

# 利用 RTA 解释技术对注水井动态评价

高杰,袁玉凤,冯青,杨慰兴

中海油田服务股份有限公司油田生产事业部 天津 300459

通讯作者:Email: gaojie29@cosl.com.cn

引用:高杰,袁玉凤,冯青,等. 利用 RTA 解释技术对注水井动态评价[J]. 油气井测试,2022,31(5):75-78.

Cite: GAO Jie, YUAN Yufeng, FENG Qing, et al. RTA-based dynamic evaluation of water injection wells [J]. Well Testing, 2022, 31(5): 75-78.

**摘要** 注水井由于水质、地层物性、施工等因素影响,易造成水井停产停注,常用的动态分析法缺少对水井定量评价。将 RTA 解释技术应用到注水井中,利用注水井井口压力及注水量数据,结合不稳定试井理论,拟合注水井史及双对数诊断曲线,获得注水井地层参数及边界信息,与地质油藏认识相结合,提高解释精度。以 X 油田 C1、C2 井为例,采用 RTA 解释技术对欠注原因进行分析,认为 C1 井地层物性、连通性差, C2 井储层污染严重。该方法可快速获得地层参数,为注水井动态分析提供一种新的方法。

**关键词** 注水井;RTA 解释技术;注水量;动态评价;表皮系数;等效时间;双对数曲线

**中图分类号**:TE353 **文献标识码**:B **DOI**:10.19680/j.cnki.1004-4388.2022.05.015

## RTA-based dynamic evaluation of water injection wells

GAO Jie, YUAN Yufeng, FENG Qing, YANG Weixing

Production Optimization Business Division, China Oilfield Services Limited, Tianjin 300459, China

**Abstract:** Production and injection of water injection wells may stop due to the influence of water quality, formation physical properties, operation and other factors, but common dynamic analysis methods rarely evaluate the water injection wells quantitatively. This paper introduces the rate transient analysis (RTA) method into the dynamic evaluation of water injection wells. Using the wellhead pressure and water injection volume data of the water injection well, and according to the theory of pressure transient well test, the water injection well history and log-log curve were fitted to obtain the formation parameters and boundary information of the water injection well, which are then combined with the geological understanding of reservoir to improve the interpretation accuracy. Taking Wells C1 and C2 in X oilfield as examples, the causes of insufficient water injection were analyzed by RTA. It is found that the reservoirs in Well C1 have poor physical properties and connectivity, and the reservoirs in Well C2 are seriously damaged. The proposed method can quickly obtain formation parameters, and it provides a new method for dynamic evaluation of water injection wells.

**Keywords:** water injection well; RTA; water injection volume; dynamic evaluation; skin factor; equivalent time; log-log curve

RTA 解释技术,即 Rate Transient Analysis,利用日常井口产量和压力数据,结合不稳定试井理论,获得不同开发阶段急需的储层渗流参数、储层伤害定量诊断参数、生产动态预测参数等<sup>[1]</sup>。RTA 解释技术源于产量递减分析方法,20 世纪 80 年代,由 Fetkovich 首次提出,对压力进行产量规整化,建立 NPI(规整化压力积分)方法<sup>[2]</sup>。20 世纪 90 年代,提出应用最为广泛的 Blasingame 典型特征曲线及相应分析方法<sup>[3-6]</sup>;对 Blasingame 修正,形成 A-G 分析方法。21 世纪,提出了  $\beta$  函数的分析方法,用来辅

助 Blasingame 分析方法<sup>[7-8]</sup>。 $\beta$  函数特征明显,可以简单有效的消除多解性。目前,商业生产分析软件提供多种诊断曲线,其中将压力进行归一化处理形成的双对数曲线可以进行径向流与边界的诊断,提高解释精度<sup>[9-10]</sup>。

相较于压力恢复试井,RTA 解释技术能克服压力恢复试井的局限性,RTA 不需要关井,不影响油气井的正常生产,能记录长期的生产数据,能反映油气井的远井储层信息<sup>[11-14]</sup>。RTA 解释技术常用于油井的问题诊断<sup>[15-16]</sup>,然而水井存在的问题也不

少。由于水质、地层物性、施工等因素,影响注水井的注水效果,甚至造成了水井停产停注。对于水井,通常用动态分析法评价<sup>[17-18]</sup>,缺少对水井定量评价方法。RTA解释技术也可以应用于水井评价,获取水井近井筒附近参数,对地层压力和表皮系数等参数进行计算。

## 1 理论基础

RTA解释技术从渗流理论出发,建立产量、压力之间的关系,通过压力归一化的双对数诊断曲线为手段,来检验实际产量、压力历史拟合。

### 1.1 产量与压力的关系

假设无限大地层一口水井,以恒定水量注入,其试井分析的基本方程如下,即

$$p_{wf} - p_i = - \frac{2.12 \times 10^{-3} q \mu B}{Kh} \times \left( \lg \frac{Kt}{\phi \mu C_t r_w^2} + 0.9077 + 0.87S \right) \quad (1)$$

对于实际注水井史,注水量不是一成不变的,可采用压降叠加原理进行处理,即

$$\frac{p_{wf} - p_i}{q_n} = - \frac{2.12 \times 10^{-3} \mu B}{Kh} \left[ \sum_{j=1}^n \frac{q_j - q_{j-1}}{q_n} \lg(t - t_{j-1}) + \lg \frac{K}{\phi \mu C_t r_w^2} + 0.9077 + 0.87S \right] \quad (2)$$

对于封闭油藏,流体进入拟稳态流动阶段,井底压降表达式为

$$p_{wf} - p_i = - \frac{9.21 \times 10^{-4} q \mu B}{Kh} \times \left( \ln \frac{2.246A}{r_w^2 C_A} + 2S \right) + \frac{qB}{24Ah\phi C_t} t \quad (3)$$

式中:  $p_{wf}$  为井底流压, MPa;  $p_i$  为原始地层压力, MPa;  $q$  为日注水量,  $m^3/d$ ;  $\mu$  为流体黏度,  $mPa \cdot s$ ;  $B$  为地层原油体积系数,  $m^3/m^3$ ;  $K$  为地层渗透率,  $\mu m^2$ ;  $h$  为储层厚度,  $m$ ;  $t$  为生产时间,  $h$ ;  $\phi$  为孔隙度;  $C_t$  为总压缩系数,  $MPa^{-1}$ ;  $r_w$  为油井半径,  $m$ ;  $S$  为表皮系数;  $A$  为泄油面积,  $m^2$ ;  $C_A$  为封闭油藏的形状系数。

### 1.2 双对数诊断公式

RTA解释技术会形成双对数诊断曲线,对应公式如(4)~(6)式,将时间处理成等效时间  $t_e$ , 并将生产指数倒数进行积分处理,可以克服实际生产频繁变产、变压力的叠加难题,同时提高计算的收

敛性。

$$t_e = Q(\tau)/q(\tau) \quad (4)$$

$$p = \frac{1}{t_e} \int_0^{t_e} \frac{P_w(\tau) - p_i}{q(\tau)} d\tau \quad (5)$$

$$p' = \frac{\partial \left[ \frac{1}{t_e} \int_0^{t_e} \frac{P_w(\tau) - p_i}{q(\tau)} d\tau \right]}{\partial \ln(t_e)} \quad (6)$$

式中:  $t_e$  为等效时间,  $h$ ;  $Q(\tau)$  为  $\tau$  时刻累计注入量,  $m^3$ ;  $q(\tau)$  为  $\tau$  时刻注入量,  $m^3/h$ ;  $p_w(\tau)$  为  $\tau$  时刻井底压力, MPa;  $p$  为平均生产指数倒数,  $MPa/(m^3/h)$ ;  $p'$  为平均生产指数倒数的导数,  $MPa/m^3$ 。

双对数曲线类似于试井形成的压力与压力导数曲线,可以分析和认识储层物性、污染程度及边界情况等。基于双对数曲线的诊断,可以更好的避免解释的多解性。

## 2 现场应用

X油田采用 RAT解释技术对两口水井实际的注入历史拟合分析。不同于油井,水井数据需要做一下预处理,在导入数据时,注水量为负值,将井口压力折算为井底压力,或者将  $p_i$  赋值 0.101 325 MPa,即无注水时井口压力。

### 2.1 C1井

C1井注水层位为沙三段,构造上被断层复杂化,投注初期可以注入  $350 m^3/d$ 。为验证该井的注入能力,注水量最高提至  $537 m^3/d$ ,保持注水量不变,油压不断上升,随后降低注水量至  $200 m^3/d$ ,但油压不降。2017年5月实施拖轮酸化。酸化前实注  $150 m^3/d$ ,油压 13.5 MPa;酸化后实注  $171 m^3/d$ ,油压 13.9 MPa,酸化效果差;2020年10月开始欠注,目前配注  $85 m^3/d$ ,日注只有  $10 m^3$ ,注水压力 14.0 MPa。图1为C1井历史拟合曲线,可以看出,实际累注水、日注水与拟合累注水、日注水曲线重合性较好,解释结果具有一定的可靠性。

为分析C1井的欠注原因,对该井进行了生产分析。将井口压力折算成井底压力,同时将注水量数据一起导入生产分析软件,形成实际历史曲线和双对数曲线。类似于试井解释,根据实际井况和双对数曲线形态,选择直井+均质+交叉断层模型进行拟合,其注入历史和双对数曲线如图2所示。

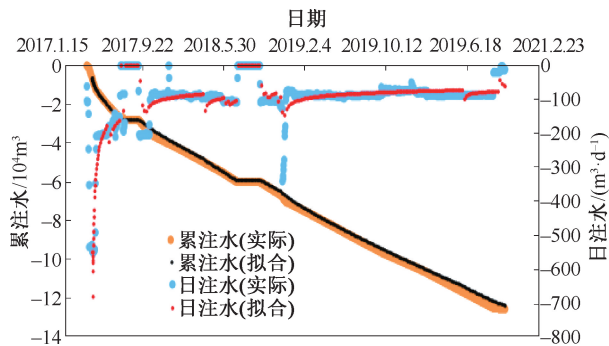


图1 C1井历史拟合曲线

Fig. 1 History fitting curve of well C1

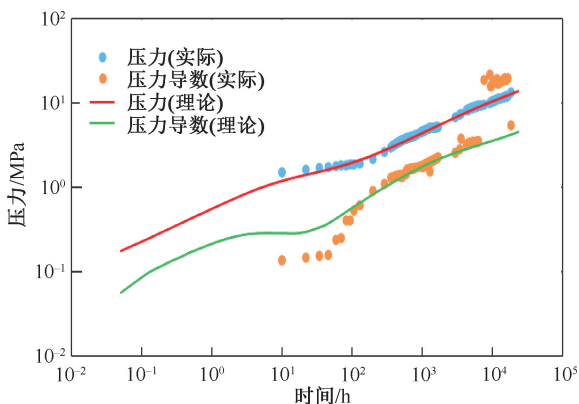


图2 C1井双对数拟合曲线

Fig. 2 Log-log fitting curve of well C1

由图2可见双对数曲线图形态显示近井附近曲线开口较小,表现低渗无污染的特征,双对数曲线上翘,但未重合,可能是物性、岩性或者断层变化引起。该井远离井底附近,致使连通性变差,结合地质构造分析,C1井周边确实存在2条交叉断层,解释结论与实际认识相吻合。该井选用直井+均质+交叉断层模型,解释的地层系数为 $245 \text{ mD}\cdot\text{m}$ ,有效渗透率为 $2.68 \text{ mD}$ ,表皮系数为 $-1.5$ ,初始压力 $19.6 \text{ MPa}$ 。通过生产分析认为该井注入困难的原因为储层物性差,连通性差。

## 2.2 C2井

C2井为先期排液的注水井,注水层位为东二段I、II油组,分两段防砂,一个油组一段,有效厚度 $12.9 \text{ m}$ ,油藏中深 $1630.0 \text{ m}$ 。为补充地层能量,于2010年6月投注,初期井口压力 $7 \text{ MPa}$ ,日注水 $140 \text{ m}^3$ ,随后注入能力不断下降。2013年4月酸化,酸化后视吸水指数明显上升,由 $2.5 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{MPa})$ 上升至 $10.1 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{MPa})$ ,2018年8月之后该井一直欠注。图3为C2井历史拟合曲线,可以看出,该井实际累注水、实际日注水与拟合累注水、拟合日注水曲线重合性较好,解释结果具有一定的可靠性。

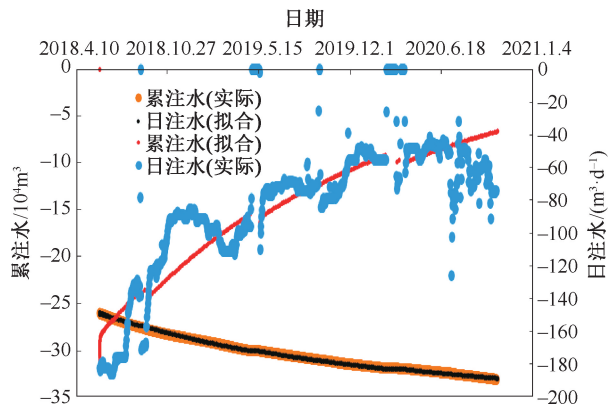


图3 C2井历史拟合曲线

Fig. 3 History fitting curve of well C2

为了分析C2井的欠注原因,对该井进行了生产分析。将井口压力折算成井底压力,同时将注水量数据一起导入生产分析软件,形成实际历史曲线和双对数曲线。根据实际井况和双对数曲线形态,选择直井+均质+圆形封闭边界模型进行拟合,其注入历史和双对数曲线如图4所示。

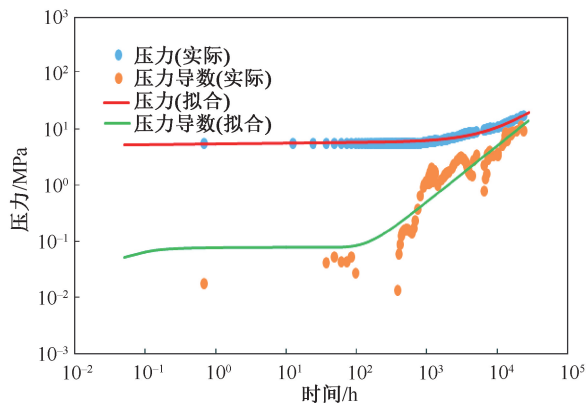


图4 C2井双对数拟合曲线

Fig. 4 Log-log fitting curve of well C2

由图4可见,近井附近曲线开口较大,表现污染严重特征,需要采取解堵措施恢复注水,曲线后期上翘近似斜率为1,出现拟稳态边界流。该井选用直井+均质+圆形封闭边界模型,解释的地层系数为 $991 \text{ mD}\cdot\text{m}$ ,有效渗透率为 $76.8 \text{ mD}$ ,表皮系数为 $28.6$ ,初始压力 $16.3 \text{ MPa}$ 。通过生产分析认为,该井注入困难的原因为储层污染。

## 3 结论

(1)将RTA解释技术应用到C1、C2两口注水井上,从拟合结果来看,理论值和实际值基本吻合,表明应用RTA解释技术可以对水井注入动态进行解释获得地层特征参数,从而指导水井污染等问题诊断,为水井措施决策提供依据。

(2)RTA 解释技术适用于油水井单井动态分析,目前在油井中应用比较广泛。由于水井数据源易获取,压力与产量响应不受泵影响,流体性质单一,PVT 参数易获得,井口压力折算井底压力较准确,该技术更适用于注水井。

(3)后续可将 RTA 解释技术应用到分层注水的水井,对每一层的注水井史进行解释,可以明确污染层位及各层物性差异,对注水井措施选层实施提供依据。

**致谢:**感谢中海油田服务股份有限公司油田生产事业部和中海石油(中国)有限公司天津分公司同意本文公开发表;感谢单位领导和同事对论文撰写提出的宝贵建议。

### 参考文献

- [1] 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.
- [2] 高春光,侯晓春,唐春梅. Fetkovich 产量-时间标准曲线研究[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报),2005,27(4):675-677.  
GAO Chunguang, HOU Xiaochun, TANG Chunmei. On Fetkovich production rate- time typical curve [J]. Journal of Oil and Gas Technology (J. JPI), 2005,27(4):675-677.
- [3] 孙贺东,朱忠谦,施英,等. 现代产量递减分析 Blasingame 图版制作之纠错[J]. 天然气工业,2015,35(10):71-75.  
SUN Hedong, ZHU Zhongqian, SHI Ying, et al. A note on the Blasingame type curve plotting of production decline analysis [J]. Natural Gas Industry, 2015,35(10):71-75.
- [4] 刘春枚. 一种评价气井储层物性及边界特征的新方法[J]. 油气井测试,2017,26(6):34-36.  
LIU Chunmei. A new method for evaluating the properties and boundary characteristics of gas well [J]. Well Testing, 2017,26(6):34-36.
- [5] 于萃群,唐亚会. Blasingame 产能分析方法在徐深气田的应用[J]. 科学技术与工程,2012,12(19):4770-4772.  
YU Cuiqun, TANG Yahui. Application of Blasingame's deliverability analysis method in Xushen deep gas field [J]. Science Technology and Engineering, 2012,12(19):4770-4772.
- [6] 刘宝华. 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.  
LIU Baohua. Using modern production decline analysis to obtain the gas well reservoir properties in Anda sag [J]. Well Testing, 2019,28(6):59-65.
- [7] BLASINGAME T A, ILK D, HOSSEINPOUR-ZONOOZI N. Application of the B-derivative function to production analysis [C]. SPE 107967, 2007.
- [8] IDORENYIN E H, MANGHA V O, MATTAR L. Analysis of production data using the beta-derivative [C]. SPE 149361, 2011.
- [9] 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.  
TANG Shenglai, YAO Yuan, WANG Yuchuan, et al. An opinion on application of Topaze software [J]. Well Testing, 2013,22(2):20-21.
- [10] 牛雪,张辉,吴旭东,等. 井口压力 Topaze 生产分析技术在 DF1-1 气田的应用[J]. 油气井测试,2015,24(1):38-40.  
NIU Xue, ZHANG Hui, WU Xudong, et al. Application of well-head pressure testing technology for DF1-1 gas field [J]. Well Testing, 2015,24(1):38-40.
- [11] 王晓冬,胡永乐,丁一萍. 水平井生产数据分析模型[J]. 石油勘探与开发,2010,37(1):99-103.  
WANG Xiaodong, HU Yongle, DING Yiping. A model of production data analysis for horizontal wells [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010,37(1):99-103.
- [12] LAZUTKIN D, GULYAEV D, MOROZOVSKIY N. Oil production enhancement operations recommendations by well-testing and decline analyze [C]. SPE 187791, 2017.
- [13] 闫肃. 基于生产数据及试井分析的单井动态储量计算方法[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版),2020,22(1):43-46.  
YAN Su. Dynamic reserves calculation of single well based on well test analysis of production data [J]. Journal of Chongqing Institute of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020,22(1):43-46.
- [14] MOKHTARI M, HASHEMI A, NIKJOO E. Pressure transient analysis in multiphase multi layer reservoirs with inter layer communication [C]. SPE 152838, 2012.
- [15] SIDDIQUI I, SHARMA H, MEHTA M, et al. History matching water breakthrough timing using analytical techniques (Russian) [C]. SPE 189035, 2017.
- [16] LAZUTKIN D, GULYAEV D, MOROZOVSKIY N. Oil production enhancement operations recommendations by well-testing and decline analyze [C]. SPE 187791, 2017.
- [17] 李小平,张烈辉,刘启国. 试井分析方法[M]. 北京:石油工业出版社,2009:42-54.
- [18] 刘曰武,刘俊丽,刘振庆. 注水井试井方法综述[J]. 油气井测试,1998,7(1):69-73.  
LIU Yuewu, LIU Junli, LIU Zhenqing. Overview of the well testing method for injection wells [J]. Well Testing, 1998,7(1):69-73.

编辑 方志慧

**第一作者简介:**高杰,女,1988年出生,硕士,工程师,2014年毕业于西南石油大学油气田开发工程专业,现主要从事渗流力学、油气藏工程及试井分析等领域的科研工作。电话:022-59551921,13920857793;Email: gaojie29@cosl.com.cn。通信地址:天津市滨海新区塘沽海洋高新技术开发区海川路1581号A座304室,邮政编码:300459。