

# 渤海南部河流相油田四维试井分析技术

常会江, 陈晓明, 雷源, 吴穹, 翟上奇

中海石油(中国)有限公司天津分公司渤海石油研究院 天津 300459

通讯作者: Email: changhj2@cnooc.com.cn

项目支持: 中海石油(中国)有限公司综合科研项目“渤海双高油田挖潜关键技术研究”(YXKY-2018-TJ-04)

引用: 常会江, 陈晓明, 雷源, 等. 渤海南部河流相油田四维试井分析技术[J]. 油气井测试, 2020, 29(3): 71-78.

Cite: CHANG Huijiang, CHEN Xiaoming, LEI Yuan, et al. 4D well test analysis for fluvial oil fields in the Southern Bohai Sea [J]. Well Testing, 2020, 29(3): 71-78.

**摘要** 针对试井解释结果精度不高和多解性的问题, 结合渤海南部河流相油田特点, 以及生产井大多采用永久压力计生产的实际, 在常规试井解释模型的基础上, 基于空间拓展和时间推移尺度, 提出四维试井分析技术。根据多层渗流理论、压力生产史或同井不同时期压力恢复资料, 分别在空间上、时间上对试井模型进行约束。经对调整井 D24 井进行分析, 试井解释四层表皮系数分别为 19.9、20.0、15.1 和 14.2, 与实际地层严重污染相符, 建议酸化作业后, 该井日产量由  $30 \text{ m}^3$  提高至  $80 \text{ m}^3$ ; 应用该技术, 定向生产井 B27 井前后进行了 3 次时间推移试井, 通过调整井的实施, 新增原油地质储量  $48.41 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。该技术可有效判断井污染情况、储层边界情况和物性参数, 有效指导油水井措施及井网调整。

**关键词** 河流相油田; 四维试井; 多层渗流理论; 压力生产史; 储层污染; 井网调整

**中图分类号**: TE353      **文献标识码**: B      **DOI**: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2020.03.012

## 4D well test analysis for fluvial oil fields in the Southern Bohai Sea

CHANG Huijiang, CHEN Xiaoming, LEI Yuan, WU Qiongyuan, ZHAI Shangqi

Bohai Petroleum Research Institute, CNOOC Tianjin Company, Tianjin 300459, China

**Abstract**: To improve the accuracy and reduce the ambiguity of well test interpretation results, on a conventional well test interpretation model, a 4D well test analysis technology is proposed by expanding space and time ranges according to the characteristics of the fluvial oil fields and the fact that most production wells are producing with permanent pressure gauges in the Southern Bohai Sea. According to the multi-layer seepage theory, the pressure production history or pressure buildup data in different periods of the same well, the well test model is constrained in space and time respectively. In Well D24, the skin coefficients of four sections are 19.9, 20.0, 15.1 and 14.2, respectively. These results are consistent with the seriously polluted sections. After acidizing stimulation, the oil production of the well increased from  $30 \text{ m}^3$  to  $80 \text{ m}^3$ . Using this technology, the directional production well B27 has been tested three times. In the adjusted well, the geological oil reserves increased by  $48.41 \times 10^4 \text{ m}^3$ . This technology can effectively judge well pollution, reservoir boundary and physical properties, and effectively guide how to implement well stimulations and adjust well patterns.

**Keywords**: fluvial oil field; 4D well test; multi-layer seepage theory; pressure production history; reservoir pollution; well pattern adjustment

试井是评价油气藏的一项重要手段, 所获取的参数(地层压力、渗透率、表皮系数、边界状况等)能更为真实地表征油藏动态, 对开展生产调整具有指导意义<sup>[1-3]</sup>。张宏友等<sup>[4]</sup>利用试井解释结果计算动态储量进而指导油田调整井研究。林加恩<sup>[5-6]</sup>、孙勇<sup>[7]</sup>、宋黎明等<sup>[8]</sup>阐述了试井资料在渗流特征研究、增产措施评价、井间连通性、水驱效果评价、储层描述方面的应用。齐二坡等<sup>[9]</sup>、何琦<sup>[10]</sup>利用试井分析降低了地质模型的不确定性提高了油藏数值

模拟历史拟合精度。针对海上开发井少、井距大, 地质条件复杂, 静态资料对地质认识存在不确定性的特点<sup>[11-12]</sup>。赵春明等<sup>[13]</sup>、张建民等<sup>[14]</sup>和张利军等<sup>[15]</sup>采用反褶积试井解释方法有效克服了因测试时间短而较难认识油藏边界的问题, 从而加深了地质认识。胡勇<sup>[16]</sup>、王月杰等<sup>[17]</sup>利用全压力史拟合法降低了试井边界模型选择的不确定性, 扩大了测试获取信息量。陈晓明等<sup>[18-19]</sup>、张利军等<sup>[20]</sup>、吴浩君等<sup>[21]</sup>采用多层试井解释方法可以有效对多层

合采且储层平面存在变化的复合油藏进行评价,获取多层合采复合油藏各分层渗透率、表皮系数、地层压力、边界等参数信息。

上述学者都针对某一方面提出了不同的试井解释方法,在一定程度上减少了试井多解性的问题,但是方法仍然不够全面。渤海南部河流相油田主要含油层系分布在新近系明化镇组,为高孔高渗储层,具有单砂体厚度薄,井间储层横向变化快,纵向上油气水间互,平面上连通性差等特点<sup>[22]</sup>,单一试井分析技术在该类油田多解性非常突出。为了更加系统全面的进行试井分析,在总结目前现代试井分析方法的基础上,结合地质认识和开发现状,以及海上油田开发特点,提出了四维试井分析方法,即通过解析方法与数值方法相结合,并在空间和时间上进行约束,形成一套适用于油气井整个开发历程的四维试井分析技术。

## 1 四维试井理论基础

四维试井理论主要包括空间拓展试井和时间推移试井<sup>[23-24]</sup>,空间拓展试井主要基于多层渗流理论在空间上对试井模型进行约束,时间推移试井主

要是基于压力生产史或者同井不同时期压恢资料在时间上对试井模型进行约束。针对层间物性差异大而合采的生产井,简单采用单层模型解释,往往无法达到精细拟合,基于多层渗流理论进行空间拓展试井一般可以解决解释精度的问题;对于试井多解性的问题,随着生产井继续生产,试井解释模型会得到进一步检验,只有正确的模型才能得到整个压力史的精确拟合。因此,可以基于压力生产史在时间上进行约束,从而可以解决模型多解性的问题。进行四维试井技术分析主要步骤有以下几方面:①资料收集与处理,包括静态和动态资料;②对于多层合采井,特别是层间条件(储层边界、储层物性、生产状态)差异大的井,要深入分析各层差异,在单层模型的基础上,采用空间拓展试井模型提高试井的解释精度;③对于短时间压恢或者压降测试井而言,在压力及其导数双对数曲线拟合的基础上,充分利用已有压力历史资料对模型进行验证分析,降低试井的多解性;④在上述两步分析的基础上得到储层(边界、物性)信息和生产状态(表皮)的精细描述,从而指导油田相应措施与调整。详细过程如图1所示。

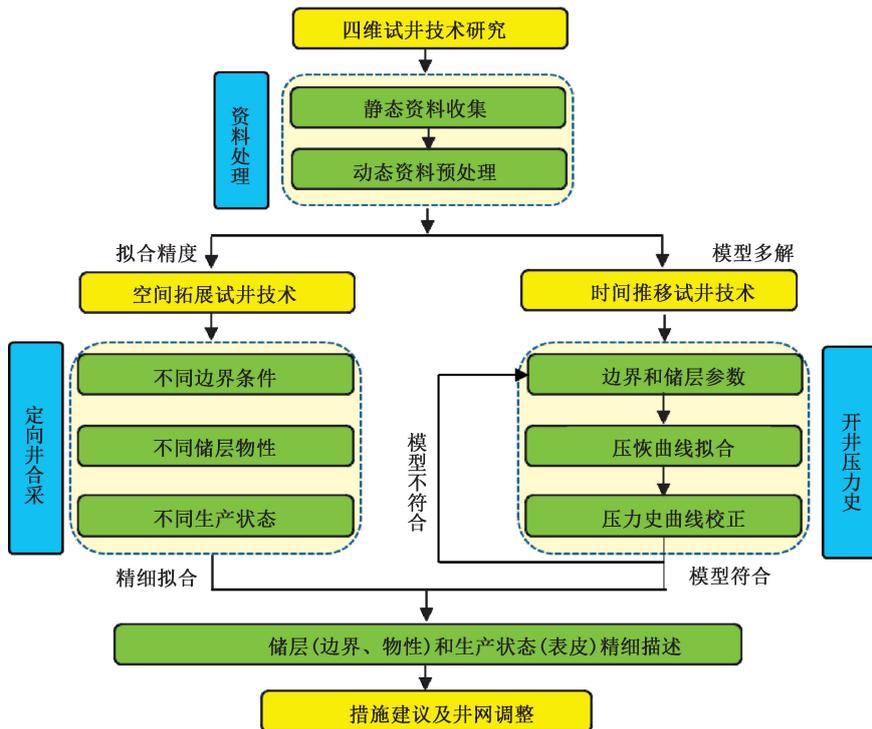


图1 四维试井分析技术思路

Fig. 1 Technical ideas 4D well test analysis

下面以两个试井设计的机理模型来详细阐述四维试井分析技术思路。

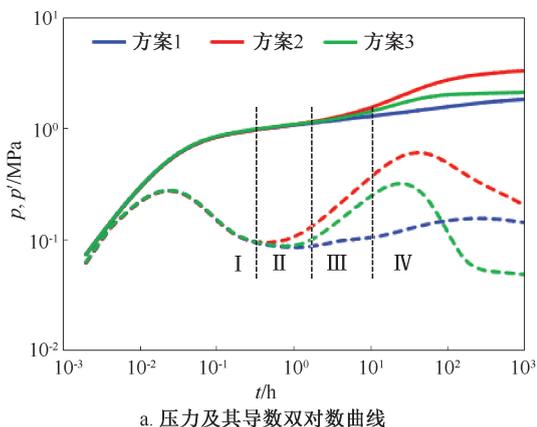
首先,对空间拓展试井技术来说,基于BZ油田

明化镇组储层物性及油层边界常见形态,在空间维度上建立多层试井模型,设置三种不同边界条件,见表1。

**表 1 不同边界条件下试井设计方案**  
**Table 1 Well test design schemes under different boundary conditions**

方案	储层 1		储层 2		储层 3	
	边界条件	边界距离/m	边界条件	边界距离/m	边界条件	边界距离/m
方案一	无限大	-	平行断层	100	圆形定压	200
方案二	平行断层	50	圆形封闭	100	圆形定压	200
方案三	无限大	-	圆形封闭	100	圆形定压	200

根据上述三种方案的边界条件,得到空间拓展试井模型理论图版,如图 2 所示。从该图版可知,与单层模型不同,多层模型的压力变化主要反映了四个流动阶段:①第 I 阶段是早期井筒储集合表



皮相应阶段。首先压力及其导数曲线重合成 45° 的直线,随后压力导数曲线出现“驼峰”,峰值的高低取决于井筒平均表皮系数。②第 II 阶段是系统径向流动阶段。该阶段发生在边界响应之前,压力导数曲线呈现对应数值 0.5 的水平直线段。③第 III 阶段是单一边界响应阶段。该阶段反映物性较好储层的压力波传导了边界,压力导数曲线的形态呈现上抬或下降的趋势,具体形态与边界类型有关。④第 IV 阶段是边界混合响应阶段。该阶段出现了“驼峰”和“凹子”的特征,该阶段的压力导数曲线的最终形态主要受储层的整体能量控制。

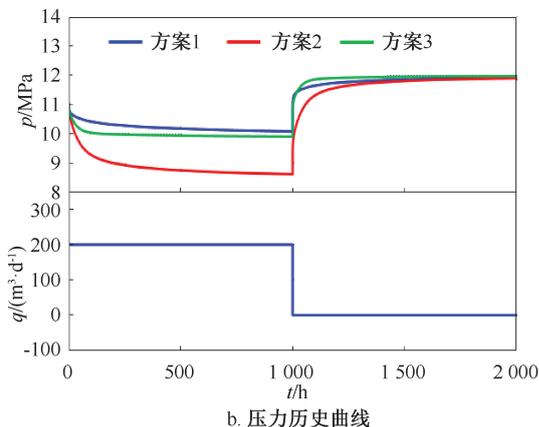


图 2 空间拓展试井模型理论图版(以三层为例)

Fig. 2 Theoretical charts of the space-expanded well test model (Three layers)

其次,对时间拓展试井技术来说,分别设置三种不同的边界,即方案 1(无限大边界)、方案 2(平行断层边界)和方案 3(圆形封闭边界)进行试井设计,试井模型理论图版如图 3 所示。可以看出,边界

条件不同,压力及其导数曲线在较短压力恢复内区分不够明显。但随着生产历史的延长,压力历史曲线区分越来越明显。因此,在试井解释过程中很有必要进行压力历史曲线校正。

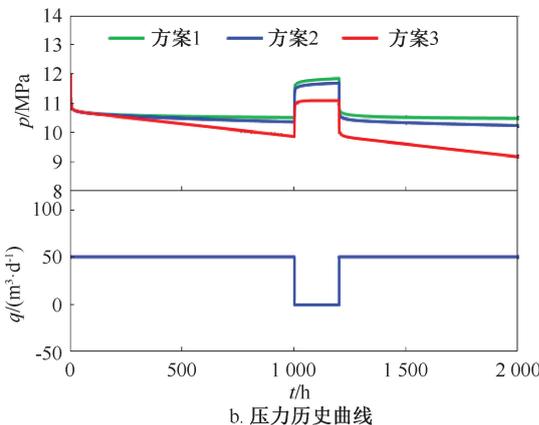
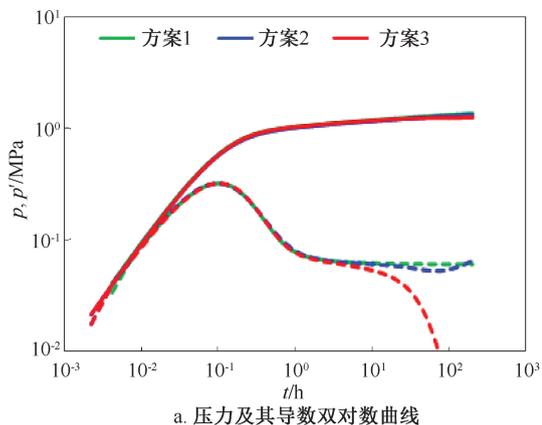


图 3 时间拓展试井模型理论图版

Fig. 3 Theoretical chart of the time-expanded well test model

实际油田开发过程中是在空间维度上随着时间不断变化的过程。在进行试井解释过程中,应根据现有地质油藏认识,选择合适的四维试井理论。

首先选择单独考虑空间维度或者时间维度相对简单的试井解释模型,在采用单一维度下试井解释难以解释存在问题的时候,应同时考虑两个维度的试

井模型,也就是本文提出的四维试井分析技术。这样,可以有效降低试井模型的多解性,提高试井解释精度,从而有利于地质油藏的精细认识,可以为后续相关工作决策提供技术支持。

## 2 实例分析

四维试井分析方法在渤海南部河流相油田进行应用,主要是在井周围储层污染判断及储层精细描述等方面进行现场应用,有效指导了油田高效开发。

### 2.1 在措施建议中的应用

D24井为渤中34油田一口调整井,其生产层位为明化镇组,钻后设计配产日产油 $75\text{ m}^3$ ,投产实际产能仅为钻前设计的 $1/3$ ,日产油不足 $20\text{ m}^3$ 。和

周围其他生产井相比,D24井产液强度低、流压下降幅度大。为分析该井产能是储层物性差还是存在污染导致的原因,于2015年4月15日进行了关井压力恢复测试。

根据砂体展布特征及D24井井位分布图,首先选择“定向井+均质油藏+一条断层”单层解析模型对该井进行解释,拟合曲线如图4所示。从双对数拟合曲线拟合情况来看,无法拟合压力导数曲线出现的“凹子”,从参数的解释情况来看储层渗透率仅为 $20\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ,表皮因子为 $-1.73$ ,即该储层为低渗透储层,这与明化镇组的地质认识(储层渗透率大约在 $100\times 10^{-3}\sim 5\,000\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ )是明显不符的。然后,分析D24井钻遇砂体的横向发育情况,如图5所示。

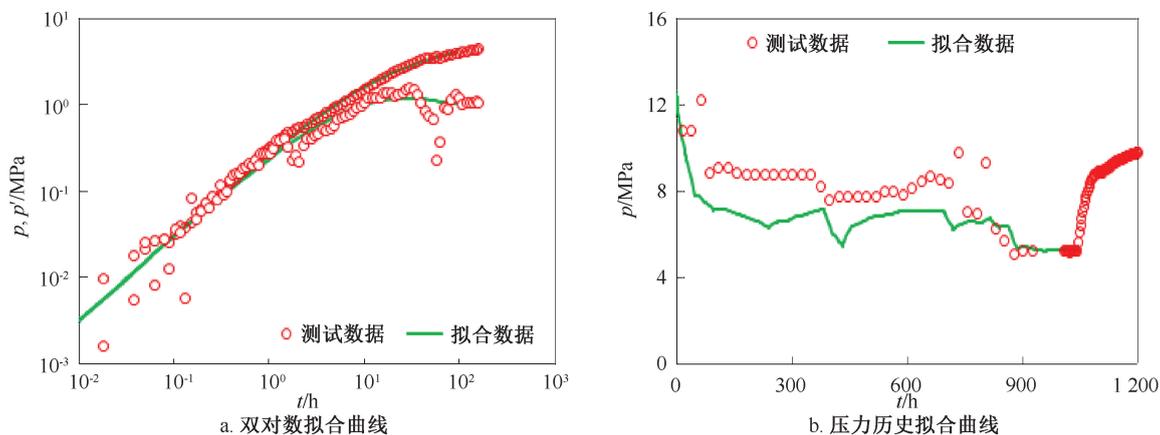


图4 D24井试井解释曲线(单层模型)

Fig. 4 Well test interpretation curve of Well D24 (A single-layer model)

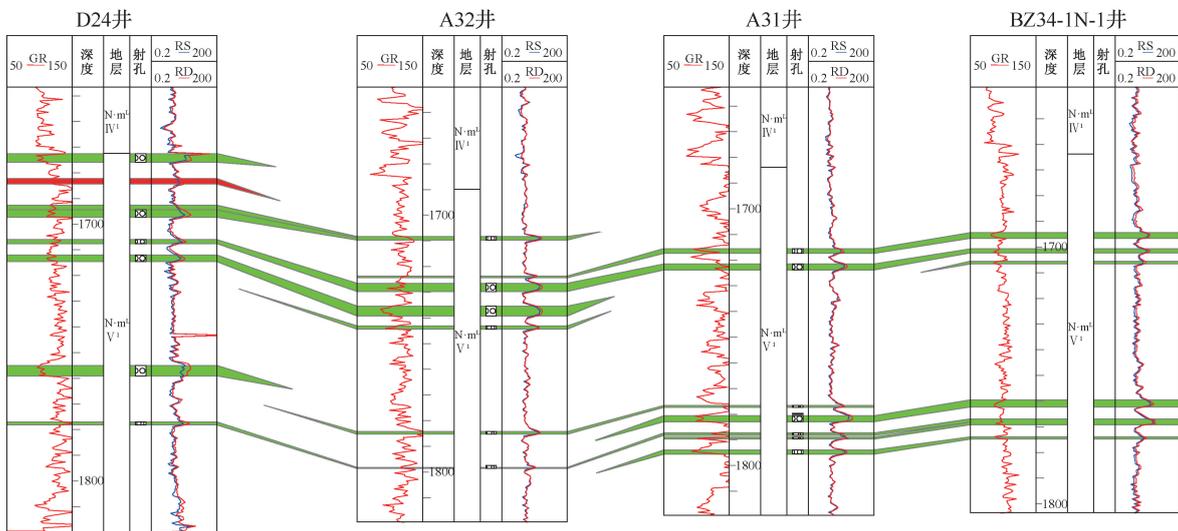


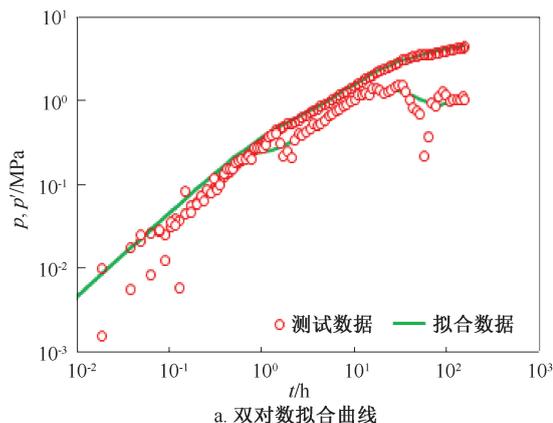
图5 过D24井-A32井-A31井-BZ34-1 N-1井连井剖面图

Fig. 5 Section across Wells D24-A32-A31-BZ34-1 N-1

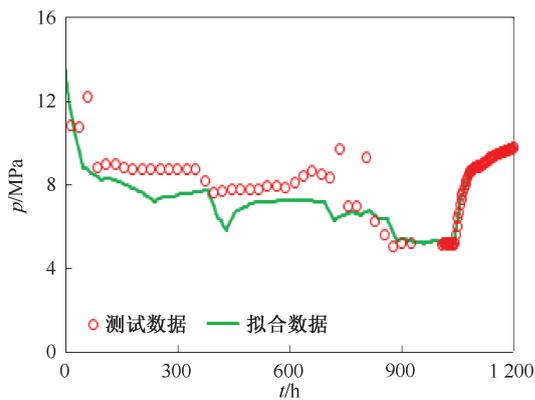
从图5可以看出,D24井主要钻遇四套砂体,

分别为1642、1680、1750和1770砂体,其中1642

与 1750 砂体为岩性尖灭发育。根据图 2 空间拓展试井模型理论图版来看,当储层边界条件不同时,单层模型压力导数曲线与空间拓展试井模型的压力导数曲线在中后期差异较大,而且通常不能满足解释要求,需要在空间上进行拓展试井解释。



a. 双对数拟合曲线



b. 压力历史拟合曲线

图 6 D24 井试井解释曲线拟合图(多层模型)

Fig. 6 Fitted well test interpretation curve of Well D24 (A multilayer model)

表 2 D24 井试井解释参数

Table 2 Well test interpretation parameter of Well D24

层目	储层模型	表皮因子	各层渗透率/ ( $10^{-3} \mu\text{m}^2$ )	边界距离/ m	平均渗透率/ ( $10^{-3} \mu\text{m}^2$ )
1642	圆形封闭	19.9	200.0	108	160
1680	一条断层	20.0	96.5	148	
1750	圆形封闭	15.1	97.3	95	
1770	一条断层	14.2	102.0	203	

从参数的解释情况看,四个砂体的渗透率分别为  $200.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、 $96.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、 $97.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  和  $102.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,属于中渗透储层,与明化镇组的地质认识相符合;表皮系数分布为 19.9、20.0、15.1 和 14.2,认为该井受到了严重的污染,建议对该井进行酸化作业。

该井于 2016 年 9 月进行微压裂和酸压作业,日产油由  $30 \text{ m}^3$  提高至  $80 \text{ m}^3$ ,实现了产量翻番,达到了钻前设计,同时也证明了钻前对于该区域的地质油藏认识是正确的。

## 2.2 在滚动挖潜中的应用

B27 井为渤中 28 油田的一口定向生产井。该井于 2015 年 9 月 1 日投产,1 个月 after 日产油由  $200 \text{ m}^3$  递减到  $100 \text{ m}^3$ ,仅为初期的一半。为判断该井生产能力及进一步认识该井周围储层情况,2015 年 10 月 20 日对该井进行压力恢复测试。

### 2.2.1 试井分析

根据地震解释资料,B27 井右侧存在断层,但其

因此,根据四个砂体展布特征选择分布,选择“圆形封闭”、“一条断层”、“圆形封闭”和“一条断层”边界条件,采用多层解析模型对该井进行解释。通过不断调整各层相关参数,使得双对数曲线及压力历史曲线吻合程度均较高,试井解释曲线如图 6 所示,试井解释参数见表 2。

封堵程度不确定。根据该井周围砂体展布特征,首先分别对该井选用“定向井+均质油藏+一条断层”、“定向井+均质油藏+矩形边界”、“定向井+径向复合油藏”,以及数值模型共 4 种模型进行试井分析,压力及其导数曲线如图 7 所示。

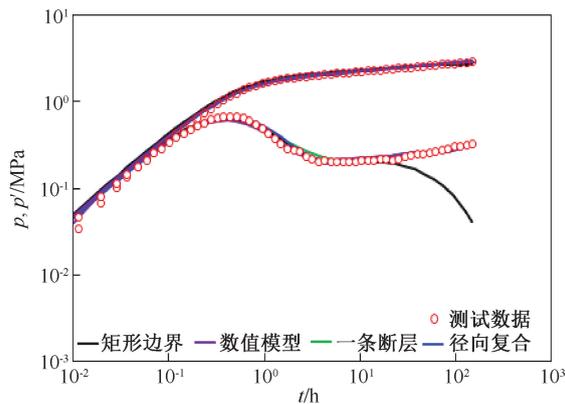


图 7 B27 井压力及其导数双对数曲线拟合图

Fig. 7 Fitted log-log curves of pressure and its derivative in Well B27

从压力及其导数双对数曲线拟合图来看,只有矩形边界模型拟合效果较差。由于双对数曲线拟合结果多解性极强,无法确定储层右侧的是否有断层分布。

根据图 3 时间拓展试井模型理论图版分析,这种情况下有必要在时间维度上进行约束分析。故第 1 次时间推移,借助压力历史拟合情况,判断模型精度,解释结果如图 8 所示。结合压力及其导数双对数曲

线和压力史曲线拟合结果来看(图7、图8),一条断层模型及矩形边界模型与实际情况不符,但是仍然有两个模型拟合较好,故储层右侧断层仍不落实。

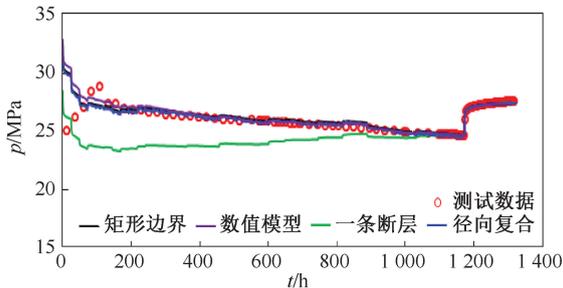


图8 B27井第1次压力历史曲线拟合图

Fig. 8 Fitted diagram of the first pressure history curve of Well B27

油井开井生产,压力数据随之增加,第2次时间推移,不同模型对压力的预测与实际值差别变大,如图9所示。初步认为,数值模型(右侧存在渗透性断层)更符合实际。

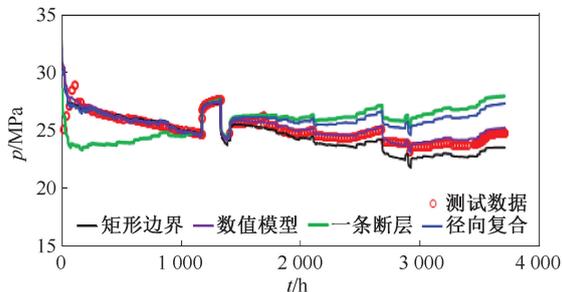


图9 B27井第2次压力历史曲线拟合图

Fig. 9 Fitted diagram of the second pressure history curve of Well B27

为验证上述判断,2016年3月再次关井测试,采用数值模型解释,双对数与压力史拟合精度较高(图10)。随着油井再次开井,第3次时间推移,预测值与实际值吻合,充分说明了数值试井建立的模型是正确的。储层采用数值模型,试井解释参数为:井筒储集系数  $1.3 \text{ m}^3/\text{MPa}$ ,表皮系数-2,渗透率  $110 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,渗漏系数0.01。

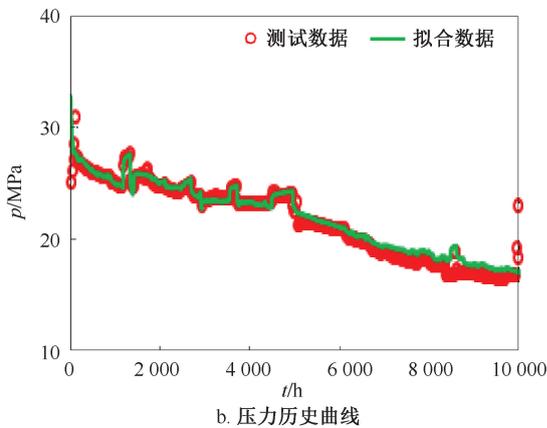
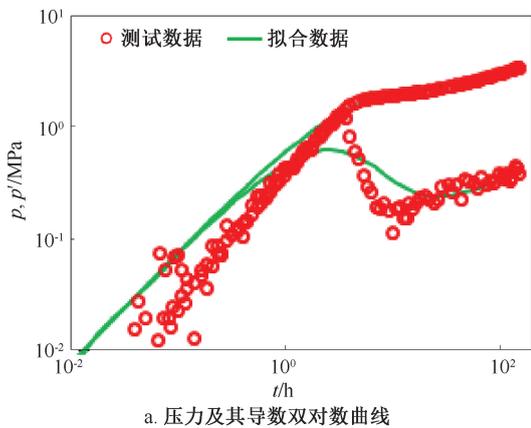


图10 B27井试井解释曲线拟合图(数值试井)

Fig. 10 Fitted well test interpretation curve of Well B27 (Numerical well testing)

2.2.2 试井解释结果应用

从解释结果来看,该砂体外界能量补充有限,

建议增加一口注水井改变该砂体的开发方式,井位图如图11所示。

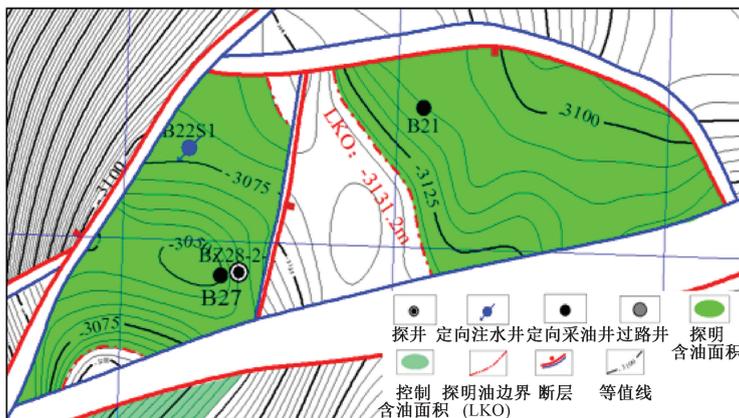


图11 调整井B22S1井及B21井井位图

Fig. 11 Locations of adjusted wells B22S1 and B21

2017年4月新钻注水井B22S1井,对采油井B27井进行能量补充。B22S1井投注半年后,B27井地层压力回升3 MPa,B27井的开发形势逐步好转。同时也认为,该砂体东侧具有一定潜力。2017年9月实施开发评价B21井。

B21井投产初期,日产油 $60\text{ m}^3$ ,也证实了该区域有一定的潜力。根据调整井B22S1和B21两口井实施后砂体动态响应来看,验证了B27井试井分析结果,认为该井东侧断层具有一定渗透性、东侧有能量供给的认识是正确的。通过调整井B21井的实施,新增原油地质储量 $48.41\times 10^4\text{ m}^3$ 。

### 3 结论

(1)四维试井分析技术主要在空间维度和时间维度上对试井解释模型进行约束,可以解决试井解释精度和模型多解性的问题,使得拟合吻合度更高,解释参数更加合理。

(2)在进行试井解释过程中,应根据现有地质油藏认识,首先选择单独考虑空间维度或者时间维度相对简单的试井解释模型,在采用单一维度下试井解释难以解释存在问题的时候,应同时考虑两个维度的试井模型。

(3)本文提出的四维试井分析技术可以有效判断井污染情况、储层边界情况和物性参数,从而有效指导油水井措施及井网调整。实践应用表明,该技术在渤海油气田具有较好的应用效果和前景。

致谢:感谢中海油天津分公司渤海石油研究院同意本文公开发表;感谢各位领导的大力支持。

#### 参考文献

[1] 姜平,孙雷,杨志兴,等. 数值试井技术在南海油气田中的应用[J]. 天然气工业,2013,33(4):52-55.  
JIANG Ping, SUN Lei, YANG Zhixing, et al. Application of numerical well-testing technology in oil/gas fields in South China Sea [J]. Natural Gas Industry, 2013,33(4):52-55.

[2] 周克万,黄炳光,罗志锋,等. 数值试井与不稳定试井结合计算物性参数[J]. 西南石油大学学报(自然科学版),2011,33(3):141-144.  
ZHOU Kewan, HUANG Bingguang, LUO Zhifeng, et al. Combination of numerical well test and unstable well test for calculation of physical parameter [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2011,33(3):141-144.

[3] 雷源,张建民,常会江,等. 数值试井技术在渤海河流相油田的应用[J]. 油气井测试,2015,24(6):14-17.

LEI Yuan, ZHANG Jianmin, CHANG Huijiang, et al. Application of numerical well testing technology in Fluvial Oilfield of Bohai Sea [J]. Well Testing, 2015,24(6):14-17.

[4] 张宏友,王月杰,马奎前,等. 应用永久式井下压力计降压曲线计算油藏动态储量[J]. 油气井测试,2010,19(3):31-32.  
ZHANG Hongyou, WANG Yuejie, MA Kuiqian, et al. Calculating dynamic reserves of reservoirs with pressure drawdown curve measured by permanent downhole pressure gauge [J]. Well Testing, 2010,19(3):31-32.

[5] 林加恩. 油气井试井资料的价值及作用[J]. 油气井测试,2016,25(4):38-40,43.  
LIN Jia'en. Value and function of oil and gas well testing data [J]. Well Testing, 2016,25(4):38-40,43.

[6] 林加恩,何辉,韩章英. 未出现径向流的试井典型曲线及其分析方法[J]. 石油学报,2017,38(5):562-569.  
LIN Jia'en, He Hui, Han Zhangying. Typical curves and their analysis method for well test data without radial flow response [J]. Acta Petrolei Sinica, 2017,38(5):562-569.

[7] 孙勇. 试井资料在油层动用状况及措施效果评价中的作用[J]. 油气井测试,2012,21(3):26-28.  
SUN Yong. Effect of well test data on used condition of oil reservoir and evaluation of measure effectiveness [J]. Well Testing, 2012,21(3):26-28.

[8] 宋黎明,张晓岗,李广轩,等. 基于试井理论的水平井试井储层描述[J]. 油气井测试,2014,23(5):36-39.  
SONG Liming, ZHANG Xiaogang, LI Guangxuan, et al. Description based on well testing theory of horizontal well reservoir [J]. Well Testing, 2014,23(5):36-39.

[9] 齐二坡,洪鸿,田婉玲,等. 数值试井技术在复杂气井解释中的应用[J]. 天然气工业,2007,27(5):97-99.  
QI Er'po, HONG Hong, TIAN Wanling, et al. Application of numerical well test analysis in complex gas wells [J]. Natural Gas Industry, 2007,27(5):97-99.

[10] 何琦. 试井分析在油气藏数值模拟中的应用[J]. 天然气勘探与开发,2005,28(1):28-30.  
HE Qi. Application of well test analysis on reservoir numeral simulation [J]. Natural Gas Exploration & Development, 2005,28(1):28-30.

[11] 胡光义,陈飞,范廷恩,等. 基于复合砂体构型样式的河流相储层细分对比方法[J]. 大庆石油地质与开发,2017,36(2):12-18.  
HU Guangyi, CHEN Fei, FANG Ting'en, et al. Subdividing and comparing method of the fluvial facies reservoirs based on the complex sandbody architectures [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2017,36(2):12-18.

[12] 张显文,胡光义,范廷恩,等. 河流相储层结构地震响应分析与预测[J]. 中国海上油气,2018,30(1):110-117.

- ZHANG Xianwen, HU Guangyi, FAN Ting'en, et al. Seismic response analysis and prediction for fluvial reservoir architecture [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2018, 30(1):110-117.
- [13] 赵春明,张迎春,戴卫华,等. 反褶积试井方法在渤海油田的应用[J]. *中国海上油气*, 2010, 22(2):111-113, 118.
- ZHANG Chunming, ZHANG Yingchun, DAI Weihua, et al. Application of deconvolution well test method in Bohai Oilfield [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2010, 22(2):111-113, 118.
- [14] 张建民,阳晓燕,张宏友,等. 反褶积试井技术在渤海复杂油气藏中的应用[J]. *油气井测试*, 2015, 24(3):21-23.
- ZHANG Jianmin, YANG Xiaoyang, ZHANG Hongyou, et al. Application of deconvolution well test interpretation in Bohai complex oil & gas reservoir [J]. *Well Testing*, 2015, 24(3):21-23.
- [15] 张利军,田冀,朱国金,等. 反褶积试井在海上短时试井中的应用[J]. *油气井测试*, 2015, 24(4):21-23.
- ZHANG Lijun, TIAN Ji, ZHU Guojin, et al. Application of deconvolution well testing in short time well test on offshore well [J]. *Well Testing*, 2015, 24(4):21-23.
- [16] 胡勇. 全压力史拟合法的应用[J]. *油气井测试*, 2000, 9(2):32-35.
- HU Yong. Application of all pressure history match approach [J]. *Well Testing*, 2000, 9(2):32-35.
- [17] 王月杰,张宏友,马奎前,等. 全压力史拟合在现代试井解释中的应用[J]. *油气井测试*, 2011, 20(6):26-27, 30.
- WANG Yuejie, ZHANG Hongyou, MA Kuiqian, et al. Application of the fitting in the whole history pressure in modern well test interpretation [J]. *Well Testing*, 2011, 20(6):26-27, 30.
- [18] 陈晓明,张建民,王月杰,等. 海上油田多层合采井试井模型研究与应用[J]. *特种油气藏*, 2017, 24(1):119-123.
- CHEN Xiaoming, ZHANG Jianmin, WANG Yuejie, et al. Development and application of well-test models for wells deployed for joint development of multiple layers in offshore oilfields [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2017, 24(1):119-123.
- [19] 王月杰,陈晓明. 多层合采试井模型适用性研究及矿场实例分析[J]. *中国海上油气*, 2017, 29(2):78-86.
- WANG Yuejie, CHEN Xiaoming. Applicability study and case analysis of multi-layer commingled production well test model [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2017, 29(2):78-86.
- [20] 张利军,郑伟,王帅,等. 厚层强非均质油藏部分射开试井曲线特征及影响因素[J]. *油气井测试*, 2018, 27(4):1-6.
- ZHANG Lijun, ZHENG Wei, WANG Shuai, et al. Characteristics of well testing curves and influencing factors for thick and strong heterogeneous reservoirs with partially perforated [J]. *Well Testing*, 2018, 27(4):1-6.
- [21] 吴浩君,姜永,王迪. 多层复合油藏试井解释模型建立[J]. *油气井测试*, 2019, 28(3):1-6.
- WU Haojun, JIANG Yong, WANG Di. Foundation of well test interpretation model for composite reservoirs with multi-layers [J]. *Well Testing*, 2019, 28(3):1-6.
- [22] 马栋,赵汉卿,杨明,等. 渤海河流相油田剩余油形成与分布研究[J]. *复杂油气藏*, 2018, 11(4):46-50.
- MA Dong, ZHAO Hanqing, YANG Ming, et al. Formation and distribution of remaining oil in fluvial facies reservoirs in Bohai Oilfield [J]. *Complex Hydrocarbon Reservoirs*, 2018, 11(4):46-50.
- [23] 吴洪彪,刘立明,陈钦雷,等. 四维试井理论研究[J]. *石油学报*, 2003, 24(5):57-62.
- WU Hongbiao, LIU Liming, CHEN Qinlei, et al. Theoretical study on four-dimension well testing [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2003, 24(5):57-62.
- [24] 陈钦雷,吴洪彪,刘立明. 四维试井理论及应用[M]. 北京:石油工业出版社,2006:101-106.

编辑 王军

**第一作者简介:**常会江,男,1987年出生,硕士,工程师,2013年毕业于中国石油大学(华东)油气田开发工程专业,主要从事油气田开发工程相关研究工作。电话:022-65000902; Email:changhj2@cnooc.com.cn。通信地址:天津市滨海新区海川路2121号渤海石油管理局B座1419,邮政编码:300459。