

文章编号:1009-9603(2020)03-0091-09

DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.2020.03.012

聚合物/降黏剂复合驱产液能力动态预测方法

姜颜波¹, 刘璐², 元福卿³, 潘玉萍², 祝仰文³, 魏翠华³, 李峰⁴

(1. 中国石化油田勘探开发事业部, 北京 100035; 2. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛 266580;
3. 中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东东营 257015; 4. 中国石化北京埕岛西项目部, 北京 100035)

摘要:在聚合物/降黏剂复合驱过程中,由于注入的化学剂溶液黏度较高、渗流阻力大,相较于水驱阶段,注入化学剂后生产井的产液指数普遍下降,甚至难以达到预设的配产要求。目前尚没有一种明确的方法可以预测聚合物/降黏剂复合驱的产液能力,严重制约了稠油油藏化学驱技术在胜利油田的推广应用。基于数理统计原理和油藏数值模拟,首先以孤岛油田东区Ng3—4区块为例建立数值模拟模型,然后进行无因次产液指数影响因素研究,最后基于模拟结果建立无因次产液指数定量表征模型,形成了一套聚合物/降黏剂复合驱产液能力的动态预测方法。研究表明,所建立的无因次产液指数定量表征模型的数学形式简洁,模型中待定系数含义明确,提出的动态预测方法可以较好地拟合矿场实际动态数据。

关键词:聚合物/降黏剂复合驱;无因次产液指数;数值模拟;数学模型;定量表征

中图分类号:TE357.46

文献标识码:A

Dynamic prediction method of liquid production capacity in polymer/viscosity reducer compound flooding

JIANG Yanbo¹, LIU Lu², YUAN Fuqing³, PAN Yuping², ZHU Yangwen³, WEI Cuihua³, LI Feng⁴

(1. Oilfield Exploration & Development Department, SINOPEC, Beijing City, 100035, China; 2. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao City, Shandong Province, 266580, China; 3. Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257015, China; 4. Project Department of Chengdao Xi, SINOPEC, Beijing City, 100035, China)

Abstract: Due to the relatively high viscosity of the injected chemical solution and high flow resistance, the test shows that the liquid production index in the polymer/viscosity reducer flooding after the injection of the chemical agent generally decreases compared with that in the water flooding stage, and it is difficult to meet the preset requirements. At present, there is no feasible method to predict the liquid production capacity in the polymer/viscosity reducer flooding, which seriously restricts the application of chemical flooding technology in heavy oil reservoirs in Shengli Oilfield. Based on the mathematical statistics and reservoir numerical simulation methods, a numerical simulation model is first established by taking Block Ng3-4 in the eastern part of Gudao Oilfield as an example. Then, the effects of factors on dimensionless liquid production index are investigated. Finally, a quantitative characterization model for the dimensionless liquid production index is established based on the simulation results, and the dynamic methods for the liquid production capacity in the polymer/viscosity reducer flooding are formed. The research results show that the quantitative characterization model for the dimensionless liquid production index is concise in mathematical form, and the meaning of the uncertain coefficients in the model is clear. The proposed dynamic prediction method can better fit the dynamic field data.

Key words: polymer/viscosity reducer compound flooding; dimensionless liquid production index; numerical simulation; mathematical model; quantitative characterization

中国稠油资源丰富,陆上稠油资源量约占石油总资源量的20%以上,随着中国能源需求的不断增

收稿日期:2020-02-28。

作者简介:姜颜波(1972—),男,山东荣成人,高级工程师,硕士,从事油田提高采收率研究工作。E-mail:jiangyb@sinopec.com。

基金项目:国家科技重大专项“高温高盐油田化学驱提高采收率技术”(2016ZX05011-003)。

长,在未来很长一段时间内化石能源仍将占据主导地位,因此如何高效开发稠油资源变得越发重要^[1-2]。中国稠油开采目前主要采用蒸汽吞吐和蒸汽驱等热采方法,但常规热采方法需要消耗大量热能,经济性往往较差。在当今国际低油价形势下,如何降本增效开发稠油油藏成为各大油田亟待解决的关键问题^[3-5]。以聚合物、降黏剂为主的化学驱冷采技术具有能耗较低、易于施工、适用范围广等特点,具有广泛的应用前景^[6-11];然而矿场试验结果表明,由于聚合物溶液的黏度较大,阻力系数和残余阻力系数较高,区块内注入井的注入能力以及生产井的产液能力较水驱阶段会出现一定幅度的下降,部分生产井和注入井甚至难以达到配产配注要求。众多学者针对化学驱过程中吸水和产液指数的变化规律开展了研究工作。夏晞冉对聚合物/降黏剂复合驱的吸水指数进行了研究,并确定了注入速度界限^[12]。李宗阳等以经济性为约束,确定了聚合物/降黏剂复合驱的原油黏度界限^[13]。未志杰等对海上稠油油藏早期注聚产液指数的变化规律进行了研究^[14-15];王晓超等以渤海S油田为例,确定了聚合物驱的合理产液指数降幅^[16]。然而化学剂对产液指数的影响是一个持续过程,产液指数降低幅度等单一指标难以准确地反映产液指数的动态变化过程,严重制约了稠油油藏化学驱技术的推广应用^[17-18]。为此,基于数理统计原理和油藏数值模拟方法,构建无因次产液指数定量表征模型,进而提出一套聚合物/降黏剂复合驱产液能力的动态预测方法。以孤岛油田东区Ng3—4单元为例,建立数值模拟模型,并对聚合物/降黏剂复合驱的无因次产液指数进行了预测,研究成果可以为稠油油藏聚合物/降黏剂复合驱的推广应用提供指导。

1 聚合物/降黏剂复合驱产液能力表征

1.1 产液能力评价指标

对于聚合物/降黏剂复合驱区块,其生产井产液能力的变化主要是与注入化学剂前的产液能力进行对比。因此,采用无因次产液指数作为聚合物/降黏剂复合驱产液能力的评价指标,其表达式为:

$$\begin{cases} \Delta J = \frac{J}{J_0} \\ J = \frac{q}{p_a - p_{wf}} \end{cases} \quad (1)$$

1.2 无因次产液指数曲线变化规律

注入的化学剂由注入井运移至生产井需要一定的时间,因此在注入化学剂初期产液指数仍然遵循水驱时的规律,呈继续上升趋势。但当所注入的高黏度聚合物和降黏剂达到一定量时,生产井的产液能力开始下降,在后续水驱阶段,随着低黏度水的稀释和冲刷,渗流阻力下降至低峰值后又不断恢复。仅从产液指数开始下降时进行研究,产液指数的变化规律表现为无因次产液指数曲线在实施化学驱后整体呈现漏斗形,并可分为2个阶段:注入化学剂阶段和后续水驱阶段(图1)。为了定量表征无因次产液指数曲线的变化规律,定义 T_1 , ΔJ_1 , ΔJ_{\min} , T_{\min} , ΔJ_{\max} 和 T_{\max} 共6个特征参数。

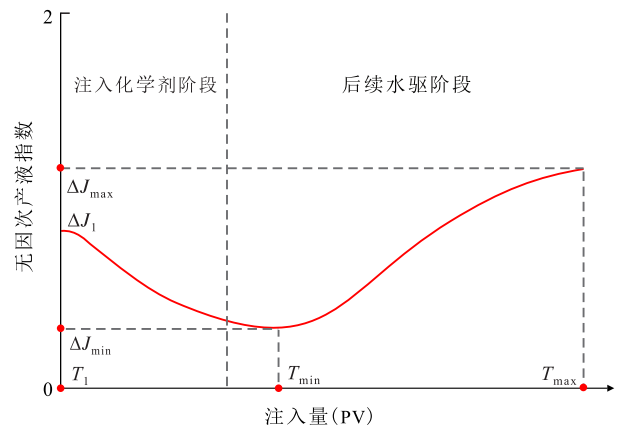


图1 聚合物/降黏剂复合驱无因次产液指数曲线变化
Fig.1 Schematic diagram of dimensionless liquid production index in polymer/viscosity reducer compound flooding

1.3 无因次产液指数定量表征模型

如图1所示,聚合物/降黏剂复合驱无因次产液指数曲线通常呈现不对称性。为了描述这种不对称性,引入几何学中的不对称偏差项,其表达式为:

$$\sigma = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\min} - T_1} \quad (2)$$

σ 值越趋近于1,无因次产液指数曲线的对称性越好;反之,则曲线的不对称性越强。

对于偏漏斗形的无因次产液指数曲线,在几何学中可表征为:

$$\Delta J = (1.4 - a) + b \left(\frac{T - c}{d - c} \right)^f e^{f \left(1 - \frac{T - c}{d - c} \right)} \quad (3)$$

(3)式中基于矿场实际设定的 ΔJ_{\max} 的上限值为1.4,其与储层性质相关。

对于一个特定的区块,其生产井产液指数的变化与注入化学剂的质量浓度、化学剂注入段塞尺寸以及降黏剂性质等有关,各待定系数与这些参数存在函数关系,即:

$$a \parallel b \parallel c \parallel d \parallel f = f(X_1) + f(X_2) + f(X_3) + f(X_4) + \dots \quad (4)$$

为了得到(4)式的具体表达式,首先对影响产液指数的各因素进行分析,然后采用正交试验设计方法进行方案设计,并基于试验结果,采用 Levenberg-Marquardt (LM)算法对各参数进行多元非线性回归,进而得到无因次产液指数定量表征模型^[19-21]。

2 应用实例

2.1 数值模拟模型建立

以孤岛油田东区 Ng3—4 单元为目标区块,模拟区域的含油面积约为 0.72 km²,平均有效油层厚度为 18.92 m,石油地质储量约为 386.58×10⁴ t,油层埋深为 1 200 ~ 1 305 m,油藏温度为 71 ℃,初始地层压力为 12.5 MPa,平均孔隙度为 34%,孔隙体积为 4 621×10⁴ m³,平均渗透率为 1 138 mD,渗透率变异系数为 0.7,原始含油饱和度为 61%,地层原油黏度为 573 mPa·s,地层水矿化度为 5 694 mg/L。数值模拟模型共划分为 7 个模拟层,采用直角坐标网格,总网格数为 81 900 个,网格步长为 50 m。

孤岛油田东区 Ng3—4 单元于 1975 年 8 月投产,先后经历了水驱开发和化学驱开发 2 个阶段。为了得到与现场实际相符合的化学驱模拟效果,在 CMG 模拟软件中,考虑聚合物的吸附、降解、黏度与质量浓度关系等因素,聚合物溶液的黏度与质量浓度关系曲线以及油、水相相对渗透率曲线如图 2 和图 3 所示。结合矿场实际情况,数值模拟模型选取的基础方案为:1975 年 8 月模型投产,经历注水开发后于 2011 年 5 月转入聚合物/降黏剂复合驱阶段,聚合物质量浓度为 2 000 mg/L,降黏剂质量分数为 0.4%,降

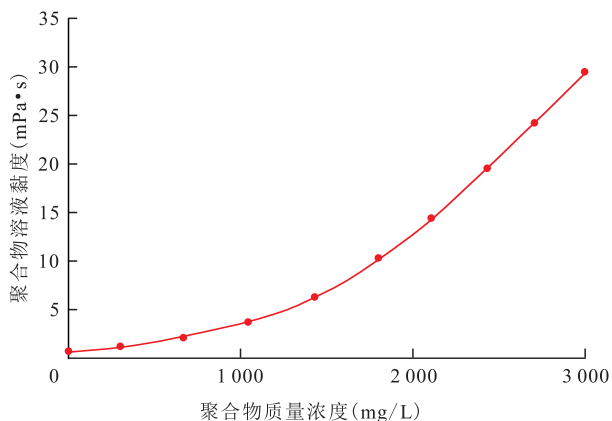


图2 数值模拟模型中聚合物溶液黏度与质量浓度关系曲线

Fig.2 Relationship between viscosity and mass concentration of polymer solution in numerical model

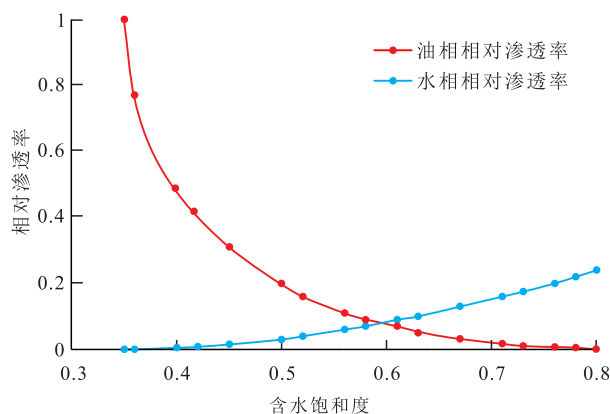


图3 数值模拟模型中油水相对渗透率曲线

Fig.3 Oil-water relative permeability curve in numerical model

黏剂降黏率为 90%。当化学剂注入段塞达到 0.4 PV 时转为后续水驱开发,当区块综合含水率达到 98% 时模拟终止。

2.2 无因次产液指数影响因素

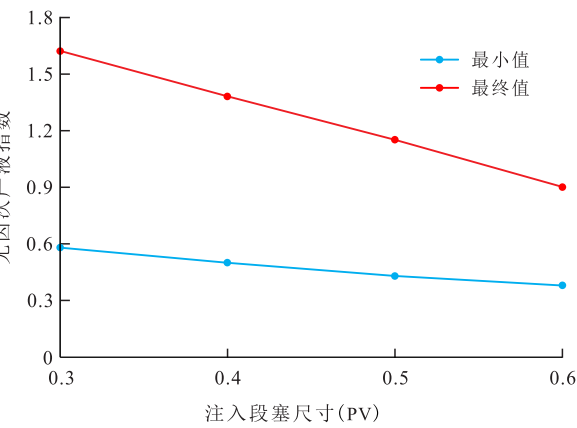
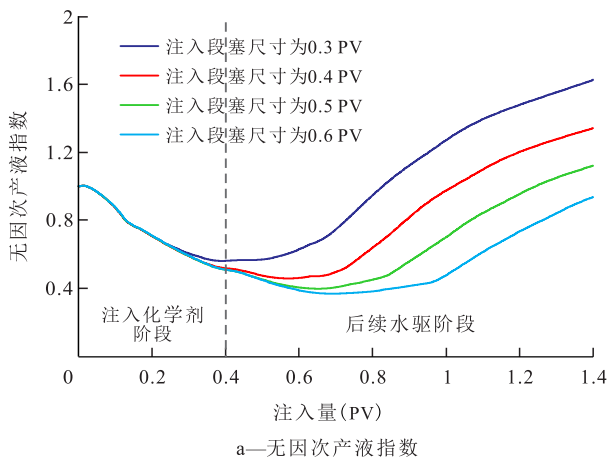
当目标油藏确定后,其储层参数即已固定,此时生产井产液指数的影响因素主要为化学剂性质参数,因此,选取化学剂注入段塞尺寸、聚合物质量浓度、降黏剂质量分数以及降黏剂降黏率共 4 个主要因素,利用单因素分析法研究其对无因次产液指数的影响。各单因素的变化范围如表 1 所示。

表1 无因次产液指数影响因素取值
Table1 Influencing factors of dimensionless liquid production index

化学剂注入段塞尺寸(PV)	聚合物质量浓度(mg/L)	降黏剂质量分数(%)	降黏剂降黏率(%)
0.3	1 000	0.2	80
0.4	1 500	0.3	85
0.5	2 000	0.4	90
0.6	2 500	0.5	95

2.2.1 化学剂注入段塞尺寸

分析化学剂注入段塞尺寸对无因次产液指数的影响(图 4a)可以看出,注入化学剂后生产井的无因次产液指数普遍下降,注入化学剂前期各曲线几乎重合,但在后期化学剂注入段塞尺寸会对无因次产液指数曲线的抬升幅度产生较大影响,注入量越低,曲线后期的抬升幅度越大。同时化学剂注入段塞尺寸对曲线的漏斗宽度也有较大影响,化学剂注入段塞尺寸越大,漏斗宽度也越大。这是因为随着化学剂注入段塞尺寸的增大,化学剂溶液的波及范围扩大,渗流阻力逐渐增大,从而影响采出井的产液能力,化学剂注入段塞尺寸越大,吸附在岩石表面的化学剂质量浓度越高,残余阻力也越大,因此后期无因次产液指数的恢复速率和恢复程度越低。从无因次产液指数的统计结果(图 4b)可以看出,其



b—无因次产液指数最小值和最终值
图4 化学剂注入段塞尺寸对无因次产液指数的影响
 Fig.4 Effect of injection slug size of chemical agent on dimensionless liquid production index

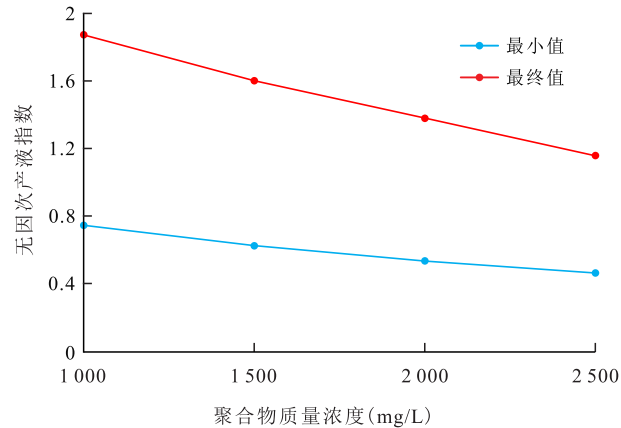
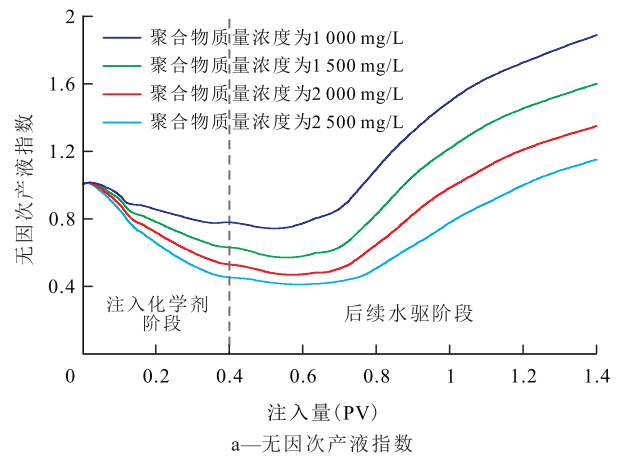
最低可降至约为0.3,说明高段塞时生产井的产液能力最低可降至原来的三分之一。

2.2.2 聚合物质量浓度

从聚合物质量浓度对无因次产液指数的影响(图5)可以看出,与化学剂注入段塞尺寸所造成的影响不同,注入化学剂后各曲线前期不重合,即聚合物质量浓度对无因次产液指数曲线的影响表现在整个注入化学剂和后续水驱阶段。聚合物质量浓度越高,无因次产液指数的最小值和最终值均越小,这主要是因为聚合物质量浓度越高,对应的化学剂溶液黏度也越高,流动阻力越大,因此产液能力降幅相应也越大。在后续水驱阶段,由于低黏度水的稀释和驱替作用,生产井附近的化学剂质量浓度逐渐降低,无因次产液指数不断恢复,且低质量浓度聚合物所对应生产井的产液指数的恢复速度明显较快。

2.2.3 降黏剂质量分数

降黏剂质量分数对无因次产液指数的影响与化学剂注入段塞尺寸、聚合物质量浓度不同,降黏剂质量分数主要对无因次产液指数曲线的前期形



b—无因次产液指数最小值和最终值
图5 聚合物质量浓度对无因次产液指数的影响
 Fig.5 Effect of polymer mass concentration on dimensionless liquid production index

态影响较大,而在化学驱后期曲线趋向于一致(图6)。降黏剂质量分数越高,化学驱前期无因次产液指数降幅越小,这主要是因为降黏剂可以大幅降低原油黏度。降黏剂质量分数越高,原油在地层中流动时的黏滞阻力越小,无因次产液指数的下降幅度也越小。同时,由于目前化学驱所采用降黏剂的降黏率一般在90%以上,降黏效果较好,因此降黏剂达到一定质量分数后,继续提高质量分数对无因次产液指数的影响较小。对比化学剂注入段塞尺寸、聚合物质量浓度和降黏剂质量分数对无因次产液指数的影响可以看出,降黏剂质量分数对无因次产液指数的影响程度远低于聚合物质量浓度和化学剂注入段塞尺寸。

2.2.4 降黏剂降黏率

由降黏剂降黏率对无因次产液指数的影响(图7)可以看出,降黏剂降黏率对注入化学剂和后续水驱阶段的无因次产液指数均会产生影响。降黏率越高,地层中的原油黏度降低幅度越大,因此其流动性越好,注入化学剂后生产井的产液能力也越高。但总体上,降黏剂降黏率对无因次产液指数的

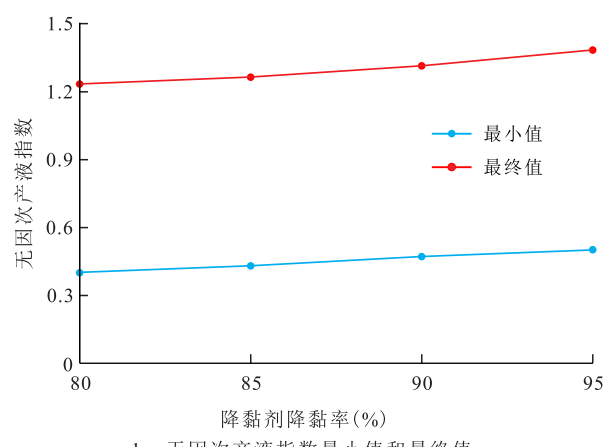
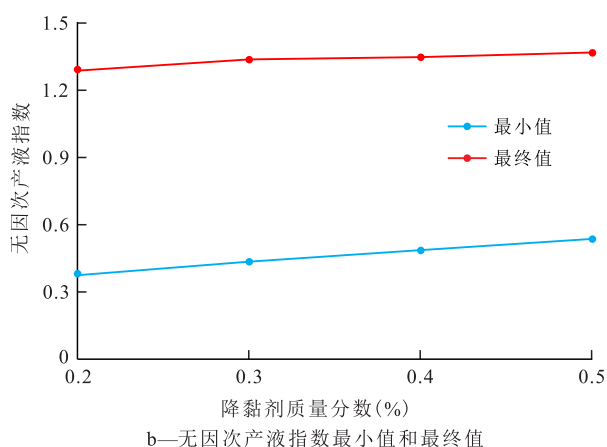
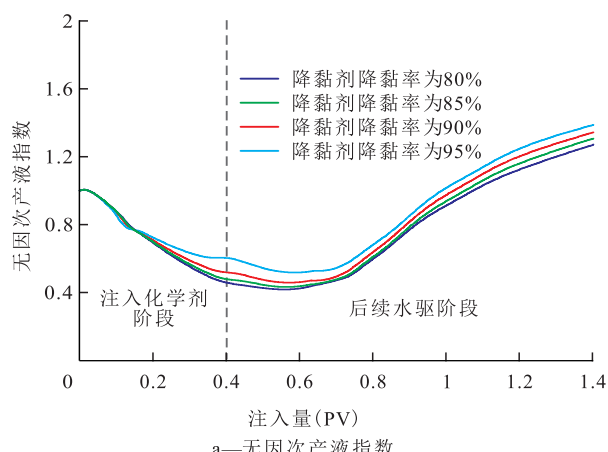
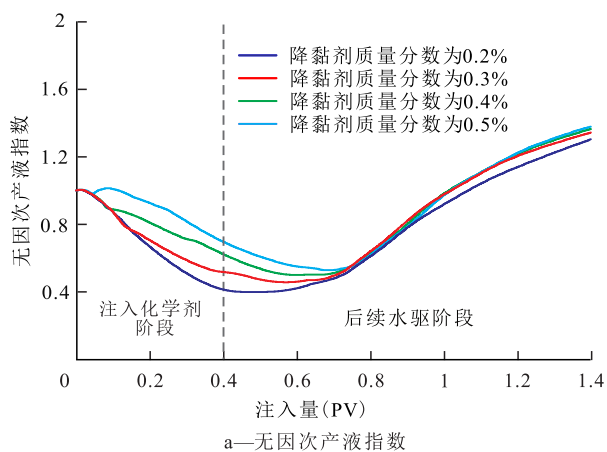


图6 降黏剂质量分数对无因次产液指数的影响

Fig.6 Effect of mass fraction of viscosity reducer on dimensionless liquid production index

图7 降黏剂降黏率对无因次产液指数的影响

Fig.7 Effect of viscosity reducer on the dimensionless liquid production index

影响远小于聚合物质量浓度和化学剂注入段塞尺寸。

2.3 无因次产液指数定量表征

2.3.1 模型的建立

无因次产液指数影响因素的研究结果表明,所选取的化学剂注入段塞尺寸、聚合物质量浓度、降黏剂质量分数和降黏剂降黏率这4个影响因素均会对无因次产液指数曲线的形态产生一定影响,各曲线的初始值几乎相同,且开始下降时刻也几乎相同,而(3)式中的系数 a 和 c 分别与曲线的初始值及下降时刻相关。对图4—图7中的所有曲线采用(3)式进行拟合,发现各曲线所对应的 a 和 c 值变化范围很小,因此对系数 a 和 c 分别取值为0.032和3.778,但对应的系数 b , d 和 f 的变化幅度均较大,则无因次产液指数定量表征模型可表示为:

$$\Delta J = (1.4 - 0.032) + b \left(\frac{T - 3.778}{d - 3.778} \right)^f e^{f \left(1 - \frac{T - 3.778}{d - 3.778} \right)} \quad (5)$$

由(5)式可知,仅需建立 b , d 和 f 与上述4个影响因素之间的定量关系,即可得到无因次产液指数

定量表征模型。

以化学剂注入段塞尺寸为例,研究不同化学剂注入段塞尺寸所对应的 b , d 和 f 的取值分布(图8),可以看出 b 和 f 与化学剂注入段塞尺寸之间呈现良好的二次函数关系,而 d 与化学剂注入段塞尺寸之间呈现良好的线性关系。同理可分析 b , d 和 f 与聚合物质量浓度、降黏剂质量分数以及降黏剂降黏率之间的关系,结果表明: b 与聚合物质量浓度和降黏剂降黏率之间均呈现良好的二次函数关系,与降黏剂质量分数之间呈现良好的线性关系; d 与聚合物质量浓度、降黏剂质量分数之间呈现良好的二次函数关系; f 与降黏剂降黏率之间呈现良好的二次函数关系,与聚合物质量浓度、降黏剂质量分数之间呈现良好的线性关系,由此可以得到各系数的回归关系式为:

$$\begin{cases} b = a_1 x_1^2 + a_2 x_1 + a_3 x_2^2 + a_4 x_2 + a_5 x_3 + a_6 x_4^2 + a_7 x_4 + a_0 \\ d = m_1 x_1 + m_2 x_2^2 + m_3 x_2 + m_4 x_3^2 + m_5 x_3 + m_0 \\ f = n_1 x_1^2 + n_2 x_1 + n_3 x_2 + n_4 x_3 + n_5 x_4^2 + n_6 x_4 + n_0 \end{cases} \quad (6)$$

根据多元非线性回归原理,采用正交试验设计

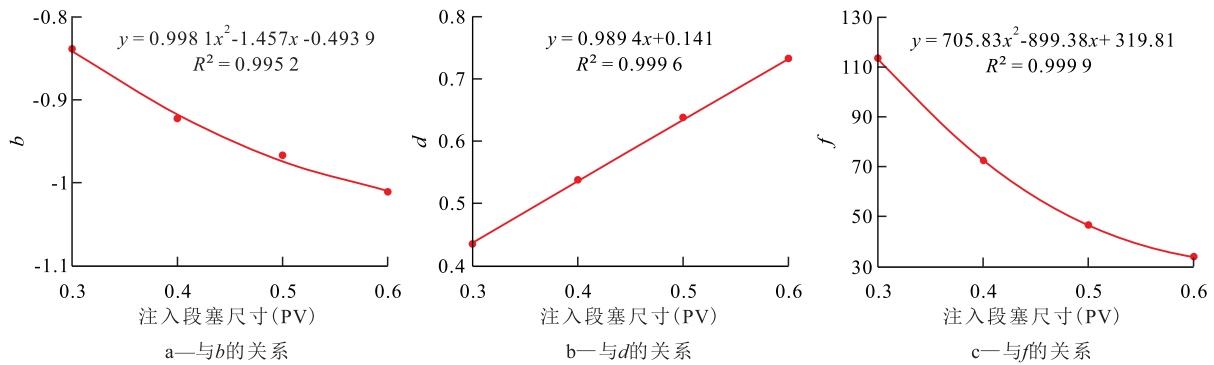


图8 化学剂注入段塞尺寸与无因次产液指数定量表征模型中主控系数的关系

Fig.8 Relationship between injection slugs size of chemical agent and main controlling coefficients in quantitative characterization model for dimensionless liquid production index

得到(6)式中各多项式系数。采用4因素4水平共计16组试验方案进行后续分析和回归,各因素的水平取值如表2所示。对16组试验方案所对应的无因次产液指数曲线采用(6)式进行回归,可得到各方案对应的**b**,**d**和**f**值(表3)。

表2 无因次产液指数影响因素水平取值
Table2 Level of influencing factors of dimensionless liquid production index

水平	x_1 (PV)	x_2 (mg/L)	x_3 (%)	x_4 (%)
1	0.3	1 000	0.2	80
2	0.4	1 500	0.3	85
3	0.5	2 000	0.4	90
4	0.6	2 500	0.5	95

表3 正交试验设计结果
Table3 Design results of orthogonal experiments

水平	x_1 (PV)	x_2 (mg/L)	x_3 (%)	x_4 (%)	b	d	f
1	0.3	1 000	0.2	80	-0.75	0.36	209.48
2	0.4	1 000	0.3	85	-0.73	0.43	138.47
3	0.5	1 000	0.4	90	-0.67	0.52	108.26
4	0.6	1 000	0.5	95	-0.6	0.76	111.24
5	0.4	1 500	0.2	90	-0.92	0.48	103.06
6	0.3	1 500	0.3	95	-0.65	0.34	162.78
7	0.6	1 500	0.4	80	-0.96	0.69	50.06
8	0.5	1 500	0.5	85	-0.87	0.64	73.72
9	0.5	2 000	0.2	95	-1	0.62	48.54
10	0.3	2 000	0.3	90	-0.85	0.44	118.04
11	0.6	2 000	0.4	85	-1	0.76	35.02
12	0.4	2 000	0.5	80	-0.9	0.6	68.34
13	0.6	2 500	0.2	85	-1.09	0.77	26.33
14	0.5	2 500	0.3	80	-1.04	0.7	32.77
15	0.4	2 500	0.4	95	-0.87	0.65	46.41
16	0.3	2 500	0.5	90	-0.77	0.54	81.52

将正交试验设计得到的**b**,**d**和**f**值代入(6)式

中,采用LM法进行多元非线性回归,可得到**b**,**d**和**f**的表达式为:

$$\begin{cases} b = 1.556x_1^2 - 1.951x_1 + 1.3 \times 10^{-7}x_2^2 - 6 \times 10^{-4}x_2 + 0.478x_3 + 3 \times 10^{-4}x_4^2 - 0.051x_4 + 2.056 \\ d = 1.008x_1 + 2.1 \times 10^{-8}x_2^2 + 3.4 \times 10^{-5}x_2 + 1.407x_3^2 - 0.735x_3 + 0.067 \\ f = 1\,061.574x_1^2 - 1\,230.462x_1 - 0.063x_2 - 27.298x_3 + 0.087x_4^2 - 15.099x_4 + 1\,184.945 \end{cases} \quad (7)$$

采用(7)式计算对应16组正交试验方案的**b**,**d**和**f**多元线性回归值,并与表3中的曲线拟合值进行对比,结果(图9)表明,不同试验方案下**b**,**d**和**f**的曲线拟合值与多元非线性回归值在**y = x**左右两侧分布,表明二者之间存在着良好的相关性,多元非线性回归拟合的多项式精度较高。因此,当已知油藏化学驱参数时,可直接代入(7)式中得到**b**,**d**和**f**值,然后根据(5)式即可直接得到无因次产液指数的表达式及其所对应的分布曲线。

2.3.2 模型的验证及分析

在各因素的水平取值范围内随机挑选与正交试验方案不重合的4组方案进行数值计算,将模拟曲线与无因次产液指数定量表征模型所预测的曲线进行对比分析,用以验证所建立无因次产液指数定量表征模型的准确性。选取的4组验证方案如表4所示,由不同方案下模拟曲线与无因次产液指数定量表征模型预测曲线对比(图10)可以看出,不同方案下无因次产液指数定量表征模型预测曲线与模拟曲线具有良好的匹配性,表明无因次产液指数定量表征模型的预测精度较高,可以满足矿场预测的需要。

中国胜利、大庆等油田普遍采用的聚合物驱、强化聚合物驱、二元驱、三元驱、凝胶驱甚至泡沫驱

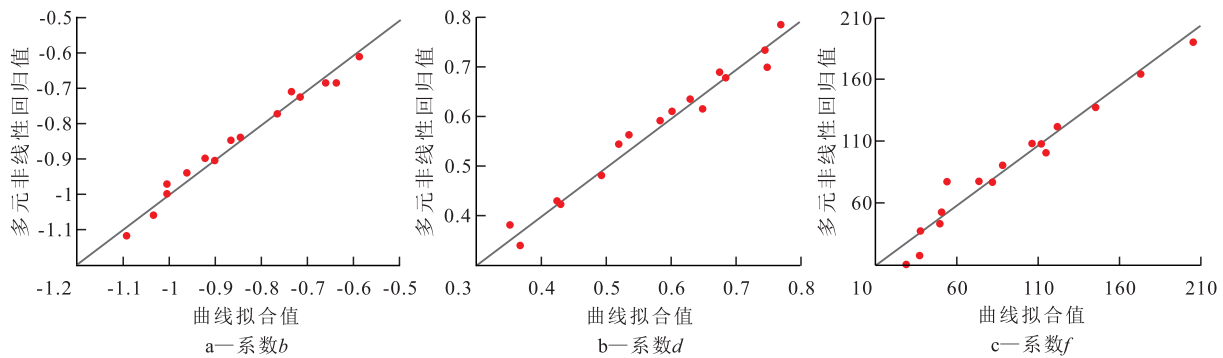


图9 主控系数的曲线拟合值与无因次产液指数定量表征模型中多元非线性回归值对比

Fig.9 Comparison between fitting values of main controlling factors and coefficients with multiple nonlinear regression in quantitative characterization model for dimensionless liquid production index

表4 验证方案
Table4 Verification cases

方案编号	化学剂注入段塞尺寸(PV)	聚合物质量浓度(mg/L)	降黏剂质量分数(%)	降黏剂降黏率(%)
1	0.6	1 500	0.3	85
2	0.6	2 000	0.3	80
3	0.3	2 000	0.4	95
4	0.4	2 500	0.3	90

等化学驱方式均是通过改善流度比以扩大波及系数,在化学剂注入后无因次产液指数均会出现明显下降;但在后续水驱阶段,由于化学剂的产出以及吸附、降解,导致驱替液中的化学剂质量浓度不断降低,无因次产液指数不断恢复,因此在上述化学驱过程中均会表现出无因次产液指数先降低后升高的偏漏斗形曲线分布特征。所建立的无因次产液指数定量表征模型中的(3)式为偏漏斗形曲线的

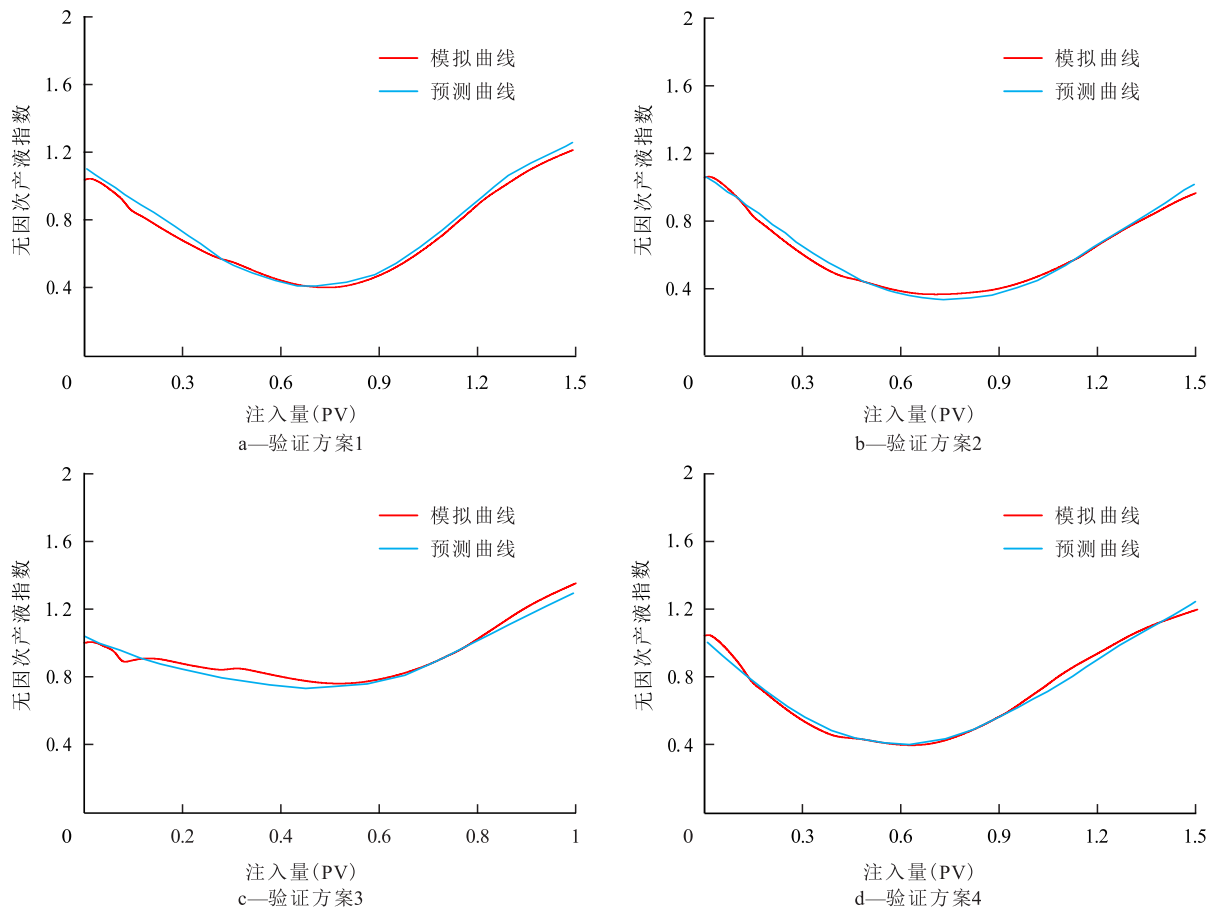


图10 无因次产液指数定量表征模型预测曲线与模拟曲线对比

Fig.10 Comparison between prediction curves and simulation curves of dimensionless liquid production index in quantitative characterization model

通式,因此可以直接推广为上述各种化学驱方式无因次产液指数曲线的预测模型,但该式中各系数的取值与化学剂的物化参数有关,因此在推广应用时需考虑其物化特征对无因次产液指数的影响,通过多元非线性回归分析确定(3)式中各系数的表达式,进而得到可靠的无因次产液指数预测模型。

3 结论

利用数理统计原理和油藏数值模拟方法,建立一套聚合物/降黏剂复合驱产液能力的动态预测方法。该方法以无因次产液指数作为评价指标,根据数值模拟结果,采用多元非线性回归方法得到无因次产液指数定量表征模型,进而得到目标区块在不同化学驱方案下的产液指数变化曲线,为聚合物/降黏剂复合驱的方案设计提供了支持和帮助。无因次产液指数影响因素的分析结果表明,无因次产液指数曲线在实施化学驱后整体呈现先下降再上升的偏漏斗形;化学剂注入段塞尺寸在注入化学剂前期对无因次产液指数的影响较小,但在后期主要影响无因次产液指数的恢复程度;与之相反,降黏剂质量分数则主要对无因次产液指数曲线的前期形态影响较大,聚合物质量浓度和降黏剂降黏率对无因次产液指数曲线的前期和后期均有一定程度的影响,但以聚合物质量浓度对无因次产液指数的影响程度更大。模型验证结果表明,所建立的无因次产液指数定量表征模型预测曲线与模拟曲线具有良好的匹配性,证明建立的无因次产液指数定量表征模型的预测精度较高,可以满足矿场预测的需要。

符号解释

ΔJ ——无因次产液指数; J ——产液指数, $\text{m}^3/(\text{d}\cdot\text{MPa})$; J_0 ——注入化学剂前的产液指数, $\text{m}^3/(\text{d}\cdot\text{MPa})$; q ——生产井的日产量, m^3/d ; p_a ——地层平均压力,MPa; p_{wf} ——生产井的井底流动压力,MPa; T_1 ——无因次产液指数初始下降时刻, a ; ΔJ_1 —— T_1 对应的 ΔJ 的局部极大值; T_{\min} —— ΔJ_{\min} 对应的时刻, a ; T_{\max} —— ΔJ_{\max} 对应的时刻, a ; σ ——不对称偏差项; a, b, c, d, f ——模型中的待定系数,其中, a 与 ΔJ_1 有关, b 与 ΔJ_{\min} 有关, c 与 T_1 有关, d 与 T_{\min} 有关, f 与 σ 有关; T ——累积注入量,PV; $f(X_1), f(X_2), f(X_3), f(X_4)$ ——无因次产液指数定量表征模型主控系数与影响因素 X_1, X_2, X_3, X_4 之间的回归式; x_1 ——化学剂注入段塞尺寸,PV; x_2 ——聚合物质量浓度,mg/L; x_3 ——降黏剂质量分数,%; x_4 ——降黏剂降黏率,%; $a_0-a_7, m_0-m_5, n_0-n_6$ ——多项式系数。

参考文献

- [1] 刘文章.热采稠油油藏开发模式[M].北京:石油工业出版社,1998.
LIU Wenzhang.The development model of heavy oil reservoirs by thermal recovery[M].Beijing:Petroleum Industry Press,1998.
- [2] 郑洪涛,崔凯华.稠油开采技术[M].北京:石油工业出版社,2012.
ZHENG Hongtao,CUI Kaihua.Heavy oil recovery technology[M].Beijing:Petroleum Industry Press,2012.
- [3] 裴海华,张贵才,葛际江,等.化学驱提高普通稠油采收率的研究进展[J].油田化学,2010,27(3):350-356.
PEI Haihua,ZHANG Guicai,GE Jijiang,et al.Advance in enhanced ordinary heavy oil recovery by chemical flooding[J].Oilfield Chemistry,2010,27(3):350-356.
- [4] 侯健.提高原油采收率潜力预测方法[M].东营:中国石油大学出版社,2007.
HOU Jian.A prediction method for the potential of enhancing oil recovery [M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2007.
- [5] 郭太现,苏彦春.渤海油田稠油油藏开发现状和技术发展方向[J].中国海上油气,2013,25(4):26-30,35.
GUO Taixian,SU Yanchun.Current status and technical development direction in heavy oil reservoir development in Bohai Oilfields[J].China Offshore Oil and Gas,2013,25(4):26-30,35.
- [6] 束青林,张本华,毛卫荣,等.孤岛油田特高含水期提高采收率技术措施及效果[J].油气地质与采收率,2009,16(5):52-55.
SHU Qinglin,ZHANG Benhua,MAO Weirong,et al.EOR method and effect at Technical measures and effect at extra high water cut stage in Gudao Oilfield[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2009,16(5):52-55.
- [7] 李锦超,王磊,丁保东,等.稠油热/化学驱油技术现状及发展趋势[J].西安石油大学学报:自然科学版,2010,25(4):36-40.
LI Jinchao,WANG Lei,DING Baodong,et al.Present situation and development trend of the thermal/chemical flooding technology of heavy oil [J].Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition,2010,25(4):36-40.
- [8] 姚同玉,李继山.稠油油藏化学驱实验研究[J].油田化学,2010,27(1):84-87,42.
YAO Tongyu,LI Jishan.An experiments study on chemical flood for heavy oil reservoirs [J].Oilfield Chemistry,2010,27(1):84-87,42.
- [9] 丁保东,张贵才,葛际江,等.普通稠油化学驱的研究进展[J].西安石油大学学报:自然科学版,2011,26(3):52-58.
DING Baodong,ZHANG Guicai,GE Jijiang,et al.Research progress in the chemical flooding of conventional heavy oil [J].Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition,2011,26(3):52-58.
- [10] 蒋平,葛际江,张贵才,等.稠油油藏化学驱采收率的影响因素[J].中国石油大学学报:自然科学版,2011,35(2):166-171.
JIANG Ping,GE Jijiang,ZHANG Guicai,et al.Influence factor on oil recovery efficiency for chemical flooding of heavy oil reservoir

- [J].Journal of China University of Petroleum; Edition of Natural Science,2011,35(2):166-171.
- [11] 李爱芬,任晓霞,江凯亮,等.表面活性剂改善稠油油藏水驱开发效果实验研究——以东辛油田深层稠油油藏为例[J].油气地质与采收率,2014,21(2):18-21.
LI Aifen, REN Xiaoxia, JIANG Kailiang, et al. Experimental study on influencing factors of injecting surfactant to improve water flooding for heavy oil reservoirs—case of Dongxin heavy oil reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21 (2): 18-21.
- [12] 夏晞冉. 聚合物-降粘剂复合驱注入速度界限确定方法[J]. 油气地质与采收率, 2018, 25(6): 89-95.
XIA Xiran. A method of calculating injection rate limit for polymer/viscosity reducer combination flooding [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2018, 25(6): 89-95.
- [13] 李宗阳,王叶飞,张娜,等. 聚合物-降粘剂复合驱原油粘度界限确定方法[J]. 油气地质与采收率, 2018, 25(6): 96-100.
LI Zongyang, WANG Yefei, ZHANG Na, et al. Determination method of the upper limit of oil viscosity suitable for polymer/viscosity reducer combination flooding [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2018, 25(6): 96-100.
- [14] 未志杰,康晓东,何春百,等. 海上多层稠油聚合物驱产液指数变化主控因素[J]. 新疆石油地质, 2018, 39(5): 578-584.
WEI Zhijie, KANG Xiaodong, HE Chunbai, et al. Main controlling factors on liquid productivity index for polymer flooding in offshore multi-layered heavy oil reservoirs [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2018, 39(5): 578-584.
- [15] 未志杰. 海上稠油油藏早期注聚产液指数变化规律[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(23): 212-218.
WEI Zhijie. Liquid productivity index behavior for earlier polymer flood in offshore heterogeneous heavy-oil reservoirs [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(23): 212-218.
- [16] 王晓超,王锦林,张维易,等. 渤海S油田聚合物驱合理产液指数降幅研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2018, 37(3): 104-108.
WANG Xiaochao, WANG Jinlin, ZHANG Weiyi, et al. Study on the reasonable reduction degree of the liquid production index for polymer-flooded Bohai oilfield S [J]. Petroleum Geology & Oil-field Development in Daqing, 2018, 37(3): 104-108.
- [17] 何春百,王大威,未志杰,等. 聚合物驱产液指数变化物理模拟实验[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(34): 210-214.
HE Chunbai, WANG Dawei, WEI Zhijie, et al. Physical simulation experiment of polymer flooding liquid productivity index variation [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17 (34) : 210-214.
- [18] 陈涛平. 石油工程[M]. 北京:石油工业出版社, 2011.
CHEN Taoping. Petroleum engineering [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.
- [19] LEVENBERG K. A method for the solution of certain non-linear problems in least squares [J]. Quarterly of Applied Mathematics, 1944, 2(2): 164-168.
- [20] MARQUARDT D W. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters [J]. Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics, 1963, 11(2): 431-441.
- [21] 杨彦明,姜立新,王禛祥. 基于Levenberg-Marquardt方法的内蒙古及邻区地震烈度影响场改进技术[J]. 地震, 2017, 37(3): 117-126.
YANG Yanming, JIANG Lixin, WANG Zhenxiang. An improved technology for estimating seismic influence field based on Levenberg-Marquardt method [J]. Earthquake, 2017, 37(3): 117-126.

编辑 邹澂滢