

现代产量递减分析方法求取安达凹陷试采气井储层参数

刘宝华¹, 杨东²

- 1. 中国石油大庆油田有限责任公司试油试采分公司 黑龙江大庆 163412
- 2. 中国石油大庆油田有限责任公司勘探事业部 黑龙江大庆 163000

通讯作者: Email: sc_liubaohua@petrochina.com.cn

引用: 刘宝华, 杨东. 现代产量递减分析方法求取安达凹陷试采气井储层参数[J]. 油气井测试, 2019, 28(6): 59-65.

Cite: LIU Baohua, YANG Dong. Using modern production decline analysis to obtain the gas well reservoir properties in Anda sag [J]. Well Testing, 2019, 28(6): 59-65.

摘要 安达凹陷 X1 井试采生产 180 d, 后期关井时间较短, 测得压力恢复数据不符合资料录取要求。现代产量递减曲线分析方法, 以试采期间取得变井底压力与相对稳定产量动态数据为依据, 对数据进行规整化处理, 结合静态地质参数, 对储层进行评价。X1 等 6 口试采井实例应用, 获得了渗透率、开采年限及废弃时累积产量等参数, 在试采气井产能评价中具有较好的适用性。为进一步减小拟合过程中的误差, 该方法应结合不稳定试井资料进行相互解释验证, 为气井动态规律认识和试采方案调控措施制定提供科学依据, 为指导下一步单井控制储量评价提供技术支撑。

关键词 安达凹陷; 试采气井; 产量递减; 曲线拟合; 地层参数; 产能评价; 单井储量

中图分类号: TE353 **文献标识码**: B **DOI**: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2019.06.011

Using modern production decline analysis to obtain the gas well reservoir properties in Anda sag

LIU Baohua¹, YANG Dong²

- 1. Oilfield Testing Technology Service Branch, PetroChina Daqing Oilfield Co., Ltd., Daqing, Heilongjiang 163412, China
- 2. Exploration Division, PetroChina Daqing Oilfield Co., Ltd., Daqing, Heilongjiang 163412, China

Abstract: Due to the relatively short shut-in period after 180-day production test of Well X1 in Anda sag, the pressure build-up data could not meet the data acquisition requirements. To obtain the relatively steady production history and variable bottom-hole pressure history in the production test, the modern production decline analysis can be used to normalize data and evaluate reservoir by combining with static geological parameters. The reservoir permeability, production life and cumulative production when being disposed were gained in the field application of 6 production test wells, which shows a favorable applicability in the productivity evaluation of production test well. Transient well test data should be combined for mutual interpretation and verification to further reduce the fitting error. This research could provide certain scientific basis for the understanding of gas well production performance and development of production test program, and could also provide certain technical guidance for the further single-well controlled reserve evaluation.

Keywords: Anda sag; production test; gas well; production decline; curve fitting; transit well testing; productivity evaluation; single-well reserve

庆深气田安达凹陷位于松辽盆地徐家围子断陷北端安达次洼及斜坡带, 是受徐西断裂控制的西断东超的箕状断陷, 面积约 950 km²。本探区试气层位以营城组火山岩为主, 兼探沙河子组砂砾岩。该区块已成为庆深气田提交第三个千亿立方储量的重点勘探区域。从 2000 年以来, 已完成 X3、X4、X5 以及 X6 等 4 口井试采资料的录取, 试采方案采用“产能试井+一点法+长关井”。从试采资料利用效率分析来看, 存在三个方面的问题: (1) 产能试井资料利用效率低, 如 X4 井、X5 井等系统试气指数式与二项式产能方程均反向, 不能获得单井产量方

程; (2) “一点法”短期试采资料仅仅用于计算无阻流量, 没有利用生产动态数据进行解释, 获得渗透率、表皮系数、单井控制储量, 以及初始递减率等参数; (3) 仅利用关井恢复压力资料进行不稳定试井解释, 有时压力导数曲线未出现径向流或边界流, 得出地层参数存在多解性, 不能有效认识储层。产量递减反映气藏目前的生产能力, 利用生产状态参数, 可以对处于递减期的气田进行评价分析。

目前, 国际上出现了油气田日常生产数据通过“递减曲线典型图版拟合法”计算储层参数的现代产量递减分析技术。如孙贺东等^[1-2]提出了油气井

现代产量递减分析方法及在油气藏中的应用,详细阐述了典型曲线拟合等方法定量确定储层储渗参数、预测油气井生产动态。唐圣来等^[3]针对实际数据考虑了常表皮和变表皮系数的影响,分别在这两种情况下生成了历史曲线,解决了试井曲线拟合不理想的问题。欧阳伟平^[4]把试井解释方法与现代产量递减分析方法结合起来,评价了致密气藏储层产量递减规律。郝英芝等^[5]利用长期生产资料分析了水平井流动阶段特征,利用产量递减方法,解决了水平井试采问题。刘晓华等^[6]针对产量递减理论,结合实际数据,分析了现代产量递减分析方法的适用条件,解决了生产数据适合产量递减的分析方法。曾宪兵等^[7]从无阻流量变化的角度,说明了现代产量递减规律的重要性。喻秋兰等^[8]引申定义了三种新产能递减率,从而减少因产能测试而关井对生产造成的影响。国艳^[9]以储层物性条件为基础,动态分析了产量递减规律变化,得出了影响产能递减的敏感性参数。王磊^[10]利用统计的实际生产数据,将李闽产量递减模型的计算结果同Fetkovich图版拟合方法的计算结果进行了比较、分析。李锋^[11]综合考虑影响产量递减因素,推导出定量计算产量递减的数学关系式。马镒^[12]针对井下节流器等问题进行了Arps递减分析,解决了不稳定动态资料的分析方法。蔡左花^[13]通过对递减规律的深刻认识,分析出影响产量递减的主要因素,结合气藏的地质特征与开发特征,得出影响气藏单井产量递减的主要因素,并从气藏实际出发提出了减缓产量递减的技术对策。王燕等^[14]对产量递减规律与产能递减规律进行了对比分析,给出了产能的时间递减率、压力水平递减率和采出程度递减率的工程定义。朱豫川等^[15]详细介绍了预测气井产量递减的3种常用方法(Arps递减曲线法、Fetkovich递减曲线法和Blasingame递减曲线法),并对其应用范围、优缺点进行对比。白玉湖等^[16]在页岩气井生产数据基础上,对典型曲线进行研究,分析了拟合方法、初始产量确定方法、生产历史长短,以及压裂级数等对典型曲线的影响。蒋佩等^[17]详细介绍了低渗透、超低渗透井产量递减规律,推导出低渗透、超低渗透井如何使用产量递减方法。张荻荻等^[18]通过Arps广义双曲递减法与复合递减模型法应用对比分析,得出层状硅质-钙质页岩与层状硅质页岩两大类页岩气田产量变化规律。王金多等^[19]对目前常用的产量自然递减类型判断方法进

行了研究,并根据Arps产量递减理论及油田实际生产数据,对各种方法进行了评价。陈余^[20]针对低渗气藏气井产量递减存在递减类型判识不准确导致递减规律认识不清等问题,开展了传统Arps递减类型判识,从递减率、影响因素和产气量变化等3个方面开展了研究,建立了低渗气藏气井产量递减分析方法。乔向阳等^[21]针对气井定产降压阶段压力递减特征及定压降产阶段压力特征,分别研究了产能递减规律,提出了试采井在两种生成条件下的分析思路。

1945年,Arps提出3种产量递减分析的方法,即指数递减、双曲递减和调和递减^[22-24]。1980年,Fetkovich提出,Arps递减在理论上实际是生产井达到拟稳态即生产压力波达到地层边界后的生产特征。之后,Fetkovich将常井底流压生产条件下不稳态解析解和Arps的3种递减曲线合并,推出了经典的Fetkovich典型曲线图版。利用该图版,既可以分析常流压生产条件下的拟稳态数据,也可分析非稳态时期的生产数据。但Arps和Fetkovich产量递减分析没有考虑不稳定生产中井底流压的变化。在实际生产中,油气井的生产通常是变产量和变井底流压的状态。因此,Fetkovich典型曲线的应用受到限制。1993年,Palacio和Blasingame利用压力归一化产量和物质平衡等效时间的概念,将变产量和变井底流压的解转化成了常产量解,建立了变产量与定产量之间的等效关系。之后,基于这一理论的多种典型曲线被开发,并应用于工业界对生产数据的分析。Normalized Pressure Integral (NPI)方法则利用产量规整化压力积分的形式处理生产数据,旨在通过积分后建立一种较可靠的、不受数据分散影响的分析方法。对于处在不稳定流动阶段的数据,可用基于试井的无因次时间与产量关系(Transient方法)进行拟合分析^[25]。综上所述,现代产量递减曲线分析方法通过引入物质平衡拟时间、拟压力规整化产量、产量规整化拟压力等,来处理变产量、变井底流压和气体PVT性质随压力变化的影响,并引入产量积分、产量积分导数等作为辅助拟合分析曲线,提高拟合结果的准确性。

1 现代产量递减分析方法类型

作为油气藏动态描述的各种方法,现代产量递减分析方法与传统试井分析方法存在各自的适用条件,同时又有许多共性。在储层参数评价的过程

中,要根据实际数据决定具体采用哪种分析方法或者将其结合使用。

现代产量递减分析方法主要以不稳定渗流理论为基础,利用油气井的日常生产数据,分析压力和产量之间的关系,最终通过特征曲线求取地层相关参数,评价油气井生产动态。主要包含传统的 Arps(1945)方法、经典的 Fetkovich(1980)典型曲线拟合法、现代的 Blasingame(1993)分析法、NPI 分析法等。

传统经验方法(Arps、Fetkovich-Arps)可以进行单井产量递减规律分析,进而对后期产量与压力进行预测;现代产量递减解释方法(Blasingame、NPI)可以确定泄流范围流动参数、地层压力以及控制储量,对单井措施效果进行预测和评价。

1.1 Arps 产能递减解释方法

1945 年,Arps 在总结前人对生产动态资料统计基础上,提出了 Arps 递减分析方法,得出对于不同的油气藏,不同的开发阶段的产能递减曲线遵循指数、双曲或调和递减共 3 种产量递减规律(图 1)。

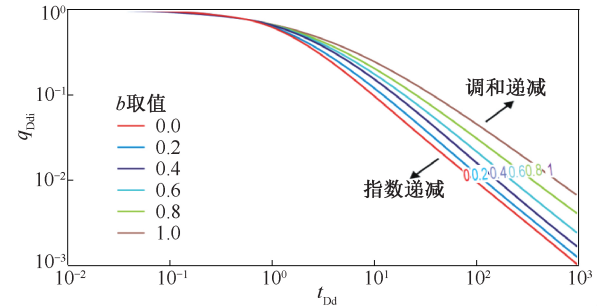


图 1 Arps 无因次产量积分与无因次时间图版
Fig.1 Plate for Arps dimensionless production integral and dimensionless time

统一表达式:

$$q = \frac{q_i}{(1 + bD_i t)^{1/b}}$$
$$N_p = \frac{q_i}{(1 - b)D_i} [1 - (1 + bD_i t)^{1-1/b}]$$

式中: q_i 为初始产量, m^3/d ; q 为产量, m^3/d ; D_i 为递减因子; b 为决定递减曲线的类型且在 0 和 1 之间变化的参数; t 为时间, d ; N_p 为累积产量, m^3 。

三种递减曲线分别是:双曲递减,指数递减和调和递减。

适用条件:产量呈现明显下降趋势,定流压生产+封闭边界控制情况。

非线性回归确定系数:典型图版拟合的方式确定 b 、 q_i 、 D_i 后,可计算单井可采储量及产量预测。

优缺点:其优点是直接利用产量数据,不需要储层参数;但是获得的地层参数比较少。

1.2 Fetkovich-Arps 分析法

由于 Arps 递减典型曲线图版只能用于分析边界控制流阶段数据,Fetkovich 以有界均质地层不稳定渗流理论为基础,将试井分析中的不稳定流动公式引入递减分析中,使 Arps 图版扩展到边界控制流之前的不稳定流动阶段,并建立了一套比较完整的完全类似于试井分析的双对数产量递减曲线图版拟合分析方法(图 2)。

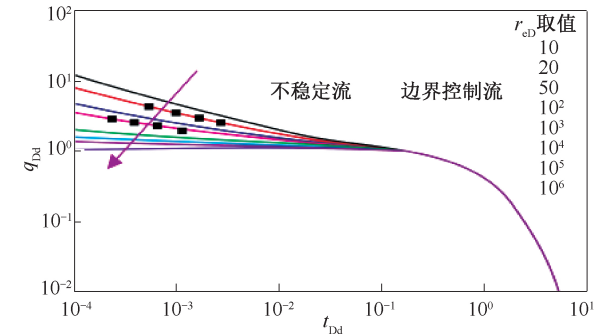


图 2 Fetkovich 产量图版
Fig.2 Fetkovich production plate

定义无因次量:

$$t_{Dd} = D_i t, \quad t_D = \frac{0.00634 K t}{\phi \mu C_i r_w^2}$$
$$q_{Dd} = \frac{q(t)}{q_i}, \quad Q_{Dd} = \frac{Q(t)}{N_{pi}}$$

把 t_{Dd} 、 t_D 两者相关联,得到

$$t_{Dd} = \frac{t_D}{\frac{1}{2} \left[\left(\frac{r_e}{r_w} \right)^2 - 1 \right] \left[\ln \left(\frac{r_e}{r_w} \right) - \frac{1}{2} \right]}$$

式中: t_{Dd} 为递减曲线无量纲时间,无因次; t_D 为无量纲时间,无因次; K 为地层渗透率, D ; ϕ 为孔隙度,无因次; μ 为流体黏度, $mPa \cdot s$; t 为生产时间, s ; C_i 为压缩系数, MPa^{-1} ; r_e 、 r_w 分别为供给半径和井筒半径, m ; q_{Dd} 为递减曲线无量纲产量,无因次; q_i 为初始产量, m^3/d ; $q(t)$ 为瞬时产量, m^3/d ; Q_{Dd} 为无量纲累积产量,无因次; $Q(t)$ 为累积产量, m^3 ; N_{pi} 为最大累积产量, m^3 。

不稳定流动段与 Arps(或边界控制流动段)组合来分别描述不同流动期。递减双对数曲线图版的后半部分可以确定 Arps 递减参数 q_i 、 D_i 和 b 的大小;典型曲线的前半部分可以确定 r_{De} ,进而计算渗透率 K 、表皮系数 S 、井控半径 r_e 和单井动态储量以及达到废弃条件时的累积产量等参数。

适用条件:定流压、单调递减、封闭系统。

1.3 Blasingame 分析法

Blasingame 方法引入了拟压力规整化产量 ($p/\Delta p \cdot p$) 和物质平衡拟时间函数 t_{ea} 建立了拟合图版(图3)。该方法考虑了变井底流压生产情况和随地层压力变化的气体 PVT 性质,模型丰富,适用于不同油气藏拟合,获得地层参数多,如渗透率、总表皮系数、井控半径及原始地质储量等。

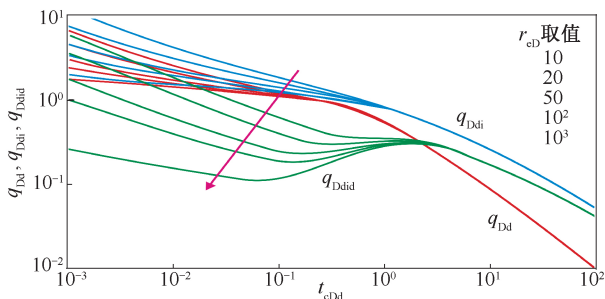


图3 Blasingame 复合图版曲线
Fig.3 Blasingame composite plate

依据压力传导方程、物质守恒原理,可在不同油藏下分析产量特征。地层平均压力定义为

$$c(\nabla p)^2 + \nabla^2 p = \frac{\phi \mu C_t}{K} \frac{\partial p}{\partial t}$$

$$\bar{p} = p_i - \frac{1}{NC_t} \frac{B_o}{B_{oi}} N_p$$

式中: c 为比热容,无因次; B_o 为瞬时体积系数,无因次; B_{oi} 为原始体积系数,无因次; N_p 为累积产量, m^3 ; N 为地质储量, m^3 。

生产实际中,将变化的压力、流量进行处理,转化成等效的稳定压力和产量。其等效时间和重整流量表达式为

$$t_e = \frac{Q(t)}{q(t)}$$

$$PI(t) = \frac{q(t)}{p_i - p_w(t)}$$

$$PI_{int} = \frac{1}{t_e} \int_0^{t_e} \frac{q(\tau)}{p_i - p_w(\tau)} d\tau$$

$$PI_{int, Derivative} = \frac{\partial(PI_{int})}{\partial \ln(t_e)}$$

式中: p_i 为地层压力, MPa; $p_w(t)$ 为井底压力, MPa; K 为地层渗透率, D; ϕ 为孔隙度, 无因次; μ 为流体黏度, mPa·s; t 为生产时间, s; C_t 为压缩系数, psi^{-1} ; t_e 为有效时间, d; $q(t)$ 为瞬时产量, m^3/d ; $PI(t)$ 为重整压力, 无因次; PI_{int} 为规整化压力积分, 无因次; $PI_{int, Derivative}$ 为规整化递减压力积分导数, 无因次。

1.4 NPI 产能递减解释方法

在 Blasingame 研究成果基础上,应用物质平衡时间,采取重整产量方法和导数信号放大技术,提取出了产量的地层特征。

规整化压力:

$$\Delta p/q = \frac{p_i - p_w(t)}{q(t)}$$

规整化压力积分:

$$I(t_e) = \int_0^{t_e} \frac{p_i - p_w(\tau)}{q(\tau)} d\tau$$

规整化压力导数积分:

$$I'(t_e) = \frac{\partial I(t_e)}{\partial \ln(t_e)}$$

边界特征收敛速度越快,导数水平线越早出现能准确确定 Kh 和边界距离。拟合时,通过拟合导数的水平段,得到气藏地层系数 Kh ,继续对边界控制流动段拟合,得出油藏大小和储量。规整化压力与物质平衡时间典型图版的适用范围和计算功能与规整化产量与物质平衡时间典型图版相同(图3),这里不再赘述。

2 实例分析

X1 井是位于安达凹陷宋站地区沙河子组一口预探井,层位: K_1sh , 井段 4 469.0 ~ 3 600.6 m, 水平段长 868.4 m。2016 年 6 月 22 日至 9 月 28 日,定产试采生产 97 d, 累计产气 $539.18 \times 10^4 m^3$, 天然气回收 $126.13 \times 10^4 m^3$, 试采累计排液 $12.6 m^3$, 定产 $5 \times 10^4 m^3$ 后未出液。目前,采用 3.18 mm 油嘴试采,产气量稳定,井底流压压降 8.10 MPa, 压降气产量 $56.05 \times 10^4 m^3$ 。压力产量生产历史曲线如图 4 所示。

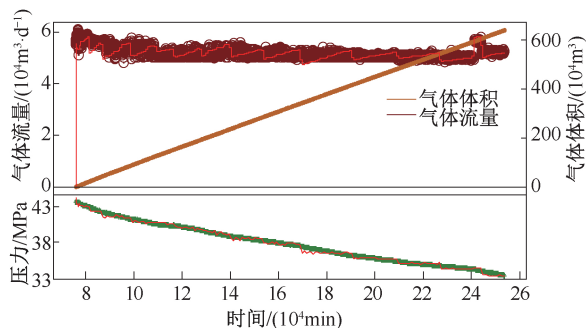


图4 X1 井试采压力产量历史曲线

Fig.4 Production and pressure test histories of Well X1

现代产量递减分析只需采用每日计量的产量、压力数据即可进行分析。针对本井未取得关井资料的

情况,以试采期间取得变井底压力与相对稳定产量动态数据为依据,再进行数据的规整化处理,可以减小异常波动点带来的误差。然后,结合静态地质参数所取得的认识,对本井储层进行评价。本井选用“外接模型+线性边界,物质平衡”模型,利用现代产量递减分析方法,达到了较好的拟合效果。通过特征曲线,求取地层相关参数,评价油气井生产动态。拟合曲线如图 5~6 所示,解释结果为:裂缝半长 45.44 m,边界距:S32.7 m,E34.2 m,N33.5 m,W32.2 m,裂缝导流能力 703.8 md·m,表皮系数 19.69,渗透率 0.057 1 mD,单井控制储量 $0.442\times10^8\text{ m}^3$ 。

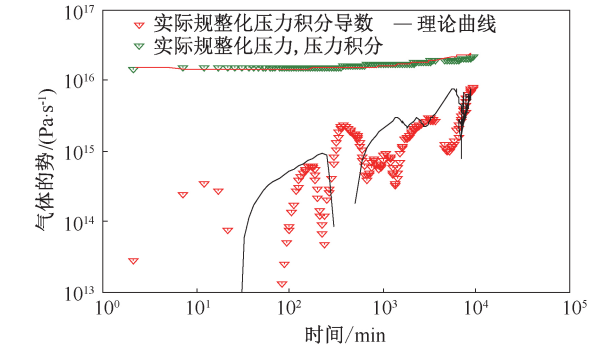


图 5 X1 井 NPI 解释复合曲线
Fig.5 NPI composite interpretation curve of Well X1

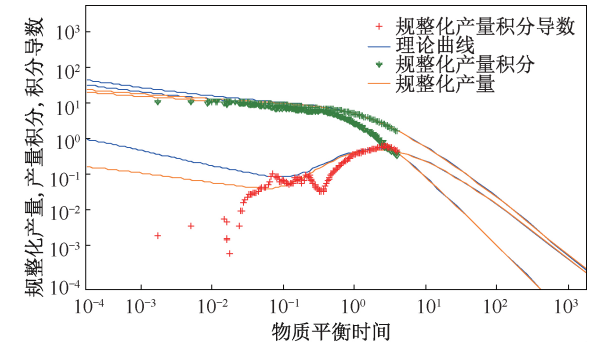


图 6 X1 井 Blasingame 解释复合曲线
Fig.6 Blasingame composite interpretation curve of Well X1

利用现代产量递减分析方法,Blasingame 和 NPI 解释复合曲线出现径向流特征,证明获得的地层参数,如渗透率、表皮系数等相对准确可靠。另外,Blasingame 和 NPI 解释曲线依旧没有闭合,说明压力波还没传播到气藏边界,预测的单井控制储量偏小,需要继续定产试采。

综上所述,根据现代产量递减分析方法,实现了利用试采生产动态数据进行储层动态描述的目的,为气井动态规律认识和试采方案调控措施制定提供了科学依据,为指导下一步单井控制储量评价提供技术支撑。

利用现代产量递减分析方法在安达凹陷 X2 井,

以及以往试采井 X3、X4、X5 上的应用与验证,拟合曲线如图 7~10 所示,解释结果见表 1。

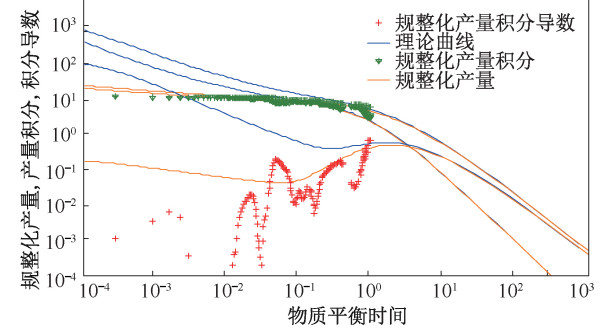


图 7 X2 井 Blasingame 解释复合曲线
Fig.7 Blasingame composite interpretation curve of Well X2

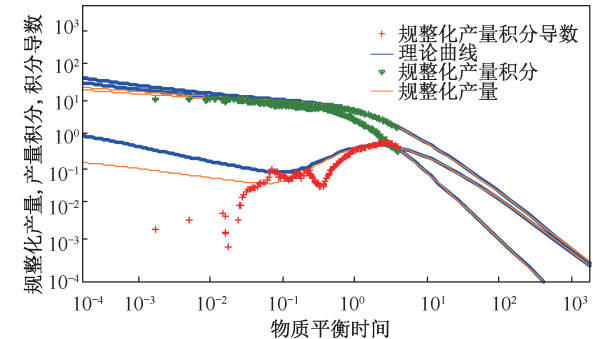


图 8 X3 井 Blasingame 解释复合曲线
Fig.8 Blasingame composite interpretation curve of Well X3

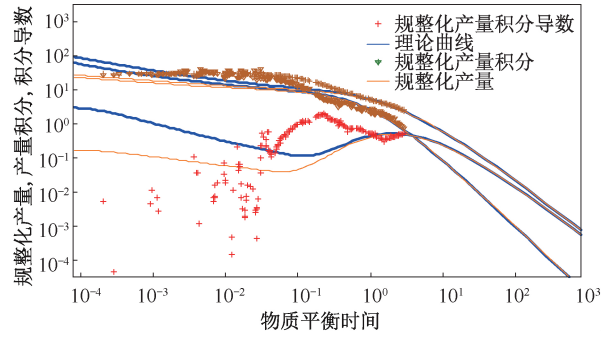


图 9 X4 井 Blasingame 解释复合曲线
Fig.9 Blasingame composite interpretation curve of Well X4

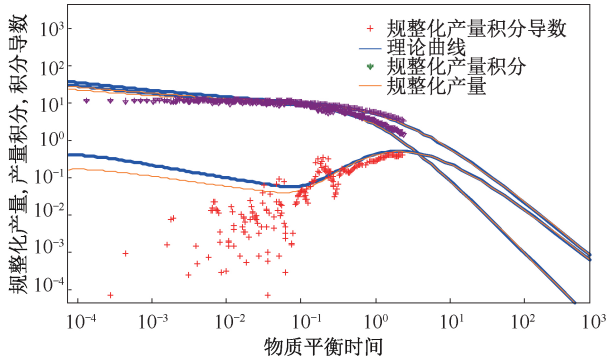


图 10 X5 井 Blasingame 解释复合曲线
Fig.10 Blasingame composite interpretation curve of Well X5

表 1 安达凹陷解释地层参数表

Table 1 Formation parameter interpretation result of Anda Sag

| 井号 | 裂缝 半长/m | 边界 距离/m | 裂缝导 流能力/ (mD·m) | 表皮 系数 | 渗透率/ mD | 单井控 制储量/ (10 ⁸ m ³) |
|----|------------|------------|-----------------------|----------|------------|--|
| X2 | 328.1 | 327.2 | 5 000 | 23.50 | 0.065 | 0.717 |
| X3 | 35.9 | 56.7 | 15 200 | -5.28 | 0.118 | 0.869 |
| X4 | 42.5 | 35.1 | 14 200 | 2.49 | 0.313 | 0.725 |
| X5 | 23.7 | 464.5 | 11 800 | 20.00 | 47.700 | 1.120 |

通过 X2 井以及以往试采井生产动态资料解释曲线可以看出:①试采周期太短,还处于不稳定流动阶段;②气井的流动未达到边界流,获得地层参数、单井井控储量可能存在误差,仍需要关井压力恢复不稳定试井解释结果的验证。

3 结论

(1)通过对 X1 和 X2 等井实例应用,采用现代产量递减分析方法分析深层气井试采开井后的生产数据,对地层动态参数进行了拟合分析,给出了单井动态波及储量,从而证实了本方法在试采气井产能评价中具有较好的适用性,为下步气井开发方案提供很好的参考,指导下一步生产。

(2)现代产能递减分析方法与不稳定试井相比,成本低、资料来源广泛。但由于生产动态数据录取的准确性对分析结果会产生很大影响,因此不能替代不稳定试井方法。

(3)为了进一步提高本方法的准确性,减小拟合过程中的误差,下步将结合不稳定试井资料进行相互解释验证;同时,应加大攻关压力计投放技术,尽可能得到直井或水平井实际井底生产期间压力数据。

致谢:本文通过了单位的保密审查;在本文撰写过程中,得到大庆油田试油试采分公司地质大队蒋凯军、黄小云等专家的悉心指导,在此表示感谢。

参考文献

[1] 孙贺东. 油气井现代产量递减分析方法及应用[M]. 北京:石油工业出版社,2013:23-184.

[2] 孙贺东,邓兴梁,常宝华,等. 油气井现代产量递减分析方法及在油气藏动态监测中的应用[C]. 2014 年全国天然气学术年会论文集,2014:37-47.

SUI Hedong, DENG Xingliang, CHANG Baohua, et al. Analysis method of modern production decline in oil and gas wells and its application in dynamic monitoring of oil and gas reservoirs [C]. Proceedings of the 2014 National Natural Gas Academic Conference, 2014:37-47.

[3] 唐圣来,姚远,王禹川,等. 对 Topaze 模块应用的认识[J]. 油气井测试,2013,22(2):20-21,24.

TANG Shenglai, YAO Yuan, WANG Yuchuan, et al. An opinion on application of Topaze software [J]. Well Testing, 2013,22(2):20-21,24.

[4] 欧阳伟平. 致密气藏分段压裂水平井的不稳定压力与产量综合分析方法[J]. 油气井测试,2018,27(1):14-21.

OUYANG Weiping. Comprehensive analysis method for transient pressure and production of multistage fractured horizontal well in tight gas reservoirs [J]. Well Testing, 2018,27(1):14-21.

[5] 郝英芝,蒋凯军,郭权. 利用生产资料分析水平井流动阶段[J]. 油气井测试,2017,26(4):30-32.

HAO Yingzhi, JIANG Kaijun, GUO Quan. Using production data to analyze flow stage of horizontal well [J]. Well Testing, 2017,26(4):30-32.

[6] 刘晓华,邹春梅,姜艳东,等. 现代产量递减分析基本原理与应用[J]. 天然气工业,2010,30(5):50-54.

LIU Xiaohua, ZOU Chunmei, JIANG Yandong, et al. Theory and application of modern production decline analysis [J]. Natural Gas Industry, 2010,30(5):50-54.

[7] 曾宪兵,李晓明. 产能递减分析方法在气田动态分析中的应用[J]. 石油化工应用,2013,32(5):5-7,13.

ZENG Xianbing, LI Xiaoming. The application of productivity decline analysis method in the dynamic analysis of gas field [J]. Petrochemical Industry Application, 2013, 32(5):5-7,13.

[8] 喻秋兰,唐海,吕栋梁,等. 气井产能递减规律研究[J]. 天然气勘探与开发,2012,35(3):41-43,52.

YU Qiulan, TANG Hai, LYU Dongliang, et al. Productivity decline law of gas well [J]. Natural Gas Exploration and Development, 2012,35(3):41-43,52.

[9] 国艳. 气井产能递减规律的研究[J]. 科学技术与工程,2011,11(33):8310-8313.

GUO Yan. The research status about gas well production and the law of diminishing [J]. Science Technology and Engineering, 2011,11(33):8310-8313.

[10] 王磊. 气井产量递减理论分析[J]. 中国石油和化工标准与质量,2013,34(5):245,154.

WANG Lei. Theoretical analysis of diminishing gas well output [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2013,34(5):245,154.

[11] 李锋. 低渗透油田产量递减规律研究[D]. 西安:西安石油大学,2013.

LI Feng. Study on productivity decline rule in low permeability reservoir [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou university, 2013.

[12] 马锦. 低渗透气田气井产量递减规律分析[D]. 西安:西安石油大学,2013.

MA Hao. Research on gas well production decline law for low permeability gas reservoir [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou university, 2013.

- [13] 蔡左花. 新场气田 JP_1 、 JP_2 气藏单井产量递减规律研究[D]. 成都:成都理工大学, 2010.
CAI Zuohua. Research on single well production decline law for JP_1 、 JP_2 gas reservoir in Xinchang gas field [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2010.
- [14] 王燕,唐海,吕栋梁,等. 气井产量递减与产能递减[J]. 天然气勘探与开发, 2009, 32(3): 32-34, 41.
WANG Yan, TANG Hai, LYU Dongliang, et al. Production and deliverability decline in gas wells [J]. Natural Gas Exploration and Development, 2009, 32(3): 32-34, 41.
- [15] 朱豫川,刘建仪,张广东,等. 气井产量递减规律分析方法对比分析[J]. 天然气勘探与开发, 2009, 32(1): 28-31.
ZHU Yuchuan, LIU Jianyi, ZHANG Guangdong, et al. Correlation of production decline for gas wells [J]. Natural Gas Exploration and Development, 2009, 32(1): 28-31.
- [16] 白玉湖,杨皓,陈桂华,等. 页岩气产量递减典型曲线应用分析[J]. 可再生能源, 2013, 31(5): 115-119.
BAI Yuhu, YANG Hao, CHEN Guihua, et al. Application and analysis of yield decline type curve of shale gas [J]. Renewable Energy Resources, 2013, 31(5): 115-119.
- [17] 蒋佩,王怒涛,姚锋盛,等. 非常规天然气产量递减分析新方法及其应用[J]. 天然气与石油, 2012, 30(2): 52-55.
JIANG Pei, WANG Nutao, YAO Fengsheng, et al. Foreign new methods for analysis on unconventional gas production rate decline and their application [J]. Natural Gas and Oil, 2012, 30(2): 52-55.
- [18] 张荻荻,李治平,苏皓. 页岩气产量递减规律研究[J]. 岩性油气藏, 2015, 27(6): 138-144.
ZHANG Diqiu, LI Zhiping, SU Hao. Production decline trend of shale gas [J]. Lithologic Reservoirs, 2015, 27(6): 138-144.
- [19] 王金多,刘国静,秦凯峰,等. 产量自然递减类型的综合判断及构成分析[J]. 断块油气田, 2007, 14(2): 44-46.
WANG Jinduo, LIU Guojing, QIN Kaifeng, et al. Comprehensive judgment and analysis of natural production decline type [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2007, 14(2): 44-46.
- [20] 陈余. 低渗气藏气井产量递减分析及预测方法研究[D]. 成都:西南石油大学, 2017.
CHEN Yu. CHENG Yu. The Research of low permeability gas reservoir gas well production decline analysis and prediction method [D]. Chengdu: Southwest petroleum university, 2017.
- [21] 乔向阳,李靖,冯东,等. 低渗气井压力和产量递减规律及其影响因素[J]. 石油钻采工艺, 2017, 39(3): 259-266.
QIAO Xiangyang, LI Jing, FENG Dong, et al. Pressure and production decline laws of low-permeability gas wells and their influential factors [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2017, 39(3): 259-266.
- [22] 周尚文,王红岩,刘浩,等. 基于 Arps 产量递减模型的页岩损失气量计算方法[J]. 天然气地球科学, 2019, 30(1): 102-110.
ZHOU Shangwen, WANG Hongyan, LIU Hao, et al. A new calculation method for lost gas content of shale based on Arps production decline analysis model [J]. Natural Gas Geoscience, 2019, 30(1): 102-110.
- [23] 于荣泽,姜巍,张晓伟,等. 页岩气藏经验产量递减分析方法研究现状[J]. 中国石油勘探, 2018, 23(1): 109-116.
YU Rongze, JIANG Wei, ZHANG Xiaowei, et al. A review of empirical production decline analysis methods for shale gas reservoir [J]. China Petroleum Exploration, 2018, 23(1): 109-116.
- [24] 陈元千,唐玮. 广义递减模型的建立及应用[J]. 石油学报, 2016, 37(11): 1410-1413.
CHEN Yuanqian, TANG Wei. Establishment and application of generalized decline model [J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(11): 1410-1413.
- [25] 唐睿,李菊花,陶世增,等. 油气井几种常见的产量递减分析方法浅析[J]. 广东化工, 2013, 40(22): 15-16, 42.
TANG Rui, LI Juhua, TAO Shizeng, et al. A brief analysis of several common methods of oil-gas well production decline analysis [J]. Guangdong Chemical Industry, 2013, 40(22): 15-16, 42.

编辑 刘振庆

第一作者简介:刘宝华,男,1982年出生,工程师,2008年毕业于西南石油大学石油工程专业,现从事试气地质管理及解释评价工作。电话:0459-5691945, 15504599307; Email: sc_liubaohua@petrochina.com.cn。通信地址:黑龙江省大庆市大庆油田有限责任公司试油试采分公司地质大队,邮政编码:163412。