

煤层气试井注入压降法模拟实验

张均锋, 付应乾, 牛斌, 穆丹

中国科学院力学研究所水动力与海洋重点实验室, 北京 100190

摘要 煤层气开发首先需要通过试井分析来反演地层参数, 而注入压降法是煤层气开发过程中最常用的试井方法。为进一步扩展注入压降法在煤层气试井中的适用性, 尽量在煤层气试井过程中获得更多的地层信息, 提高试井解释合格率, 通过室内模拟实验的方法研究了注入压降法试井新方法。首先建立了室内模拟实验装置, 通过控制注入流量的变化, 获得井底压力时程变化曲线, 与现场试井得到的井底压力曲线形式一致, 证明室内模拟实验能够复现场试井过程。实验首次提出并采用一次试井过程中多级流量注入的方法, 获取井底压力不同阶段的变化曲线, 结果表明, 多级变流量注入时井底压力增加的幅值与注入流量的增加呈非线性关系。实验模拟过程可控制注入流量, 充分反映井底压力变化, 以此获得更多的数据资料, 为后续试井资料解释提供更充分的信息, 以便提高试井解释准确率和合格率。同时还可通过控制和改变地层参数(如渗透性)进行实验, 从而在已知地层参数前提下, 达到校验试井理论解释模型的合理性和准确性的目的。

关键词 煤层气试井; 注入压降法; 渗透性; 多级注入

中图分类号 TE373

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.17.003

Simulated Experiments on the Method of Injection/Falloff Well Testing for Coal Bed Methane

ZHANG Junfeng, FU Yingqian, NIU Bin, MU Dan

Key Laboratory for Hydrodynamics and Ocean Engineering, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract Before carrying on a reasonable exploitation of coal bed methane, it is necessary to take the inverse computation for the parameters of coal bed by well testing analysis. The method of injection/falloff is the most commonly used in coal bed methane well testing. In order to expand the applications of the injection/falloff method in well testing and to gain more information about the coal bed, the injection/falloff well testing process is reconstructed in terms of an experimental system designed in the laboratory. The change of pressure on well bottom is obtained by controlling injection flux. It is indicated that the experimental result is consistent with the in-situ result. The method of multi-level injection is presented in the simulated experimental study to gain more information involving the pressure change on well bottom at different stages. The results show that the pressure on well bottom is nonlinearly increasing with the increase of injection flux. By controlling the injection flux, the simulated experimental process is able to sufficiently response the pressure change on well bottom, and to obtain more digital information about well bottom for further well testing interpretation. In the meanwhile, this kind of experiments could be carried out to verify the rationality and accuracy of the proposed model for theoretical interpretation by controlling and changing the given parameters of well bottom.

Keywords well testing of coal bed methane; injection/falloff; permeability; multi-level injection

0 引言

煤层气开发对于改善能源结构, 减少煤层瓦斯灾害, 保护大气环境, 都具有极为重要的意义。中国煤层气资源丰富, 总储量为 36.8 万亿 m^3 , 占世界总储量的 14.15%, 居世界第 3

位, 煤层气开发在中国具有极为广阔的前景^[1-2]。

合理开发煤层气田首先要了解地层参数, 对煤层进行定性和定量分析。煤层气试井的主要目的就是获取地层参数, 预测气井的产能和采收率, 指导完善合理的排采制度, 为煤

收稿日期: 2012-04-20; 修回日期: 2012-06-05

基金项目: 国家科技重大专项(2009ZX05038-001)

作者简介: 张均锋, 高级工程师, 研究方向为煤层气开采试井方法, 电子信箱: zhangjf@imech.ac.cn

层气开采提供科学合理的依据。目前试井测试的方法很多,主要有 DST 测试、段塞测试、注入压降测试、水罐测试等,但这些方法主要还是依赖于常规油气井试井技术,尽管一些常规试井方法可用于煤层气试井测试,但由于煤层气在储集、运移、产出机理方面与常规油气存在明显差异,其中有些现有的试井技术在应用时还存在一定的局限性^[3-5]。试井方法的选取关系到资料录取的合格率和对试井资料解释的成功率,也关系到排采过程参数的选取,直接影响开采成本,因而需要对煤层气试井方法进行进一步探索。

由于现场试井方法研究成本较大,现场影响因素较多,控制参数稳定性差,要进行详尽的方法研究还可能影响生产,而开展室内模拟实验可以避免上述缺点,且地层参数、输入流量等参数可控性强,适合试井方法的进一步研究,更有利于验证解释模型的合理性和精度。但国内外极少有试井方法室内模拟实验方面的研究报道。本文主要针对注入压降试井方法,通过室内模拟实验复现现场的试井过程,配比地层模拟材料以便控制地层参数,采用单级和多级流量注入的方法获取井底压力的数据,可用于试井资料解释过程中模型和参数的合理选取,使得试井解释更为准确,还可以达到校验试井解释模型的目的。

1 实验原理

通过煤层气试井可获得的动态参数包括:渗透率、储层压力、表皮系数、井筒储集、煤层的破裂压力和闭合压力等。由于注入压降测试提供的资料准确度高,且操作简便、成本较低,是目前国内外煤层气试井中最常用的方法^[5-7]。

注入压降试井测试是一种单井压力瞬变测试方法,它是以稳定排量以及低于煤层破裂压力的注入压力将水注入储层一段时间,再关井进行压力恢复测试,使压力与原始储层压力逐渐平衡。由于现阶段注入过程中设备等客观条件的限制,稳定排量的控制比较困难,这就造成测试井井下压力数据的波动,因此试井测试的关井压降阶段的压力数据分析通常最能反映地层特性。通过分析压力计记录的数据,可反演得到煤储层的参数。

渗透率是控制煤层气开采的主要储层参数之一,是控制煤层气井产量动态变化的主要因素^[8-10]。文中实验的主要测试目的就是在初始配置地层渗透性已经测定的情况下,通过模拟注入压降实验得到压力变化曲线,可经过以后的试井资料解释系统反演得到渗透率。针对现场测试过程中注入压力不稳定问题,尝试采用了可控的多级流量注入,研究多级流量注入压降法的可行性和控制参数,还可以达到校验试井,解释模型合理性的目的。

2 实验装置

根据注入压降法原理,设计了室内模拟的实验装置。实验装置主要由3部分组成:压力注入与释放系统,密封容器,数据采集系统。压力注入系统将水压入密闭容器中,密封容

器内置多孔填充材料模拟地层,引起容器内多孔介质孔隙压力的变化。通过安装在密封容器上的压力传感器测量容器内各处压力值变化,由数据采集器获得试验数据,以此模拟整个注入压降试井过程。实验装置设计框图如图1所示。

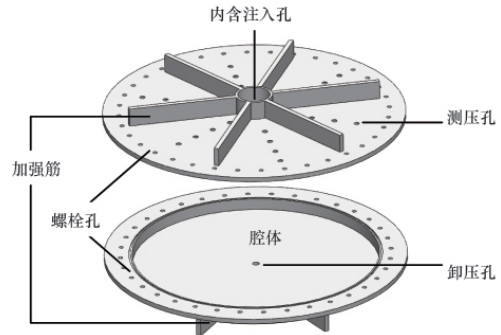


图1 实验装置设计框图

Fig. 1 Flow chart of experimental setup design

2.1 密封容器

密封容器主要由上盖板、下盘、填充材料及其附属结构(支架、起重设备等)组成。其中上盖板由直径1300mm,厚度25mm的钢板加工而成,上盖板中心开设注入孔并安装压力传感器,沿径向不同间距开设24个孔,分别可用于水注入、压力释放或压力测量,如图2所示。下盘为深度50mm的开口容器,周向由20mm的钢板圈成,上沿设有密封槽并附有高压密封圈,用于跟上盖板的密封连接(图2)。整个装置的实物图如图3。

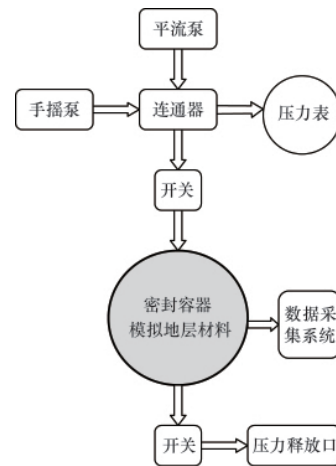


图2 实验装置主体示意

Fig. 2 Scheme of main experimental setup

2.2 压力注入与释放系统

利用平流泵或手摇泵将水注入密封容器(图3和图4)。在泵出口处加装一个压力表,观察出口压力变化并作为注入压力;水进入密封容器后,容器内压力经历局部升高、渗流、关井降压、最后趋于稳定的过程,也就是注入压降的过程。测得压力数据后,通过压力释放口将压力卸掉,完成本组试验。

2.3 数据采集系统

数据采集系统由高精度压力传感器、数据采集器和计算

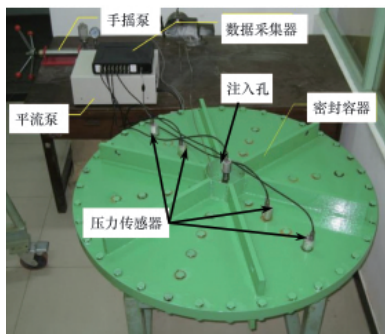


图3 实验装置图

Fig. 3 Experimental setup in the laboratory

机组成。将传感器安装在密封容器上盖预留的螺孔中,通过压力采集器缓存将压力数据传入计算机,可测量模拟地层内不同位置的压力变化。测量过程中可通过控制软件显示并观察实时的压力变化,最后存储得到的压力数据(图4)。

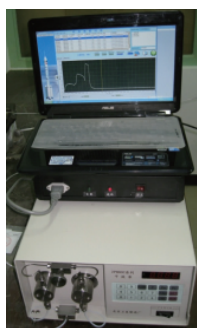


图4 数据采集系统

Fig. 4 Data acquisition system

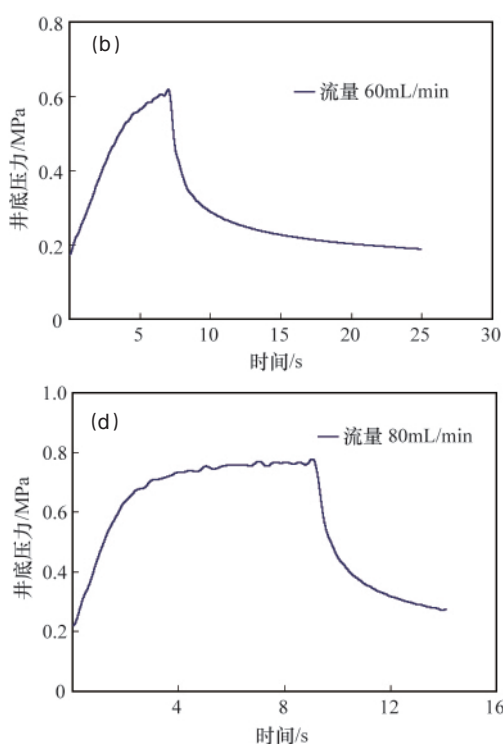
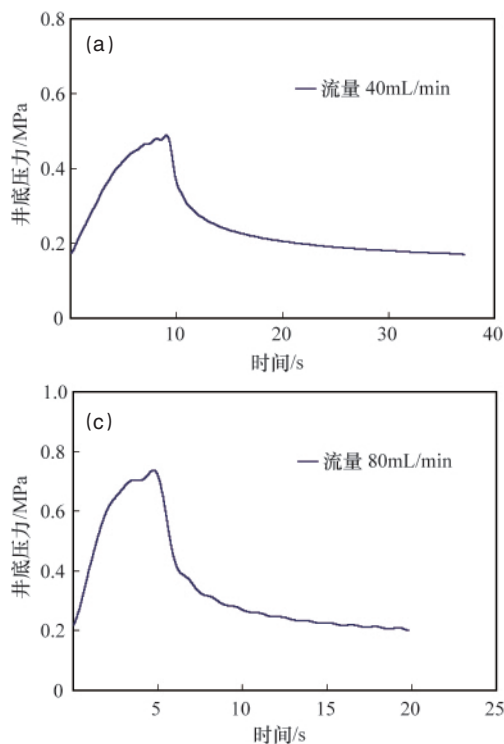


图5 恒流量注入井底压力时程变化曲线

Fig. 5 Curves of pressure change on well bottom with constant injection

3 实验测量与结果

3.1 地层土样及注入流量

压力容器内模拟地层材料采用的是细砂土、黏土、高分子弹性体材料配比而成,经测试其渗透系数 k 为 $(1.5-3.0) \times 10^{-7} \text{m/s}$ 。装填模拟地层材料时通过过盈加装材料达到施加地应力的目的,且控制模拟地应力在 0.2MPa 左右。

实验过程中,模拟井口处由于注入水流的冲刷,该处砂土渗透性增加,造成后续实验所测得的压力曲线峰值不断降低。因此在每次实验之前必须打开容器,用原配比好的土样置换注入井口附近的砂土,才能重新进行实验。

注入流量分两种:一种是恒流量,即整个注入过程中注入流量保持恒定不变;第二种是变流量,即实验过程中的注入流量是分段变化的,其中又采用了二级变流量和三级变流量的方法,见表1。

表1 设定注入流量值

Table 1 Preset injection rates

恒流量/(mL·min ⁻¹)	40	60	80
变流量/(mL·min ⁻¹)	二级变流量	40→60	40→80
	三级变流量	20→40→60	20→40→80

3.2 压力测试结果

(1) 恒流量实验

实验中设定 40、60 和 80mL/min 分别为注入流量(单级),测定井底压力升高以及关井后压力回落的时程变化曲线,如图5(a)~(c)。为考察注入时间长短对井底压力变化的影响,

选择流量为 80mL/min 进行实验,如图 5(c)和(d),可知当井底压力达到峰值后,除稍有波动外基本能维持稳定。

(2) 变流量实验

为获得更多压力变化信息以便更好的进行试井资料解释,提出采用多级变流量的方法进行注入压降测试。实验中

选定二级变流量 40→60mL/min 和 40→80mL/min, 分别测定井底压力升高以及关井后压力回落的时程变化曲线, 如图 6 (a)和(b);选定三级变流量 20→40→60mL/min 和 20→40→80mL/min, 测定井底压力升高以及关井后压力回落的时程变化曲线,如图 6(c)和(d)。

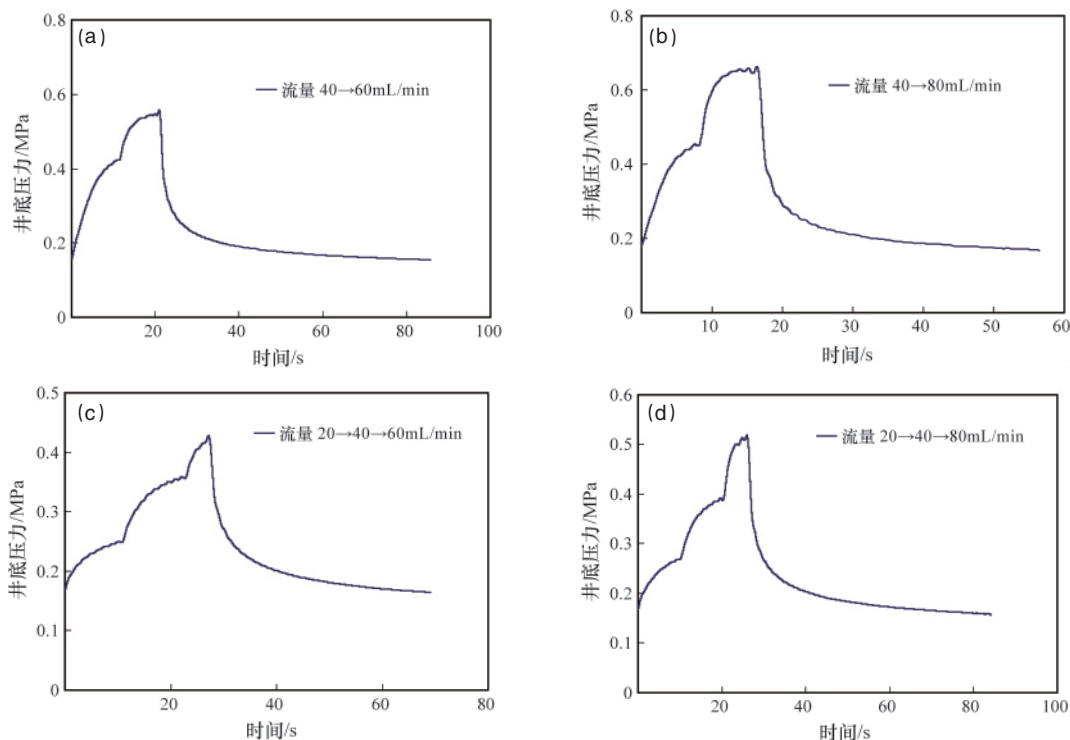


图 6 变流量注入井底压力时程变化曲线

Fig. 6 Curves of pressure change on well bottom with multi-level injection

4 结果分析

根据恒流量注入的测量结果(图 5)可知,注入流量越大,井底压力峰值就越高,且井底压力达到峰值所需的时间也越短,在同样的注入流量下(80mL/min),延长注入时间,压力峰值基本不变。井底压力峰值及达到峰值的时间随注入流量的变化如表 2,其中初始压力记为 P_0 ,井底压力峰值记为 P_1 ,则井底压力的上升最大值为 P_1-P_0 。

表 2 恒流量时注入流量与井底压力峰值对照表

Table 2 Constant injection rate and peak value of pressure

流量 (mL·min ⁻¹)	初始压力 P_0 /MPa	井底压力峰值 P_2 /MPa	P_2-P_1 /MPa	压力峰值 时间/s
40	0.17	0.49	0.32	9.2
60	0.17	0.62	0.45	7.2
80	0.22	0.73	0.51	4.8
80	0.10	0.76	0.66	—

对于二级变流量,由于每级注入流量上升都可达到暂时

的局部峰值,当注入流量变化后压力会继续上升从而达到二次峰值。二级变流量井底压力各特征值如表 3,其中初始压力记为 P_0 ,一级流量对应井底压力峰值记为 P_1 ,二级流量对应井底压力峰值记为 P_2 ,则一级流量引起井底压力的上升最大值为 P_1-P_0 ,二级流量引起井底压力的上升最大值为 P_2-P_1 。

表 3 二级变流量时注入流量与井底压力峰值对照表

Table 3 Two-level injection rate and peak value of pressure

流量 (mL·min ⁻¹)	初始压力 P_0 /MPa	一级峰值 P_1 /MPa	二级峰值 P_2 /MPa	P_1-P_0 /MPa	P_2-P_1 /MPa
40→60	0.16	0.43	0.55	0.27	0.12
40→80	0.18	0.45	0.65	0.27	0.20

同样对于三级变流量,可给出测试过程中井底压力的各个特征值如表 4,其中初始压力记为 P_0 ,一级流量对应井底压力峰值记为 P_1 ,二级流量对应井底压力峰值记为 P_2 ,三级流量对应井底压力峰值记为 P_3 ,则一级流量引起井底压力的上升最大值为 P_1-P_0 ,二级流量引起井底压力的上升最大值为

P_2-P_1 , 三级流量引起井底压力的上升最大值为 P_3-P_2 。

比较表 4 中各级变流量引起的井底压力升高幅值可知, 同样的流量增值并不会按比例引起井底压力的升高, 二者为非线性关系。

还需注意的是, 实验结果中单级恒流量与多级变流量中相应的流量相同时, 井底压力峰值存在着差异, 这是由于实

验土样渗透性差异和初始压力不同引起的, 这也恰恰反映了多级变流量测试可获取更多测试信息的优越性, 这为后续的试井资料解释提供了充分的数据。

通过笔者自行开发的资料解释软件反演得到的试样渗透系数 $k=2.38 \times 10^{-7} \text{m/s}$, 与实验土样的渗透系数非常吻合, 也验证了资料解释模型的正确性。

表 4 三级变流量时注入流量与井底压力峰值对照表
Table 4 Three-level injection rate and peak value of pressure

流量 ($\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$)	初始压力 P_0/MPa	一级峰值 P_1/MPa	二级峰值 P_2/MPa	三级峰值 P_3/MPa	P_1-P_0 /MPa	P_2-P_1 /MPa	P_3-P_2 /MPa
20→40→60	0.17	0.26	0.36	0.43	0.09	0.1	0.07
20→40→80	0.17	0.27	0.39	0.51	0.10	0.12	0.12

5 结论

通过设计加工的室内实验装置和建立的测试系统, 模拟了单级流量注入的注入压降试井方法及测试过程, 探讨了采用多级流量注入的注入压降试井方法和操作流程, 并进行了井底压力测试和分析, 可以得到如下结论。

(1) 通过室内实验模拟, 可以复现现场注入压降法的测试过程, 获得井底压力变化时程曲线, 与现场试井得到的井底压力曲线形式一致。

(2) 实验结果表明多级变流量注入时井底压力增加的幅值与注入流量的增加呈非线性关系。

(3) 实验模拟过程可控制注入流量的变化, 充分反映井底压力变化, 同时通过改变注入方式, 即通过多级变流量注入情况下的井底压力变化曲线, 以此获得更多的数据资料, 为后续试井资料解释提供更充分的信息, 以便提高试井解释准确率。

(4) 可以通过控制和改变地层参数(如渗透性)进行实验, 从而在已知地层参数前提下, 校验试井解释模型的合理性和准确性。

参考文献 (References)

[1] 张新民, 庄军, 张遂安. 中国煤层气地质与资源评价[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
Zhang Xinmin, Zhuang Jun, Zhang Suian. The evaluation of CBM geology and resources in China[M]. Beijing: Science Press, 2002.
[2] 冯明, 陈力, 徐承科, 等. 中国煤层气资源与可持续发展战略 [J]. 资源

科学, 2007, 29(3): 100-104.
Feng Ming, Chen Li, Xu Chengke, et al. Resources Science, 2007, 29(3): 100-104.
[3] 刘立军, 王立忠, 张增惠, 等. 煤层气井注入压降试井技术研究 [J]. 天然气工业, 2004, 24(5): 79-89.
Liu Lijun, Wang Lizhong, Zhang Zenghui, et al. National Gas Industry, 2004, 24(5): 79-89.
[4] 陈彦丽, 刘启国, 张烈辉, 等. 浅析煤层气井与常规油气井在试井方面的差别[J]. 中国煤层气, 2006, 3(4):44-46
Chen Yanli, Liu Qiguo, Zhang Liehui, et al. China Coal Bed Methane, 2006, 3(4): 44-46.
[5] 张世富. 煤层气注入/压降测试技术应用[J]. 探矿工程, 2001(3): 42-43.
Zhang Shifu. Exploration Engineering, 2001(3): 42-43.
[6] 陈志胜. 煤层气井常用试井方法及应用[J]. 陕西煤炭, 2003(1): 40-42.
Chen Zhisheng. Shaanxi Coal, 2003(1): 40-42.
[7] 景兴鹏. 基于注入压降法的煤层气指标试井试验 [J]. 煤炭科学技术, 2008, 36(10): 38-40.
Jing Xingpeng. Coal Science and Technology, 2008, 36(10): 38-40.
[8] 唐书恒. 煤层气试井设计方法 [J]. 煤田地质与勘探, 1999, 27 (2): 29-31.
Tang Shuheng. Coal Geology & Exploration, 1999, 27(2): 29-31.
[9] Cummins T, Frederick L. Development of in-house coal seam permeability testing capabilities [C]. Underground Coal Operator's Conference, 2006,
[10] Lourdes B, Mark D. Hydraulic fracturing and wellbore completion of coalbed methane wells in the powder river basin, wyoming: implication for water and gas production[J]. The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 2007, 91(1): 51-67.

(责任编辑 吴晓丽)



《科技导报》“研究论文”栏目征稿

“研究论文”栏目专门发表自然科学、工程技术领域具有创新性的研究论文, 要求学术价值显著、实验数据完整、具有原始性和创造性, 同时应重点突出、文字精炼、引证及数据准确、图表清晰, 并附中、英文摘要以及作者姓名、所在单位、通信地址、关键词等信息。在线投稿: www.kjdb.org。