

基于井间干扰模型的气井压力恢复数值试井技术

甘笑非¹, 易劲¹, 欧家强², 袁权¹, 邓庄¹, 颜平³

- 1. 中国石油西南油气田公司川中油气矿 四川遂宁 629000
- 2. 中国石油西南油气田分公司川中北部采气管理处 四川遂宁 629000
- 3 成都理工大学能源学院 四川成都 610059

通讯作者: Email: yanpingcdut@163.com

引用: 甘笑非, 易劲, 欧家强, 等. 基于井间干扰模型的气井压力恢复数值试井技术[J]. 油气井测试, 2022, 31(3): 9-15.

Cite: GAN Xiaofei, YI Jin, OU Jiaqiang, et al. Numerical build-up well test technology for gas wells based on inter-well interference model[J]. Well Testing, 2022, 31(3): 9-15.

摘要 传统的压力恢复试井解释难以正确甄别邻井的影响。为了认识井间干扰对压力恢复试井曲线的影响, 将数值试井技术应用于压力恢复试井解释中, 在测试前和测试中, 基于不同的邻井工作制度建立相应的数值试井理论模型, 得到邻井干扰引起的测试井压力恢复试井曲线的变化规律, 并分析导致曲线变化的原因。研究表明: 在一口井进行试井测试时, 邻井降低产量(或关井)会导致压力导数曲线上翘, 与断层的压力恢复试井响应类似; 邻井提高产量, 会引起压力导数曲线下掉, 与定压边界的压力恢复试井响应类似; 为减小邻井干扰对测试井的影响, 测试井进行压力恢复测试时, 邻井应尽量保持原有的工作制度。该技术可为油气田开发提供更为准确可靠的依据。

关键词 气井; 井间干扰; 数值试井; 试井分析; 压力恢复曲线; 工作制度; 外边界; 实例分析

中图分类号: TE353 **文献标识码:** B **DOI:** 10.19680/j.cnki.1004-4388.2022.03.002

Numerical build-up well test technology for gas wells based on inter-well interference model

GAN Xiaofei¹, YI Jin¹, OU Jiaqiang², YUAN Quan¹, DENG Zhuang¹, YAN Ping³

- 1. Central Sichuan Oil and Gas District, PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Suining, Sichuan 629000, China
- 2. Central-North Sichuan Gas Production Management Office, PetroChina Southwest Oil and Gas Field Company, Suining, Sichuan 629000, China
- 3. School of Energy, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China

Abstract: Traditional build-up well tests cannot correctly identify the influence of offset wells. To understand how inter-well interference affects the build-up well test curve, the numerical well test technology was incorporated into the build-up well test. Before and during the test, specific numerical well test theoretical model was established depending on the working systems of offset wells, the variation of the build-up well test curve of the tested well caused by the interference from the offset wells was obtained, and the reasons for the curve change were analyzed. The results show that during well test of a well, the production decrease (or shut-in) of the offset well leads to upwarp of the pressure derivative curve, which is similar to the response of fault in build-up well test, and the production increase of the offset well causes the downwarp of the pressure derivative curve, which is similar to the response of the constant pressure boundary in build-up well test. To minimize the interference of the offset well to the tested well, it is recommended to keep the offset well working with original system when the build-up well test is conducted on the tested well. The proposed technology can provide a more accurate and reliable basis for oil and gas field development.

Keywords: gas well; inter-well interference; numerical well test; well test analysis; build-up curve; working system; outer boundary; case study

试井分析是一种常用的动态分析方法。近年来, 随着越来越多的复杂油气藏投入开发, 基于渗流方程解析解的常规试井分析方法存在一定的局限性, 例如: ①对于多相流动问题, 一般将其简化为单相流情形; ②对于非均质问题, 只能简化为径向

复合或者线性复合; ③对于复杂边界问题, 其渗流方程已难以建立和求解, 只能简化为简单规则的边界形状。除了上述 3 种影响试井解释精度的因素外, 井间干扰也是不可忽略的。油气藏全面投产, 随着各井的持续生产, 其井控区域越来越大, 会

出现井间干扰现象^[1]。在测试井的关井压力恢复曲线上,表现为压力导数曲线后期下掉或者上翘^[2]。传统的压力恢复试井解释技术是建立在单井的不稳定渗流方程解析解基础上的一种分析方法^[3-5],在处理多井干扰问题时,通常采用镜像反映法进行简化处理^[6-7]。当井网形式不规则时,这种简化方法的分析误差较大^[8-9]。

数值试井理论提供了一种在复杂储渗介质中分析渗流规律的方法。Puchyr^[10]首先提出了将数值模拟方法应用在试井分析当中,并成功完成了实例分析。对于多相流动问题,刘立明等^[11]提出了数值试井技术能够很好的用于多相流试井问题;徐文斌^[12]针对边水的影响,利用数值试井的方法得到井底不稳定压力的数值解;杨勇等^[13]针对底水的影响,研究了裂缝性礁灰岩底水油藏试井解释问题。对于非均质问题,王新海等^[14]建立了含有大尺度裂缝和溶洞的油藏数值试井模型,解决了多重介质缝洞型油藏中介质“重数”非均质的问题。对于复杂边界问题,李爱青等^[15]将数值试井技术应用于复杂边界油藏的试井分析中,更加直观和准确地描述复杂边界油藏。

杨景海^[16]总结了前人的研究成果,归纳出数值试井的应用流程,但尚无专门文献讨论井间干扰对试井曲线的影响规律。因此,当测试井可能受井间干扰时,在试井解释中应解决以下问题:(1)如何甄别测试数据是否受邻井干扰?(2)在测试井测试时,如何减小邻井干扰的影响?(3)当测试数据受邻井干扰后,应如何开展数值试井分析,进而反映出储层真实的渗流特征?针对以上问题,本文基于前人的研究成果,先总结了储层非均质性以及边界对压力恢复试井曲线的影响。利用 PEBI 网格建立了气藏的数值试井模型,开展邻井干扰对气井压力恢复试井曲线的影响规律分析。

1 储层非均质性以及边界对压力恢复试井曲线的影响

在压力恢复试井过程中,储层非均质性以及边界都会对气井的压力恢复产生影响,因此储层非均质性以及边界都能够直观的反映在压力恢复试井曲线上。

1.1 储层非均质性对单井压力恢复试井的影响

对于无限大均质储层,当一口井进行压力恢复试井时,其压力恢复导数曲线后期应该是一条 0.5

水平线。但是如果储层为非均质的,其压力恢复试井曲线会产生变化,具体表现在:如果储层物性变差,试井曲线将会发生上翘(见图 1)。反之,试井曲线将会下掉。

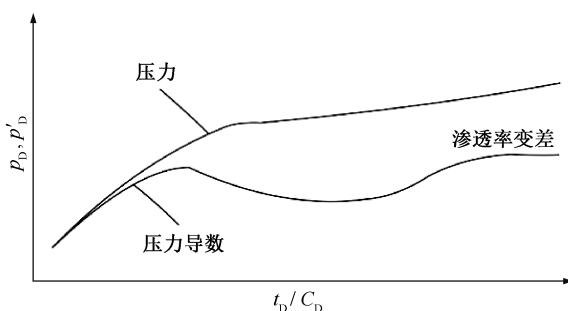


图 1 径向复合储层试井曲线示意图

Fig. 1 Well test curve of radial composite reservoir

1.2 边界对单井压力恢复曲线的影响

单井的压力恢复试井通常包含三个流动阶段:早期流动阶段、中期流动阶段和晚期流动阶段^[17]。其中边界主要影响的是晚期流动阶段。不同的边界条件,如封闭边界、断层、恒压边界,会对单井压力恢复试井曲线造成不同的影响^[18]。

对于封闭边界,当测试井生产一段时间后,关井进行压力恢复测试,压降漏斗逐渐消失,最终地层各点恢复到一个稳定压力,此时边界上压力不再随时间变化。在双对数曲线上,压力曲线出现一条水平直线,压力导数曲线则下降趋近于 0(见图 2)。

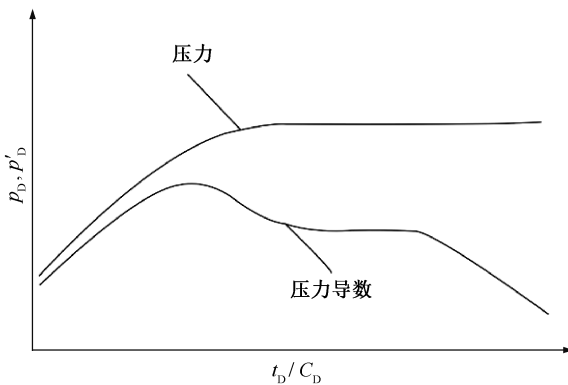


图 2 封闭边界试井曲线示意图

Fig. 2 Closed boundary well test curve

对于气藏来说,具有活跃的边水或底水,或者充足注气,都可以形成定压边界。对于定压边界的测试井,关井到了压力恢复后期,气藏各点压力将恢复到原始地层压力。其双对数曲线形态与封闭边界类似,压力曲线出现一条水平直线,压力导数曲线则下降趋近于 0。

均质储层中的断层,也会引起曲线的变化,在

双对数曲线上,压力导数曲线上翘(见图 3)。

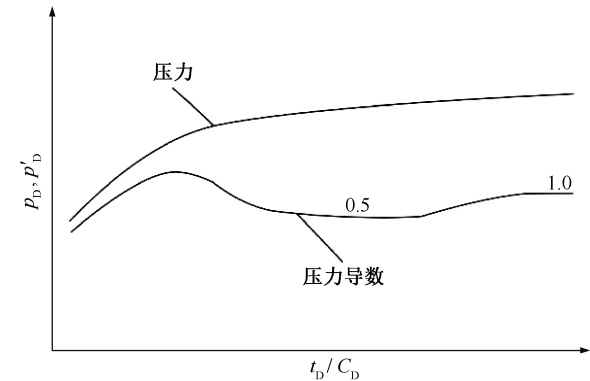


图 3 单一断层试井曲线示意图
Fig. 3 Well test curve of single fault

2 邻井干扰对压力恢复试井曲线的影响

在传统的压力恢复试井解释模型中,只针对地层中一口测试井建立渗流模型,进而完成数学方程的求解。在讨论邻井的影响时,只能采用压力叠加原理作简单定性分析,没有考虑到在测试期间,邻井工作制度可能会发生变化,因此不能正确认识井间干扰对压力恢复试井曲线的影响规律。在本次分析中,采用数值试井模型开展邻井干扰分析。

2.1 邻井干扰模型构建

目前数值试井技术已由单纯的理论研究发展到了商业应用的阶段,代表性的试井解释软件,如 EPS 公司的 Pansystem 软件;KAPPA 公司的 Saphir 软件;Schlumberger 公司的 Weltest 等近年来均推出数值试井模块,大大扩展了试井解释分析的应用领域和解释精度^[19~20]。

本文利用 Saphir 试井分析软件,建立五口井的数值试井模型,其中 A 井为测试井(见图 4),旁边 4 口井(C1~C4)为邻井。

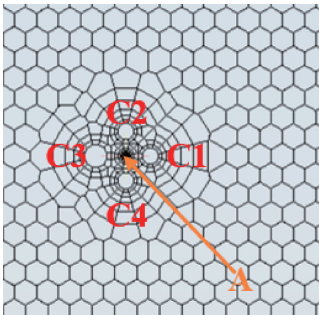


图 4 概念模型井位图(Pebi 网格)

Fig. 4 Well location map of conceptual model (PEBI grid)

建模相关参数如表 1 所示,模型的边长远大于 A 井与邻井之间的距离,避免了边界对试井曲线的干扰。五口井均以 $10\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 的产量生产 8 760 h,然后 A 井关井进行压力恢复测试。设计几种 C1~C4 井的工作制度并进行计算,总结邻井对 A 井的试井曲线的影响。

表 1 数值试井模型参数

Table 1 Parameters of numerical well test model	
参数	取值
模型边长/m	15 240
模型厚度/m	10
孔隙度/%	10
渗透率/mD	33
井间距离/m	1 000

根据测试井关井时邻井的状态,可以将邻井工作制度分开井和关井两类。再根据测试期间邻井的状态,进一步将邻井工作制度划分为 6 类见表 2。

表 2 邻井的工作制度变化

Table 2 Production principle changes of adjacent wells		
测试井关井时,邻井的状态	测试期间,邻井的状态	模式编号
邻井关井	一直保持关井	1
	中途开井	2
	保持原工作制度生产	3
邻井继续生产	中途调整工作制度	4
	提高产量	5
	降低产量	6
	中途关井	6

2.2 邻井干扰对压力恢复试井曲线的影响规律

参照邻井的不同工作制度,模拟邻井干扰对测试井的试井曲线的影响。

(1)测试井关井时,邻井为关井状态,对 A 井试井曲线的影响,结果见图 5。

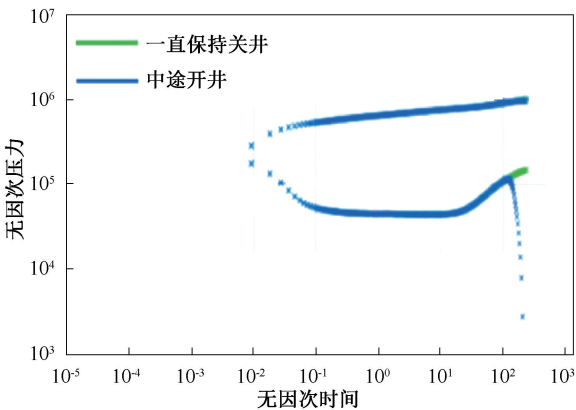


图 5 A 井的双对数曲线(测试井关井时邻井为关井状态)
Fig. 5 Double logarithm curve of well a (when the test well is shut in, the adjacent well is shut in)

测试井关井时,如果邻井为关井状态,从表 2 可以发现,主要包含模式 1 和模式 2 两种邻井工作制度。从模拟结果可以发现:①如果邻井一直关井(模式 1),会引起 A 井的导数曲线上翘,表现类似封闭断层特征。②如果邻井中途开井(模式 2),会引起 A 井的导数曲线先上翘,后下降。

(2)测试井关井时,邻井继续生产,对 A 井试井曲线的影响结果见图 6。

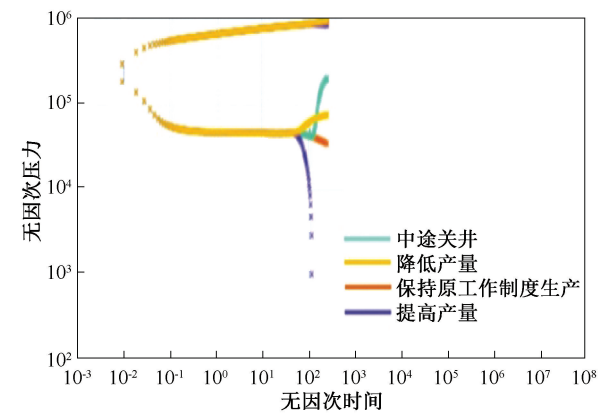


图 6 A 井的双对数曲线(测试井关井时邻井为开井状态)
Fig.6 Double logarithmic curve of well a (when the test well is shut in, the adjacent well is open)

测试井关井时,如果邻井为开井状态,从表 2 可以发现,主要包含模式 3 到模式 6 共 4 种邻井工作制度。从模拟结果可以发现:①如果邻井的工作制度保持不变(模式 3),会引起 A 井的导数曲线下降,类似于定压(封闭)边界特征。②如果邻井提高产量(模式 4),同样会引起 A 井的导数曲线下降,但是幅度远大于保持工作制度不变。③如果邻井降低产量(模式 5),也会导致 A 井的导数曲线上翘,类似模式 1 的邻井关井,只是上翘幅度变缓。④如果邻井中途关井(模式 6),会导致 A 井的导数曲线先下降,后上翘。

通过以上分析,为了尽可能降低邻井对测试井测试数据的干扰,在测试时,邻井应当尽量保持原工作制度,不应该关井。

3 试井分析步骤

一旦气井在关井试井过程中受邻井的影响,中后期试井曲线会出现有规律的形态变化。但是,在以往的压力恢复试井解释中,只分析一口测试井,忽略了邻井的影响,一般把中后期的压力测试曲线形态变化归结于地层物性变化或者地层边界的影响。

邻井工作制度对压力恢复试井曲线的影响见

表 3。

表 3 井间干扰对压力恢复试井曲线的影响总结
Table 3 Summary of influence of inter well interference on pressure build up test curve

井间干扰模式	干扰造成的导数曲线形态	与之曲线形态类似的常规试井模型
模式 1	末端上翘	外区物性变差或者断层响应
模式 2	末端先上翘后下降	/
模式 3	末端下降	外区物性变好或者封闭(或定压)边界响应
模式 4	末端下降	外区物性变好或者封闭(或定压)边界响应
模式 5	末端上翘	外区物性变差或者断层响应
模式 6	末端先下降后上翘	/

甄别试井曲线是否受邻井干扰的影响,主要从以下几个步骤分析:

(1)首先应当收集工区的地质资料,判断测试井的井控区是否有断层、岩性尖灭等渗流边界。另外,还可以通过先期压降分析,判断测试井和邻井之间的连通性,分析测试井和邻井之间存在井间干扰的可能性。

(2)收集邻井在压力恢复试井期间的工作制度变化,如:开关井,以及产量变化。

(3)如果压力恢复试井曲线的后曲线形态有异常的变化,如:有异常的上翘或者下掉,可根据邻井干扰对压力恢复试井曲线的影响规律,结合邻井工作制度变化,甄别是否存在井间干扰。

(4)如果存在井间干扰,应该建立井组数值试井模型,拟合压力恢复试井曲线。

4 实例分析

某典型的缝洞型碳酸盐岩气藏中部有五口气井,分别是 X、C、D、E、F。X 井与 E 井距离 1.3 km,与 F 井距离 2 km,与 C 井距离 3.4 km,与 D 井距离 2.4 km(见图 7)。

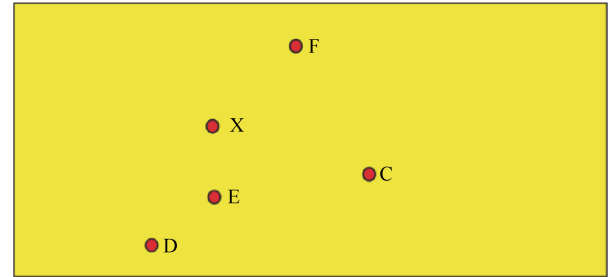


图 7 某气藏中部井位示意图
Fig.7 Well location in the middle of a gas reservoir

4.1 井间干扰先导分析

根据试井曲线是否受邻井干扰的影响甄别步

骤,首先对 X 井进行井间干扰先导分析。

4.1.1 地质条件分析

该气藏为岩性气藏,外围有非渗透边界,无天然水体补充能量,因此,没有定压边界。位于气藏中部的 X 井距离气藏边界的距离 5 km 左右,远大于与各井之间的距离。并且通过气藏储层连续性、

断裂特征、裂缝发育、流体性质、折算地层压力等综合分析,气藏储层整体是连通。

通过对比各井测压时间、邻井井距、邻井投产时间,综合分析认为:5 口气井存在一定程度的先期压降,X 井所在区域整体连通性较好,存在干扰的可能(见表 4)。

表 4 X 井及邻井原始地层压力统计表
Table 4 Statistics of original formation pressure of well X and adjacent wells

井号	测试日期	产层中部垂深/m	产层中部压力/MPa	压力系数	折算压力/MPa	先期压降/MPa	投产日期
E	2014-08-29	4 600.72	75.01	1.66	75.28	0.72	2014-08-30
D	2015-03-17	4 607.38	72.06	1.60	72.30	3.70	2015-05-29
C	2015-10-27	4 589.50	68.51	1.52	68.76	7.24	2015-10-31
F	2016-02-25	4 605.00	69.98	1.55	70.19	5.81	2016-03-01
X	2016-03-11	4 606.10	69.83	1.55	70.09	5.91	2016-03-19

注:折算压力处深度为 4 385 m。

4.1.2 邻井工作制度变化

X 井于 2016 年 8 月 1 日~8 月 15 日开展压力恢复试井测试。在测试期间,邻井 D 井的生产较为稳定,其中 C 井和 E 井产量有小幅提高;F 井在 X 井测试开始时为关井状态,之后开井产量逐渐提高到 $100\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ (见图 8)。

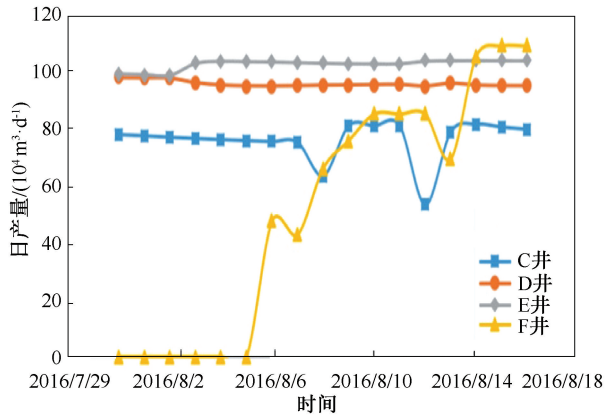


图 8 邻井产量变化图(X 井测试期间)
Fig. 8 Production variation of adjacent wells (during well x test)

4.1.3 试井曲线形态分析

以 X 井压力恢复试井为例。X 井在关井 7 天后,井底压力呈下降趋势,引起的递减为 0.105 MPa/mon。双对数曲线中的压力恢复导数曲线中后期下掉。并且气井附近无封闭(或定压)边界存在(见图 9)。X 井试井曲线异常下降的原因是:邻井 C、D、E、F 生产,并且产量有增加(特别是 F 井),类似于模式 4。

综合分析,X 井压力恢复试井曲线末端下掉原因:压力恢复试井期间,邻井继续生产引起的。

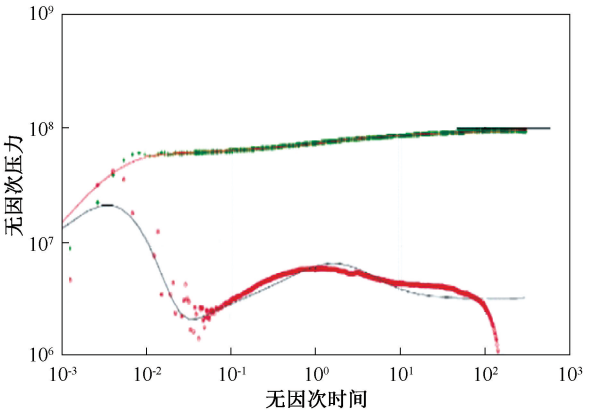


图 9 X 井双对数压力历史拟合
Fig. 9 Log pressure history fitting of well x

4.2 考虑井间干扰的数值试井解释

X 井以及邻井的常规试井解释结果见表 5。根据储层地质及邻井特征,以常规试井解释结果为初始参数,建立数值试井模型。考虑到储层的非均质性,以两井距离一半作为物性的分界线分区建立模型。同时由于气藏总体呈现径向复合特征,井模型选用径向复合模型。

表 5 X 井以及邻井的常规试井解释结果
Table 5 Conventional well test interpretation of well X and adjacent wells

井号	测试时间	渗透率/mD	地层压力/MPa
X	2016	23.07	65.51
E	未进行测试	/	/
F	2016	33.30	67.05
C	2016	0.35	66.58
D	2015	3.01	70.74

X 井采用数值试井重新进行拟合后,最终得到较好的压力历史拟合及双对数拟合曲线(如图 10、

11)。对比图 9 和图 11,拟合效果明显优于常规试井解释的结果,说明建立的试井动态模型符合该井实际情况。

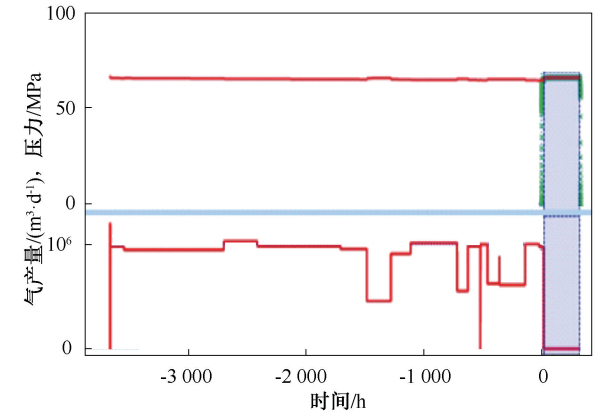


图 10 X 井数值压力历史拟合图
Fig. 10 Numerical pressure history fitting diagram of well X

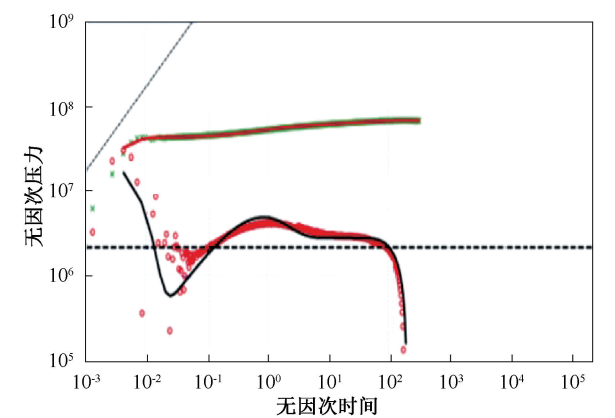


图 11 X 井数值试井双对数曲线拟合图
Fig. 11 Double logarithm curve fitting of numerical well test in well X

在添加了邻井影响的情况下,模型压力与实测压力历史、叠加时间曲线、双对数曲线拟合情况较好。地层有效渗透率为 26.48 mD,折算产层中部地层压力为 65.746 MPa(见表 6)。

表 6 X 井常规试井与数值试井解释结果对比表 Table 6 Comparison of interpretation results of conventional well test and numerical well test in well x		
参数	常规试井解释	数值试井解释
试井解释模型	径向复合	-
地层压力/MPa	65.309	65.746
渗透率/mD	26.48	23.07
探测半径/m	2 103.30	1 531.74

由表 6 可见,X 井常规试井解释得到的地层渗透率较数值试井解释得到的渗透率数值偏大。
为了验证井间干扰对试井曲线的影响,选择 X 单独进行数值试井,结果见图 12。

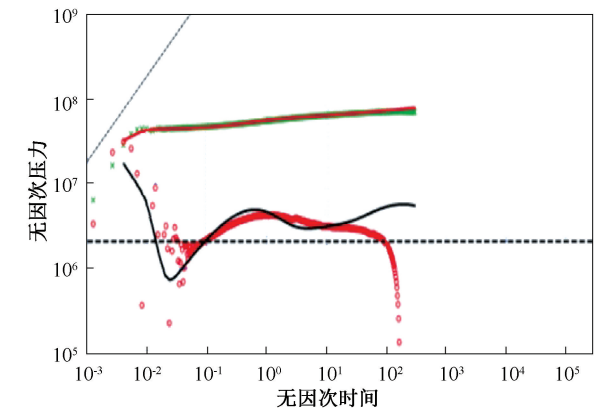


图 12 磨溪 X 井数值试井曲线图(仅有测试井)
Fig. 12 Numerical well test curve of Moxi X well (only test well)

对比图 9 和图 12 可以验证,X 井单井数值试井双对数拟合曲线与常规试井的拟合曲线类似,也印证了 X 井的试井曲线中后期异常下掉的主要原因是井间干扰。同时,也说明了数值试井考虑了井间干扰的影响,解释结果更可靠,更能反映储层真实的渗流特征。

5 结论

(1)在一口井进行试井时,如果邻井工作制度发生变化,测试井的压力数据会产生异常变化;在一口井进行试井测试时,如果邻井降低产量(或者关井)会导致压力导数曲线上翘,与断层的压力恢复试井响应类似;如果邻井提高产量,会引起压力导数曲线下掉,与封闭(定压)边界的压力恢复试井响应类似。

(2)为了减小邻井干扰对测试井的影响,在测试井进行试井测试时,邻井应该尽量保持原有的工作制度不变,不应该关井。

(3)数值试井技术在分析存在井间干扰的试井资料时,能够建立更贴近实际储层的地质模型,兼顾井间干扰以及储层非均质性的影响,获得更加准确可靠的结果,为油气田开发提供了更为准确的资料信息。

致谢:感谢中国石油西南油气田公司川中油气矿的同事为本文提供的数据,以及在论文修改、数据统计等方面的帮助。

参考文献

[1] 刘曰武,陈慧新,张大为,等. 存在邻井影响条件下的油井数值试井分析[J]. 油气井测试,2002,11(5):4-7.
LIU Yuewu, CHEN Huixin, ZHANG Dawei, et al. Numerical well-test analysis for oil wells in condition of adjacent wells influences [J]. Well Testing, 2002, 11

- (5):4-7.
- [2] 孙贺东. 邻井干扰条件下的多井压力恢复试井分析方法[J]. 天然气工业, 2016, 36(5): 62-68.
SUN Hedong. Pressure buildup analysis in multi-well systems under interferences from adjacent wells [J]. Natural Gas Industry, 2016, 36 (5): 62-68.
- [3] SPIVEY JP, LEE WJ. Applied well test interpretation [M]//SPE Text-book Series Vol. 13. Richardson: SPE, 2013: 1-30.
- [4] SUN Hedong. Advanced production decline analysis and application [M]. Oxford: Gulf Professional Publishing, 2015: 263-290.
- [5] ZHUANG Huinong. Dynamic well testing in petroleum exploration and development [M]. Amsterdam: Elsevier, 2012: 300-450.
- [6] ONUR M, SERRA KV, REYNOLDS A C. Analysis of pressure build up data from a well in a multiwell system [J]. SPE Formation Evaluation, 1991, 6(1): 101-110.
- [7] 李顺初, 周荣辉, 黄炳光. 邻井干扰压力理论分析及其应用[J]. 石油勘探与开发, 1994, 21(1): 84-88.
LI Shunchu, ZHOU Ronghui, HUANG Bingguang. Theoretical analysis and application of interference pressure in adjacent wells [J]. Petroleum Exploration and Development, 1994, 21 (1): 84-88.
- [8] 田冷, 何顺利, 施英. 数值试井技术在凝析气藏边界识别中的应用[J]. 新疆地质, 2009, 27(1): 95-97.
TIAN Leng, HE Shunli, SHI Ying. Application of numerical well testing for boundary identification in condensate gas pools [J]. Xinjiang Geology, 2009, 27 (1): 95-97.
- [9] 黄登峰, 刘能强. 数值试井在描述油气藏复杂边界中的应用[J]. 油气井测试, 2006, 15(6): 18-19.
HUANG Dengfeng, LIU Nengqiang. Application of numerical well testing in describing complex reservoir boundary [J]. Well Testing, 2006, 15 (6): 18-19.
- [10] PUCHYR P J. A numerical well test model [C]//Low Permeability Reservoirs Symposium. 1991.
- [11] 刘立明, 陈钦雷. 试井理论发展的新方向—数值试井[J]. 油气井测试, 2001, 10(1,2): 78-82.
LIU Liming, CHEN Qinlei. Numerical well testing - new developmental orientation of well test theory [J]. Well Testing, 2001, 10 (1,2): 78-82.
- [12] 徐文斌. 气水系统过渡带多相流试井新认识[J]. 油气藏评价与开发, 2014, 4(4): 21-26.
XU Wenbin. New cognition of multiphase flow well testing in the transitional zone of gas and water system [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2014, 4 (4): 21-26.
- [13] 杨勇, 谢日彬, 闫正和, 等. 双重介质复合数值试井技术在裂缝性礁灰岩底水油藏中的应用[J]. 特种油气藏, 2020, 27(5): 100-105.
YANG Yong, XIE Ribin, YAN Zhenghe, et al. Application of dual-media compound numerical well test technology in fractured reef limestone reservoirs with bottom water [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2020, 27(5): 100-105.
- [14] 王新海, 张冬丽, 李江龙. 含有大尺度裂缝、溶洞的缝洞型油藏的数值试井模型[J]. 石油天然气学报, 2009, 31(6): 129-135.
WANG Xinhai, ZHANG Dongli, LI Jianglong. Numerical well test model for fractured vuggy reservoirs with large-scale fractures and caves [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2009, 31 (6): 129-135.
- [15] 李爱青, 张广宇, 魏春林, 等. 数值试井解释技术在复杂边界油藏评价中的应用[J]. 石油天然气学报, 2012, 34(9): 105-108.
LI Aiqing, ZHANG Guangyu, WEI Chunlin, et al. Application of numerical well test interpretation technology in complex boundary reservoir evaluation [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2012, 34 (9): 105-108.
- [16] 杨景海. 数值试井解释应用流程及其正确性验证[J]. 油气井测试, 2013, 22(1): 37-40.
YANG Jinghai. Numerical well test interpretation application process and its correctness verification [J]. Well Testing, 2013, 22 (1): 37-40.
- [17] 刘能强. 实用现代试井解释方法 (第五版) [M]//实用现代试井解释方法 (第五版). 石油工业出版社, 2008, 75-76.
- [18] 伍藏原, 罗敏, 罗浩渝, 等. 利用数值模拟分析不同气藏边界类型在压力恢复试井曲线中的特征 [C]//油气田勘探与开发国际会议. 陕西省石油学会; 西安石油大学, 2015.
Wu Zangyuan, Luo Min, LUO Haoyu, et al. Using numerical simulation to analyze the characteristics of different gas reservoir boundary types in pressure build-up test curves [C] //International Conference on oil and gas field exploration and development. Shaanxi petroleum society; Xi'an Petroleum University, 2015.
- [19] 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 Erpo, 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.
- [20] 雷霆, 关振良, 何忠卿. 数值试井技术在复杂井解释中的应用[J]. 油气井测试, 2011, 20(6): 24-25.
LEI Ting, GUAN Zhenliang, HE Zhongqing. Application of numerical well testing interpretation techniques in the complex well [J]. Well Testing, 2011, 20 (6): 24-25.

编辑 刘振庆

第一作者简介:甘笑非,男,1990年出生,研究生,主要从事三维地质建模、数值模拟及气藏动态分析等方面的研究。电话:0825-2517786,18628232792, Email: ganxf2016@petrochina.com.cn。通信地址:四川省遂宁市船山区河东新区香林南路川中油气矿地质研究所,邮政编码:629000。