

文章编号: 1001-1986(2010)03-0020-04

煤层气井裸眼与套管注入/压降测试渗透率对比分析

张奉东^{1,2}

- (1. 西北大学地质学系, 陕西 西安 710069;
2. 中国石油化工股份有限公司华东分公司, 江苏 南京 210011)

摘要: 我国煤层气井渗透率测试方法目前广泛采用注入/压降试井。通过对试验井的裸眼测试和套管测试发现, 套管测试渗透率是裸眼测试的 9.82 倍, 裸眼测试渗透率明显偏低。裸眼测试渗透率低的主要原因是注入和关井时间较短, 未出现径向流。由于我国煤层气区块大多处于勘探阶段, 且多采用裸眼注入/压降方法, 开展区块裸眼和套管注入/压降的对比测试, 可以获取区块标准井的注入时间和关井时间, 提高渗透率解释结果的准确性。

关键词: 煤层气井; 渗透率; 注入/压降试井; 裸眼测试; 套管测试; 径向流

中图分类号: P618.11 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2010.03.005

Injection/fall off test for comparative analysis of permeability of coalbed methane open and casing wells

ZHANG Fengdong^{1,2}

- (1. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China;
2. East China branch, China Petroleum and Chemical Corporation, Nanjing 210011, China)

Abstract: At present, the injection/fall off test is widely used for the permeability of coalbed methane wells in China. Through open hole test and casing test of test wells, it is found that the permeability from casing test is 9.82 times of that from open hole test, which shows that the permeability from open hole test is obviously low. The main cause for it is that the injection and shut in time is short, and the radial flow doesn't appear. Because most coalbed methane blocks of China are in exploration phase, and the open hole injection/fall off test is usually adopted, comparison between open hole and casing injection/fall off tests can obtain the injection time and shut in time of the typical well of a block, and improve the accuracy of permeability interpretation.

Key words: coalbed methane well; permeability; injection/fall off test; open hole test; casing test; radial flow

煤层气是赋存于煤层之中“自生自储”的主要以吸附形式存在的非常规天然气。渗透性是评价煤层气勘探选区的重要条件。根据全国范围内 23 个目标区 76 层次的试井结果^[1], 对煤层的原始渗透率数据进行统计分析(表 1)。结果表明, 我国煤储层渗透率普遍较低, 原始渗透率小于 1 mD 的煤层在 70% 以上, 此结论将直接影响对我国煤层气井的勘探开发和生产潜能的正确评价。

表 1 原始煤层渗透率统计结果
Table1 Permeability of primary coalbed

渗透率/mD	煤层数	所占比例/%
>1.0	21	28
1.0~0.1	28	37
<0.1	27	35

我国从 20 世纪 80 年代开始, 对煤储层渗透率

做了大量的研究和试验工作^[2-12], 尤其是煤炭科学研究总院西安研究院承担的国家“九五”攻关项目, 全面研究了各种试井方法、试井设备的适应性, 确定了以注入/压降试井为主的渗透率测试方法。注入/压降试井方法现已广泛应用于煤层渗透率的测试。表 1 中渗透率的数据, 均来自于注入/压降测试。

近年来, 国内多数学者研究认为, 我国煤储层应用注入/压降试井方法所测试的渗透率偏低。董敏涛等提出: 煤储层真实渗透率是试井测试的 2~10 倍^[13]。笔者以为, 评价注入/压降试井方法所获得的渗透率, 需要剖析注入/压降试井技术的原理及其解释方法。

1 注入/压降测试技术

注入/压降试井是将测试工具下入井内预定位置, 采用注入泵以恒定的排量向煤储层中注水一段

收稿日期: 2010-03-26

作者简介: 张奉东(1961—), 男, 江苏徐州人, 教授级高级工程师, 博士研究生, 从事油气田勘探开发技术及管理工作。

时间,在井筒周围产生一个高于原始储层压力的压力分布区,然后关井,使得注水压力与原始储层压力逐渐趋于平衡。分别记录注入期和关井期的井底压力数据,据此进行储层参数计算。利用注入期和关井期的井底压力数据,通过试井解释软件,求取储层参数。由于注入期时间较短、注入阶段压力波动较大以及煤层的应力敏感性等因素干扰,分析结果往往失真,故多采用关井期的压力衰减数据进行参数计算。

1.1 试井参数的选择

注入/压降测试参数的选择是正确指导测试的依据,其中测试时间和关井时间的设计对测试结果的影响尤为关键。

测试时间包括注入时间和关井时间,注入时间选择与煤层渗透率密切相关。注入时间可以通过以下计算公式求得:

$$t_{inj} = (69.4 \phi \mu C_t r_i^2) / k \quad (1)$$

式中 t_{inj} 为注入时间, h; ϕ 为煤层孔隙度, 小数; μ 为注入流体粘度, mPa·s; C_t 为综合压缩系数, MPa⁻¹; r_i 为设计调查半径(应大于 5 m), m; k 为煤层渗透率(可用邻井值), 10⁻³ μm²。

由于煤层气勘探井储层参数资料有限,这给计算注入时间带来很大困难。为了快速评价煤储层特征,煤层气井测试方式绝大多数采取裸眼测试。一般说来,为了获得最具代表性的参数,求得准确的渗透率,要求注水时间较长,而从井筒安全角度考虑,注水时间往往不可能太长。因此,一般要求注水时间不少于 8~12 h,关井时间为注入时间的 2~4 倍^[14]。

1.2 试井数据的解释

与常规油气井测试一样,注入/压降试井的解释以达西径向流定律为基础,借助渗流力学理论建立了煤层气井试井解释模型,根据径向流特征,计算煤层渗透率、地层压力等参数。

根据储层试井解释公式,关井期间井底压力的变化规律为:

$$P_{ws} = P_i + \frac{2.121 \times 10^{-3} q \mu B}{kh} \lg t + \left(\lg \frac{k}{\phi \mu C_t r_w^2} + 0.9077 + 0.8686 S \right) \quad (2)$$

式中 P_i 为原始煤层压力, MPa; q 为地面注入排量, m³/d; μ 为流体粘度, mPa·s; B 为体积系数, 小数; k 为煤层渗透率, μm²; h 为煤层厚度, m; t 为关井时间, h。

由式(2)可以看出,当关井时间 t 足够长时,注水压力与原始储层压力趋于平衡,此时压力 P_{ws} 、压力导数 $\lg \Delta P_{ws}$ 均与 $\lg t$ 存在直线关系,也就是压力

曲线及压力导数曲线在关井后期,煤储层出现径向流特征。根据径向流特征值,可以计算煤层渗透率、压力和表皮系数。

因此,当注入/压降试井出现径向流特征时,所得到的渗透率值可以代表煤层渗透率的真实情况。但未出现径向流时,所获得渗透率的可靠性将无法得到保证。笔者通过近百口煤层气井注入/压降试井渗透率的统计,60%以上煤层气井的解释曲线并未出现径向流特征,其渗透率值并不能代表煤层真实渗透率,表1中的大部分数据是值得推敲的。

2 现场试验

煤层气井注入/压降试井通常以裸眼测试为主,考虑井壁的稳定性,裸眼测试要求注入和关井的累计时间小于 60 h(特殊井壁还要缩短)。煤层气井完井后还可以进行套管测试,套管测试则没有时间的限制。

大部分煤层气井的注入/压降解释曲线并未出现径向流特征,其主要原因是由于裸眼测试时间较短,而套管测试可以大幅度延长注入和关井时间,有利于压力响应的径向流出现,提高测试结果的准确性。因此,有必要开展裸眼和套管的对比测试试验。

2.1 裸眼测试

试验井是位于沁水盆地北部榆社—武乡构造带的一口探井。试验层位为石炭系太原组 15 号煤层,深度 500~505 m。2009 年 3 月完成该层位取心和测井后,为快速评价煤储层参数,3 月 2 日至 3 月 4 日进行裸眼测试(图 1),注入和关井时间分别为 15 h 和 36 h。

根据测试卡片(图 2),利用 PanSystem V3.2.0 试井解释软件,得出关井压降期双对数拟合分析图(图 3),实测压力及压力导数曲线早期表现为单位斜率直线段,为早期井储段;后期无径向流特征,所解释的结果并不能真实反映煤储层的实际情况。

本次注入/压降裸眼测试试验,注入时间 15 h,注水量仅 0.248 m³,虽然关井压降时间达到了 36 h,但由于储层渗透率低,关井时间仍然不够,这对解释结果造成较大的影响(如调查半径仅 2.89 m)。

2.2 套管测试

本井完井后,2009 年 4 月 22 日至 4 月 29 日进行套管测试试验(图 4),大幅度延长了注入时间和关井时间,分别为 30 h 和 128.5 h。

此次测试卡片(图 5),利用 PanSystem V3.2.0 解释软件,得出关井压降期双对数拟合分析图(图 6),可见,实测压力及压力导数曲线早期表现为单位斜率直线段,为早期井储段;后期达到了径向流阶段,所解释的结果基本能反映煤储层的实际情况。

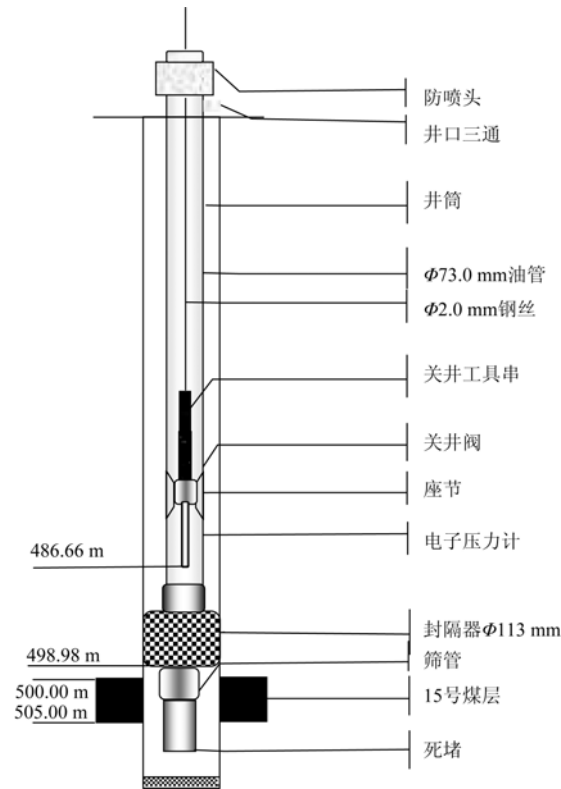


图 1 试验井裸眼测试管柱结构图*
Fig. 1 Open hole test string of test well

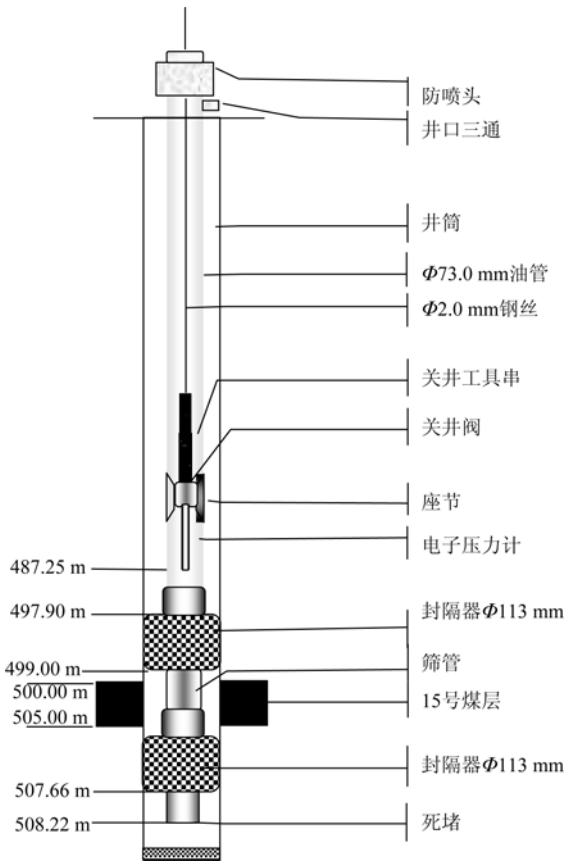


图 4 试验井套管测试管柱结构图*
Fig. 4 Casing test string of test well

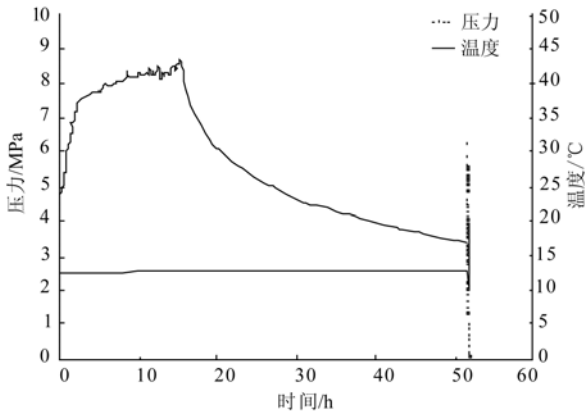


图 2 煤层注入/压降裸眼试井压力温度曲线图
Fig. 2 Coalbed injection/fall off open hole well test pressure and temperature curves

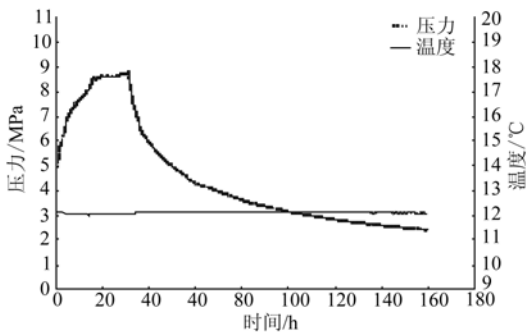


图 5 注入/压降套管试井实测曲线图
Fig. 5 Injection/fall off casing test data plot

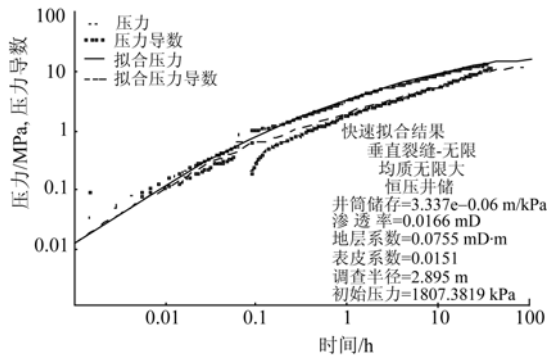


图 3 裸眼试井压降期双对数曲线分析图
Fig. 3 Log-log analysis plot of fall off period of open hole well test

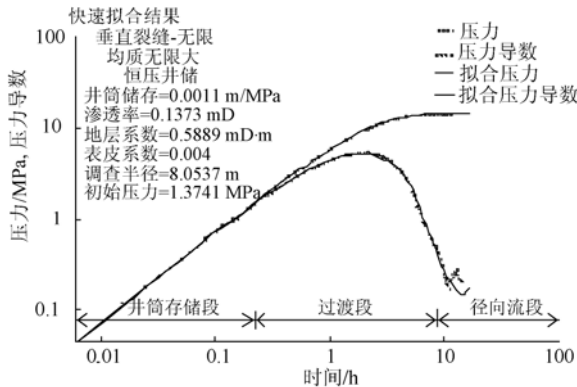


图 6 套管试井双对数曲线图
Fig. 6 Log-log plot of casing test

* 杨新辉. 沁水盆地和顺区块煤层气和 2 井(射孔后)试井成果报告, 2009.

2.3 裸眼测试与套管测试结果对比

根据试验井的裸眼和套管试井压降期的双对数拟合,可以分析和计算出15号煤层的渗透率、煤层压力和表皮系数等参数,结果见表2。

2.3.1 渗透率

套管测试的渗透率为0.167 mD,与裸眼测试0.017 mD相比,套管测试的渗透率较裸眼测试的渗透率提高9.82倍。由于注入时间增加1倍,注入水量是裸眼测试的2.47倍,调查半径增加5.16 m,关井时间是裸眼测试的3.57倍,套管测试关井压降期间,压力 $P_{ws}-\lg t$ 、压力导数 $d(\lg \Delta P_{ws})-d(\lg t)$ 曲线中

出现径向流特征,因此,套管测试解释的渗透率值更能反映煤储层的实际情况。

2.3.2 储层压力和温度

两次测试压力计均采用加拿大DDI存储式电子压力计,精确度不低于0.025%,压力分辨率不低于0.000 5 MPa。关井后期,每20 s采集1个数数据点,完全能满足资料分析需要。套管测试压力(1.37 MPa)较裸眼测试压力(1.81 MPa)低0.44 MPa,套管测试关井时间较裸眼测试延长92.5 h,显然,套管测试压力值更为准确。

表2 裸眼测试与套管测试解释结果对比

Table 2 Contrast between interpretation results of open hole test and casing test

测试类别	试验参数			拟合结果				
	注入时间/h	注水量/m ³	关井时间/h	储层压力/MPa	渗透率/mD	表皮系数	调查半径/m	储层温度/
裸眼测试	15.00	0.248	36	1.81	0.017	0.015	2.89	12.68
套管测试	30.00	0.613	128.5	1.37	0.167	0.004	8.05	12.31

两次测试温度分别为12.68℃和12.31℃,由于煤储层深度仅500 m,煤层温度受注入水影响较大,套管测试注水量大,温度影响更为明显,但套管测试关井时间长(128.5 h),所测得的温度12.31℃相对准确。

2.3.3 表皮系数

裸眼测试与套管测试解释表皮系数分别为0.015和0.004,套管测试结果比裸眼测试的小。由于套管测试调查半径大于裸眼测试,裸眼测试表皮系数仅反映近井地带的完善程度,而套管测试的影响范围已远离井筒附近,所测得表皮系数更能反映煤层深部的完善程度。

3 结论和建议

a. 为快速评价煤储层物性,应尽可能进行裸眼注入/压降试井,但对于难以出现径向流的煤储层,需要开展裸眼和套管对比测试,通过延长注入和关井时间,来获得更为准确的煤储层渗透率。

b. 在延长注入和关井时间的同时,还需要完善配套技术和注入参数,如封隔器距煤层的距离、最大注入压力、注入排量、调节排量的时间等,确保取得可靠的原始资料。

c. 由于现有注入/压降试井的结果需要在测试结束后才能获得,建议开展地面压力直读测试。

参考文献

[1] 叶建平,史保生,张春才.中国煤储层渗透性及其主要影响

因素[J].煤炭学报,1999,24(2):118-122.

[2] 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.

[3] 傅雪海,姜波,秦勇,等.用测井曲线划分煤体结构和预测煤储层渗透率[J].测井技术,2003,27(2):140-143.

[4] 傅雪海,秦勇,李贵中.煤储层渗透率研究的新进展[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2001,20(6):739-743.

[5] 何伟钢,唐书恒,谢晓东.地应力对煤层渗透性的影响[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2000,19(4):353-355.

[6] 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.

[7] 傅雪海,秦勇,李贵中,等.山西沁水盆地中、南部煤储层渗透率影响因素[J].地质力学学报,2001,7(1):45-52.

[8] 王锦山.煤层气储层两相流渗透率试验研究[J].西安科技大学学报,2006,26(1):24-26.

[9] 薄冬梅,赵永军,姜林.煤储层渗透性研究方法及其主要影响因素[J].油气地质与采收率,2008,15(1):18-21.

[10] 孙立东,赵永军,蔡东梅.应力场、地温场、压力场对煤层气储层渗透率影响研究[J].山东科技大学学报(自然科学版),2007,26(3):12-14.

[11] 张世富.煤层气注入/压降测试技术应用[J].探矿工程,2001(3):42-45.

[12] 李相臣,康毅力,罗平亚.煤层气储层变形机理及对渗流能力的影响研究[J].中国矿业,2009,18(3):99-102.

[13] 董敏涛,张新民,郑玉柱,等.煤层渗透率统计预测方法[J].煤田地质与勘探,2005,6(33):28-31.

[14] 中国国家标准化管理委员会.煤层气井注入/压降试井方法[M].北京:中国标准出版社,2009.