

# 贵州金沙县安洛煤矿仁和勘查区试井曲线分析

岑明峰, 黄培, 任平

(贵州省煤田地质局一一三队, 贵州 贵阳 550081)

**[摘要]**本文以安洛煤矿仁和勘查区为研究区,以地质勘探资料、现场样品分析及实验室测试成果为基础,通过注入/压降现场测试,使用 saphir 软件做了相关试井解释分析,选用具有井筒储集效应+表皮效应+径向复合井的模型,数值模拟了 26-4 孔特征鲜明的 4<sup>#</sup>、8<sup>#</sup>和 13<sup>#</sup>煤层,浅析该区煤储层基本地层特征。分析发现:注入初期压力波动大,压降阶段出现“回吐”现象,分析认为这可能与地层(煤层)具有较强的塑性且地层渗透性较差有关。从双对数曲线的开口较大,半对数曲线呈“厂”字形的形态看,本井煤层存在一定程度的污染。半对数曲线斜率发生变化,导数曲线上翘,并非反应某种边界,而是由于超过注水时间造成的。在试井过程中,储层渗透率受煤层有效厚度、流体水粘度控制极为显著;孔隙度和综合压缩系数对除储层渗透率以外其它储层参数的控制作用较为明显;流体地层体积系数在实际工作中可以忽略。

**[关键词]**煤层气;地层特征;注入/压降;试井曲线

**[中图分类号]**P618.123;P631.8<sup>+</sup>18 **[文献标识码]**A **[文章编号]**1000-5943(2016)01-0036-08

我国煤层气资源丰富,华北沁水盆地南部煤层气商业性地面开发的突破,以及我国油气资源供求关系、煤矿安全生产、大气环境保护等面临的巨大压力,使得我国煤层气勘探开发得到了前所未有的重视<sup>[1,2]</sup>。而滇东、黔西地区总资源量达  $2.2 \times 10^{12} \text{ m}^3 \sim 2.75 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ,具有非常巨大的开发前景<sup>[3]</sup>。

要合理科学的开发煤层气田<sup>[4]</sup>,首先需要了解煤的储层特性,获取如渗透率、储层压力、地应力等参数,它们是煤层气开发工程设计与施工的重要地质依据,对煤层气藏产能预测、采收率预测、压裂效果评价和井网部署等具有重要的控制作用,同时也是当前煤与煤层气勘查必须提交的关键资料。

为了研究注入/压降试井方法在黔西仁和地区的可行性及准确性,本文依托国家科技重大专项项目“煤层气储层工程与动态评价技术(2011ZX05034)”和“国家自然科学基金面上项目“多煤层区不同含气系统产气潜力及单井高效开采模式研究(41272178)”,选取黔西仁和参数井煤层为研究对象,通过现场测试,依据特征鲜明的试井曲线,浅析该地区煤储层特征。

## 1 勘探区概况

### 1.1 地理位置及地质构造

研究区隶属金沙县安洛煤矿勘查区,位于毕节地区的金沙县、大方县、黔西县及百里杜鹃风景名胜区交界处,分别隶属金沙县、大方县、黔西县及百里杜鹃管委会管辖,面积 38.52 km<sup>2</sup>。

研究区位于扬子板块(I级),川、滇、黔盆地(II级),黔北断拱(III级)上。区块位于纸厂背斜东翼,黔西向斜西翼,总体呈一宽缓的单斜构造。区域上地形地貌受地质构造的控制,地势西低东高。区域内褶曲和断层有一定程度的发育,主要构造线方向为 NE 向。褶曲主要发育有纸厂背斜、黔西向斜,其轴的走向长度大于 20 km;断层以正断层为主,其中多条走向长度大于 10 km,断层倾角多数小于 65°。具体见图 1。

### 1.2 地层

区内各组段地层岩性特征由老至新有二叠系中统茅口组,二叠系上统长兴组、龙潭组,三叠系

**[收稿日期]**2015-12-01

**[作者简介]**岑明峰(1984—),男,工程硕士学位,工程师,长期从事煤层气试井工作。

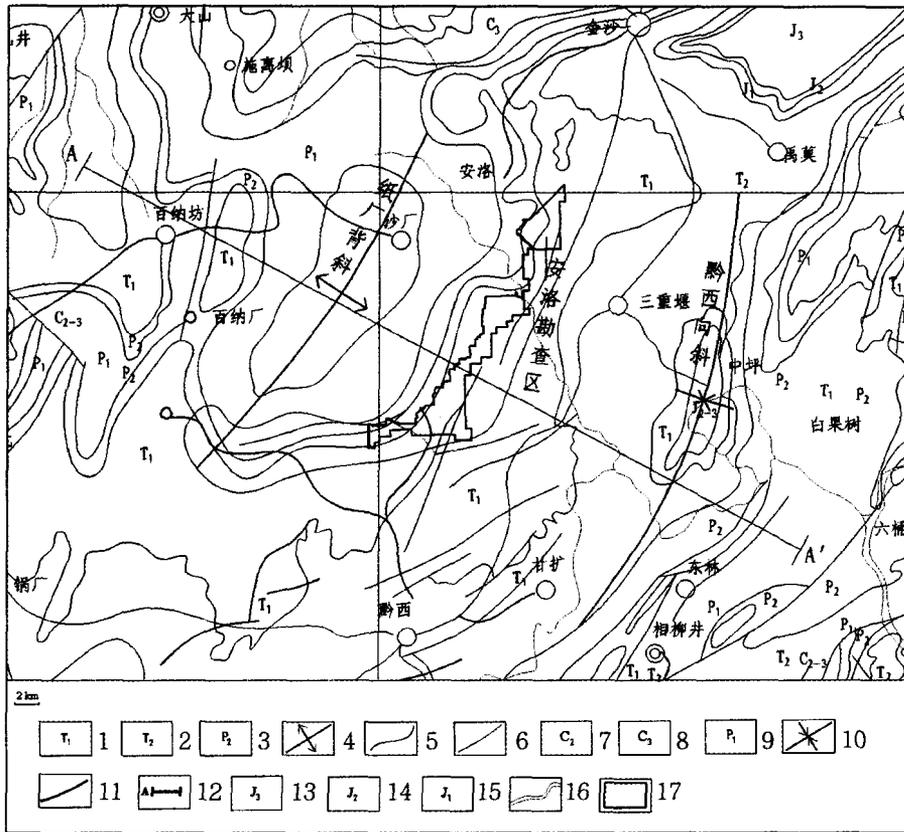


图 1 研究区构造纲要图

Fig. 1 Structural outline of the studying area

1—三叠系下统;2—三叠系中统;3—二叠系中统;4—背斜;5—地质界线;6—性质不明断层;7—石炭系中统;8—石炭系上统;9—二叠系下统;10—向斜;11—公路;12—勘探线及编号;13—侏罗系上统;14—侏罗系中统;15—侏罗系下统;16—河流;17—矿区范围

下统茅草铺组、夜郎组,第四系。区内大部分可采及局部可采煤层为 4、5、8、9、13、15 号煤层,共 6 层,平均可采厚度 7.10 m,可采含煤系数 6.02%。

### 1.3 煤的物理性质和煤岩特征

研究区各可采煤层煤岩组分多以镜煤、亮煤为主,夹少量暗煤和丝炭,煤岩类型主要为半亮型煤,少量半暗-半亮型煤和光亮-半亮型煤。内生裂隙和外生裂隙较发育,充填方解石、黄铁矿及钙质薄膜;方解石以薄膜状、脉状,黄铁矿以微粒状、球粒状、细粒状为主,少有结核状、星点状、蜂窝状。煤的破坏类型多属Ⅲ类以上。

## 2 煤层气注入/压降试井施工实例与数据分析

选取研究区内 26-4 参数井煤层气参数井注入/压降试井测试特征的曲线进行分析,根据相关参数建立模型,采用 Saphir 软件对试井测试数据进行解释分析,对一些特征鲜明的试井曲线进行相关试井分析解释,回归储层真实状态,探索煤储层特性。

### 2.1 测试层段数据

表 1 测试煤层基本数据

Table 1 Basic data of tested coal seam

煤层	埋深/m	煤层结构/m	倾角/°	有效厚度/m	备注
4 <sup>#</sup>	434.55 ~ 435.65	1.10	10	1.08	注入/压降试井、原地应力测试
8 <sup>#</sup>	459.50 ~ 460.40	0.90	8	0.89	
13 <sup>#</sup>	485.76 ~ 486.90	1.14=0.40(0.10)0.64	7	1.03	

## 2.2 施工过程

2011年11月4日至11月15日利用常规MFE测试工具对26-4井的4<sup>#</sup>、8<sup>#</sup>、13<sup>#</sup>三层测试

煤层进行注入/压降试井测试工作,井下工具选用加拿大进口的DDI电子压力计。测试主要包括三个过程:微破裂实验、注入/压降试井和关井,施工参数见表2。

表2 4<sup>#</sup>煤层成果数据表  
Table 2 Data of 4<sup>#</sup> coal seam

测试煤层	注入持续时间	累计注入水量	平均排量	地面最大注入压力	关井时间
4 <sup>#</sup>	7.25 h	40.0 L	0.10 L/min	6.5 MPa	24.17 h
8 <sup>#</sup>	8.00 h	62.5 L	0.13 L/min	6.0 MPa	27.42 h
13 <sup>#</sup>	7.75 h	74.0 L	0.16 L/min	5.2 MPa	33.92 h

## 2.2 测试分析

测试目的层4<sup>#</sup>、8<sup>#</sup>、13<sup>#</sup>煤层为二叠系上统龙潭组煤层,揭露煤层顶底板后进行注入/压降试井。从测试压力历史曲线反映,本次施工正常,整个施工过程封隔器座封良好,开关井成功,达到预期设计目的,取得了合格的压力、温度资料(图2、13、16、17)。

为微破裂测试闭合压力分析曲线,求取闭合压力 $P_c$ 为8.61 MPa。选取最大注入压力为6.5 MPa。

### 2.2.1 4<sup>#</sup>煤层

从实测压力温度曲线图(图2)看出,注入段压力瞬间升高和降低,波动明显,并非煤层破裂导致的压力瞬变,这是由于柴油机泵注系统不稳定造成的。

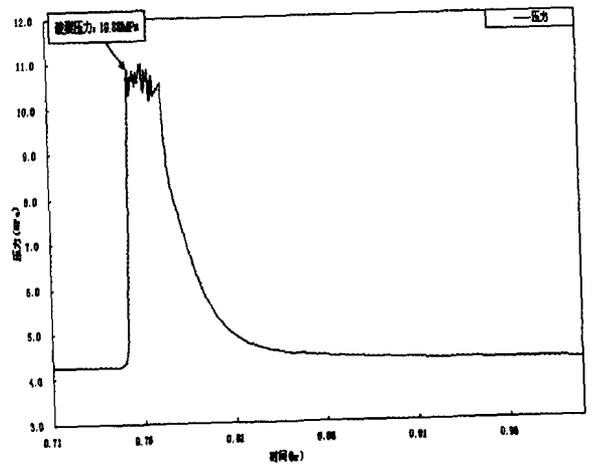


图3 微破裂实测压力曲线

Fig. 3 Curve of micro blasting tested pressure

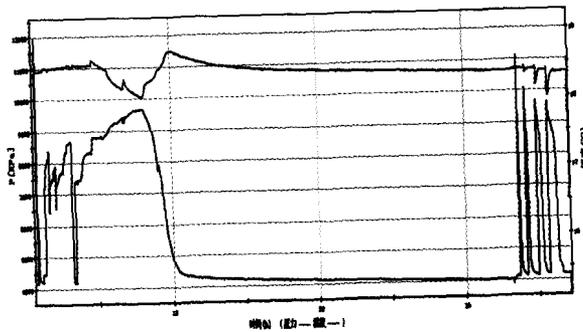


图2 4<sup>#</sup>煤层注入/压降试井压力、温度实测曲线图

Fig. 2 Tested curve of injection/pressure drop and temperature of 4<sup>#</sup> coal seam

### (1) 微破裂测试

注入/压降测试前先对其进行一次微破裂测试,注入流体为清水,水的粘度值选择为0.99 MPa·s,实测压力曲线见图3。前部压力上升段为注入阶段,注入时间2 min,注入体积0.125 m<sup>3</sup>,地面观测破裂压力为6.6 MPa,后部压力下降阶段为关井阶段,关井20 min。从后期资料分析,破裂压力点明显,破裂压力 $P_b$ 为10.88 MPa。图4

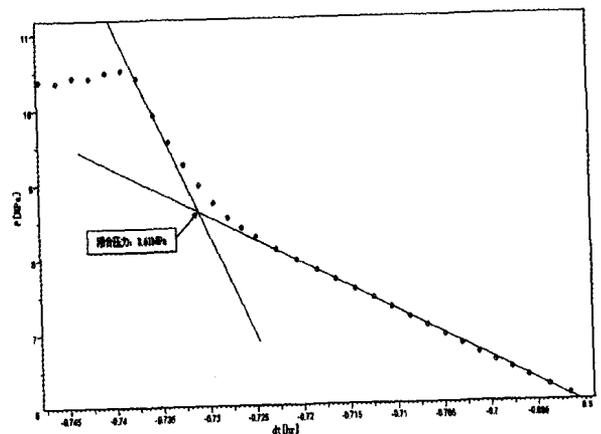


图4 微破闭合压力分析曲线

Fig. 4 Curve of micro blasting closure pressure analyses

### (2) 试井解释

从压力数据结合温度数据看,自关井时刻至其后约1.7 h,压力下降较缓慢,然后出现小的波动(图5),分析认为这可能与地层(煤层)具有较

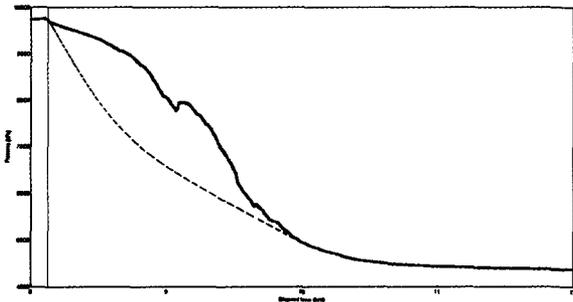


图 5 实测曲线压降早期局部放大曲线图

Fig. 5 Partial enlarged curve of tested pressure drop in the early stage

强的塑性且地层渗透性较差有关,即在较高的注水压力下,煤层孔隙(裂隙)被一定程度地撑开(地层并未达到破裂);当压力消失后,煤层中孔隙(裂隙)收缩,流体“回吐”补充井筒中压力的下降,从而使得井筒压力下降变得缓慢(正常或如图中虚线形态)。从双对数曲线及半对数早期呈现出变井筒储集<sup>[5]</sup>(井筒储存变大)特征分析(图 6、图 7、图 8),也可以说明这一点。尽管如此,因这段时间较短(从“关井”到 1.7 h),对后期曲线特征分析和参数计算影响不大。另外,原地应力测试的几个循环中,关井后的井底压力都有一段回升(比注入/压降测试时的压力波动时间长),这说明地层流体“回吐”存在影响,此时由于地层破裂后再闭合且破裂前的瞬时排量大,使得“回吐”现象更强烈。

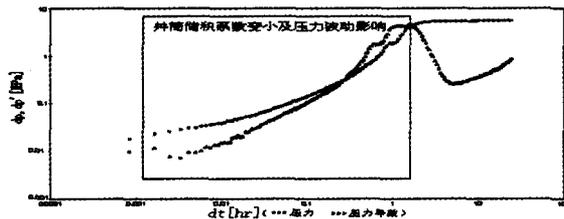


图 6 26-4 井 4#煤层原始数据双对数曲线图

Fig. 6 Double logarithmic curve of initial data of seam 4#, 26-4 well

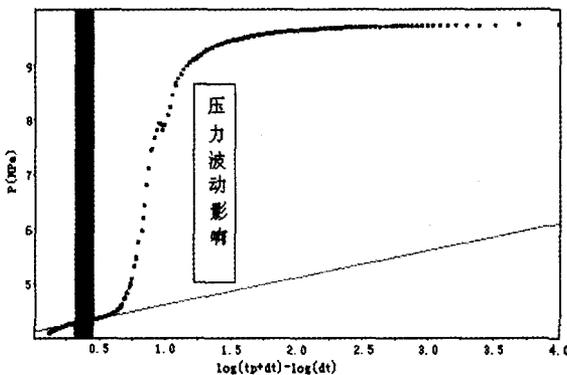


图 7 26-4 井 4#煤层原始数据霍纳曲线图

Fig. 7 Honner curve of initial data of seam 4#, 26-4 well

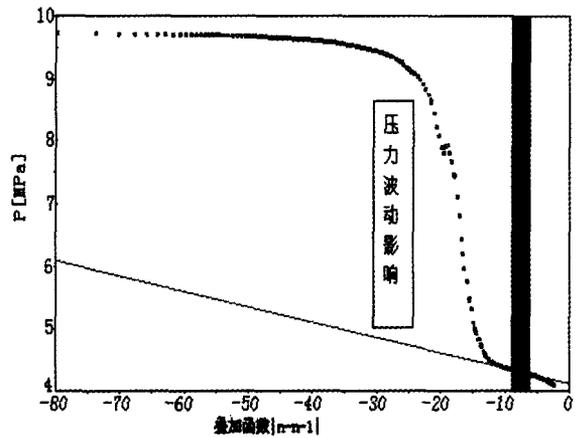


图 8 26-4 井 4#煤层半对数曲线图

Fig. 8 Double logarithmic curve of seam 4#, 26-4 well

本层压降曲线(霍纳曲线和双对数曲线)中期,半对数直线段和双对数曲线水平段特征明显,表明该段已进入无限作用的径向流动阶段,且反应均质地层特征;从双对数曲线的开口较大,叠加函数曲线(或霍纳曲线)呈“厂”字形的形态看,本井本层存在一定的污染。压降曲线后期(关井约 7 h 后),叠加函数曲线(或霍纳曲线)斜率发生变化,导数曲线上翘,并非反映某种边界,而是由于微破裂测试时的煤层破裂的裂缝造成的。

从双对数及半对数图形分析,压降曲线后期(关井约 7 h 后),半对数曲线斜率发生变化,双对数上翘,边界反映,实际情况非边界造成。短期内双对数曲线多次交叉,半对数曲线斜率多次变化,故分析避开污染及井筒干扰及注水时间的影响,避开异常点,得出地层特征曲线(图 9、图 10)

通过对关井压降曲线双对数-导数曲线图形特征(图 6)诊断分析,初期双对数-导数曲线井筒储集阶段持续时间较长,双对数-导数曲线沿斜率

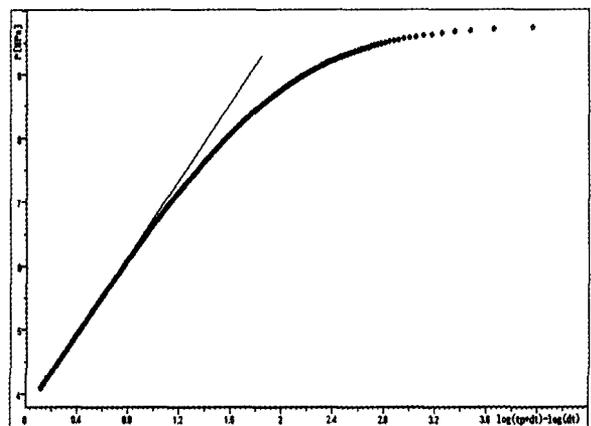


图 9 关井压降双对数拟合曲线图

Fig. 9 Double logarithmic fitting curve of shut-in pressure drop

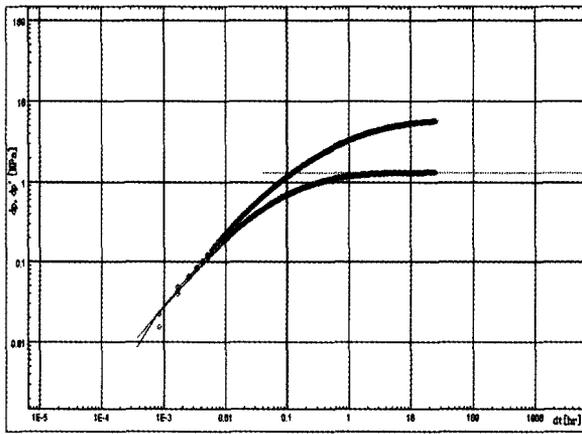


图 10 关井压降霍纳曲线图

Fig. 10 Honner curve of shut-in pressure drop

约 1 上升,约 3.6 个对数周期,表明煤岩层渗透性很差;在导数曲线后期明显径向流段,在探测范围内储层呈径向复合地层特征;从叠加函数曲线(或霍纳曲线)图(图 7)可看出,与双对数-导数

曲线(图 6),说明选用的井筒储集效应+表皮效应+径向复合的模型合理,反映一致呈现径向复合地层特征,整个曲线形态反应煤岩层为低渗透特征。

针对煤岩层特性,试井解释中选用具有井筒储集效应+表皮效应+径向复合井的模型通过现代试井理论拟合(图 9、图 10)分析,取得了分析成果:渗透率为  $0.0907 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、地层系数为  $0.0980 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 \cdot \text{m}$ 、流动系数为  $0.0926 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 \cdot \text{m}/\text{MPa} \cdot \text{s}$ 。本次试井解释结果说明,煤层渗透性很差,属于低渗透性储层,注入量很低(平均注入量 0.10 L/min)也说明了此特征;井筒储集系数  $0.1713 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{MPa}$ ,井筒储集系数很小,说明采用井下关井方式工艺合理,有效降低了井筒储集效应对测试数据分析的影响;表皮系数为 -2.83,表明井筒附近煤岩层完善程度较好。4# 煤层试井解释成果数据见表 3。

表 3 4# 煤层成果数据表

Table 3 Data of seam 4#

计算结果	双对数分析	单位
井筒储集系数	0.1713	$\times 10^{-3} \text{m}^3/\text{MPa}$
流动系数	0.0926	$\times 10^{-3} \mu\text{m}^2 \cdot \text{m}/\text{MPa} \cdot \text{s}$
地层系数	0.0980	$\times 10^{-3} \mu\text{m}^2 \cdot \text{m}$
渗透率	0.0907	$\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$
地层中部压力	3.79	MPa
压力系数	-2.83	
储层温度	18.38	°C
煤层破裂压力	10.88	MPa
煤层闭合压力	8.61	MPa
原地应力测试重张压力	10.87	MPa
煤层破裂压力梯度	0.02536	MPa/m
煤层闭合压力梯度	0.02007	MPa/m

(3) 压力、温度分析

通过对关井压降测试数据进行解释,地层中部压力(中部深度 435.10 m)3.79 MPa、煤岩层压力系数 0.8889,从压力系数分析本层属低压力系

统储层,取得储层温度 18.38°C。通过微破裂测试获得煤层破裂压力 10.88 MPa(图 3)、煤层破裂压力梯度 0.02536 MPa/m;煤层闭合压力 8.61 MPa(图 4)、煤层闭合压力梯度 0.02007 MPa/m。

表 4 4# 煤层原地应力测试取得破裂压力、闭合压力数据表

Table 4 Data of bursting pressure and closure pressure by in-situ stress measurement of seam 4#

循环	破裂压力 (MPa)	闭合压力 (MPa)	平均破裂压力 (MPa)	平均闭合压力 (MPa)	平均破裂梯度 (MPa/m)	平均闭合梯度 (MPa/m)
1	10.87	8.72				
2	10.78	8.71				
3	10.75	8.81	10.79	8.76	0.02516	0.02043
4	10.77	8.82				

(4) 分析结论及建议

本次试井测试所解释的井筒附近渗透率为  $0.0907 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,表明煤岩层渗透性很差属于低渗透性储层、导流能力一般,流动系数为  $0.0926 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 \cdot \text{m}/\text{MPa} \cdot \text{s}$ 。在试井过程中,储层渗透率受煤层有效厚度、流体水粘度控制极为显著;孔隙度和综合压缩系数对除储层渗透率以外其它储层参数的控制作用较为明显;流体地层体积系数在

实际工作中可以忽略。

通过对关井压降测试数据进行解释,地层中部压力 3.79 MPa、煤岩层压力系数 0.888 9,从压力系数分析本层属于低压系统。地应力测试获得煤层破裂压力梯度、煤层闭合压力梯度均属于较高破裂梯度和闭合梯度。

2.2.2 8#煤层

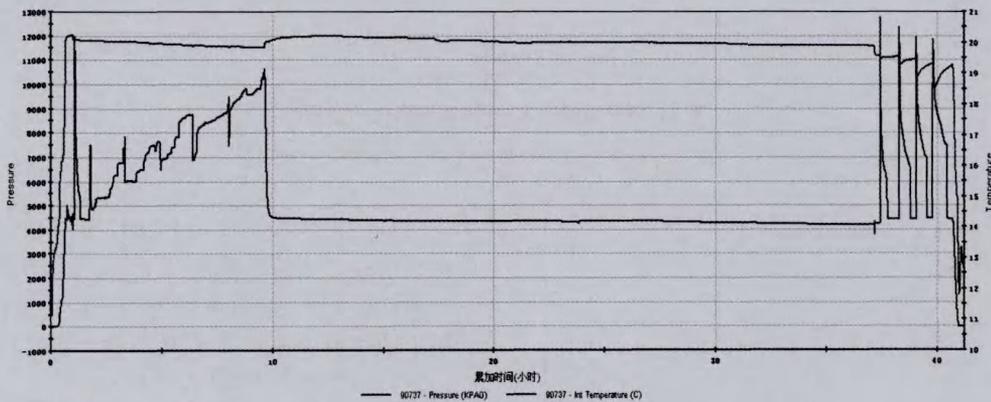


图 11 8#层注入/压降实测历史曲线图

Fig. 11 Historical curve of injection/pressure drop test of seam 8#

(2) 试井分析

本层压降曲线(压力-时间曲线)成直角下降后一直走平(图 11),主要原因为本层渗透性较好,压力稳定较快。

结合试井解释过程中的双对数曲线及压降阶段叠加函数曲线图对本次试井进行曲线特征分析:

本层压降曲线(双对数曲线)早期为井筒储集、表皮效应及过渡段结束后,压力导数曲线下掉后再上翘形成一个“凹”字,分析认为这也与“回吐”现象有关(图 12),与 4#煤层不同的是,本煤层测试时回吐发生时间相对较晚(相对于压力变

化的过程),时间短。从实测曲线上看,压降阶段中期压力略微上升,持续 2-3 h 后下降。在叠加函数曲线(或霍纳曲线)上的形态为曲线扁平缓和(图 13)。

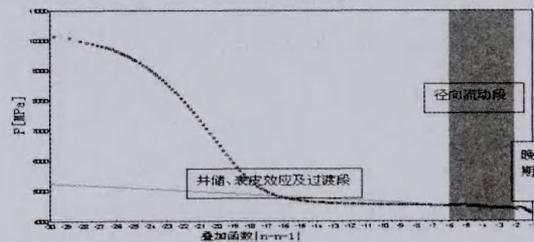


图 13 8#煤层半对数曲线图

Fig. 13 Double logarithmic curve of seam 8#

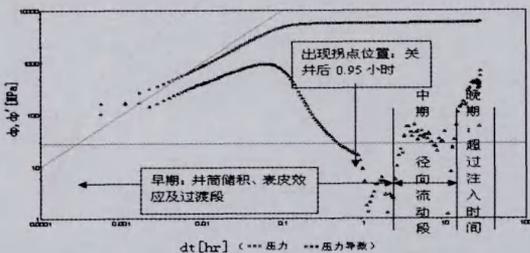


图 12 8#层压降阶段双对数压力及压力导数曲线诊断图

Fig. 12 Diagnosis curve of double logarithmic and pressure derivative during pressure drop of seam 8#

中期半对数直线段和双对数曲线水平段特征明显,表明该段已进入无限导流作用的径向流动阶段,且反映均质地层特征;从双对数压力曲线的开口较大,半对数曲线呈“厂”字形的形态看,本井本层存在一定的污染。压降曲线后期(关井约 8 h 后),半对数曲线斜率发生变化,双对数压力导数曲线上翘,并非反映某种边界,而是由于微破裂测试时的煤层破裂的裂缝造成的。由于注入阶段注入量不稳,而地层渗透性较好,使得本层测试曲线中后期数据点比较散乱(图 12)。

### 2.2.3 13<sup>#</sup>煤层

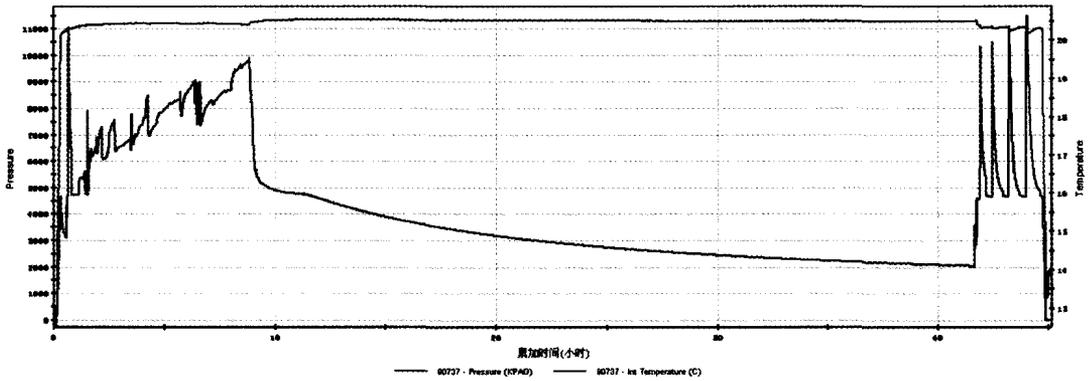


图 14 13<sup>#</sup>煤层注入/压降实测历史曲线图

Fig. 14 Historical curve of injection/pressure drop test of seam 13<sup>#</sup>

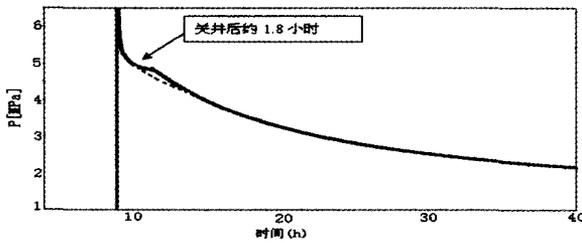


图 15 13<sup>#</sup>层压降早期局部放大曲线图

Fig. 15 Partial enlarged curve in the early stage of seam 13<sup>#</sup>

#### (2) 试井分析

结合 13<sup>#</sup>煤层的双对数压力及压力导数曲线(图 16)和压降阶段叠加函数曲线(图 17)进行试井分析和解释,本层压降曲线(双对数曲线)早期为井筒储集、表皮效应及过渡段结束后,导数曲线

由于“回吐”现象而形成一个“凹”字,并掩盖了径向流动阶段。然后导数曲线上翘,分析认为是地层渗透性变差所致(也可能为由于钻井过程使得井附近地层的缝隙连通更好,渗透性变好)。

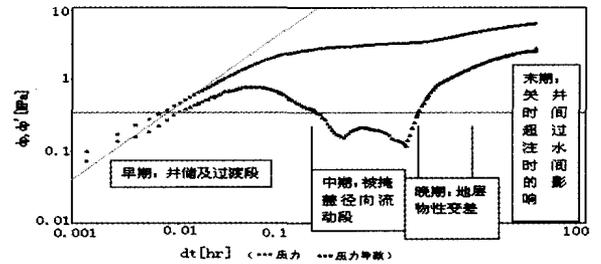


图 16 13<sup>#</sup>层压降压力及压力导数诊断曲线图

Fig. 16 Diagnosis curve of drop pressure and pressure derivative of seam 13<sup>#</sup>

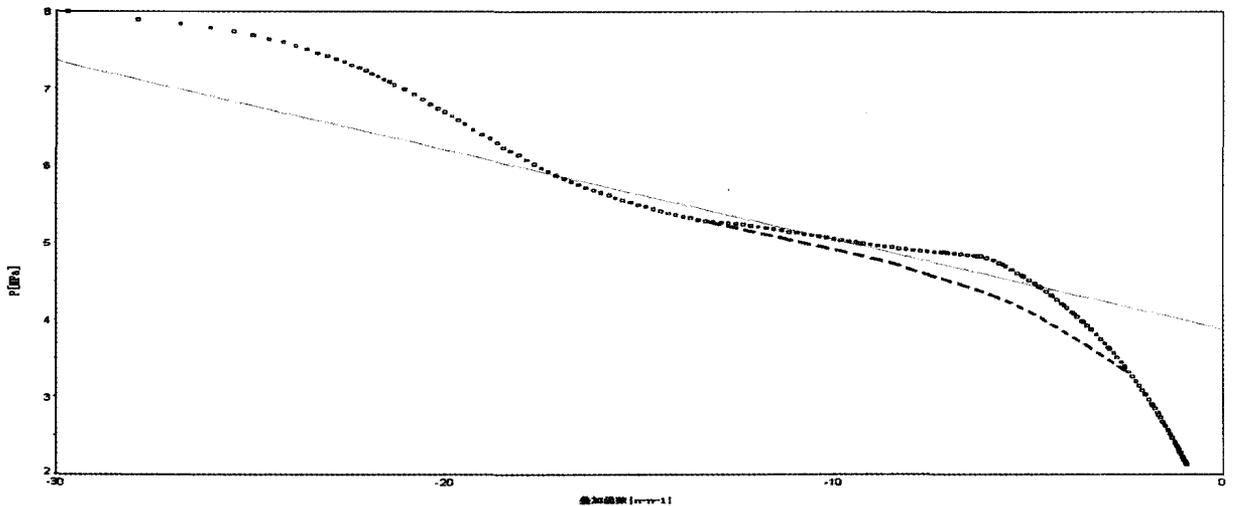


图 17 13<sup>#</sup>层压降阶段叠加函数曲线图

Fig. 17 Superposed function during pressure drop of seam 13<sup>#</sup>

### 3 结论

(1)从实测压力温度曲线图看出,注入段压力瞬间升高和降低,波动明显,这并非煤层破裂导致的压力瞬变,是由于柴油机泵注系统不稳定造成的。

(2)使用 saphir 软件,井的模型选用具有井筒储集效应+表皮效应的模型,针对煤岩层特性,储层模型选用径向复合模型。双对数-导数曲线井筒储集阶段持续时间较长,煤岩层渗透性很差;在导数曲线中后期明显径向流段;叠加函数曲线(或霍纳曲线)与双对数-导数曲线反映一致,说明选用的井筒储集效应+表皮效应+径向复合的模型合理,呈现径向复合地层特征,整个曲线形态反应煤岩层为低渗透特征。

(3)从压力、温度实测曲线压降段分析,压降曲线下降缓慢,然后出现小的波动,出现“回吐”现象,分析认为这可能与地层(煤层)具有较强的塑性且地层渗透性较差有关。

(4)从双对数曲线的开口较大,半对数曲线

呈“厂”字形的形态看,本井煤层存在一定程度的污染。

(5)半对数曲线斜率发生变化,导数曲线上翘,并非反应某种边界,而是由于超过注水时间造成的。

(6)在试井过程中,储层渗透率受煤层有效厚度、流体水粘度控制极为显著;孔隙度和综合压缩系数对除储层渗透率以外其它储层参数的控制作用较为明显;流体地层体积系数在实际工作中可以忽略。

#### [参考文献]

- [1] 秦勇,朱旺喜. 中国煤层气产业发展所面临的若干科学问题[J]. 中国科学基金,2006,(3):148-152.
- [2] 秦勇,程爱国. 中国煤层气勘探开发的进展与趋势[J]. 中国煤田地质,2007,19(1):26-29,32.
- [3] 桂宝林,王朝栋. 滇东-黔西地区煤层气构造特征[J]. 云南地质,2000,19(4):321-351.
- [4] 刘立军,王立中,等. 煤层气井注入压降试井技术研究[J]. 天然气工业,2004(5):79-81.
- [5] 刘能强. 实用现代试井解释方法[M]. 北京:石油工业出版社,1996.

## Well Curve Analyses of Renhe Exploration Zone of Anluo Coal Mine in Jinsha, Guizhou

CEN Ming-feng, HUANG Pei, REN Ping

(113 Geological Party, Coal Mine Exploration of Guizhou Province, Guiyang 550081, Guizhou, China)

**[Abstract]** In this paper, Renhe exploration Zone of Anluo coal mine is taken as the research area, on the basis of exploration information, field sample test and laboratory test, by injection/pressure-drop test, explained relative well test by Saphir software, choose the model of well bore accumulation effect, skin effect and radial composite well, simulated coal seam 4<sup>#</sup>, 8<sup>#</sup> and 13<sup>#</sup> of 26-4 pore, the basic stratum features are also studied. It shows: the pressure fluctuated wildly in the early injection stage, regurgitation appeared in the pressure-drop stage, it's thought to be concerned with strong plasticity of stratum and weak permeability. Because of the big opening of double logarithmic curve and the shape of semi logarithmic curve, there are some pollution in this coal seam. The variation of semi logarithmic curve and derivative is not reflection of some boundary but caused by overtime water injection. During the well test, it's obvious that the seam permeability is controlled by effective thickness and fluid viscosity, the control of porosity and comprehensible compression ratio for other seam is also obvious, volume ratio of fluid stratum can be ignored in the active work.

**[Key words]** Coal-bed gas; Stratum characteristics; Injection/pressure drop; Well test curve