

文章编号: 0253-2697(2013)04-0727-06 DOI:10.7623/syxb201304013

海上稠油聚合物驱开发指标定量表征

张贤松^{1,2} 孙福街^{1,3} 侯 健⁴ 康晓东^{1,2} 谢晓庆^{1,2} 蒋珊珊^{1,2}

(1. 海洋石油高效开发国家重点实验室 北京 100027; 2. 中海油研究总院 北京 100027;
3. 中海石油(中国)有限公司开发生产部 北京 100010; 4. 中国石油大学石油工程学院 山东青岛 266580)

摘要:考虑到渤海稠油油藏的复杂性,需要定量评价不同类型油藏聚合物驱的开发指标。笔者建立了适合稠油聚合物驱开发指标定量表征模型,具有 3 个有明确物理意义的特征参数,包括累积注聚量下极限采收率、模型导数曲线拐点处的累积注入量等参数。利用该模型定量表征了渤海油田不同类型油藏聚合物驱开发指标。与数值模拟相比,绝对误差基本控制在 0.5% 以内,平均相对误差也能控制在 4% 以内,满足定量评价聚合物驱开发指标计算需求。该模型易于确定特征参数,且具有较好的外推性,可用于工程问题中类似增长曲线的拟合和预测。

关键词:海上稠油;聚合物驱;提高采收率;开发指标;数学模型;定量表征

中图分类号:TE357 文献标识码:A

Quantitative characterization of production indices for polymer flooding of offshore heavy oils

ZHANG Xiansong^{1,2} SUN Fujie^{1,3} HOU Jian⁴ KANG Xiaodong^{1,2} XIE Xiaoqing^{1,2} JIANG Shanshan^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Offshore Oil Exploitation, Beijing 100027, China; 2. CNOOC Research Institute, Beijing 100027, China; 3. Development & Production Division, CNOOC (China) Ltd. Beijing 100010, China; 4. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: Due to the complexity of Bohai heavy-oil reservoirs it is necessary to quantitatively evaluate production indices for polymer flooding of different reservoirs. A quantitative characterization model was established which can evaluate production indices for polymer flooding of heavy-oil reservoirs. It includes 3 parameters characteristic of specific physical meanings, such as the ultimate oil recovery of cumulative influx, the cumulative influx of polymer solution reflecting the breakpoint of derivative curves in the model, and the peak value of enhanced oil recovery corresponding to incremental oil-production curves. The model was applied to the quantitative characterization of production indices for polymer flooding of different reservoirs in the Bohai oilfield. Compared with the result of numerical simulation, the absolute error is under 0.5% with a mean relative error generally less than 4%, which satisfied requirements of quantitatively evaluating production indices for polymer flooding of heavy-oil reservoirs. This mathematical model is suitable to the determination of specific parameters and can be well extrapolated. The model can also be used in matching and predicting similar growth curves in other engineering projects.

Key words: offshore heavy oil; polymer flooding; enhanced oil recovery (EOR); production index; mathematical model; quantitative characterization

渤海油田属于海上常规稠油油藏,目前水驱采收率不高,聚合物驱提高采收率潜力巨大^[1-5]。由于海上油田开发的特殊性,油藏地质及流体类型变化大,实施聚合物驱提高采收率技术存在一定的风险性。海上注聚的油藏适应性和实施的技术经济性^[6-7],是目前海上稠油实施注聚亟待解决的问题。目前,国外尚无实施海上注聚的相关研究,在渤海油田也仅处于探索和现场试验阶段^[8-10],对聚合物驱的动态规律和开发指标认识还不多。因此,对渤海稠油藏进行聚合物驱开发

指标的定量评价研究十分必要。

通常聚合物驱累积增油随累积注入量的变化关系曲线是一种增长型曲线,而且增油量曲线是非对称型的。常用的增长曲线模型主要有 Weibull Gompertz 模型、Logistic 模型和 Gompertz 模型^[11-12]。Weibull Gompertz 模型两端不存在极限值,不适合表征累积增油曲线;Logistic 模型虽然存在极限,但是其导数曲线是对称型的。Gompertz 模型既存在极限值,其导数曲线又能反映出非对称型曲线的特征。笔者采用数学分

基金项目:国家重大科技专项“海上稠油高效开发新技术”子课题(2011ZX05024-004)资助。

第一作者与通信作者:张贤松,男,1965年1月生,1986年毕业于华东石油学院采油工程专业,2006年获中国石油大学(北京)油气田开发专业博士学位,现为中海油研究总院开发专家,主要从事油气田开发与提高采收率技术方面的研究工作。Email:zxsong6563@126.com

析与数值模拟相结合的方法,对海上稠油实施聚合物驱提高采收率的开发指标定量表征进行了研究,得到的定量表征模型数学形式简洁,便于确定特征参数,且具有较好的外推性,与典型模型的数值模拟计算结果进行了对比,结果比较理想。油层温度、原油黏度、地层水矿化度包括二价离子,反映了影响聚合物驱开发指标的不可变油藏因素。根据这些油藏参数和定量表征模型数值模拟计算就可以得到聚合物驱开发指标,也可以用于工程问题中类似增长曲线的拟合和预测。

1 聚合物驱开发指标定量表征的数学模型

聚合物驱增油量从零开始上升,到达最大值后逐渐下降,最终趋于零,形状类似于倒扣的漏斗,曲线漏斗通常呈现出不对称性^[13]。建立聚合物驱开发指标定量表征模型的原则为:模型能较好地拟合聚驱增油曲线,同时也具有较好的外推性;模型不能过于复杂;模型中待定参数应尽可能少且具有明确的物理意义。

聚合物驱累积增油可以采用增长曲线模型进行表征,但这类增长型曲线存在极限值,其导数曲线即年增油曲线具有非对称型特征,见图1。通过对不同类型增长型曲线特征分析,Gompertz模型既存在极限值,其导数曲线又能反映出非对称型的特征,模型相对简单,外推性好。

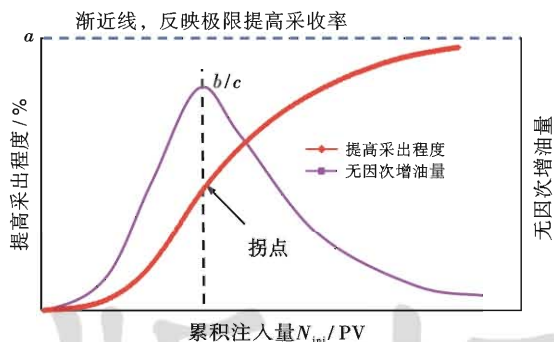


图1 提高采出程度和无因次增油量与累积注入量的关系示意图

Fig. 1 Schematic diagram of relations of cumulative injection to enhanced recovery percent and to dimensionless oil increment

根据 Gompertz 模型,定量表征聚合物驱累积增油曲线的数学方程可表达为

$$\Delta R = a \cdot \exp[-\exp(b - c \cdot N_{inj})] \quad (1)$$

式中: ΔR 为聚合物驱阶段提高采出程度,%; N_{inj} 为聚合物驱累积注入油藏孔隙体积倍数,PV; a, b, c 为模型特征参数。

该定量表征模型的特征参数具有明确的物理意

义,特征参数 a 反映累积注聚量条件下的提高采收率极限值, b/c 反映模型曲线拐点对应的累积注入量,对应于增油量曲线的峰值点,如图1所示。

由式(1)取两次对数可以得到

$$\ln[\ln(a/\Delta R)] = b - c \cdot N_{inj} \quad (2)$$

该定量表征模型还可以采用试差法得到各特征参数值。如图2所示,采用某区块矿场数据,取一系列 a 值作 ΔR 与 N_{inj} 的关系曲线。当曲线近似为直线时,对应的 a 值就是该区块定量表征模型的特征值 a ,该直线的斜率值即为 $-c$,截距为 b 。

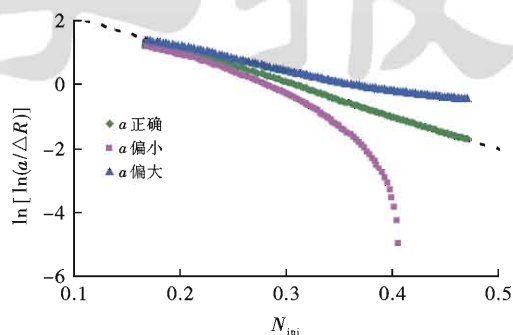


图2 试差法求解定量表征模型特征参数

Fig. 2 Characteristic parameters solution of quantitative characterization model with trial and error method

2 模型特征参数的影响因素

选取渤海某实施聚合物驱区块作为典型区块,该区块渗透率变异系数为0.6,采用缔合型聚合物作为驱油剂。笔者在典型区块数值模拟模型基础上,采用单因素分析方法分别讨论各影响因素对特征参数的影响,并划分各参数的回归区间,在各区间内确定回归模型的形式。回归模型采用 LM(Levenberg-Marquardt)算法,它是介于牛顿法与梯度下降法之间的一种非线性优化方法,LM算法在参数拟合方面应用较多^[14]。

2.1 原油黏度

特征参数 a 随原油黏度的增加先迅速增加,然后增加趋势逐渐变缓,当原油黏度达到一定值之后开始下降;特征参数 b 和 c 都随原油黏度的增加先减小、后增加,且变化幅度比特征参数 a 小得多,如图3所示。根据特征参数 a, b, c 随原油黏度的变化规律,须要分段回归特征参数与原油黏度的关系,才能较好地反映原油黏度与特征参数之间的变化关系。原油黏度范围划分为3个区间:低黏度区间(1~20 mPa·s)、中等黏度区间(20~100 mPa·s),高黏度区间(100~200 mPa·s)。

在3个黏度区间内分别对特征参数 a, b, c 进行回

归,确定其函数形式。对参数 a 的回归结果如图 4 所示。可以看出,由于当原油黏度大于 20 mPa·s 后, a 值增速放缓,故原油黏度与特征参数 a 只能分别在低黏度区间和中等黏度区间呈对数关系,在高黏度区间呈二次式关系。

低黏度区间:

$$a = 1.727 \ln \mu_o + 1.9436 \quad (3)$$

中等黏度区间:

$$a = 2.1307 \ln \mu_o + 0.6999 \quad (4)$$

高黏度区间:

$$a = -2.0 \times 10^{-4} \mu_o^2 + 4.88 \times 10^{-2} \mu_o + 7.5152 \quad (5)$$

原油黏度与特征参数 b 在低黏度区间和中等黏度区间呈线性关系,在高黏度区间呈二次式关系。

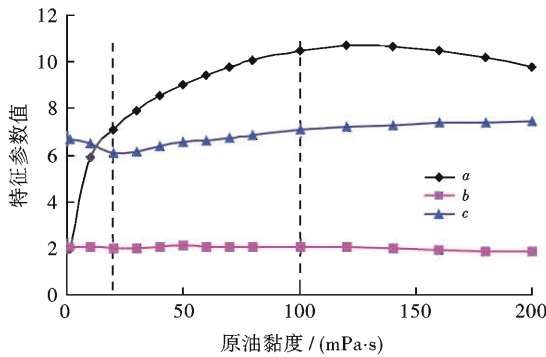


图 3 原油黏度对模型特征参数值的影响

Fig. 3 Influence of oil viscosity on characteristic parameters

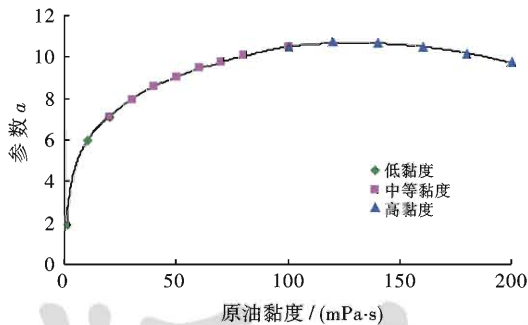


图 4 特征参数 a 的分段拟合效果

Fig. 4 Segmented imitative effect of characteristic parameter a

低原油黏度区间:

$$b = -3.9 \times 10^{-3} \mu_o + 2.0682 \quad (6)$$

中等原油黏度区间:

$$b = 1.1 \times 10^{-3} \mu_o + 1.9665 \quad (7)$$

高原油黏度区间:

$$b = -5.0 \times 10^{-7} \mu_o^2 - 1.9 \times 10^{-3} \mu_o + 2.2642 \quad (8)$$

原油黏度与特征参数 c 在低黏度区间、中等黏度区间和高黏度区间均呈对数关系。

低黏度区间:

$$c = -0.2087 \ln \mu_o + 6.6951 \quad (9)$$

中等黏度区间:

$$c = 0.6303 \ln \mu_o + 4.088 \quad (10)$$

高黏度区间:

$$c = -0.5663 \ln \mu_o + 4.4607 \quad (11)$$

2.2 地层温度和地层水矿化度

除原油黏度外,对聚合物驱开发指标有影响的还有地层温度、地层水矿化度及钙镁离子含量,它们对特征参数 a 、 b 、 c 的影响分别如图 5、图 6 和图 7 所示。可以看出,它们的影响规律基本一致,主要体现在这 3 个因素均对聚合物溶液的黏度产生影响。多元回归分析也表明这 3 个影响因素不是独立变量,存在明显的共线性问题。因此,考虑引入中间变量 D ,将这 3 个因素的影响都归到中间变量 D 中去。

通过回归分析,建立了中间变量 D 与地层温度、地层水矿化度和钙镁离子含量的关系式为

$$D = 3.95401 \times 10^4 T^{-2} - 0.07813T + 1/(0.1192 + 6.72 \times 10^{-5} C_{sal} - 5.07 \times 10^{-3} C_{sal}^{0.5}) + 1.01534 \times 10^4 C_{cm}^{-1} - 1.688951 \times 10^6 C_{cm}^{-2} + 8.8744532 \times 10^7 C_{cm}^{-3} - 16.789 \quad (12)$$

式中: D 为中间变量; T 为温度,°C; C_{sal} 为地层水矿化度,mg/L; C_{cm} 为钙镁离子含量,mg/L。

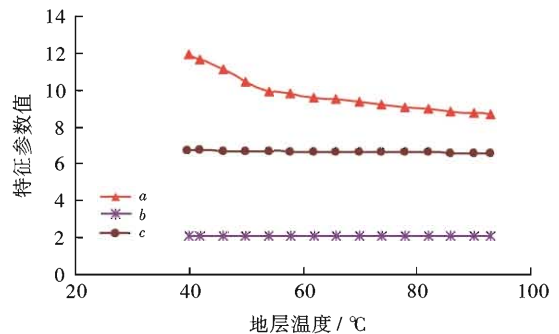


图 5 地层温度对模型特征参数值的影响

Fig. 5 Influence of reservoir temperature on characteristic parameters

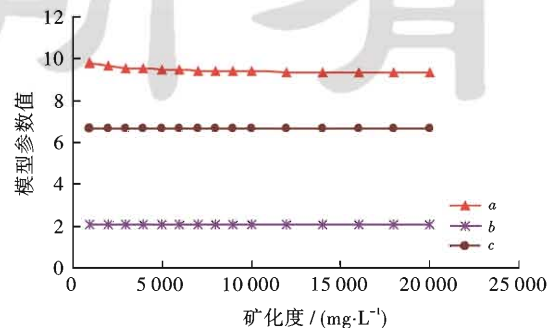


图 6 矿化度对模型特征参数值的影响

Fig. 6 Influence of degree of formation water mineralization on characteristic parameters

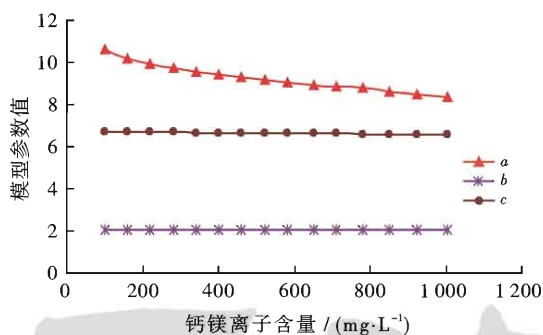


图7 钙镁离子含量对模型特征参数值的影响

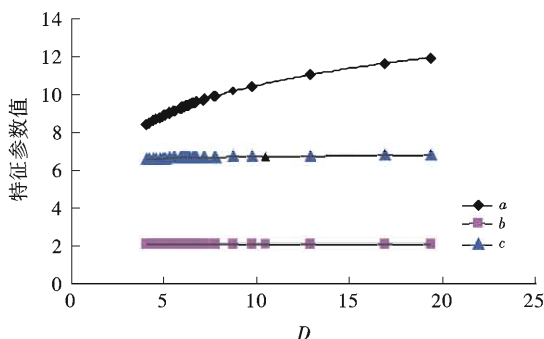
Fig. 7 Influence of calcium and magnesium ions content of formation water on characteristic parameters

中间变量 D 对模型特征参数值的影响规律如图 8 所示。整个区间中,中间变量 D 与特征参数 a 呈对数关系,与特征参数 b 呈线性关系,与特征参数 c 呈倒数关系。中间变量 D 与各特征参数的关系式为

$$a = 2.2474 \ln D + 5.3175 \quad (13)$$

$$b = 2.2 \times 10^{-3} D + 2.0542 \quad (14)$$

$$c = 6.8204 D^{-1} - 1.09657 \quad (15)$$

图8 中间变量 D 对模型特征参数值的影响Fig. 8 Influence of intermediate variable D on characteristic parameters

3 分类定量模型的建立

采用上述渤海聚合物驱典型区块模型作为产生样本的基础模型。在聚合物驱影响因素分析的基础上,将地层原油黏度、地层温度、地层水矿化度、钙镁离子含量及注聚前含水作为正交试验设计的 5 个参数,每个正交设计参数在渤海油田各区块参数适当的取值范围内^[15],各取 15 个值。原油黏度取值区间为 1~200 mPa·s,地层温度区间为 40~93℃,地层水矿化度区间为 1000~20000 mg/L,钙镁离子含量区间为 100~1000 mg/L。海上油田注聚时机既可以在中含水期开展,也可能在中高含水期进行,划分 50%~70%和 70%~90%两个区间进行回归。根据渤海油田区块油藏地质特征及流体性质数据范围,确定了正交设计参数的取值范围,并

建立起参数水平取值,形成了一个 5 个参数、15 个水平的正交设计。通过结合正交设计表 L18(37)和 L50(511)生成一个 L900(155)的正交设计表,如表 1 所示。

表 1 正交设计参数

Table 1 Factors of orthogonal design

参数水平	地层原油黏度/mPa·s	地层温度/℃	地层水矿化度/(mg·L ⁻¹)	钙镁离子含量/(mg·L ⁻¹)	注聚前含水/%
1	1	40	1000	100	50
2	10	42	2000	160	55
3	20	46	3000	220	60
4	30	50	4000	280	63
5	40	54	5000	340	65
6	50	58	6000	400	68
7	60	62	7000	460	70
8	70	66	8000	520	73
9	80	70	9000	580	75
10	100	74	10000	650	78
11	120	78	12000	710	80
12	140	82	14000	780	83
13	160	86	16000	850	85
14	180	90	18000	920	88
15	200	93	20000	1000	90

单因素研究结果表明,原油黏度须要划分 3 个区间,海上油田注聚时机须要划分 2 个区间,这决定了多元回归时必须划分 6 个区间进行回归。以低原油黏度和较早时机注聚的情况为例,使用 81 组拟合样本对模型特征参数 a 、 b 、 c 的表达式进行了回归,得到 Gompertz 预测模型 I 的特征系数回归公式,同样可得其他种类型条件模型的特征系数回归公式,其中 f_{wp} 为聚合物驱的含水率:

模型 I: 低黏区(1~20 mPa·s)、注聚时机为 50%~70%时的模型特征参数 a 、 b 、 c 的回归模型公式为

$$a = 1.59326 \ln \mu_o + 0.82016 \ln D - 3.404 \times 10^{-2} f_{wp} + 1.84689$$

$$b = -5.59 \times 10^{-4} \mu_o^2 + 2.0536 \times 10^{-2} \mu_o + 2.0243 \times 10^{-4} D^2 - 5.346 \times 10^{-3} D - 2.7225 \times 10^{-5} f_{wp}^2 + 7.3473 \times 10^{-3} f_{wp} + 1.4581$$

$$c = 6.8663 \times 10^{-2} \ln \mu_o - 0.709124/D + 3.3030 \times 10^{-4} f_{wp}^2 - 7.1377 \times 10^{-2} f_{wp} + 9.3704$$

模型 II: 低黏区(1~20 mPa·s)、注聚时机为 70%~90%时的模型特征参数 a 、 b 、 c 的回归模型公式为

$$a = 1.0344 \ln \mu_o + 0.8533 \ln D + 6.7767 \times 10^{-4} f_{wp}^2 - 1.7033 \times 10^{-1} f_{wp} + 9.0898$$

$$b = -2.3672 \times 10^{-4} \mu_o^2 + 4.6584 \times 10^{-4} \mu_o - 5.2356 \times 10^{-3} D^2 + 7.1326 \times 10^{-2} D - 4.4520 \times 10^{-4} f_{wp}^2 + 2.8471 \times 10^{-2} f_{wp} + 0.45713$$

$$c = -1.0442 \times 10^{-1} \ln \mu_0 - 0.87349/D - 2.1144 \times 10^{-3} f_{wp}^2 + 0.29956 f_{wp} - 4.4312$$

模型 III:中黏区(20~100 mPa·s)、注聚时机为 50%~70%时的模型特征参数 a 、 b 、 c 的回归模型公式为

$$a = 2.2714 \ln \mu_0 + 2.2825 \ln D - 3.0810 \times 10^{-2} f_{wp} - 3.4638$$

$$b = 1.2404 \times 10^{-5} \mu_0^2 - 3.0904 \times 10^{-3} \mu_0 - 7.3423 \times 10^{-4} D^2 + 1.8881 \times 10^{-2} D + 3.4695 \times 10^{-3} f_{wp}^2 + 2.8918 \times 10^{-3} f_{wp} + 1.6588$$

$$c = 0.3062 \ln \mu_0 - 1.0610/D - 7.1931 \times 10^{-4} f_{wp}^2 + 6.9588 \times 10^{-2} f_{wp} + 4.0600$$

模型 IV:中黏区(20~100 mPa·s)、注聚时机为 70%~90%时的模型特征参数 a 、 b 、 c 的回归模型公式为

$$a = 2.4483 \ln \mu_0 + 1.7032 \ln D - 4.6601 \times 10^{-3} f_{wp}^2 + 6.2051 \times 10^{-1} f_{wp} - 25.6459$$

$$b = -1.3810 \times 10^{-5} \mu_0^2 + 3.0805 \times 10^{-3} \mu_0 - 1.8133 \times 10^{-3} D^2 + 3.7885 \times 10^{-2} D - 6.0034 \times 10^{-4} f_{wp}^2 + 9.6624 \times 10^{-2} f_{wp} - 2.1346$$

$$c = 6.4544 \times 10^{-1} \ln \mu_0 - 0.64109/D - 3.4987 \times 10^{-3} f_{wp}^2 + 4.7414 \times 10^{-1} f_{wp} - 12.1343$$

模型 V:高黏区(100~200 mPa·s)、注聚时机为 50%~70%时的模型特征参数 a 、 b 、 c 的回归模型公式为

$$a = -5.9215 \times 10^{-5} \mu_0^2 + 1.9757 \times 10^{-2} \mu_0 + 2.8762 \ln D - 2.1028 \times 10^{-2} f_{wp} + 3.7900$$

$$b = 2.7443 \times 10^{-6} \mu_0^2 - 1.4294 \times 10^{-3} \mu_0 - 1.5367 \times 10^{-3} D^2 + 1.7676 \times 10^{-2} D - 3.4253 \times 10^{-4} f_{wp}^2 - 3.4900 \times 10^{-2} f_{wp} + 2.7592$$

$$c = 2.9965 \times 10^{-1} \ln \mu_0 - 2.1589/D + 5.6819 \times 10^{-4} f_{wp}^2 - 5.8931 \times 10^{-2} f_{wp} + 7.3008$$

模型 VI:高黏区(100~200 mPa·s)、注聚时机为 70%~90%时的模型特征参数 a 、 b 、 c 的回归模型公式为

$$a = -9.3651 \times 10^{-5} \mu_0^2 + 3.2323 \times 10^{-2} \mu_0 + 2.8335 \ln D - 9.1927 \times 10^{-3} f_{wp}^2 + 1.3640 - 49.5388$$

$$b = -3.9472 \times 10^{-7} \mu_0^2 + 1.2063 \times 10^{-4} \mu_0 - 4.3218 \times 10^{-4} D^2 + 7.7580 \times 10^{-3} D - 3.6877 \times 10^{-4} f_{wp}^2 + 7.7941 \times 10^{-2} f_{wp} - 1.8230$$

$$c = 7.9304 \times 10^{-1} \ln \mu_0 - 1.6685/D - 6.8505 \times 10^{-3} f_{wp}^2 + 1.0307 f_{wp} - 35.3956$$

4 聚合物驱开发指标定量评价结果的验证

对于不同类型条件,采用相应的回归模型,分别计算相应区间拟合样本和检验样本的提高采收率值。模型 I—模型 VI 拟合样本数分别为 81、80、182、210、136 和 151,对应的检验样本数分别为 3、6、14、11、4 和 9,拟合样本和检验样本的相关系数均大于 0.9,说明模型公式精度高,可靠性较好。

整理模型 I—模型 VI 的 6 个参数区间的拟合样本和检验样本的提高采收率值计算值和实际值,可得到整体拟合效果以及预测效果。对回归模型与数值模拟的提高采收率预测误差进行了统计,见表 2。回归模型与数值模拟的结果相比,虽然拟合和预测精度稍差,但绝对误差基本控制在 0.5% 以内(图 9 中误差标准线范围内),平均相对误差也能控制在 4% 以内,满足工程需求。

表 2 提高采收率拟合和预测误差分析统计

Table 2 Error statistics of enhanced oil recovery regression and prediction

多元回归模型	相对误差/%		
	最大值	最小值	平均值
拟合样本	34.35	0.003	3.902
检验样本	25.77	0.184	3.2201

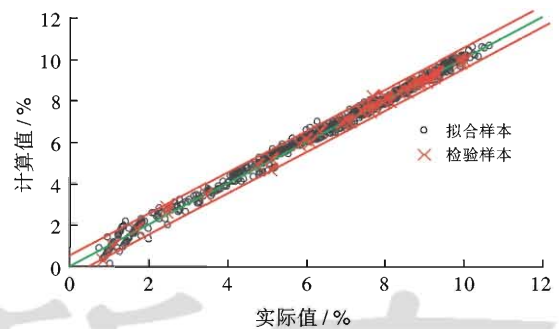


图 9 聚合物驱提高采收率计算值与实际值关系
Fig. 9 Relationship between calculated and real recovery efficiency for polymer flooding

5 结论

(1) 聚合物驱累积增油为增长型曲线,其导数曲线即年增油曲线具有非对称型特征,Gompertz 模型既存在极限值,其导数曲线又能反映出非对称型的特征,可定量表征聚合物驱增油量开发指标;

(2) 定量表征模型的特征参数具有明确的物理意义,特征参数 a 反映累积注聚量条件下的提高采收率值极限值, b/c 反映模型导数曲线拐点处的累积注入

量,对应于增油量曲线的峰值点;

(3) 聚合物开发指标定量评价模型计算结果与数值模拟相比,绝对误差基本控制在 0.5% 以内,平均相对误差也能控制在 4% 以内,满足定量评价聚合物开发指标计算需求。

参 考 文 献

- [1] 戴焕栋,龚再升. 中国近海油气田开发[M]. 北京:石油工业出版社,2003:25-26.
Dai Huandong, Gong Zaisheng. Oil and gas development of offshore in China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 25-26.
- [2] 莱克 L. W. 提高石油采收率的科学基础[M]. 李宗田,译,北京:石油工业出版社,1989:102-113.
Lake L. W. The science foundation of enhanced oil recovery[M]. Translated by Li Zongtian. Beijing: Petroleum Industry Press, 1989: 102-113.
- [3] 宋考平,杨二龙,王锦梅,等. 聚合物驱提高驱油效率机理及驱油效果分析[J]. 石油学报,2004,25(3):71-74.
Song Kaoping, Yang Erlong, Wang Jinmei, et al. Mechanism of enhancing oil displacement efficiency by polymer flooding and driving effectiveness analysis[J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(3): 71-74.
- [4] 沈平平,袁士义,邓宝荣,等. 非均质油藏化学驱波及效率和驱替效率的作用[J]. 石油学报,2004,25(5):54-59.
Shen Pingping, Yuan Shiyi, Deng Baorong, et al. Effects of oil displacement efficiency and conformance efficiency of chemical flooding in heterogeneous reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(5): 54-59.
- [5] 兰玉波,杨清彦,李斌会. 聚合物驱波及系数和驱油效率实验研究[J]. 石油学报,2006,27(1):64-68.
Lan Yubo, Yang Qingyan, Li Binhui. Experimental research on sweep efficiency and oil-displacement efficiency of polymer flooding[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(1): 64-68.
- [6] 周守为. 中国海洋石油高新技术与实践[M]. 北京:地质出版社,2005.
Zhou Shouwei. High-tech and practice of China national offshore oil[M]. Beijing: Geology Publishing House, 2005.
- [7] 张贤松,王海江,唐恩高,等. 渤海油区提高采收率技术油藏适应性及聚合物驱可行性研究[J]. 油气地质与采收率,2009,16(5):56-59.
Zhang Xiansong, Wang Haijiang, Tang Engao, et al. Research on reservoir potential and polymer flooding feasibility for EOR technology in Bohai offshore oilfield[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2009, 16(5): 56-59.
- [8] 周守为. 海上稠油高效开发新模式研究及应用[J]. 西南石油大学学报,2007,29(5):1-4.
Zhou Shouwei. The study and application of new mode of effective development of offshore heavy oil field[J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2007, 29(5): 1-4.
- [9] 周守为. 海上油田高效开发技术探索与实践[J]. 中国工程科学,2009,11(10):55-60.
Zhou Shouwei. Exploration and practice of offshore oilfield effective development technology[J]. Engineering Sciences, 2009, 11(10): 55-60.
- [10] 刘睿,姜汉桥,张贤松,等. 海上中低黏度油藏早期注聚合物见效特征研究[J]. 石油学报,2010,31(2):280-283.
Liu Rui, Jiang Hanqiao, Zhang Xiansong, et al. Effective characteristics of early polymer flooding in mid-to-low viscosity offshore reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(2): 280-283.
- [11] 孙强,邓兵,马丽梅. 广义翁氏与瑞利模型在聚合物驱产量预测中的应用[J]. 大庆石油地质与开发,2003,22(5):58-59.
Sun Qiang, Deng Bing, Ma Limei. Application of generalized Weng's model and Rayleigh model in oil production prediction of polymer flooding[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2003, 22(5): 58-59.
- [12] 刘志斌,丁辉,高珉,等. 油田开发规划产量构成优化模型及其应用[J]. 石油学报,2004,25(1):62-65.
Liu Zhibin, Ding Hui, Gao Min, et al. Optimal model for oil production composition of oilfield development programming and its application[J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(1): 62-65.
- [13] 侯健,郭兰磊,元福卿,等. 胜利油田不同类型油藏聚合物驱生产动态的定量表征[J]. 石油学报,2008,29(4):577-581.
Hou Jian, Guo Lanlei, Yuan Fuqing, et al. Quantitative characterization of polymer flooding production performance in different reservoirs of Shengli oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(4): 577-581.
- [14] 薛强,刘勇,刘建军,等. 非饱和土水特征曲线模型参数反演辨识研究[J]. 仪器仪表学报,2006,27(6):741-743.
Xue Qiang, Liu Yong, Liu Jianjun, et al. Study on model parameters identification of unsaturated soil water characteristic curve[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(6): 741-743.
- [15] 张贤松,孙福街,冯国智,等. 渤海稠油油田聚合物驱影响因素研究及现场试验[J]. 中国海上油气,2007,19(1):30-33.
Zhang Xiansong, Sun Fuyue, Feng Guozhi, et al. A research on influence factors of polymer flooding and its field testing in Bohai heavy oil fields[J]. China Offshore Oil and Gas, 2007, 19(1): 30-33.

(收稿日期 2013-01-10 改回日期 2013-05-10 责任编辑 黄小娟)