分析低渗气藏中滑脱效应对启动压力梯度的影响。

2.2. 试验材料及方法

本次试验煤样采自 156 采区下山区 5326 综采工作面, 地面标高+155~+166 米, 井下标高-650~-802.2 米, 取样地点煤层埋深均大于 800 m, 将煤样制成 50 × 50 × 100 mm 的标准煤样 17 块。试验所用气体为甲烷。将制作好的煤样通过夹持器固定, 放入自行研制的三轴渗透仪, 密闭仪器。试验示意图如图 1 所示。

本实验是根据达西关于流体在多孔介质中渗透规律而设计的, 所采用的方法为气测法, 在煤样两端建立压力差, 测量进、出口压力及出口流量, 依据达西气测渗透率公式[5]进行计算。

$$k = \frac{Q\mu\Delta L}{A\Delta P} \quad (1)$$

式中: k 为多孔介质渗透率, m^2 ; Q 为体积流量, cm^3/s ; ΔL 为煤岩体试样长度, cm ; A 为试样横截面积, cm^2 ; μ 为流体粘度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; ΔP 为试样两端压差, MPa 。

通过压力泵进行轴向、围压加载, 根据井底围压, 试验围压分别采用 5.0 MPa、8.5 MPa、12 MPa 和 15 MPa。然后逐渐增加孔隙压力, 由转子流量计测出在每个孔隙压力下对应的气体流量, 并记录数据。根据试验测得数据绘制压力梯度 - 流量图, 如图 2 所示。

3. 试验结果分析

3.1. 低渗透气藏启动压力梯度试验数据拟合分析

低渗透煤层中, 多孔介质流体的流动需要克服多孔介质与流体之间的阻力, 而产生阻力的原因可能是吸附作用, 也可能是流体的极限剪切应力作用, 其在宏观上体现为流体的流动存在启动压力梯度。

为了简化模型, 其含有启动压力梯度流动特点可用如下公式[10]进行描述:

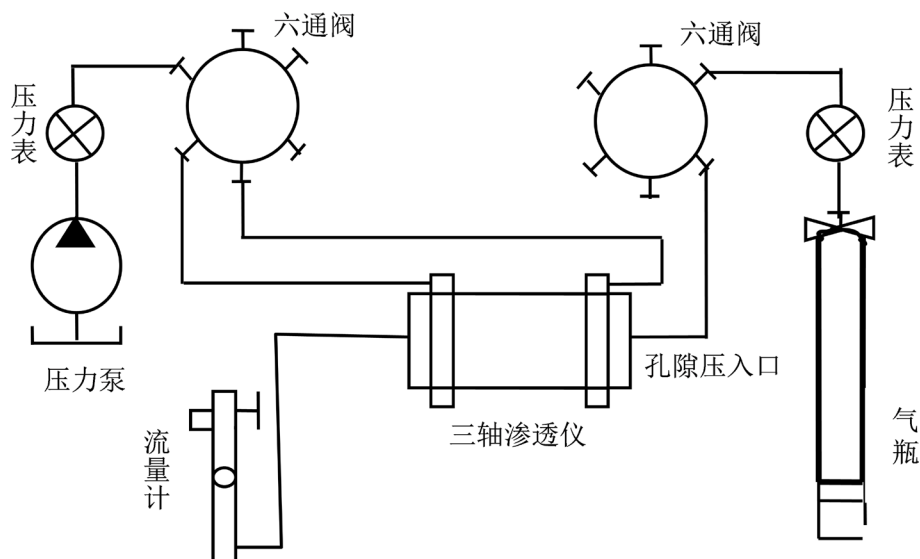


Figure 1. Experiment program
图 1. 试验示意图

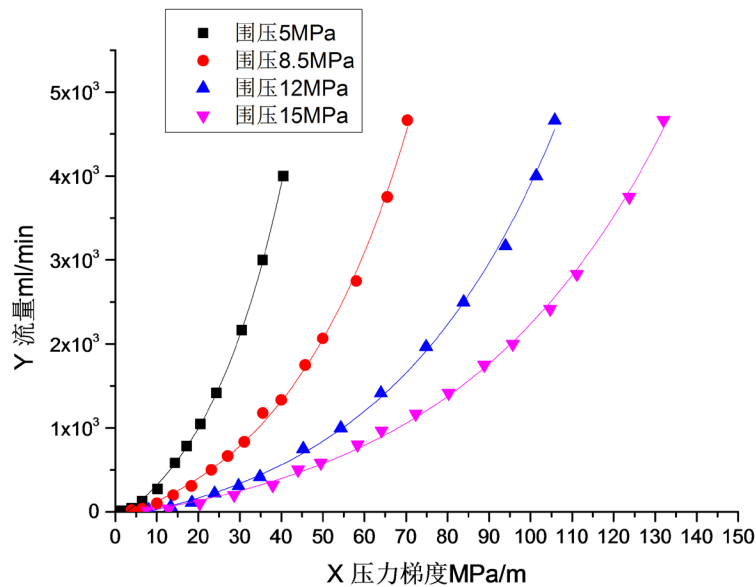


Figure 2. Pressure gradient effect under different confining pressures
图 2. 不同围压作用下的甲烷压力梯度效应

$$v = \begin{cases} 0, & |\nabla p| \leq G \\ -\frac{k}{\mu} \nabla p (1 - G/|\nabla p|), & |\nabla p| > G \end{cases} \quad (2)$$

式中： v 为多孔介质中气体流动的速度，m/s； p 为孔隙压力，MPa； G 为启动压力梯度，MPa/m。

从上图可以看出，围压一定时，压差越大，即压力梯度越大，流体流动获得的动力越大，流量也就随之增加；随着围压增大，煤体的骨架基质收缩，喉道孔径减小，裂隙系统闭合，流体流动通道受限，使得气气体通过的流量明显减少。

从拟合的图(图 3)中可以看出，渗流在所测的压力梯度范围内都是呈现非线性，煤储层的渗透性特别差，在压力梯度很小的情况下，没有气体流量产生。根据试验数据拟合，可以得到在不同围压下甲烷的启动压力梯度：围压为 5 MPa 时，启动压力梯度为 1.48143 MPa/m；围压为 8.5 MPa 时，启动压力梯度为 3.9702 MPa/m；围压为 12 MPa 时，启动压力梯度为 7.6222 MPa/m；围压为 15 MPa 时，启动压力梯度为 6.0678 MPa/m。随着围压增大，启动压力梯度增大是因为煤基质骨架收缩，岩心受到压缩，喉道半径减小，使得气体通过煤基质的传质阻力增大，导致气体流动困难。但围压在增加到一定程度时，启动压力梯度却出现减小的情况。这说明围压增大在使骨架喉道半径减小的同时，也会产生新的裂隙，而裂隙的渗透率要大于孔隙的渗透率，进而导致启动压力梯度减小。

3.2. 低渗气藏滑脱效应试验数据拟合分析

滑脱效应是气体在多孔介质孔道渗流过程中出现在孔道壁面附近的气体分子速度不为零的一种现象。在低渗条件下，滑脱效应的存在会增加附加流量，进而会提高煤层的渗透性能。而渗透率的计算公式偏离非达西定律，采用如下公式[11] [12]进行计算：

$$k = \frac{2p_0 Q \mu L}{A(P_1^2 - P_2^2)} \quad (3)$$

利用公式求得渗透率，并对试验数据利用线性回归方法进行数据拟合，得到不同围压下气体渗流时

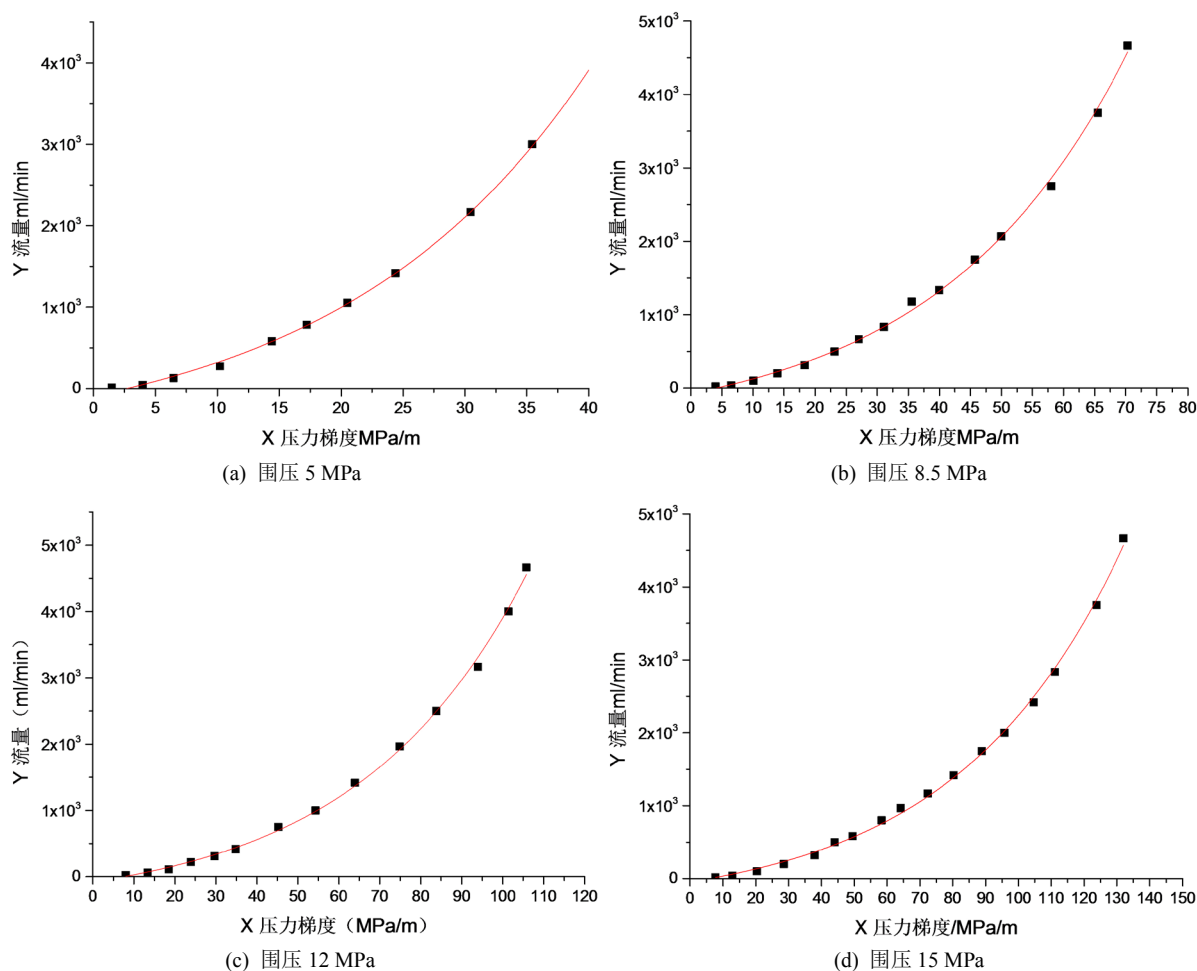


Figure 3. Threshold pressure gradient under different confining pressures

图 3. 不同围压作用下甲烷启动压力梯度

考虑滑脱效应的渗透率数学表达式和滑脱因子。数据拟合曲线如图 4 所示。

从试验数据拟合图可以得到，不同围压下，气体渗流会呈现出不同程度的滑脱效应。在低围压下，气体渗透率随着孔隙压力倒数的增加，渗透率逐渐变大，滑脱效应明显。随着围压的增大，渗透率会大幅度减小，但气体渗透率随着孔隙压力倒数的增加变化很小，几乎没有变化，而滑脱系数在减小，围压对滑脱效应的影响减小。围压增大，滑脱效应产生的渗透率增量减小。

4. 讨论

在低渗透致密气藏煤层气开发过程中，由于启动压力梯度、滑脱效应的存在，气体的流动呈现出非达西现象，不同于常规气体的流动形态。启动压力梯度对气体的流动有阻碍作用，而滑脱效应对气体的流动有促进作用，那么微观的滑脱效应对宏观的启动压力梯度又是如何影响的，现做进一步进行研究。将试验数据拟合得到的滑脱因子和启动压力梯度值整理见表 1，拟合曲线如图 5 所示。

从拟合图中可以看出，启动压力梯度随滑脱因子的增加呈现很好的线性递减关系：

$$\lambda = A + Bb$$

式中：A、B 为常数。

由于滑脱因子增大，滑脱效应明显，而滑脱效应的存在会增加附加流量，增大气体的渗透率，大大

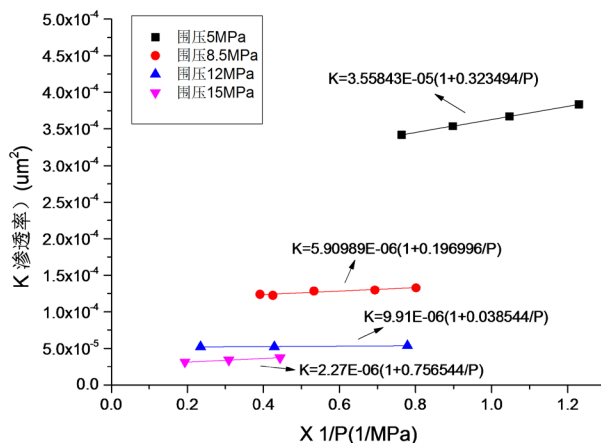


Figure 4. Gas slippage effect under different confining pressures
图 4. 不同围压作用下的气体滑脱效应

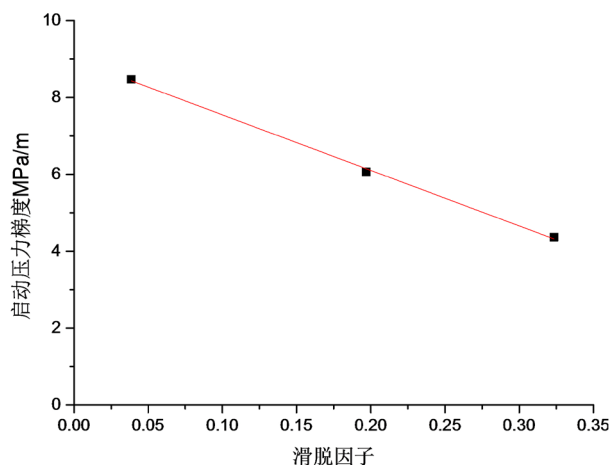


Figure 5. The relationship between the slippage factor and the threshold pressure gradient
图 5. 滑脱因子与启动压力梯度的关系

Table 1. The date of slippage factor and threshold pressure gradient
表 1. 滑脱因子与启动压力梯度数据

围压(MPa)	滑脱因子	启动压力梯度(MPa/m)
5	0.323494	1.48126
8.5	0.196996	3.97017
12	0.038544	7.62223

改善低渗储层的渗透率，从而使启动压力梯度减小。启动压力梯度越大，气体开始流动需要克服的阻力就越大，对于煤层气的开采越困难，所以要提高煤层气的采收率，可以通过改善储层的渗透率。滑脱效应的存在会削弱启动压力梯度，有利于气体的流动。

5. 结论

本文通过试验研究的方法来分析低渗气藏滑脱效应对启动压力梯度的影响，并且得到如下结论：

- 1) 低渗气藏气体的渗流流动存在启动压力梯度，并且随着围压的增大，启动压力梯度增大。

2) 低渗气藏渗流的滑脱效应是普遍存在的, 低压条件下, 随着孔隙压力的增大, 滑脱效应比较明显; 但随着围压的增大, 滑脱效应的影响逐渐减弱。

3) 在一定的围压范围内, 滑脱因子与启动压力梯度呈现很好的线性递减关系, 滑脱效应的存在有利于减小启动压力梯度, 更加有利于煤层气的开采。

参考文献

- [1] 王敬, 刘慧卿, 刘仁静, 徐杰. 考虑启动压力和应力敏感效应的低渗、特低渗油藏数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013(S2): 3317-3327.
- [2] 刘海龙, 范天一, 吴淑红, 李春涛. 考虑压力敏感效应和启动压力梯度的低渗透气藏水平井产能研究[J]. 科学技术与工程, 2015(5): 70-80.
- [3] 汪全林, 唐海, 吕栋梁, 彭得兵, 郭粉转. 低渗油藏启动压力梯度实验研究[J]. 油气地质与采收率, 2011(1): 97-100, 117-118.
- [4] 冯其红, 舒成龙, 张先敏, 等. 煤层气井两相流阶段排采制度实时优化[J]. 煤炭学报, 2015, 40(1): 142-148.
- [5] 刘高波, 刘荣和, 冯文光, 张青锋. 低渗透气藏非达西渗流研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2007(1): 65-67.
- [6] 肖晓春, 潘一山. 滑脱效应影响的低渗煤层气运移实验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(10): 1554-1558.
- [7] 肖晓春, 潘一山. 低渗煤储层气体滑脱效应试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008(S2): 3509-3515.
- [8] 肖晓春, 潘一山. 考虑滑脱效应的煤层气渗流数学模型及数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(16): 2966-2970.
- [9] 葛洪魁, 申颖浩, 宋岩, 等. 页岩纳米孔隙气体流动的滑脱效应[J]. 天然气工业, 2014, 34(7): 46-54.
- [10] 尹虎, 王新海, 刘洪, 汪金如. 考虑启动压力梯度的页岩气藏数值模拟[J]. 天然气与石油, 2012, 30(4): 43-45, 57, 100.
- [11] 陈代询, 王章瑞, 高家碧. 气体滑脱现象的综合特征参数研究[J]. 天然气工业, 2003(4): 65-67, 142-143.
- [12] 任晓娟, 阎庆来, 何秋轩, 张敏渝. 低渗气层气体的渗流特征实验研究[J]. 西安石油学院学报(自然科学版), 1997(3): 22-25, 4-5.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2164-5639, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>
期刊邮箱: apf@hanspub.org