

基于数值试井的聚驱前缘与大通道识别应用案例分析

董晓芳

中国石油大庆油田有限责任公司测试技术服务分公司 黑龙江大庆 163453

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

项目支持:国家重大科技专项“致密油气藏多尺度介质复杂结构井数值试井分析方法及应用研究”(2017ZX05009005-002)

引用:董晓芳. 基于数值试井的聚驱前缘与大通道识别应用案例分析[J]. 油气井测试,2018,27(3):66-71.

Cite: DONG Xiaofang. Case study for identification of polymer flooding front and large channel based on numerical well testing [J]. Well Testing, 2018, 27(3):66-71.

摘要 地层压力、聚合物波及范围及前缘变化监测是聚合物驱提高采收率中亟待解决的难题。根据地层流体渗流特点,考虑聚合物黏度、吸附、剪切变稀等多种物化现象,建立油水两相四组分聚合物驱流动模型,基于非结构 PEBI 网格进行全隐式数值求解,形成聚合物驱数值试井方法,并研制聚驱数值试井解释软件。以 A1 井和 B1 井为例,应用压力恢复测试的数值试井解释结果,考察了聚合物驱的波及范围及聚驱前缘推进情况,识别了注采井组之间优势通道发育状况。该方法在大庆油田聚合物驱开发区块应用 200 多井次,取得较好的效果。应用实例表明,聚驱数值试井解释软件能正确反映地层压力及流体渗流情况,准确判断聚合物波及范围及前缘推进、地层大孔道分布、井间连通状况,可以为化学驱提高采收率的生产制度优化和措施调整提供依据。

关键词 聚合物驱;试井;数值试井;前缘;曲线拟合;优势渗流通道

中图分类号:TE353 **文献标识码:**B **DOI:**10.19680/j.cnki.1004-4388.2018.03.011

Case study for identification of polymer flooding front and large channel based on numerical well testing

DONG Xiaofang

Well Logging Services Branch Company of Daqing Oilfield Company Ltd., PetroChina, Daqing, Heilongjiang 163453, China

Abstract: The formation pressure, the sweep range of the polymer and the monitoring of the change of the leading edge are the problems to be urgently solved in the polymer flooding. According to the percolation characteristics of formation fluids, as well as the multiple physical and chemical phenomena such as polymer viscosity, adsorption and shear thinning, the flow model of oil-water two-phase four-component polymer flooding was established. The model is based on a non-structural PEBI grid for full implicit numerical solution, so that a set of numerical test methods for polymer flooding is established. Meanwhile, the corresponding numerical testing interpretation software is also developed. In order to verify their effectiveness, this paper takes Wells A1 and B1 as examples, applies the numerical well test interpretation results of the pressure recovery test to examine the sweep range of the polymer flooding, the position of front edge, and the development status of dominant channels between injection-production wells, it is found that the effectiveness is great. The method was applied in more than 200 wells in the polymer flooding block in Daqing Oilfield and achieved satisfactory results. These actual examples show that the polymer flooding numerical testing interpretation software can accurately reflect formation pressure and fluid percolation conditions, meanwhile, it can also determine the spread of the polymer, the position of the front edge, the distribution of large pore throat, and the connectivity of wells, so as to provide the basis for optimization and adjustment of production system for improving enhanced oil recovery.

Keywords: polymer flooding; testing; numerical well testing; front; curve fitting; predominant percolation channel

目前国内各大油田的主力油区都已进入高含水开发阶段,聚合物驱技术已成为提高油田采收率的重要方法,并已大规模工业化应用。聚合物驱油中的水溶液黏度、剪切变稀、聚合物吸附以及渗透

率下降等都与常规水驱模型有非常大的差异^[1]。在聚驱大规模开发应用中,为正确评价聚合物驱后地层参数,现场往往进行大量的压力测试,急需相关软件与技术对测试的关井压力数据进行解释,获

得井筒与地层参数,为调整开发方案服务。

很多学者采用解析试井和数值试井对聚合物溶液等非牛顿流体的试井解释进行研究^[2]。在解析试井方面,Ikoku C. U.^[3]和 Odeh A. S.等^[4]给出了非牛顿幂律流体在均质多孔介质中流动的数学模型及其解析解,Vongvuthipornchai S.等^[5]给出了考虑井储和表皮效应的非牛顿流试井典型曲线,通过表皮近似模拟流变性。宋考平等^[6]采用复合油藏研究非牛顿幂律流体驱油的渗流规律,并进行了试井典型曲线分析。然而,由于解析试井进行了过多的简化,导致其所描述的流动规律与实际差异很大,导致难以现场应用。

因而,数值求解受到了重视,吴明录等^[7]根据流线模拟方法建立了聚合物驱流线数值试井解释模型。聂向荣等^[8]考虑聚合物溶液在地层中存在扩散、对流和不可及孔隙体积作用的黏度模型,以此建立多因素影响下的聚合物驱试井解释模型,采用迭代法对非线性数学模型进行了数值求解,研制了典型曲线图版,典型曲线存在3个流动段。而曾杨等^[9]通过改进聚合物驱试井解释基础参数模型,建立了聚合物驱三层窜流油藏试井解释模型,采用有限差分算法对模型进行数值求解,绘制压力和压力导数双对数典型曲线图版,典型曲线存在5个流动阶段。朱常玉等^[10]通过研究聚合物溶液在地层中的剪切、扩散、对流等物化参数作用,考虑层间窜流和非牛顿-牛顿复合特性,建立了聚合物驱双层窜流非牛顿-牛顿复合试井解释模型,采用有限差分算法进行了数值求解,研制了典型曲线图版。梁光跃等^[11]建立了黏弹性聚合物驱油藏的不稳定渗流数学模型,利用有限差分方法求得数值解,研制了相应的无因次试井图版,并对实测试井资料进行了拟合解释,探讨了弹性对聚合物驱油藏试井曲线形态的影响。流线方法可加快模拟速度,但模拟精度有所欠缺。而试井解释面对的是瞬态压力的模拟,需要高精度的模拟器。

合肥工业大学团队与大庆油田测试分公司共同攻关,研发了基于PEBI网格的两相(油、水)四组分(油、水、聚合物、阳离子)的全隐式聚合物驱数值试井模型及软件,该模型考虑了聚合物流变性、吸附、不可及孔隙体积、渗透率下降系数及残余阻力系数等聚合物驱物理化学现象和参数^[12-13]。现场300余井次现场应用证明,该软件能够对聚驱压力数据进行成功解释,解释结果得到了现场专家认

可,是迄今为止,首个可现场应用的聚合物驱数值试井软件,解决了大庆油田聚驱压力数据解释问题。本文给出了聚合物驱软件在描述注采井间驱动力大小、聚合物波及范围及前缘变化、井间渗流能力评价、注采井连通变化情况及井组和区块注采完善情况判断等方面的应用研究成果。

1 方法原理

聚合物驱数值试井采用的数学模型^[14-17]是两相(油、水)、四组分(油、水、聚合物、一价阳离子)改进的黑油模型。假设油相为单一油组分,水相中含纯水、溶解于纯水中的大分子聚合物和一价阳离子。模型中考虑了聚合物驱油的主要物理化学机理^[18-20],包括聚合物溶液的黏浓关系、剪切变稀、聚合物吸附、聚驱渗透率下降、不可及孔隙体积等。

聚驱数学模型基本假设:(1)油藏为等温模型;(2)扩展的达西定律适合于描述多相流动;(3)流体由油、水两相和油、水、聚合物、一价阳离子四个组分组成;(4)聚合物和一价阳离子存在于水相中;(5)聚合物在岩石表面的吸附—滞留为不可逆过程;(6)除了聚合物的吸附外没有其他化学反应的发生。

根据上述假设,聚合物驱的基本方程如下:

油:

$$\nabla \cdot \left[\frac{KK_{ro}}{\mu_o B_o} (\nabla p_o - \gamma_o \nabla D) \right] + q_o = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi S_o}{B_o} \right) \quad (1)$$

水:

$$\nabla \cdot \left[\frac{KK_{rw}}{R_k \mu_w B_w} (\nabla p_w - \gamma_w \nabla D) \right] + q_w = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi S_w}{B_w} \right) \quad (2)$$

聚合物:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \left[\frac{KK_{rw}}{R_k \mu_w B_w} (\nabla p_w - \gamma_w \nabla D) C_o \right] + q_o \\ = \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\phi (S_w C_o + C_{pads})}{B_w} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

一价阳离子:

$$\nabla \cdot \left[\frac{KK_{rw}}{R_k \mu_w B_w} (\nabla p_w - \gamma_w \nabla D) C_{sa} \right] + q_{cl} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi S_w C_{sa}}{B_w} \right) \quad (4)$$

饱和度关系:

$$S_o + S_w = 1 \quad (5)$$

井方程为:

$$q_{isc} = \frac{1}{\mu_i B_i} \frac{K_r K h}{\ln(r_e/r_w) + S} (p - p_{wf}) \quad (6)$$

耦合井储后:

$$Q = \frac{1}{\mu_l B_1} \frac{\theta K_r K h}{\ln(r_e/r_w) + S} (p - p_{wf}) - \frac{C}{\Delta t} (p_{wf}^{n+1} - p_{wf}^n)$$

(7)

式中: K 为绝对渗透率, μm^2 ; K_r 为相对渗透率; B 为地层体积系数; μ 为黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; ϕ 为孔隙度; t 为时间, s ; S 为饱和度; p 为压力, MPa ; γ 为重度, N/m^3 ; D 为深度, m ; R_k 为渗透率下降系数; C 为质量浓度, kg/m^3 ; C_{sa} 为一价阳离子质量浓度, kg/m^3 ; Q 为地面总产量, m^3/s ; q 为产量, m^3/d ; 下标: w 为水相, o 为油相, p 为聚合物, l 为油相或水相, sc 为标准状态。

以上方程没有解析解,为此基于非结构 PEBI 网格^[21-22],使用有限体积法进行离散,全隐式方法进行线性化与迭代求解,采用数值求解的方式进行计算^[23]。

2 解释分析流程

聚合物驱数值试井方法解释分析流程包括以下六个步骤:

第一步:地质建模。输入井号及井坐标、小层数据(有效厚度、孔隙度、渗透率、饱和度)、聚合物实验数据(数据、剪切变稀数据、吸附数据等)、相渗数据、加载压力产量史数据、油水 PVT 参数等。

第二步:建模数据正确性检测。自动对建模数据进行正确性检测。

第三步:拟合分析。要求对建模区域内所有测试井的压力双对数曲线、压力史曲线、所有生产井含水率曲线、聚合物浓度曲线同时进行拟合分析,使得计算出的理论曲线变化趋势与实测曲线趋势相一致。

第四步:解释结果正确性检验。对压力导数双对数曲线、压力史曲线、聚合物浓度曲线、含水饱和度曲线拟合结果进行检验,要求计算出的理论曲线与实测曲线重合;所有生产井聚合物浓度曲线、含

水饱和度曲线与实测曲线变化趋势相一致,聚合物浓度变化、含水率变化与井口化验值误差不超过 10%。

第五步:解释结果场数据可视化检查。检查场数据可视化是否有异常,需要检查的场数据有:压力、饱和度、聚合物浓度、渗透率下降系数、总流度。

第六步:成果输出。输出井点处井的井储、表皮、渗透率、平均地层压力数据;输出建模区域内地层压力、渗透率、油(水)饱和度、总流度、聚合物浓度分布的二维及三维视图。

3 实例分析

聚合物驱数值试井方法在大庆油田采油一厂采油六厂进行应用,该方法在地层压力评价、地层聚合物分布及前缘描述、地层大孔道识别、注采关系是否完善判断等方面进行现场应用。下面以两个应用实例为例对方法的应用效果进行说明。

3.1 聚合物波及范围及前缘变化情况评价

A1 井为大庆油田某采油厂注聚开发采出井,该井周围有四口注入井,2010 年投入开发,2012 年进行聚合物注入,其基础数据见表 1。

表 1 A1 井组基础数据表

Table 1 Basic data table of well group A1

井号	厚度 /m	渗透率 /($10^{-3}\mu\text{m}^2$)	孔隙度	含水饱和度
A1	5.5	250	0.30	0.536
A2	6.5	300	0.29	0.682
A3	4.5	400	0.29	0.682
A4	6.7	60	0.30	0.682
A5	3.2	40	0.27	0.682

在注聚阶段对该井进行三次压力恢复测试,测试时间分别为 2013 年 5 月、2013 年 10 月、2015 年 8 月,该井及周围井生产数据见表 2。从表 2 可以看出,A1 井的含水率变化符合聚合物驱含水率先上升后降低的变化规律,产出液中聚合物浓度符合逐渐上升的变化规律。

表 2 A1 井组生产数据表

Table 2 Production data sheet of well group A1

井别	井号	2013 年 5 月			2013 年 10 月			2015 年 8 月		
		产液/注入 /($\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$)	含水 /%	聚合物浓度 /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	产液/注入 /($\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$)	含水 /%	聚合物浓度 /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	产液/注入 /($\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$)	含水 /%	聚合物浓度 /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
生产井	A1	31.7	96.6	0.988	29.4	98.1	1.021	22.9	97.1	1.221
	A2	47.1	—	3.508	37.2	—	3.405	62.4	—	2.115
	A3	9.3	—	3.525	29.8	—	3.417	35.3	—	1.593
	A4	21.9	—	3.545	39.9	—	3.429	53.2	—	1.463
	A5	19.9	—	1.013	21.3	—	1.000	49.7	—	1.043

依据聚合物驱数值试井解释操作流程,分别对该井组 2013 年 5 月、2013 年 10 月、2015 年 8 月三次测试数据进行地质建模,建模完成后分别对三次测试井压力双对数曲线、压力史曲线、所有采出井含水率曲线、聚合物浓度曲线同时进行拟合分析。根据聚合物驱资料解释分析流程先对水驱时期地层压力、有效厚度、渗透率、饱和度等参数分布作为初值建模,对 2013 年 5 月测试压力双对数曲线、压力史曲线及所有采出井的含水率曲线、聚合物浓度曲线进行拟合,得出 2013 年 5 月井点及井周围地层平均压力、渗透率、聚合物浓度、总流量等分布;再以 2013 年 5 月解释结果为初值进行建模,对 2013 年 10 月测试曲线进行分析,得出 2013 年 10 月地层压力及相关参数分析;最后再以 2013 年 10 月解释成果作为初值建模,对 2015 年 8 月曲线进行拟合分析,得出 2015 年 8 月时地层压力及相关参数分布情况。

解释完成后对解释结果进行正确性检验:检查压力双对数曲线、压力史曲线、含水率曲线及聚合物浓度曲线是否完全拟合上,解释的地层平均压力是否与地质动态相符,地层渗透率是否与注聚后地层物性发展规律相一致,曲线拟合结果如图 1 所示。

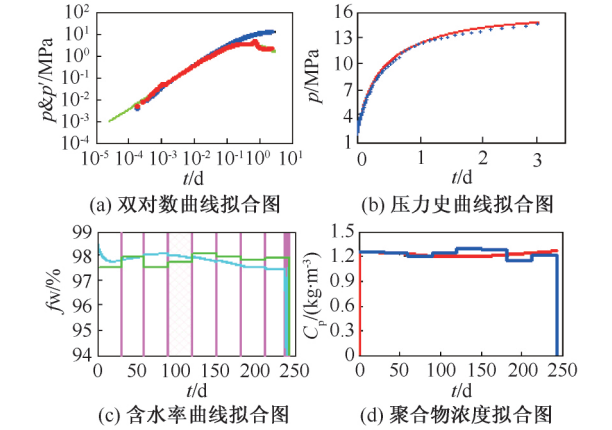


图 1 A1 井曲线拟合成果图
Fig.1 Results of curve fitting in Well A1

从图 1 可以看出,计算出的含水率、聚合物浓度与井口化验值误差不超过 10%。

分析该井 2013 年 5 月、2013 年 10 月、2015 年 8 月连续三次测试数据及曲线、聚合物浓度分布可视化成果图如图 2 所示。

从图 2 可以看出不同时期地层中聚合物推进前缘、波及范围及浓度的分布情况,可以为生产制度优化和措施调整提供依据。

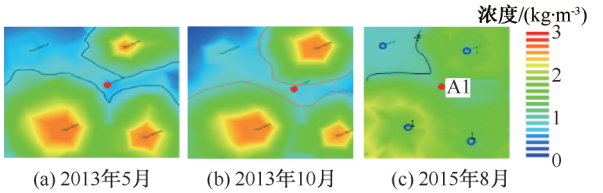


图 2 A1 井不同时期聚合物浓度分布图
Fig. 2 Distribution of polymer concentration at different periods in Well A1

3.2 判断注采井间优势渗流通道

B1 井是大庆油田某采油厂聚驱后高浓度试验区^[4]一口井,该井周围有 4 口注入井,注采关系如图 3 所示。在开发过程中发现 B1 井与周围注入井之间存在高渗流通道下的无效循环,因此利用测试资料优选措施层位并进行措施改造。

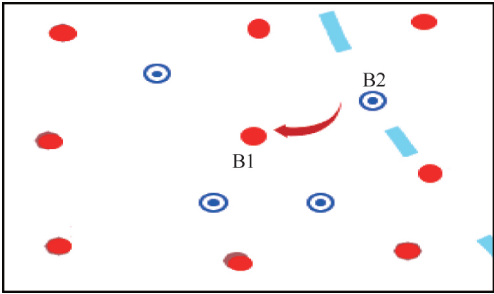


图 3 B1 井组井位图
Fig.3 Well pattern of well group B1

该井组在 2014 年 6 月进行一次压力测试,用聚合物驱数值试井方法对该次测试数据进行解释分析。地质建模完成后通过对 B1 井压力双对数曲线、压力史曲线、含水率曲线及聚合物浓度曲线进行拟合分析,可求得分析区域内的地层信息。解释成果中总流量的可视化成果分布图如图 4 所示。从图 4 中可以看出,在采出井 B1 井与注入井 B2 之间流量比其余三口注入井大,说明 B1 井与 B2 井连通性好,而 B1 井与其余三口井连通性不好,因此认为在井 B1 与井 B2 井存在高渗流通道。

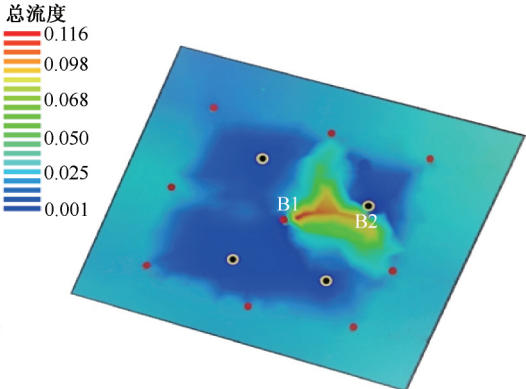


图 4 B1 井组总流量分布图
Fig.4 Distribution of total flow in well group B1

根据试井分析结果识别出 B1 井与 B2 井之间存在优势渗流通道,为了进一步扩大聚合物驱波及

体积,对 B1 井的相应层位进行封堵,封堵完成后 B1 井及 B2 井的生产情况如图 5、图 6 所示。

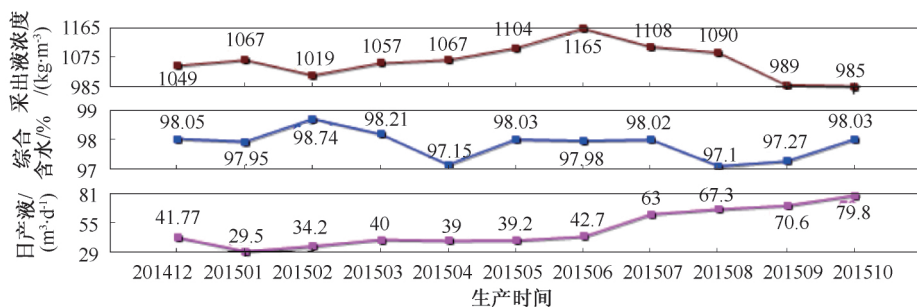


图 5 B1 井生产曲线
Fig.5 Production curve of Well B1

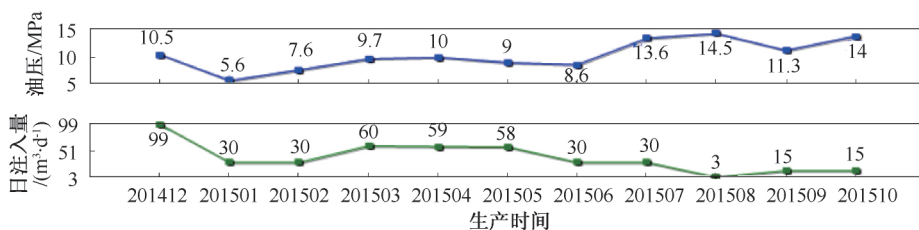


图 6 B2 井注入曲线
Fig.6 Injection curve of Well B2

从图中可以看出,B1 井含水率下降、采出液浓度降低,B2 井油压升高、注入量下降,井 B1 与井 B2 井之间的无效循环得到有效控制。

4 结论

(1)聚合物驱数值试井方法可以描述注采井间驱动能力大小、判断地层聚合物分布及驱替前缘变化、识别地层大孔道、评价注采井连通关系及区块注采完善情况。

(2)由于聚合物驱数值试井解释参数多,分析难度大,计算周期较长,在现场大面积应用有一定难度。下一步计划采用大数据方法提高解释自动化程度,提升资料解释效率,实现现场的大面积推广应用。

致谢:感谢大庆油田测井技术专家委员会专家组对项目“三元复合驱(聚合物驱)数值试井方法研究”的指导与帮助;感谢中科大李道伦老师带领团队对项目的指导与支持。

参考文献

[1] 张传宝,任力成,张德志,等.非牛顿幂律流体试井解释方法及软件研制[J].油气地质与采收率,2002,9(3):21-23.
ZHANG Chuanbao,REN Licheng,ZHANG Dezhi *et al.* Interpretation method and the software development for well testing used in non-Newtonian power law fluid [J].

Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2002, 9(3): 21-23.
[2] 陈月明.油藏数值模拟基础[M].北京:石油大学出版社,1989:73-79.
[3] IKOKU C U. Transient flow of non-Newtonian power-law fluids in porous medium [C]. SPE 7139,1979.
[4] ODEH A S, YANG H T. Flow of non-Newtonian power-law fluids through porous medium [C]. SPE 7150,1979.
[5] VONGVUTHIPORNCHAI S, RAGHAVAN R. Well test analysis of data dominated by storage and skin: Non-Newtonian power-law fluids [C]. SPE 14454,1987.
[6] 宋考平,祝俊峰,刘泽俊,等.多区复合油藏非牛顿幂律流体试井解释[J].石油学报,1997,18(2):78-82.
SONG Kaoping, ZHU Junfeng, LIU Zejun *et al.* Well test analysis for a compound reservoir with non-Newtonian power law fluid flow [J]. Acta Petrolei Sinica, 1997, 18(2):78-82.
[7] 吴明录,姚军.聚合物驱流线数值试井解释模型及其应用[J].石油钻探技术,2007,35(2):55-58.
WU Minglu, YAO Jun. A streamline based polymer flooding numerical well testing interpretation model and applications [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007, 35(2):55-58.
[8] 聂向荣,程时清,高照敏,等.考虑不可及孔隙体积的聚合物驱压力响应[J].油气井测试,2012,21(6):9-11.
NIE Xiangrong, CHENG Shiqing, GAO Zhaomin *et al.* Pressure response in polymer flooding reservoir considering

- inaccessible pore volume [J]. *Well Testing*, 2012, 21(6): 9-11.
- [9] 曾杨, 康晓东, 谢晓庆, 等. 聚合物驱大孔道油藏试井解释方法[J]. *大庆石油地质与开发*, 2018, 37(2): 130-134.
- ZENG Yang, KANG Xiaodong, XIE Xiaoqing *et al.* Well-test interpreting method of the polymer-flooded high-capacity-channel oil reservoir [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2018, 37(2): 130-134.
- [10] 朱常玉, 程时清, 唐恩高, 等. 聚合物驱双层窜流复合模型试井分析方法[J]. *陕西科技大学学报*, 2016, 34(4): 110-114.
- ZHU Changyu, CHENG Shiqing, TANG Engao *et al.* Pressure transient analysis of crossflow double-layer composite model by polymer flooding[J]. *Journal of Shaanxi University of Science & Technology (Natural Science Edition)*, 2016, 34(4): 110-114.
- [11] 梁光跃, 沈平平, 廖新维, 等. 黏弹性聚合物驱油藏渗流规律及试井模型探讨[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2016, 38(2): 136-142.
- LIANG Guangyao, SHEN Pingping, LIAO Xinwei *et al.* Seepage flow and well test model for viscous-elastic polymer flooding reservoir [J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2016, 38(2): 136-142.
- [12] 贾智淳, 闫术, 董晓芳, 等. 剪切变稀作用对聚驱试井分析影响的数值研究[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2016, 38(5): 107-114.
- JIA Zhichun, YAN Shu, DONG Xiaofang *et al.* Numerical study on the impact of shear thinning behavior in well test analysis for polymer flooding [J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2016, 38(5): 107-114.
- [13] 董晓芳, 张晓辉, 杨彬, 等. 聚合物驱数值试井方法在油田开发中的应用[C]. 2017 油气田勘探与开发国际会议, 四川成都, 2017 年 9 月 21-22 日.
- DONG Xiaofang, ZHANG Xiaohui, YANG Bin *et al.* Application of numerical well test of polymer flooding model [C]. Presented at the 2017 International Field Exploration and Development Conference in Chengdu, China, 21-22 September, 2017.
- [14] 刘亚青, 李小平, 吴钰, 等. 数值试井方法研究进展[J]. *油气地质与采收率*, 2010, 17(5): 65-68.
- LIU Yaqing, LI Xiaoping, WU Yu *et al.* Review on numerical well testing methods [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2010, 17(5): 65-68.
- [15] 张烈辉. 实用油藏数值模拟技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004: 89-93.
- [16] 李福垠. 黑油和组分模型的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1996: 96-105.
- [17] 王新海, 韩大匡, 郭尚平. 聚合物驱数学模型、参数模型的建立与机理研究[J]. *科学通报*, 1992, 37(18): 1713-1715.
- WANG Xinhai, HAN Dakuang, GUO Shangping. Foundation of numerical model and parameter model and application study on polymer flooding [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1992, 37(18): 1713-1715.
- [18] 张仲勋, 沈全富, 陈文若, 等. 聚合物驱多学科油藏研究与应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2014: 18-27.
- [19] 刘洋. 高浓聚合物驱提高采收率方法实验研究[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010: 124-128.
- [20] 李道伦, 查文舒. 数值试井理论与方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 2013: 57-64.
- [21] 查文舒, 李道伦, 卢德唐, 等. 井间干扰条件下 PEPI 网格划分研究[J]. *石油学报*, 2008, 29(5): 742-746.
- ZHA Wenshu, LI Daolun, LU Detang *et al.* PEPI grid division in inter-well interference area [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29(5): 742-746.
- [22] 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.
- XIE Haibing, MA Yuanle, HUAN Guanren *et al.* Study of unstructured grids in reservoir numerical simulation [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2001, 22(1): 63-66.
- [23] 杨景海, 李道伦, 查文舒. 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.
- YANG Jinghai, LI Daolun, ZHA Wenshu *et al.* Numerical well testing technology and software of UST numerical well test [J]. *Well Testing*, 2011, 20(4): 5-9.

编辑 刘述忍

第一作者简介: 董晓芳, 女, 1979 年出生, 工程师, 2004 年毕业于西南石油学院石油工程专业, 现主要从事试井解释方法研究工作。电话: 0459-5576175, 13936882669; Email: dlts_dongxf@petrochina.com。地址: 黑龙江省大庆市让胡路区西柳街 4 号, 邮政编码: 163453。