

文章编号: 1001-4888(2013)01-0117-04

超临界 CO₂ 在低渗透煤层中渗流规律的实验研究^{*}

孙可明, 任硕, 张树翠, 陈治宇, 吴迪, 岳立新, 李赞

(辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁 123000)

摘要: 利用自主研发的 THM 三场耦合渗流实验系统, 进行不同孔隙压力和温度条件下的超临界 CO₂ 在低渗透煤层中的渗流实验, 得出不同温度下流速和压力梯度之间的关系, 从而得到了低渗透煤层注入超临界 CO₂ 的非达西渗流规律, 即流速与压力梯度变化规律呈现正指数关系。随着压力梯度的增大, 渗透系数也不断的增大, 且呈现正指数关系; 在同一体积应力和压力梯度的条件下, 温度越高, 流速越快; 温度在临界点附近, 流速和渗透系数增加很快。

关键词: 超临界 CO₂; 低渗透煤层; 渗流

中图分类号: TD712

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-12-048

0 引言

我国煤层瓦斯储量巨大, 其资源量约为 35 万亿 m³^[1], 然而我国煤层具有低压、低渗、低饱和度的三低储层特征^[2], 导致不管是地面钻井抽采还是井下钻孔抽采抽气率普遍低, 严重影响了煤层气开发利用与煤矿瓦斯灾害事故的防治。

大量实验表明, 煤对 CO₂ 的吸附量比 CH₄ 高, 通过对煤体注入 CO₂ 的办法来降低煤体对 CH₄ 的吸附, 从而达到实现吸附甲烷转化为游离甲烷, 促使其解吸达到提高煤层甲烷的目的^[3], 作者在进行温度对 CO₂ 气体驱替置换煤层甲烷实验中发现, 当温度超过 31.06℃, 压力超过 7.39MPa, 即 CO₂ 处于超临界状态时, 煤的渗透性得到明显提高。

目前, 煤层注入 CO₂ 提高煤层 CH₄ 采收率只是利用煤对未处于超临界状态的 CO₂、CH₄ 气体的吸附能力不同来实现的。国外较早进行了注气提高煤层 CH₄ 采收率的实验研究, 1984 年 Reznik^[4] 和 1998 年 Zuber^[5] 等证实了在煤层中注入 CO₂ 能够提高 CH₄ 采收率的事实, 2000 年 Clarkson^[6] 等认为, 在煤层甲烷生产期间, 可以通过向煤层中注入 CO₂、N₂ 等气体促使 CH₄ 从煤层中解吸, 增加 CH₄ 的产量。在国内, 2001 年吴世跃^[7] 等人从理论上研究了注气开采煤层气的增产机制, 2004 年唐书恒^[8] 等进行了 CH₄/N₂ 和 CH₄/CO₂ 二元气体等温吸附和解吸实验, 孙可明 2004 年完成的博士论文^[9] 研究了注气开采流固耦合渗流问题, 目前进行利用二氧化碳改造低渗透煤层渗透性的研究。

本文结合超临界 CO₂ 具有零表面张力、低粘度、强扩散和强溶解能力以及对温度和压力改变敏感的特性, 通过实验揭示出低渗透煤层注入超临界 CO₂ 的渗流规律, 为改造低渗透煤层的渗透性和提高瓦斯抽采率提供重要的理论指导。

1 材料与方 法

实验仪器采用自主研发的 THM 三场耦合渗流实验系统, 该系统主要包括能通过调控温压独立产

^{*} 收稿日期: 2012-03-31; 修订日期: 2012-10-02

基金项目: 国家自然科学基金(11072103、50874057)资助

通讯作者: 孙可明(1968—), 男, 博士, 教授, 主要从事渗流理论及工程应用方面的教学与研究工作。E-mail: sskkmm11@163.com

生不同条件下 CO_2 流体的压力釜,具有施加围压、轴压、孔隙压、温度、测定变形、注气、采气等功能的渗透仪,并与气相分析仪、加热控制器等设备配套组成实验系统,如图 1。

该实验系统既克服了传统吸附解吸实验不能反映储层地应力等实际储层条件对吸附解吸的影响和吸附解吸过程中储层变形规律的不足,又克服了岩土等领域三轴渗透实验中不能反映吸附、解吸、置换过程影响的不足。

为方便不同条件下的实验比较,制成不同孔隙度的型煤试样。采用河南平顶山煤矿的煤块,使用 SP-100×100 颚式破碎机将煤块粉碎后,筛选其中 60 目的微颗粒,然后使用液压式压力试验机加压 100MPa,并保持压力 20 分钟后成型 50mm×100mm 的型煤试件,将型煤试件放在 100℃ 烘干箱里烘烤 48 小时,如图 2。

用热缩管将型煤试件密封,如图 3,之后放入 THM 三场耦合渗流实验系统,通气并检查气密性;根据实验方案,调节温度、围压、轴压、孔隙压,待流速平稳,记录数据,进行超临界 CO_2 在低渗透煤层中渗流规律的实验。



图 1 THM 三场耦合渗流实验系统

Fig. 1 THM three fields coupling seepage test system



图 2 型煤试件图

Fig. 2 Briquette specimen



图 3 密封的煤样试件

Fig. 3 Sealed briquette specimen

2 结果与分析

根据等温渗流实验的渗透率计算公式:

$$K = 2P_2 L \mu Q / A(P_1^2 - P_2^2) \quad (1)$$

式中: K 为煤样渗透率(cm^2); L 为煤样长度(cm); P_2 为煤样出气端绝对压力(Pa); μ 为二氧化碳气体动力粘度($\text{Pa} \cdot \text{s}$); Q 为出气端流量(cm^3/s); A 为煤样横截面面积(cm^2); P_1 为进气端绝对压力(Pa)。

根据非等温超临界渗流实验,气体的粘度和体积受温度和压力的影响,利用气体状态方程:

$$PQ/T = P_2 Q_2 / T_2 \quad (2)$$

代入到(1)式中,可得到变温后渗透率公式:

$$K = 2P_2 L \mu_T QT / A(P_1^2 - P_2^2) T_2 \quad (3)$$

式中 μ_T 为升温后气体粘度; T 为升温前热力学温度(K); T_2 为升温后实验热力学温度(K)。

渗透系数与渗透率的关系式:

$$k = K \rho g / \mu_T \quad (4)$$

根据超临界 CO_2 在低渗透煤层中渗流实验数据,可得到不同温度条件下 CO_2 的流速随着压力梯度的变化曲线。

图 4 中的三条曲线分别表示为体积应力均为 21MPa 时,在温度 39℃、温度 50℃、温度 73℃ 条件下流速与压力梯度的关系,由图可知,流速 V 随着压力梯度 ∇P 的增大而增大,呈现正指数关系,渗流规律为非达西渗流。

同时从图 4 也可以看出,温度对流速也存在着一一定的影响,即在体积应力和压力梯度一定的条件下,温度越高,流速 V 越快。 $T=39^\circ\text{C}$ 的曲线比其他两条曲线陡,变化明显,这主要是因为超临界 CO_2 的性质如密度、粘度、扩散系数、溶剂化能力等,可以在一定范围内通过压力和温度进行调节,在其临界

点附近这种调节作用尤为显著。

表 1 给出了在超临界 CO₂ 状态作用下流速与压力梯度的拟合关系,由相关系数可知拟合精度较高。根据表 1 可以归纳出流速 V 与压力梯度 ∇P 的关系式为:

$$V = Ae^{B\nabla P} \quad (A, B \text{ 为大于 } 0 \text{ 的常数}) \quad (5)$$

表 1 流速与压力梯度拟合关系表

Tab. 1 Flow rate and pressure gradient fitting relational table

$\sigma_v = 21\text{MPa}$	V 与 P 关系函数	R^2
$T=39^\circ\text{C}$	$V=0.3496e^{0.0763\nabla P}$	0.9563
$T=50^\circ\text{C}$	$V=14.205e^{0.0366\nabla P}$	0.9989
$T=73^\circ\text{C}$	$V=25.516e^{0.0324\nabla P}$	0.9901

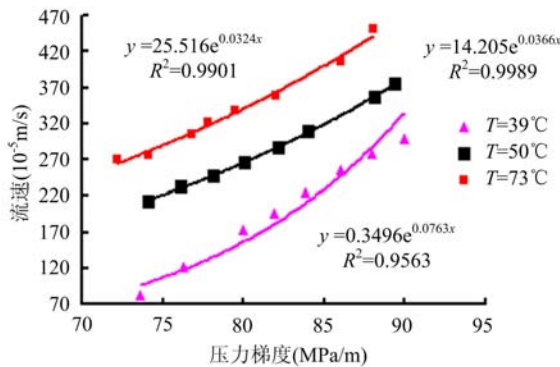


图 4 流速与压力梯度的关系图 ($\sigma_v = 21\text{MPa}$)

Fig. 4 The relation between flow rate and pressure gradient ($\sigma_v = 21\text{MPa}$)

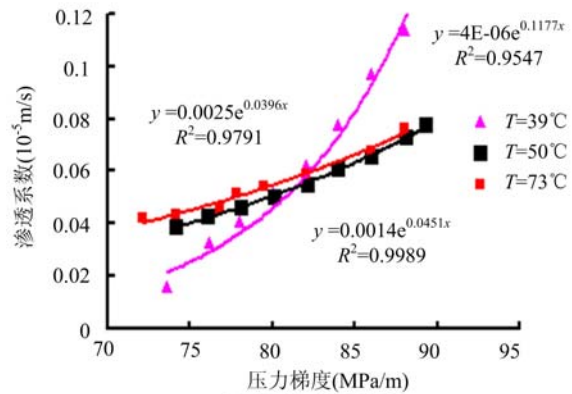


图 5 渗透系数与压力梯度的关系图 ($\sigma_v = 21\text{MPa}$)

Fig. 5 The relation between coefficient of permeability and pressure gradient ($\sigma_v = 21\text{MPa}$)

在体积应力为 21MPa 时,不同温度条件下的渗透系数与压力梯度的关系曲线如图 5 所示。从图中可以看出,随着压力梯度的增大,渗透系数也不断增大,且呈现正指数规律,和流速与压力梯度的变化规律是一致的,可以归纳为:

$$k = Ce^{D\nabla P} \quad (C, D \text{ 为大于 } 0 \text{ 的常数}) \quad (6)$$

从图 5 还可看出,温度对渗透系数也存在着一一定的影响,即在体积应力和压力梯度一定的条件下,温度越高,渗透系数越大(见 $T=50^\circ\text{C}$ 和 $T=73^\circ\text{C}$ 两条曲线比较); $T=39^\circ\text{C}$ 曲线最终超过其他两条曲线,这主要是因为超临界 CO₂ 在临界点附近,压力和温度微小变化都可以引起流体密度的很大变化^[10]。

3 结论

本文通过实验研究,得出如下结论:

- (1) 流速 V 随着压力梯度 ∇P 的增大而增大,呈正指数关系 $V = Ae^{B\nabla P}$,渗流规律为非达西渗流;
- (2) 渗透系数与压力梯度的关系式为 $k = Ce^{D\nabla P}$;
- (3) 在体积应力和压力梯度一定的条件下,温度越高,流速 V 越快。

参考文献:

- [1] 刘洪林,李景明,宁宁,李贵忠.我国煤层气勘探开发现状、前景及产业化发展建议[J].天然气技术,2007,1(4):9-12(LIU Hong-lin, LI Jing-ming, Ning Ning, LI Gui-zhong. Current Status and Prospect of China's Coal

- Bed Gas Exploration and Suggestions on Accelerating Its Industrialized Development [J]. Natural Gas Technology, 2007, 1(4): 9–12 (in Chinese))
- [2] 吴嗣跃, 郑爱玲. 注气驱替煤层气的三维多组分流动模型[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(4): 580–583 (WU Shi-yue, ZHENG Ai-ling. A Three-Dimension Multicomponent Flow Model of Enhanced Coalbed Methane Recovery by Gas Injection [J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(4): 580–583 (in Chinese))
- [3] 杨涛, 杨栋, 康志勤, 黄静静, 赵静. 注入超临界二氧化碳对提高煤层渗透性的影响[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(4): 108–110 (YANG Tao, YANG Dong, KANG Zhi-qin, HUANG Jing-jing, ZHAO Jing. Influence on Improving Permeable Performance in Coal Seam Through Injection Super Critical CO₂ [J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(4): 108–110 (in Chinese))
- [4] REZNIK A A, AINGH P K, FOLEY W L. An analysis of the effect of CO₂ injection on the recovery of in-situ methane from Bituminous coal: an experimental simulation[J]. SPE Journal, 1984, 24(5): 521–528.
- [5] ZUBER M D. Production characteristics and reservoir analysis of coal bed methane reservoirs [J]. International Journal of Coal Geology, 1998, 38(1-2): 27–45.
- [6] CLARKSON C R, BUSTIN R M. Binary gas adsorption/desorption isotherms: effect of moisture and coal composition upon carbon dioxide selectivity over methane[J]. International Journal of Coal Geology, 2000, 42(4): 241–272.
- [7] 吴世跃, 郭勇义. 注气开采煤层气增产机制的研究[J]. 煤炭学报, 2001, 26(2): 199–203 (WU Shi-yue, GUO Yong-yi. Study of the mechanism of increasing production of exploitation coal-bed methane by gas injection [J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(2): 199–203 (in Chinese))
- [8] 唐书恒, 汤达祯, 杨起. 二元气体等温吸附-解吸中气分的变化规律[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(4): 448–452 (TANG Shu-heng, TANG Da-zhen, YANG Qi. Variation Regularity of Gas Component Concentration in Binary-Component Gas Adsorption-Desorption Isotherm Experiments [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 33(4): 448–452 (in Chinese))
- [9] 孙可明. 低渗透煤层气开采与注气增产流固耦合理论及其应用[D]. 辽宁: 辽宁工程技术大学博士学位论文, 2004 (SUN Ke-ming. Fluid-Solid Coupling Theory of Exploiting Coal Methane and Improving Coal Methane Production by Gas Injection in Low Permeability Reservoir and Its Application [D]. Liaoning Technical University Ph. D. Thesis, 2004 (in Chinese))
- [10] 赵阳升. 多孔介质多场耦合作用及其工程响应[M]. 科学出版社, 2010 (Zhao Yang-sheng. Porous Media Multi-Field Coupling Effect and its Engineering Response [M]. Science Press, 2010 (in Chinese))

Experimental Study of Supercritical Carbon Dioxide Seepage Flow in Low Permeability Coal Seam

SUN Ke-ming, REN Shuo, ZHANG Shu-cui, CHEN Zhi-yu, WU Di, YUE Li-xin, LI Zan

(Liaoning Technical University, Mechanics and Engineering, Liaoning 123000, China)

Abstract: A series of seepage experiments of supercritical CO₂ were carried out under different conditions of pore pressure and temperature based on a self-developed THM three field coupled seepage experiment system. Relationship among the flow velocity and the pressure gradient at different temperatures were obtained. That is non-Darcy seepage regulation of supercritical CO₂ in low permeability seam, which means a positive exponential relation between the flow velocity and pressure gradient. The permeability coefficient increases along with the pressure gradient increase, and presents a positive exponential relationship; under the same volume stress and pressure gradient conditions, the higher the temperature is, the faster the flow velocity; when temperature approaches the critical point, the flow velocity and the permeability coefficient increase faster.

Keywords: supercritical carbon dioxide; low permeability coal seam; seepage flow