

数值试井技术在大北102区块气藏认识的研究及应用

刘磊, 陈东, 陈宝新, 魏聪, 陈丽群, 王翠丽

(中国石油塔里木油田分公司勘探开发研究院, 新疆 库尔勒 841000)

摘要:大北气田构造复杂, 断裂发育, 基质孔隙度、渗透率较低, 具有高温高压、非均质性强的特点。在这种复杂的地质条件下, 解析试井解释并不能很好地描述储层特征, 存在局限性。根据气藏构造、断层、布井、测井资料建立符合实际的复杂不规则边界的数值试井地质模型, 加载生产井生产数据产生渗流模型, 进行非结构化网格 Voronoi 网格划分并离散, 并通过考虑邻井干扰影响, 调整储层物性参数, 改变断层封堵性, 最终建立了符合大北气田大北102区块实际特征的数值试井模型。研究表明通过在该区块首次研究并应用数值试井技术, 从空间和时间上对气藏生产过程中的压力动态进行了准确描述, 解决了大北102区块的连通性分析、断层封堵性评价和井间干扰问题, 进一步深化气藏认识, 研究成果直接指导大北102区块生产。

关键词:大北气田; 数值试井; 连通性; 断层封堵性; 井间干扰

中图分类号: TE353

文献标识码: A

Research and application of numerical well testing technology in well block Dabei-102

Liu Lei, Chen Dong, Chen Baoxin, Wei Cong, Chen Liqun and Wang Cuili

(Research Institute of Exploration and Development, Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla, Xinjiang 841000, China)

Abstract: The Dabei gas field, with the complex geological structure, the developed faults and fractures and the low matrix porosity and permeability, has the characteristics of high temperature and pressure, and strong heterogeneity. Under these complicated geological conditions, the reservoir characteristics are poorly described by the analytical well test with limitation. Based on the static data of the structure, the fault, the well pattern and the well logging data, the numerical well test geological model with the complex irregular boundary closed to the actual condition was established, the seepage model was established by the production data of the gas production wells, and the unstructured Voronoi mesh was generated and discrete. Meanwhile, by considering the influences of the interference from the adjacent wells, the reservoir physical property parameters revision, and the fault sealing property alteration, the numerical well test model conformed to the actual condition of the well block Dabei-102 was proposed. The result showed that, through the first research and the application of the numerical well test technologies in this block, the numerical well test analysis and the interpretation can exactly describe the feature of the pressure changes during the development of the gas reservoir in time and space, solve the problems of the communication, the fault sealing property and the interference of the inter wells in well block Dabei-102, and further deepen the understanding of the gas reservoirs. The research result helps for the production of the gas wells in well block Dabei-102.

Key words: Dabei gas field, numerical well test, communication of inter wells, fault sealing property, interference of inter wells

气井试井技术是一种探测气藏动态的直接方法,也是进行气藏评价、生产动态监测和掌握气田开发规律的关键技术。试井分析工作质量的好坏直接关系到人们对油气藏特征认识的正确与否,关系到

开发决策和生产措施科学性、合理性^[1]。常规解析试井分析由于受到模型建立、数学推导等因素的限制,对剩余油饱和度、储层纵向上厚度和流渗条件等的变化以及复杂油藏形状等复杂的地质现象难以判

收稿日期: 2017-01-16。

第一作者简介: 刘磊(1986—),女,工程师,天然气开发研究。

基金项目: 中国石油股份公司重大专项“前陆冲断带超深超高压气藏开发技术”(2014E-2104)。

断,且存在难以解决的问题^[2-6]:1) 油藏复杂边界的处理问题。复杂边界下的渗流方程已难以获得解析解,只能将油藏近似为矩形等简单规则形状。2) 多相流动问题。对于注水开采油田,油藏中至少存在着油水两相流动,渗流方程没有解析解,只能将其简化为单相情形。3) 层间非均匀性问题。对非均匀性问题,解析试井只能将其简化为径向复合或线性复合。4) 很多测试井的试井资料解释难。只有通过近似,才能得到上述问题的解析解,有时存在较大的误差,甚至得到完全错误的结果。而数值试井在解释多相流、复杂边界、非均质油气藏、井间干扰等复杂性试井资料方面具有优势^[7-9],在解释开发井网、任意边界和非均质油藏等复杂性试井资料方面,具有独特优势^[10]。

鉴于常规解析试井解释方法无法准确描述气藏复杂边界及多井试井问题,为了准确认识评价大北气田的气藏动态特征,得到符合气藏实际特征的动态认识,采用数值试井技术对不稳定试井资料进行解释分析评价,力求试井解释更加真实地反映储层的特征。

1 气藏概况

大北气田位于塔里木盆地库车前陆冲断带,岩性主要为灰褐色含砾细砂岩、细砂岩、粉砂岩,主力开发层位为白垩系巴什基奇克组。大北地区受强挤压应力作用,白垩系巴什基奇克组储层构造裂缝发育,气藏中部深度为5 461.7~7 201.18 m,压力系数为1.57~1.70,基质孔隙度主要分布在5.7%~7.9%,测井解释渗透率为 $(0.01\sim 0.1)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,为超深常温高压低孔裂缝性砂岩干气气藏。由于宽方位叠前深度逆时偏移资料信噪比明显提高,地震解释

的断裂较为清晰,大北气田的大北102区块南部断层面上盘为大北102断块,下盘为大北2断块,初步认为断层并未完全分隔两个断块,但缺乏可靠的动态资料进行验证。随着投捞式压力测试技术的突破,实现了超高压气田的井下压力测试,录取了大北101-3井的井下压力测试资料,为该气藏的动态描述提供了可靠的实测资料支持。

2 常规解析试井问题

2.1 测试过程

大北气田102区块有6口生产井。DB101-3井是该区块西部的一口生产井,2014年9月投产,生产层位为白垩系巴什基奇克组,日产气 $35\times 10^4\text{m}^3$,未见水。为了落实储层动态参数的变化,获得真实的储层认识,对DB101-3井进行了投捞式压力测试,获得了高质量的井下压力资料。

全气藏同时关井进行第一次压力恢复测试8 d后,测试井地面开井进行了5个工作制度的修正等时试井测试,期间大北101断块5口井先后开井生产,产能测试结束后地面关井进行了15 d的压力恢复测试,第二次关井测试期间全气藏日产气量峰值为 $92.3\times 10^4\text{m}^3$ 。

2.2 解析试井分析

2.2.1 双对数分析

对比两次关井压力恢复双对数诊断曲线(图1a),早期为井筒存储和表皮效应的综合反映,存在差异与关井前DB101-3井的产气量有关,中期都有一个“凹”形呈现出典型双重孔隙介质模型双对数特征曲

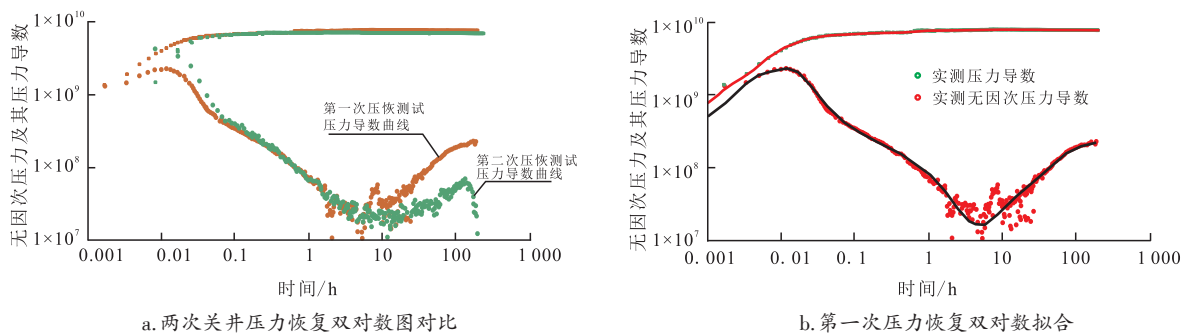


图1 两次关井压力恢复测试双对数曲线

Fig. 1 Log-log plot of pressure buildup test after two well shut in

线,但后期差异较大,第二次关井压恢测试压力导数曲线斜率减小,明显下掉,表现出恒压边界特征,但地质分析认为该区不存在恒压边界,结合动态分析认为是受到邻井生产干扰,影响解释模型的选取,解释结果存在多解性,不能用于解释。

第一次关井压力恢复测试期间全气藏关井,未受到邻井开井生产的干扰影响,可以进行试井解释(图1b)。采用“具有变井筒储存和随时间相关表皮效应的双孔拟稳定+无限大边界”的试井模型进行拟合,双对数曲线取得了良好的拟合效果,解释的储层参数如下:地层有效渗透率为 $5.94 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,储能比0.0139,窜流系数 1.44×10^{-7} 。

2.2.2 压力历史拟合检验

对于复杂边界油藏、多变的非均质油藏问题,保证试井解释结果的准确性及解释模型的可靠程度,排除试井解释的多解性,验证储层动态模型的主要途径是压力历史拟合检验^[11],根据试井解释软件所选模型生成的压力历史,与实测的压力历史相比较,如果两者相似或一致,则确认所选动态模型的可靠性。因此,为了使解释结果更符合储层真实特征,整理分析了该井投产至测试期间的生产数据,由井口油压折算并据实测数据校正过的井底流压数据,通过拟合压力历史(图2)发现实测数据与拟合曲线差异较大,这说明该井解释模型不符合气藏实际情况。除测试段拟合相对较好外,其余生产段拟合曲线则偏离实测曲线,初期拟合压力曲线比实测压力低,末期拟合压力曲线比实测压力下降快偏离越来越大说明该井模型储量偏小,而总体拟合压力曲线比实测压力下降慢说明未考虑邻井干扰的影响。

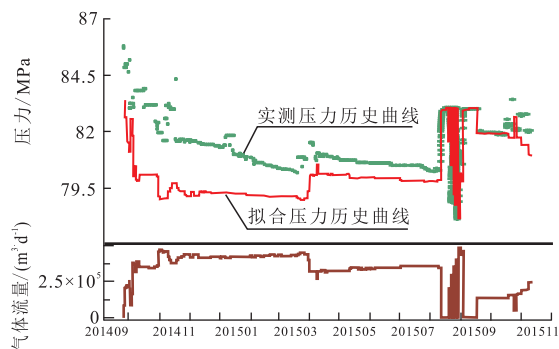


图2 DB101-3井解析试井压力历史拟合

Fig. 2 History fitting of analytic test pressure of well DB101-3

由于油藏的复杂性,用基于解析模型发展起来的试井分析理论^[12]进行试井解释时很难与实际曲线拟合完好,证明所选用的模型类型不符合气藏的实际地质特征,增加了试井解释的多解性,常规解析试井分析法不能满足气藏动态描述的需要。如果考虑的因素太复杂,又无法求解解析表达式。为了能解决更复杂的问题,采用数值试井技术^[13]。

3 数值试井研究

对于复杂、多变的非均质油气藏以及多相流的试井问题,由于渗流方程高度非线性,只能采用数值解法,故称其为数值试井^[12]。数值试井的特点是较全面地考虑了油藏的地质因素(油藏非均质、断层与边界等)和开发因素(生产历史、驱替过程和井网等),使试井解释模型更加符合油藏的实际情况^[13]。在地层非均质性比较严重时,井间连通性好,存在井间干扰时,靠解析模型的非均质简化描述也难以达到较准确描述地层的目的,因此必须开展数值试井研究。

3.1 数值试井技术原理

1) 渗流模型。主要依据运动方程及物质平衡定律,以单相不可压缩流体为例,则有:

$$v = -K/\mu \nabla p \quad (1)$$

$$-\text{div}(\rho v) = -\partial(\rho \phi) / \partial t \quad (2)$$

一般情况都是针对微—微可压缩流体来建立推导的,对于气体,只需将以上公式中 p 替换成拟压力即可。

$$\psi(p) = \int_{p_0}^p \frac{2p}{\mu z} dp \quad (3)$$

2) 离散方程的建立。对井和储层模型进行时间及空间上的离散,从而确定每个单元网格点上的微分方程式。

3) 离散单元的联立以及求解。利用Newton-Paphson迭代法对系统进行求解,得到一个重复 n 次的近似解: $F^{n+1} = F^n + J^{-1} \nabla p$,再对方程进行多次重复求解,从 $p^0 = p^1$ 到 $p^{n+1} = p^{n+1}$,最后得到一个收敛值 $(\max(e_i) \nabla t/v)$,将得到的解通过图形方式表达出来,产生一个有限数值模型及其动态压力响应特征曲线。

3.2 数值试井解释

数值试井技术通过描述每个单元格在不同时刻

的瞬时压力响应,来实现对测试范围内的每个单元的精确定义,模拟出无法用解析解表达的复杂油气藏和流动阶段。并根据试井曲线表现出的特征,建立任意形状及不同类型的多种外边界组合,通过不断调整、改善数值模型的结构、形状和相关参数来实现对外边界精确描述。

实际解释过程中,采用法国 Kappa 公司的 Saphir 试井软件,参考常规解析试井解释结果,根据气藏构造、断层、布井、测井资料建立符合实际的复杂不规则边界的数值试井地质模型,加载生产井生产数据产生渗流模型,并进行非结构化网格 voronoi 网格划分并离散,建立了与该区块气藏真实地质特征相似的数值试井模型(图3),产生压力拟合曲线。结合地质研究成果,通过反复调整解释参数、边界和断层特征,计算网格所有节点的压力和流体分布,然后进行数值试井分析,找出其不合理的动态现象及地质因素。检验压力拟合曲线与实际压力历史曲线拟合情况,从而获得符合气藏实际的储层物性、压力分布及气藏特征认识,达到最佳匹配,准确描述气藏。

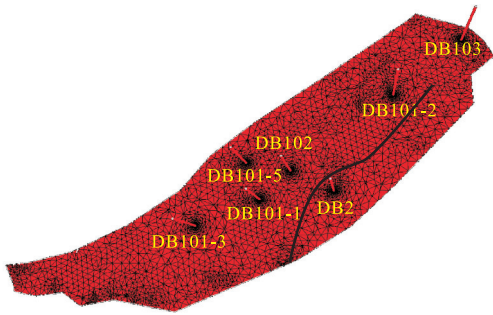


图3 大北102区块数值试井模型

Fig. 3 Numerical well testing model of block Dabei-102

由于数值试井对计算精度要求远远大于油藏数值模拟,因而数值试井的网格划分尺度要小很多,会存在断层间、断层与边界、断层与井、井与井间的干扰^[4]。因此,解释思路是:在未能确定断层封堵性条件的情况下,暂时认为断层不具有封堵性,以DB101-3井实测压力历史曲线拟合作为检测依据,在区块邻井干扰影响的情况下,不断调整井间渗透率参数,改变断层(图3中黑色粗实线)封堵性,解释大北102区块整体渗透率为 $8.04 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,储能比0.0139,窜流系数 1.44×10^{-7} 。模型拟合压力与实际压力基本吻合(图4),说明所建立的理论模型较为合理。

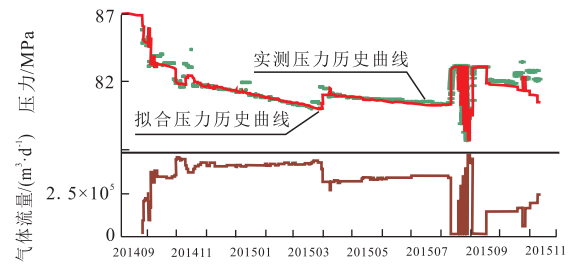


图4 DB101-3井数值试井压力历史拟合

Fig. 4 History fitting of numerical test pressure of well DB101-3

3.3 应用效果

3.3.1 识别断层封堵性

地震资料解释大北气田的大北101区块南部断层面下盘为大北2断块,断层并未完全分隔两个断块。在数值试井模型中,将大北2断块与大北102断块之间的断层(图3中黑色粗实线)设置为传导性断层。设置后DB2井与测试井DB101-3井中间没有隔挡,完全连通。设置该断层没有封堵性后的压力历史拟合曲线(图5,绿色细线)比实测压力历史曲线(图5,褐色粗线)下降速率大,断层为封堵性断层数值试井模型的压力历史拟合曲线(图5,褐色细线)则和实测压力历史曲线较吻合。落实大北2断块与大北102断块之间的断层为封堵性断层,从动态角度验证了地震解释结果一致。

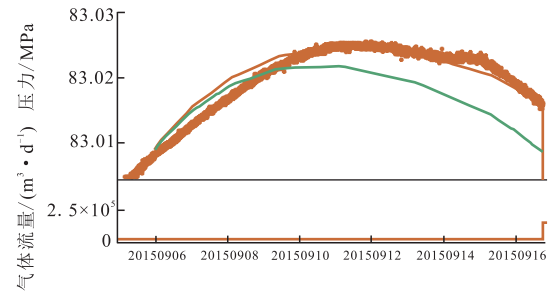


图5 设置为传导性断层前(褐色)后(绿色)压力历史拟合对比

Fig. 5 History fitting before (brown line) and after (green line) when set as a conductive fault

3.3.2 井间干扰分析

第二次关井压力恢复测试期间,邻井生产对测试井干扰较大,结合动态分析认为距离1.44 km的DB101-5井开井生产12.67 h后,实测压力曲线末期出现明显压力恢复下降斜率增大的拐点。通过干扰

试井与数值试井结合判断,数值试井模型设置DB101-5井在测试期间是否开井进行实测压力拟合(图6),图中绿色细线为DB101-5井关井时拟合压力曲线,比实测压力曲线(图中褐色粗线)高,与实际不符合;图中褐色细线为DB101-5井开井时的拟合曲线,与实测曲线较一致。对比认为,DB101-3井第二次关井压恢测试末期曲线下下降斜率增大为受DB101-5井开井生产影响,说明这两口井井间连通性好。

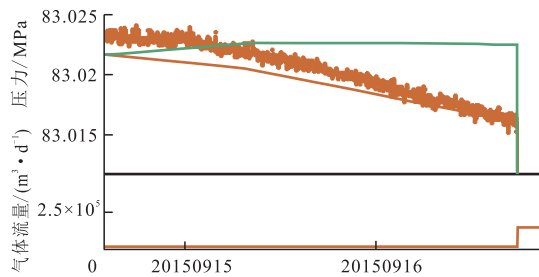


图6 第二次关井压恢测试压力历史拟合对比(局部放大)
Fig. 6 History fitting of second shut-in pressure buildup test (zoom local)

为了验证其余3口生产井与测试井间连通性,在模型中设置第二次关井压力恢复测试期间DB101-2、DB101-1、DB102井关井,DB101-5井及DB2井按实际情况开井生产,图7中褐色细线为拟合曲线,比DB101-3井实测压力历史曲线(绿色粗线)压力恢复速率大。设置所有生产井均按实际生产情况生产,图7中绿色细线为拟合曲线,与DB101-3井实测压力历史曲线较一致。对比分析认为,大北102区块气藏整体是连通的。

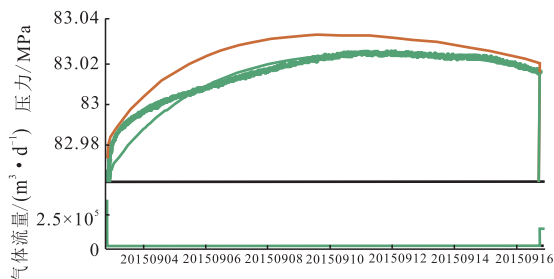


图7 第二次关井压恢测试压力历史拟合对比
Fig. 7 History fitting of second shut-in pressure buildup test

4 结论

1) 储层连通性较好的气藏应用常规解析试井解释方法受到限制,采用数值试井技术可通过断层性质设置,同时考虑邻井生产影响,准确解释井间干

扰情况,从而能更好拟合受储层非均质性和井间干扰影响的测试压力曲线。

2) 动静态结合,通过在数值试井模型中设置改变大北2井北边的断层封堵性及邻井开关井对测试井的影响,实现对大北102区块较准确的动态描述。

3) 大北102气藏整体连通,局部隔断,井间干扰强。

参考文献

- [1] 宋文杰,王振彪,李汝勇,等.大型整装异常高压气田开采技术研究——以克拉2气田为例[J].天然气地球科学,2004,15(4):331-336.
- [2] B L Beckner, A K Usadi, M B Ray, et al. Next generation reservoir simulation using Russian linear solvers[C]// paper SPE-103578-RU presented at the SPE Russian Oil and Gas Technical Conference and Exhibition, 3-6 October 2006, Moscow, Russia.
- [3] Gunasekera D, Cox J, Lindsey P. The generation and application of K-orthogonal grid systems[C]// paper SPE-37998-MS presented at the SPE Reservoir Simulation Symposium, 8-11 June 1997, Dallas, Texas, USA.
- [4] 谢海兵,马远乐,桓冠仁,等.非结构网格油藏数值模拟方法研究[J].石油学报,2001,22(1):63-66.
- [5] Palagi C L, Aziz K. Use of Voronoi grid in reservoir simulation [J]. SPE Advanced Technology Series, 1994, 2(2): 69-77.
- [6] Faisal M Al-Thawad, M B Issaka, Saudi Aramco, et al. A simple approach to numerical analysis of complex well tests[C]// paper SPE-81514-MS presented at the Middle East Oil Show, 9-12 June 2003, Bahrain.
- [7] 杨敏.塔河油田4区岩溶缝洞型碳酸盐岩储层井间连通性研究[J].新疆地质,2004,22(2):196-199.
- [8] 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):18-19,73.
- [9] 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].油气采收率技术,2002,11(5):4-7.
- [10] F Pach, A Gilicz. Analytical and numerical simulation well test paper model[C]// presented at the Ecmor 5th European Conference on the Mathematics of Oil Recovery, 3-6 September 1996, Leoben, Austria.
- [11] 庄惠农.气藏动态描述与试井[M].北京:石油工业出版社,2009:139-147.
- [12] 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.
- [13] 韩永新,庄惠农.数值试井技术在气藏动态描述中的应用[J].油气井测试,2006,15(2):9-11.
- [14] 杨景海,李道伦,查文舒,等.数值试井技术及UST数值试井软件[J].油气井测试,2011,20(4):5-9.

(编辑 杨友胜)