

文章编号: 1001-1986(2018)06-0096-06

基于干扰试井技术的煤层气储层参数测定

景兴鹏^{1,2}, 宋永辉¹

(1. 西安建筑科技大学冶金工程学院, 陕西 西安 710055;
2. 中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077)

摘要: 为弥补传统注入压降试井测试结果以点代面的问题, 提出基于煤层气干扰试井的储层参数测试方法, 阐述了其基本原理、测试方法和数据分析依据。以沁水盆地南部 1 口激动井和 4 口检测井组成的井组为例, 结合该井组前期注入压降法、历史拟合法测试结果, 并与干扰试井测试结果进行对比分析。结果表明, 煤层气干扰试井法各井测点渗透率接近利用排采数据的历史拟合值, 且高于注入压降测值, 但 3 种方法获得数据处于同一数量级之内; 煤层气干扰试井技术方法可以反映试验 5 口井的区域渗透率分布特征, 其区域东南方向渗透率较大, 即为主裂隙发育方向。结合 3 种方法测得的参数值对比可知, 煤层气干扰试井法既可获得离散点的参数值, 又可以获得区域井组的连通性和优势渗流方向, 结果有助于认识区域储层参数, 为进一步的井网和排采井的布置提供比较直接的数据依据。

关 键 词: 煤层气; 干扰试井技术; 渗透率; 半对数分析法

中图分类号: TD712 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2018.06.013

CBM reservoir parameter measurement based on the interference testing technology

JING Xingpeng^{1,2}, SONG Yonghui¹

(1. School of Metallurgical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;
2. Xi'an Research Institute Co. Ltd., China Coal Technology & Engineering Group Corp., Xi'an 710077, China)

Abstract: In order to remedy the problem of point replacing surface in the results of traditional injection pressure drop test, a CBM reservoir parameter measurement method based on interference well testing was proposed. The basic principle, test method and data analysis basis were described. Taking a well group composed of a stimulation well and 4 observation wells in the south of Qinshui basin as example, the results of earlier injection pressure drop and historical fitting of the well group were compared to the results of interference well testing and analyzed. The results showed that the permeability of different measurement points of the well group approximated the permeability from historical fitting using production data and was higher than the permeability measured from injection pressure drop, but the permeability obtained by the three methods was of the same order of magnitude. The CBM interference well testing technology may reflect the characteristics of the regional permeability distribution of the tested well group consisting of 5 wells, at the southeast direction in the region, i.e the direction of development of the principal fracture, the permeability was higher. By combining the parameter values measured from the three methods, it can be known that the CBM interference well testing can get not only the parameter value of the discrete points, but also the regional connectivity of well group and advantageous seepage direction, the results are helpful to know the regional reservoir parameters, provide direct data basis for the layout of further well grid and production wells.

Keywords: coalbed methane, interference well testing, permeability, semi-logarithmic analysis

收稿日期: 2018-07-08

基金项目: 国家科技重大专项课题(2016ZX05045-002); 中国煤炭科工集团有限公司重点项目(2013ZD008)

Foundation item : National Science and Technology Major Project(2016ZX05045-002); The Key Program of the China Coal Technology & Engineering Group Corp.(2013ZD008)

第一作者简介: 景兴鹏, 1982 年生, 男, 陕西子洲人, 博士研究生, 副研究员, 从事煤层气资源勘探评价测试、煤矿安全技术及设备材料性能研究。E-mail: jingxingpeng@cctegxian.com

通信作者: 宋永辉, 1972 年生, 陕西宝鸡人, 教授, 博士生导师, 研究方向为煤洁净技术及其综合利用。E-mail: syh1231@126.com

引用格式: 景兴鹏, 宋永辉. 基于干扰试井技术的煤层气储层参数测定[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(6): 96–101.

JING Xingpeng, SONG Yonghui. CBM reservoir parameter measurement based on the interference testing technology[J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(6): 96–101.

煤层气井试井就是对煤层气井进行测试，测试项目包括储层动态的产量、压力和温度等。试井的基础学科是渗流力学，其是通过数学的手段和现代化测试技术对煤储层进行全面分析，从而对煤层气储层参数做出准确的科学评价^[1-3]。随着现代科学技术和材料设备的不断更新发展，煤层气试井储层参数测试技术也出现一些新的研究成果和理论。现阶段对于试井技术的前期设计、微破裂和水压致裂数据的基本模型和数据处理方式进行了研究和分析^[4-5]。刘立军^[6-7]等对注入压降的测定过程以及渗透率敏感性影响因素进行了细致分析和研究。一些学者^[8-9]对于不同完井方式下的注入压降测定的结果和过程进行对比分析，并提出不同完井方式下的试井适应测试方法。国内通过试井方法对其研究区域的储层参数进行综合分析和研究^[10-11]。杨怀成等^[12]对煤层气井注入压降试井技术进行评述和问题分析。景兴鹏等^[13]提出了流体注入诊断测试的煤层气试井技术和方法。A. P. Bunger 等^[14]研究和分析注入系统压缩性和黏性流体流动对水压致裂破碎压力影响。

本文主要针对目前煤层气测试现状，解决传统注入压降试井测试时间过长、测定数据结果只是表征储层参数“点”的特征等问题，对煤炭行业内的煤储层参数测试的技术方法进行改进，提出区别于传统煤层试井技术方法的煤层气干扰试井技术方法，补充和促进试井测试技术，为煤层气勘探开发参数测定提供新的技术。煤层气干扰试井技术方法是利用传统注入压降试井设备对现有煤层气区域井网进行测定的一种方法，可以分析出区域参数的基本情况，动态的了解区域储层的参数，增加了煤层参数测试的效率并优化了测定技术工艺。

1 煤层气干扰试井技术方法

1.1 设备构成

煤层气干扰试井技术方法主要沿用了传统煤层气试井技术方法的测定设备，主要包括泵注设备的系统装置、高精度压力计检测系统和井组密封系统3个部分。泵注设备的系统主要包括：高压5柱塞注入泵、调频调速电机、计量水罐、高压管汇、压力高压阀、流量调节计量阀、压力数值记录表等；高精度压力计检测系统主要包括：压力计托筒、随井下放工具、高精度压力计等；井组密封系统主要包括：检测井的液压密封系统、井口密封系统和扰动井的密封系统等。

1.2 技术原理

煤层气干扰试井技术方法是最常用的一种多井

试井的特殊化，在激动井中储层压裂注入一段时间，在其他检测井中记录井底的压力变化，通过分析检测井中的压力变化值，即检测井的干扰信号的变化，并且利用检测井的压力数据来计算区域几口井的储层参数及区域参数。试井测试时，一般以一口井作为激动井，另一口或数口井作为检测井。其测定系统如图1所示。

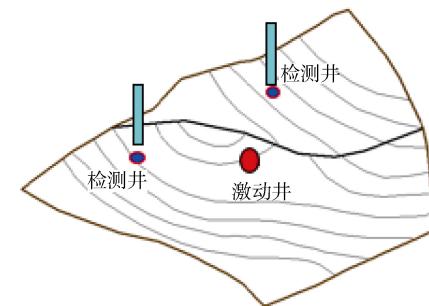


图1 基于煤层气干扰试井的储层参数测定示意图

Fig.1 Schematic diagram of reservoir parameter measurement based on interference well testing of coalbed methane

中国煤层气储层具有低渗低压特征，在进行煤层气干扰试井测试时，为了达到干扰试井传播信号的时间，现阶段一般采用的方式为在激动井中注入高压水压裂，并改变井底的压力工作制度，使激动井的地层压力产生压力波动（常称为“干扰信号”），在检测井中检测到激动井压力波动对其检测井的压力的扰动情况。从检测井接收到激动井“干扰”压力变化，从激动井和检测井接收到压力变化的时间和规律，利用专业分析测点数据可以计算得出各个井筒点的流动参数、测点参数和区域参数。对于一个测定的煤层气井组区域，在激动井中压裂后“注入加压”方式改变井底压力工作制度，当压力传输到检测井时，用高精度压力计记录压力数据，最终通过分析压力数据获得区域煤层气参数结果。

1.3 煤层气干扰试井的技术步骤

确定区域井组和井别 根据区域井组地质和排采资料，综合分析，估计测试层的基本参数，对测试井选取几口排采井进行干扰试井测试，并确定激动井和检测井；

干扰试井激动井测试前准备 对测试设备、仪表、压力计等进行性能检验，合格后方可使用；对测试设备进行检查、保养；封隔器地面装配；依据测试井的测井结果和压裂深度设计决定封隔器坐封位置；记录激动井下井的部件及长度；

干扰试井检测井工艺流程 根据井组的特征，在检测井中下入地面直读压力计，并在激动井开始工作后随时关注检测井压力的变化并记录；

干扰试井激动井工艺流程 测试管柱下井，

记录下入油管的根数及长度，计算管柱总质量；管柱下井过程缓慢平稳，遇阻则查明原因，查清原因并排除后继续下入管柱；测试管柱下井结束，校正管柱的长度，保证深度无误；安装井口三通设备，连接其他测试设备；开始管柱试压，压力控制在 4.5~7.5 MPa，保持压力 30 min 为合格；

投球 坐封封隔器，坐封后地面加压，检查坐封情况；准备测试，压力计编程，通过检验程序后，用钢丝绞车将压力计下入井中预计深度；激动井注入排量的调节依据设计的要求，调节的基本原则为排量尽可能保持稳定、调节排量时间不应超过全部注入时间的三分之一；随时观察激动井注入压力的变化，选择合适排量的进行注入测试；同时记录激动井排量的注入时间、注入压力等基本数据；

压力观测与关井 在检测井中观测到压力变化后，变化压差在 0.007 MPa 以上；记录变化压力并在激动井中持续注入一段时间后关井；开始关井压力恢复测试；关井压力恢复结束后，取出所有压力计，分析测试数据；对激动井中封隔器解封，起出测试管柱；完成煤层气干扰试井测试试验。

1.4 干扰试井测试数据分析方法

煤层气干扰试井方法的数据分析假设：忽略激动井井筒储存效应和表皮效应，检测井没有表皮效应。对于区域井组有以下几个方面的前提假设条件：煤储层无限大没有外边界；煤储层的上下顶底板具有不渗透边界层；激动井在注入测试前储层保持原始状态且呈均质性。

根据煤层气试井的储层渗流力学性质，其压力变化服从扩散方程：

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{1}{3.6\eta} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (1)$$

式中 压力 $p=p(r,t)$ ，为 r 和 t 的函数，为 t 时间距离井筒中心点 r 处压力，MPa； r 为离井筒中心点距离，m； t 为从关井点开始时间，h； η 为导压系数。

$$\eta = \frac{K}{\varphi \mu C_t} \quad (2)$$

式中 K 为储层渗透率， μm^2 ； φ 为储层孔隙度，无量纲； μ 为流体黏度， $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ； C_t 为流体的综合压缩系数。

由假设条件可知，式(1)的定解、边界条件为式(3)。

$$\begin{cases} p = p_i, & t = 0 \\ (r \frac{\partial p}{\partial r})_{r=r_w} = \frac{q\mu B}{172.8\pi Kh} \\ p = p_i, & r \rightarrow \infty \end{cases} \quad (3)$$

式中 p_i 为初始时刻储层压力，MPa； h 为储层厚度，m； r_w 为井筒半径，m； q 为井排量， m^3/d ； B 为储层的体积系数，无量纲。

式(1)和式(3)联立求得式(4)。

$$p(r,t) = p_i - \frac{q\mu B}{345.6\pi Kh} \left[-\text{Ei}\left(-\frac{r^2}{14.4\eta t}\right) \right] \quad (4)$$

式中 Ei 为指数积分函数。

式(4)用井底流压和压差进行表示，可以得出测试关井过程中压降表达式：

$$p_{ws}(\Delta t) = p_i + \frac{2.121 \times 10^{-3} q\mu B}{Kh} \lg \frac{\Delta t}{t_p + \Delta t} \quad (5)$$

式中 p_{ws} 为井底流压，MPa； Δt 为关井时间，h； t_p 为注入测试时间，h。

在压降曲线中，当 $t_p \gg \Delta t_{max}$ 时， $p_{ws} - \lg \frac{\Delta t}{t_p + \Delta t}$

曲线成一条直线，直线的斜率 m 为：

$$m = \frac{2.121 \times 10^{-3} q\mu B}{Kh} \quad (6)$$

根据式(6)可以得出渗透率 K 的表达式：

$$K = \frac{2.121 \times 10^{-3} q\mu B}{mh} \quad (7)$$

由式(5)还可以得出：当关井时间 $\Delta t \rightarrow \infty$ 时，

$$\frac{\Delta t + t_p}{\Delta t} \rightarrow 1, \lg \frac{\Delta t}{t_p + \Delta t} \rightarrow 0,$$

因此， $p_{ws} \rightarrow p_i$ 。把直线段延长，使其与 $\frac{\Delta t}{t_p + \Delta t} = 1$ 相交，则相交的数据点就是 p_i ，即储层压力。

利用试井压降公式(5)和试井测试数据，可分析得出煤储层的基本参数。煤层气干扰试井的半对数分析法根据压力数据在半对数分析曲线上画出半对数直线段，根据直线的斜率 m 求出压力导数，或者依据检测井的压力值出现的峰值，由微积分极值原理求出压力导数。

2 煤层气干扰试井技术试验

2.1 试验区域基本情况

沁水盆地是煤层气商业开发利用较为成功区域。该盆地南部含煤地层主要为石炭-二叠系太原组和二叠系山西组，含煤地层总厚为 137.87 m，共含煤 14~16 层；煤层总厚度为 12.79 m，含煤系数 9.28%，含可采煤层 3 层，总厚 9.90 m。3 号煤层位于山西组下部，上距下石盒子组底砂岩(K_8)约 30 m，下距太原组 K_6 灰岩 5.71~15.00 m。煤层中含夹矸 1~2 层，煤层结构属简单类型。煤层直接顶板为黑色泥岩或粉砂质泥岩，底板为粉砂质泥岩或泥岩。沁水盆地南部构造总体为走向 NW、倾向 NE 的单斜构造，地层倾角变化不大，一般 0° ~ 14° ，小型褶皱比较发育，并见断层及陷落柱；地质构造属于简单类型。

2.2 试验情况

在沁水盆地南部某区共布置煤层气干扰试井5口井组成一个井组(图2), 其中位于井组中央的WP-1井作为激动井, 其他4口井为检测井。4口检测井分别为试-1井、试-2井、试-3井和试-4井, 其距离WP-1井的直线距离分布为350 m、220 m、172 m和156 m。

对该井组进行煤层气干扰试井试验, 试验煤层为山西组3号煤层, 煤层埋深626.38~631.75 m, 有效厚度为5.70 m, 测试时段中部深度629.07 m。对

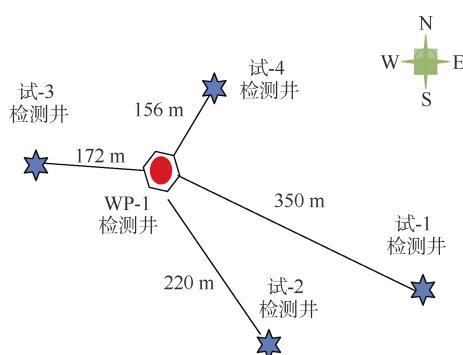


图2 基于煤层气干扰试井井组井位分布示意图

Fig.2 Schematic map of well group distribution based on interference well testing of coalbed methane

激动井WP-1进行清水大排量注入激动测试(即干扰激动信号源), 试验持续时间2.65 h。压裂注入过程压力稳定, 其压力曲线如图3所示, 累计注入量8.45 m³, 最大注入压力18.93 MPa, 关井压力14.98 MPa。施工过程破裂压力明显, 其高压泵的注入排量稳定。

检测井试-1、试-2、试-3和试-4的压力变化曲线如图4所示, 由图中可知, 试-1和试-2压力变化较大, 激动井压力变化对其影响较为明显, 记录压力最大值和最小值之差分别为2.78 MPa和0.0187 MPa; 试-3和试-4压力变化较小, 压差分别为0.0020 MPa和0.0016 MPa。

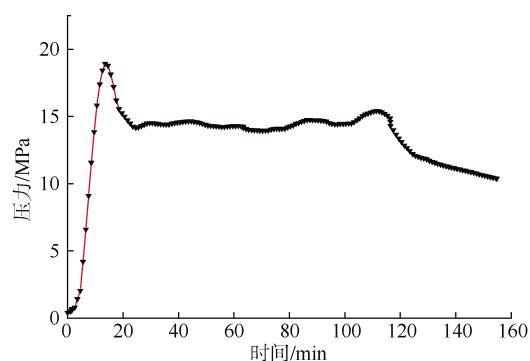
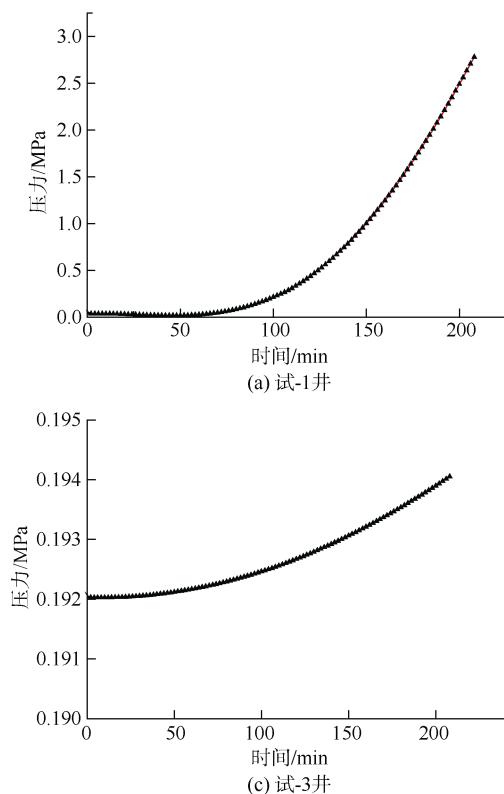
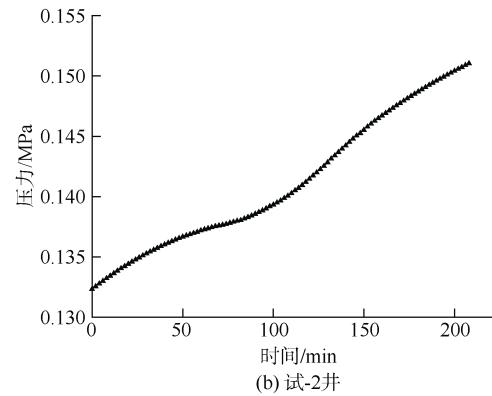


图3 激动井WP-1井原始试验压力曲线图

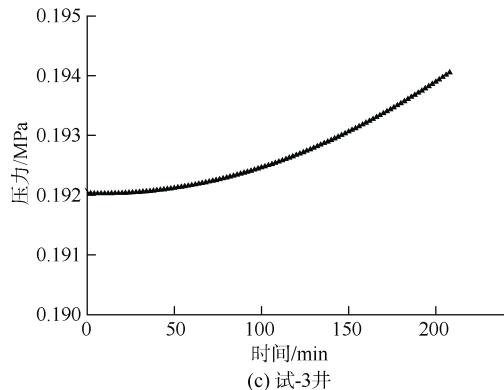
Fig.3 The original pressure curve of stimulation well WP-1



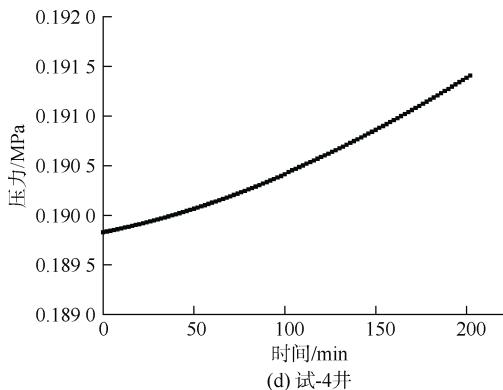
(a) 试-1井



(b) 试-2井



(c) 试-3井



(d) 试-4井

图4 4口检测井原始试验压力图

Fig.4 The original pressure curve of 4 observation wells

3 测试数据分析及结果验证

分析激动井 WP-1 井和 4 口检测井的压力数据时，需借助储层物性参数：孔隙度、流体黏度、体积系数等，这些物性参数主要是由前期勘探采样在实验室所测，如表 1 所示。

表 1 测试井组试井分析所用参数选值

Table 1 Selected parameter values for well testing analysis

参数	数值
孔隙度 φ	0.04
流体黏度 $\mu/(mPa\cdot s)$	0.96
流体地层体积系数 B	1.00
流体压缩系数 C_w/MPa^{-1}	0.0004
综合压缩系数 C_t/MPa^{-1}	0.0224
流体密度 $\rho/(10^3 kg\cdot m^{-3})$	1.00
井筒半径 r_w/m	0.064

根据激动井 WP-1 压裂时压力数据和该井前期的注入压降数据，利用煤层气试井 PanSystem 3.4.0 分析软件分析，通过流体注入诊断法(即煤层气干扰试井的激动井方法)^[3]和注入压降法^[3-4]可获得渗透率、储层压力等参数值，同时结合激动井排采数据拟合的渗透率进行对比分析，其结果见表 2。

表 2 激动 WP-1 井的 3 种方法测试结果对比表

Table 2 Comparison of the test results of 3 methods for stimulation well WP-1

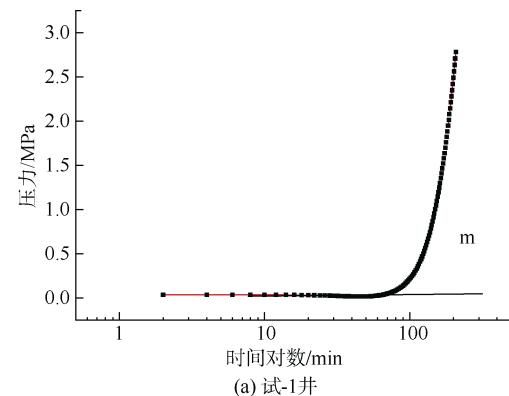
方法	参数			
	储层压 力/MPa	储层压力梯 度/ $MPa\cdot m^{-1}$	渗透率 $K/10^{-3} \mu m^2$	表皮 系数 S
注入压降测试	1.98	3.15×10^{-3}	0.038	-6.35
干扰试井	2.03	3.23×10^{-3}	0.055	-1.51
数据历史拟合	—	—	0.061	—

由表 2 可知，激动井 WP-1 中，利用注入压降法和干扰试井法，测得的储层压力分别为 1.98 MPa 和 2.03 MPa，两者相差不大，由于干扰试井是压裂后的储层压力分析值，因此储层压力较注入压降测值稍偏大；激动井 2 种方法获得的渗透率分别为 $0.038 \times 10^{-3} \mu m^2$ 和 $0.055 \times 10^{-3} \mu m^2$ ，干扰试井测值比注入压降法测值稍大，且与后期排采数据历史拟合值较吻合。由此可知，利用干扰试井法测得的参数，能够反映储层特征。与传统注入压降法相比，干扰试井测试结果反映的是区域上参数值，且可反映参数的大小和方向，弥补了注入压降法“离散散点”以点盖面问题。

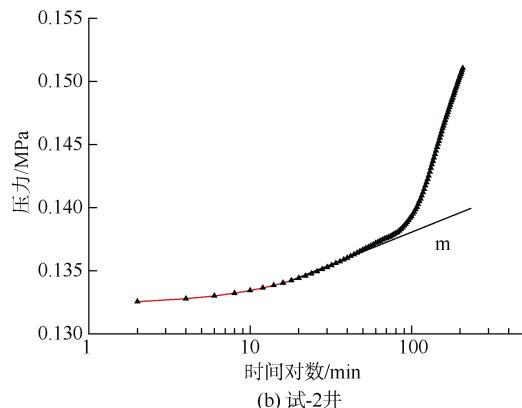
为了提高干扰测试的准确性，一般检测井的压力差应大于 0.007 MPa^[3]。根据 4 口检测井的干扰压力数据可知，试-3 和试-4 压差分别为 0.002 0 MPa 和 0.001 6 MPa，无法对其进行数据分析。试-1 和试-2 压差较大，分别为 2.78 MPa 和 0.018 7 MPa，

激动井压力变化对其影响较为显著。

利用试井半对数分析方法对试-1 和试-2 井的观测压力数据进行分析(图 5)，由图 5 可知，试-1 井和试-2 井直线斜率 m 分别为 0.33 和 1.44，根据式(6)计算可得渗透率： $K_{\text{试-1}} = 2.88 \times 10^{-3} \mu m^2$ ， $K_{\text{试-2}} = 0.85 \times 10^{-3} \mu m^2$ ；同时结合试-1、试-2、试-3 和试-4 检测井的前期注入压降和排采拟合渗透率进行对比分析，其结果见表 3 所示。由表 3 可知，试-1 和试-2 井的渗透率，干扰试井和历史拟合测值比注入压降渗透率大，整体的渗透率也反映了两口井的基本情况。对比试-3 和试-4 检测井的注入压降和历史拟合渗透率，其测值相差不大，历史拟合的渗透率相对比注入压降稍大，也符合注入压降和历史拟合渗透率的基本规律。



(a) 试-1井



(b) 试-2井

图 5 试-1 和试-2 检测井压力半对数分析图

Fig.5 Semilogarithm analysis of test wells 1 and 2

表 3 不同方法获得的 4 口检测井渗透率结果对比
Table 3 Comparison of permeability obtained from different methods in 4 observation wells 单位： $10^{-3} \mu m^2$

井号	注入压降	干扰试井	数据历史拟合
试-1	1.89	2.88	2.23
试-2	0.51	0.85	0.91
试-3	0.05	—	0.11
试-4	0.08	—	0.13

注：试-3、试-4 检测井的干扰试井的压差太低，无法分析。

由激动井和 4 口检测井的干扰试井测定结果可

推断，激动井和检测井的连通性为：SE向的试-1和试-2检测井与WP-1激动井是连通的，且裂隙发育方向为SE向；试-3和试-4检测井与WP-1激动井连通性较差，不是渗流的主要方向；同时依据式(2)，根据干扰试井各测点的渗透率值可得出导压系数，从而判断区域参数的方向性。

通过以上5口井的煤层气干扰试井试验，其井组的基本连通性和裂隙的主要方向为SE向，其渗透率较大。将干扰试井测试方法测值与注入压降参数测值和历史拟合参数进行对比验证，得出干扰试井测定方法是可行的。该方法可以很好地测得区域煤储层的参数特征和分布情况。通过分析干扰试井压力点测试数据，可以反映该点渗透率的大小和方向，与传统注入压降法相比，干扰试井测试法既可以反映单井组测点的离散数据值，也可以对区域井组的连通性进行判断，从而判定区域裂隙发育方向，为后期的井网和排采井的布置提供较直接的数据依据。

4 结论

a. 基于WP-1激动井和4口检测井测试结果，对比分析干扰试井法与注入压降法和历史拟合法，结果表明，依据3种方法测得的储层渗透率相差不大，干扰试井测值接近历史拟合值，并大于注入压降法测值，因此，煤层气干扰试井法可以测试储层渗透率、导压系数、井间连通性等参数。

b. 煤层气干扰试井法获得的渗透率可以反映试验井组的区域渗透率分布方向，沁水盆地南部渗透率SE向较大，主要裂隙优势发育方向为SE向。

c. 煤层气干扰试井法试验时间较短，方法比较简单，弥补了传统注入压降试井法的以点代面的问题，为煤层气开发区生产井网的布置方案提供直接数据依据。

参考文献

- [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: 1-65.
- [2] 张新民, 赵靖舟, 李建武, 等. 中国煤层气技术可采资源潜力[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 40-45.
- [3] 刘能强. 实用现代试井解释方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003.
- [4] 陈志胜, 廉有轩. 煤层气井注入压降试井测试中有关技术问题探讨[J]. 煤田地质与勘探, 2003: 31(4): 23-25.
- [5] 陈志胜. 煤层气井微破裂试验测试技术及应用[J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32(1): 53-56.
- [6] CHEN Zhisheng. Test technique for short-break down test in CBM well and its application[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2003, 32(1): 53-56.
- [7] 刘立军, 王立中, 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): 79-81.
- [8] LIU Lijun, WANG Lizhong, ZHANG Zenghui, et al. Study on pressure-drop well test with injection of coalbed gas well[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(5): 79-81.
- [9] 吴晓东, 师俊峰, 席长丰. 煤层渗透率敏感性及其对煤层气开发效果的影响[J]. 天然气工业, 2008, 28(7): 27-29.
- [10] WU Xiaodong, SHI Junfeng, XI Changfeng. The permeability sensitivity of coal seam and its influence on the development of coalbed methane[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(7): 27-29.
- [11] 李鑫, 景兴鹏. 基于注入压降法的煤层气井裸眼和套管射孔后测试试验研究[J]. 煤炭工程, 2014, 46(11): 89-91.
- [12] LI Xin, JING Xingpeng. Experiment study on test of coalbed methane open well and post perforated casing based on injection pressure drop method[J]. Coal Engineering, 2014, 46(11): 89-91.
- [13] 景兴鹏. 不同完井方式下注入/压降煤储层参数法测试结果对比[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(2): 33-37.
- [14] JING Xingpeng. Comparison on injection and pressure drop measuring and test results of different well completion type coal reservoir parameters[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(2): 33-37.
- [15] 景兴鹏. 沁水盆地南部储层压力分布规律和控制因素研究[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(2): 116-120.
- [16] JING Xingpeng. Study on pressure distribution law and control factors of coalbed methane reservoir in south part of Qinshui basin[J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(2): 116-120.
- [17] 孙茂远, 黄盛初. 煤层气开发利用手册[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1998.
- [18] 杨怀成, 钱卫明, 房国平, 等. 煤层气井注入压降测试工艺技术与进展[J]. 油气藏评价与开发, 2012, 2(2): 70-75.
- [19] YANG Huaicheng, QIAN Weiming, FANG Guoping, et al. Technology of CBM wells injection/falloff test and its progress[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2012, 2(2): 70-75.
- [20] 景兴鹏, 宋永辉. 基于流体注入诊断法的煤层气试井技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(12): 1-6.
- [21] JING Xingpeng, SONG Yonghui. Technical research on test well of coalbed methane based on diagnostic fracture injection test method[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(12): 1-6.
- [22] BUNGER A P, LAKIROUHANI A, DETOURNAY E. Modelling the effect of injection system compressibility and viscous fluid flow on hydraulic fracture breakdown pressure[C]//XIE F. Rock stress and earthquake. Leiden: CRC Press/Balkema, 2010: 59-68.

(责任编辑 范章群)

CHEN Zhisheng, LIAN Youxuan. Discussion on technical problems for injection/fall-off well test in the coalbed methane well[J]. Coal Geology & Exploration, 2003: 31(4): 23-25.