

高含水油田“二三结合”提高采收率评价理论模型研究

赵平起¹, 张家良¹, 刘同敬², 倪天禄¹, 喻 洲¹, 张 津¹, 王 强¹

(1. 中国石油大港油田公司, 天津 300280; 2. 中国石油大学(北京)克拉玛依校区石油学院, 新疆 克拉玛依 834000)

摘要:“二三结合”是近年来国内高含水老油田在中低油价环境下首创的一种开发理念和开发模式,已进入工业化应用阶段。针对目前尚没有针对“二三结合”开发特点的提高采收率评价理论模型的情况,在综合分析国内外现有提高采收率评价方法的基础上,提出基于静态法构建“二三结合”提高采收率评价理论模型。依据国内油田“二三结合”的开发特点和开发实践,筛选出7项对“二三结合”采收率影响较大的关键相似准则及参数。基于“二三结合”作用机理和表征机制,从渗流力学和油藏工程角度出发,首次构建表征油藏属性、渗流特性、时变特性的“二三结合”提高采收率评价理论模型。考虑多层老油田的储层非均质性和油气水分布不均特性,引入全藏渗透率洛伦兹系数、全藏流度洛伦兹系数,实现“二三结合”提高采收率评价理论模型的修正。以大港某油藏实际开发动态参数和五点井网为例,给出“二三结合”提高采收率评价理论模型中系数的求解方法,得到“二三结合”提高采收率预测曲线,通过与数值模拟结果对比表明模型具有较好的可靠性和较强的适用性,为评价和预测“二三结合”开发效果以及老油田经济有效开发提供了科学依据与技术支持。

关键词:二三结合;提高采收率(EOR);评价方法;时变特性;理论模型

中图分类号:TE343 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2023)19-0159-08

2012年中石油首次提出针对国内老油田开发对策接替升级的整体控制、层系细分、平面重组、立体优化、深部调驱、“二三结合”的技术路线,2014年明确提出“将二三结合作为老油田可持续发展的战略选择”的指导方针,阐述了“二三结合”的技术思路与技术内涵^[1]。“二三结合”是指将二次开发精细水驱采油与三次采油层系井网协同优化部署,立足当前水驱模式、精细挖潜,适时转入三次采油,实现总体采收率最大化和经济效益最优化^[1-3]。

近年来,大庆油田、辽河油田、胜利油田、大港油田等国内多个高含水期老油田相继开展了“二三结合”试验项目,油藏类型涉及中高渗透砂岩油藏、低渗透砂岩油藏、多层双高砂岩油藏、特殊岩性油藏、复杂断块油藏等,采用“二三结合”开发模式后均取得了一定效果^[4-12]。因此,大港油田自2013年在港西三区开展“二三结合”先导试验取得成功,后将“二三结合”开发模式推广应用于整个大港复杂

断块油田^[13]。

针对处于高含水阶段的老油田,“二三结合”开发模式一方面将其低成本的水驱采油潜力发挥到极致,另一方面结合适宜的三次采油技术,可实现油田开发水平和总体效益的最优化,在中低油价下有助于保持长期良好的经济效益^[14-16]。因此,采收率作为衡量油藏开发效果和经济效益的重要指标,是“二三结合”开发方案设计和效果评价过程中,必不可少的重要环节^[17-20]。由于“二三结合”是近年来国内首创的开发理念和模式,因此,目前尚没有针对“二三结合”开发特点的提高采收率评价理论模型。

针对现有提高采收率评价理论模型针对性较强、不适用于“二三结合”开发模式的情况,基于三次采油提高采收率机理,利用广义油藏工程方法,建立表征油藏属性、渗流特性、时变特性的高含水油田“二三结合”提高采收率评价理论模型,为评价

收稿日期:2023-06-29

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05058-003)。

作者简介:赵平起(1964—),男,河北邢台人,中国石油大港油田公司,教授级高级工程师,博士,研究方向为油气田开发;张家良(1971—),男,湖北洪湖人,中国石油大港油田公司,高级工程师,博士,研究方向为开发地质;通信作者刘同敬(1972—),男,山东东营人,中国石油大学(北京)克拉玛依校区石油学院,副研究员,博士,研究方向为油气田开发;倪天禄(1970—),男,四川德阳人,中国石油大港油田公司,高级工程师,硕士,研究方向为油气藏工程;喻洲(1983—),男,湖北洪湖人,中国石油大港油田公司,工程师,研究方向为石油地质;张津(1974—),男,天津人,中国石油大港油田公司,高级工程师,硕士,研究方向为油藏工程;王强(1968—),男,天津人,中国石油大港油田公司,高级工程师,研究方向为油藏工程。

和预测“二三结合”开发效果以及老油田经济有效开发提供科学依据与技术支持。

1 现有提高采收率评价方法分析

采收率计算、预测、评价至少包括两种用途:开发优化层面和潜力评价层面,需要选用不同的采收率概念。其中,开发优化层面选用标定采收率,是具体技术、经济、时间内的采出程度,侧重于近-中期调整;有技术限制和物理界限,无经济限制和时间限制,因此又称为技术采收率。潜力评价层面选用标定采收率,是具体技术、经济下的采出程度,侧重于中-远期规划;既有技术限制和物理界限,也有经济限制和时间限制,因此又称为经济采收率。

根据目前行业规范《石油可采储量计算方法》(SY/T 5367—2010)和标准,将国内外现有的提高采收率评价方法归纳为 3 大类,不同方法的适用阶段和适用条件不同,详细内容见表 1。

2 “二三结合”提高采收率评价理论模型构建

“二三结合”采收率属于潜力评价层面的概念,既有技术限制和物理界限,也有经济限制和时间限制。在国内外现有的 3 大类采收率评价方法中,没有现成的理论模型可以采用,亟须一套针对“二三结合”开发特点的提高采收率评价模型,用于精确指导、科学评价“二三结合”开发实践。综合分析

3 类评价方法的构建思路和适用条件,本文采用静态法构建“二三结合”提高采收率评价理论模型,基于无因次分析理念,通过理论公式法进行构建。

2.1 参数符号含义

计算所用参数如下:

A 、 B 、 C 、 D 、 E 、 F 、 G 、 H 为理论模型公式系数; M 为油水流量比; f_w 为含水率; n 为井网密度; V_k 为垂向非均质系数; K 为储层平均渗透率; K_{ro} 为油、气、水三相时的油相相对渗透率; K_{rog} 为油气两相时的油相相对渗透率; K_{row} 为油水两相时的油相相对渗透率; K_{rogmax} 为油气两相时的油相相对渗透率曲线的最大值(特征值); K_{rowmax} 为油水两相时的油相相对渗透率曲线的最大值(特征值); K_{rg} 为气相相对渗透率; K_{rgmax} 为油气两相时的气相相对渗透率曲线的最大值(特征值); K_{rw} 为水相相对渗透率; K_{rwmax} 为油水两相时的水相相对渗透率曲线的最大值(特征值); S_o 为含油饱和度; S_{or} 为残余油饱和度; S_{org} 为油气两相时的残余油饱和度; S_{orw} 为油水两相时的残余油饱和度; S_w 为含水饱和度; S_{wc} 为束缚水饱和度; S_{we} 为出口端含水饱和度; $\bar{S}_{wf}$ 为水驱油前缘平均含水饱和度; S_g 为含气饱和度; S_{gc} 为滞留气饱和度; n_g 为气相相对渗透率函数表达式的幂指数; n_w 为水相相对渗透率函数表达式的幂指数; n_{og} 为油气两相时的油相相对渗透率函数表达式的幂指数; n_{ow} 为油水

表 1 采收率评价方法及适用条件

方法类型	采收率评价方法		适用条件及注意事项
静态法	理论公式法		用于未开发或开发初期,缺少动态数据,开发尚未形成明显规律阶段
	经验公式法		
	类比法		
动态法	童氏图版法	童宪章图版法	用于开发中后期,判断开发效果,描述含水与采出程度之间的关系
		改进的童宪章图版	
	水驱曲线法	含水率与累积产油曲线	①动态资料全,数量多,数据可靠; ②综合含水率大于 50%; ③若以年单位,要求 3 年以上的稳定水驱规律; ④若以月单位,要求至少 12 个月以上稳定水驱规律; ⑤原则上不能忽略近期开采动态,也不能为了建立水驱规律而进行强行拟合; ⑥不同方法选取的数据时间段及数据点数量需一致
		含油率与累积产液曲线	
		水油比与累积产油曲线	
		甲型水驱曲线	
		乙型水驱曲线	
		丙型水驱曲线	
		丁型水驱曲线	
	产量递减法	指数递减	①动态资料全,数量多,数据可靠; ②若以年单位,要求 3 年以上的稳定递减; ③若以月单位,要求至少 12 个月以上的稳定递减; ④原则上不能忽略近期开采动态,也不能为了建立递减而强行要求所有资料点适应某种趋势
		双曲递减法	
		调和递减法	
	增长曲线法	威布尔预测模型	用于油田产量随开发时间先不断增加,达到一定值后递减的变化过程
		HCZ 预测模型(胡建国、陈元千、张胜宗)	
		广义翁氏预测模型	
静态+动态法	油藏数值模拟方法		通常情况下都可采用

两相时的油相相对渗透率函数表达式的幂指数; μ_o 为地下原油黏度; μ_w 为地下水黏度; N_c 为毛管数; E_A 为面积波及系数; E_R 为采收率; n 为多层油藏的小层总数; i, j, m 为多层油藏的第 i, j, m 层; v_K 为全藏渗透率洛伦兹系数; $v_{K/\mu}$ 为全藏流度洛伦兹系数; $v_{(K/\mu)W}$ 为二次开发时的全藏流度洛伦兹系数; $v_{(K/\mu)T}$ 为三次采油时的全藏流度洛伦兹系数。

2.2 相似准则和参数筛选

根据国内众多老油田“二三结合”的开发特点和开发实践,对比分析常规开发方式下的提高采收率评价方法^[17-19],筛选出7项对“二三结合”采收率影响较大的关键相似准则及参数,作为构建“二三结合”提高采收率评价理论模型的基础,详细内容见表2。

2.3 提高采收率主控因素表征

“二三结合”提高采收率的作用机理主要包括3个方面:流度控制、改善微观渗流、降低界面张力,流度比、相对渗透率、微观驱油效率、井网密度体现了二次开发和三次采油的作用机理和过程^[17-20]。在明确作用机理、表征机制的基础上,根据表2确定

的基本相似准则和关键参数,从渗流力学和油藏工程角度出发,对比分析油气田开发过程中常用的采收率分析评价模型,创建表征油藏属性、渗流特性、时变特性对采收率影响的“二三结合”采收率评价理论模型。

“二三结合”提高采收率的主控因素及作用过程的函数表征见表3。

表2 “二三结合”提高采收率理论模型关键参数

基本参数	参数表征
水油流度比	$M_i = \frac{\mu_o}{\mu_w K_{ro}(S_{wc})} [K_{ro}(\bar{S}_{wf}) + K_{rw}(\bar{S}_{wf})],$ $i = \text{water, polymer, ASP}$
含水饱和度	$S_w = S_{wi}(f_w), i = \text{water, polymer, ASP}$
含水率(相对渗透率)	$f_w = f_{wi}(S_w), i = \text{water, polymer, ASP}$
垂向非均质系数	$V_k = V_{ki}, i = \text{water, polymer, ASP}$
井网密度	n
储层平均渗透率	K
储层渗透率与流度比协同参数	$\frac{K}{M}$

注:water、polymer、ASP表示不同的驱油体系,其中,water为水,polymer为聚合物,ASP为三元复合驱油体系(A、S、P分别表示碱、表面活性剂、聚合物)。

表3 “二三结合”提高采收率主控因素及作用过程表征

因素类型	主控因素	表征函数	函数说明
渗流特性	面积波及系数	$B \sqrt{\frac{1+M}{2M}} + \frac{C f_w(S_{wc})}{1 + D f_w(S_{wc})} \left(1 - B \sqrt{\frac{1+M}{2M}}\right)$	$B \sqrt{\frac{1+M}{2M}}$ 表征流度比对见水时面积波及系数的影响; $\frac{C f_w(S_{wc})}{1 + D f_w(S_{wc})} \left(1 - B \sqrt{\frac{1+M}{2M}}\right)$ 表征流度比对见水后面积波及系数的影响
	井网影响因子	$e^{-\frac{G}{n} \left(\frac{K}{M}\right)^{-H}}$	表征井网密度对提高采收率的影响
油藏属性	渗透率与流度比协同参数校正	$1 + E \lg \frac{K}{M}$	表征渗透率对提高采收率的影响
	垂向非均质影响校正	$1 - V_k^F$	表征储层非均质对提高采收率的影响
时变特性	驱替过程	$\frac{S_{wc} + \frac{1 - f_w(S_{wc})}{f_w'(S_{wc})} - S_{wc}}{1 - S_{wc} - S_{or}}$	表征不同含水阶段的驱油效率对提高采收率的影响
	相对渗透率	$\begin{cases} K_{rg} = K_{rgmax} \left(\frac{S_g - S_{gc}}{1 - S_{org} - S_{gc}} \right)^{n_g} \\ K_{rw} = K_{rwmax} \left(\frac{S_w - S_{wc}}{1 - S_{orw} - S_{wc}} \right)^{n_w} \\ K_{ro} = S_o^* \beta_w \beta_g \\ S_o^* = \frac{S_o - S_{or}}{1 - S_{gc} - S_{wc} - S_{or}} \\ \beta_w = \frac{K_{row}}{1 - S_w^*} \\ \beta_g = \frac{K_{rog}}{1 - S_g^*} \end{cases}$	$\begin{cases} S_w^* = \frac{S_w - S_{wc}}{1 - S_{gc} - S_{wc} - S_{or}} \\ S_g^* = \frac{S_g - S_{gc}}{1 - S_{gc} - S_{wc} - S_{or}} \\ K_{rog} = K_{rogmax} \left(\frac{S_o - S_{org}}{1 - S_{org} - S_{gc}} \right)^{n_{og}} \\ K_{row} = K_{rowmax} \left(\frac{S_o - S_{owc}}{1 - S_{orw} - S_{wc}} \right)^{n_{ow}} \end{cases}$ $S_{or} = S_{or}(N_c)$ 表征残余油是毛管数的函数

2.4 提高采收率评价理论模型建立

表3中针对“二三结合”提高采收率主控因素及作用过程所建立的表征函数,第1、2项因素为主体,第3、4项因素是校正,第5、6项因素是过程。借鉴波及参数计算模型、胡斯努林模型、井间水驱油模型、井网影响模型,基于无因次分析理念,从渗流力学和油藏工程的角度,构建“二三结合”提高采收率评价的基础理论模型。“二三结合”提高采收率评价基础理论模型的表征函数为

$$\left\{ \begin{aligned} E_R &= A \left[B \sqrt{\frac{1+M}{2M}} + \frac{C f_w(S_{wc})}{1 + D f_w(S_{wc})} \left(1 - B \sqrt{\frac{1+M}{2M}} \right) \right] \times \\ &\quad \left(1 + \text{Elg} \frac{K}{M} \right) \frac{S_{wc} + \frac{1 - f_w(S_{wc})}{f'_w(S_{wc})} - S_{wc}}{1 - S_{wc} - S_{or}} \times \\ &\quad (1 - V_k^F) e^{-\frac{G}{n} \left(\frac{K}{M} \right)^{-H}} \\ M_i &= \frac{\mu_o}{\mu_w K_{ro}(S_{wc})} [K_{ro}(\bar{S}_{wf}) + K_{rw}(\bar{S}_{wf})] \\ f_w &= f_{wi}(S_w) \\ S_w &= S_{wi}(f_w) \\ V_k &= V_{ki} \\ i &= \text{water, polymer, ASP} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

“二三结合”提高采收率评价理论模型应用的约束条件为:井间注采对应关系相对稳定,人工注水驱油指数相对较大(数值大于0.5)、水驱占优的油藏。

2.5 多层非均质已开发油藏模型修正

鉴于实际油藏大多为多层,且“二三结合”开发前已经开发多年,地下多相流体分布不均,因此需要针对全藏储层非均质程度、多相不均匀状况的表征。

目前储层非均质评价的常用参数包括渗透率的变异系数、突进系数、级差、洛伦兹系数等,从不同角度开展储层非均质评价,其中洛伦兹系数法的应用日益增多。一方面,洛伦兹系数法得出的结论与其他参数规律基本一致,且洛伦兹曲线能够更加直观地反映储层的非均质程度;另一方面,洛伦兹系数介于0~1,适合用作理论模型的修正系数。

因此,针对多层非均质已开发油藏的“二三结合”提高采收率评价理论模型,构建全藏渗透率洛伦兹系数,表征多层油藏的非均质程度。开发过程中油藏流体分布的影响可以叠加流度表征,利用洛伦兹系数法原理,构造流度洛伦兹系数,从而

实现对已开发油藏多相流体分布不均特性的量化表征。

2.5.1 全藏渗透率洛伦兹系数

假设多层非均质油藏共有 n 个井层,单个井层对应一个厚度值 h_i 和渗透率值 K_i ,将整个油藏 n 个 (h_i, K_i) 点按照 K_i 由大到小排序,得到 $\sum_{i=1}^n h_i$ 和 $\sum_{i=1}^n K_i h_i$,利用洛伦兹系数计算原理,得到全藏渗透率洛伦兹系数:

$$v_K = \sum_{m=1}^n \frac{h_m}{\sum_{i=1}^n h_i} \left(\frac{\sum_{j=1}^{m-1} K_j h_j}{\sum_{i=1}^n K_i h_i} + \frac{\sum_{j=1}^m K_j h_j}{\sum_{i=1}^n K_i h_i} \right) - 1 \quad (2)$$

2.5.2 全藏流度洛伦兹系数

假设多层非均质油藏单个井层对应一个厚度值 h_i 和流度值 $\frac{K_i}{\mu_i}$,将 n 个 $(h_i, \frac{K_i}{\mu_i})$ 点按照 $\frac{K_i}{\mu_i}$ 由大到小排序,得到 $\sum_{i=1}^n h_i$ 和 $\sum_{i=1}^n \frac{K_i}{\mu_i} h_i$,利用洛伦兹系数计算原理,构造流度洛伦兹系数的计算公式:

$$v_{K/\mu} = \sum_{m=1}^n \frac{h_m}{\sum_{i=1}^n h_i} \left(\frac{\sum_{j=1}^{m-1} \frac{K_j}{\mu_j} h_j}{\sum_{i=1}^n \frac{K_i}{\mu_i} h_i} + \frac{\sum_{j=1}^m \frac{K_j}{\mu_j} h_j}{\sum_{i=1}^n \frac{K_i}{\mu_i} h_i} \right) - 1 \quad (3)$$

2.5.3 “二三结合”全藏流度洛伦兹系数

考虑“二三结合”开发的特殊性,需要考虑二次采油和三次采油的影响,分别构造二次采油和三次采油的流度洛伦兹系数。考虑多层理论油藏模型,拟合“二三结合”前的含水和采出程度,得到校正后的 K_i 典型分布和分层注水等效突破状况,作为初值和初始状态。

1)二次开发井网加密影响。显式计算加密后的含水,更新拟合加密后的含水和采出程度,得到加密校正后的 K_i 典型分布和分层注水等效突破状况,作为后续计算的初值和状态。分层流度参照水驱油深度,按照串联等值渗流阻力法计算,此时全藏流度洛伦兹系数:

$$v_{(K/\mu)W} = \sum_{m=1}^n \frac{h_m}{\sum_{i=1}^n h_i} \left(\frac{\sum_{j=1}^{m-1} \frac{K_j}{\mu_j} h_j}{\sum_{i=1}^n \frac{K_i}{\mu_i} h_i} + \frac{\sum_{j=1}^m \frac{K_j}{\mu_j} h_j}{\sum_{i=1}^n \frac{K_i}{\mu_i} h_i} \right) - 1 \quad (4)$$

2)三次采油对流度的影响。以化学驱为例,将

整个化学驱过程划分为若干个阶段,按照驱替剂的物化参数和活塞式水(化学剂)驱油理论,计算每个阶段分层水(化学剂)驱油深度。分层流度按照水(化学剂)驱油深度,按照串联等值渗流阻力计算,此时全藏流度洛伦兹系数为

$$v_{(K/\mu)T} = \sum_{m=1}^n \frac{h_m}{\sum_{i=1}^n h_i} \left(\frac{\sum_{j=1}^{m-1} \frac{K_j h_j}{\mu_j}}{\sum_{i=1}^n \frac{K_i h_i}{\mu_i}} + \frac{\sum_{j=1}^m \frac{K_j h_j}{\mu_j}}{\sum_{i=1}^n \frac{K_i h_i}{\mu_i}} \right) - 1 \quad (5)$$

基于二次开发和三次采油的流度洛伦兹系数,构造“二三结合”提高采收率评价理论模型的流度洛伦兹系数,直接与模型中原非均质系数相乘,校正计算结果,其计算公式为

$$v_{K/\mu} = \frac{v_{(K/\mu)T}}{v_{(K/\mu)W}} \left[\sum_{m=1}^n \frac{h_m}{\sum_{i=1}^n h_i} \left(\frac{\sum_{j=1}^{m-1} \frac{K_j h_j}{\mu_j}}{\sum_{i=1}^n \frac{K_i h_i}{\mu_i}} + \frac{\sum_{j=1}^m \frac{K_j h_j}{\mu_j}}{\sum_{i=1}^n \frac{K_i h_i}{\mu_i}} \right) - 1 \right] \quad (6)$$

3 “二三结合”提高采收率评价理论模型求解与应用

3.1 基础理论模型参数求解

3.1.1 求解参数 B、C、D

以大港某油藏实际开发动态参数和五点井网为例,用数学曲线拟合方法,讨论 B、C、D 3 个参数的取值范围和求解过程。

波及系数是近井含水饱和度的增凸函数(一阶二阶导数都为正),当近井含水率 $f_w(S_{we}) = 0$ 时,根据表 3 中给出的面积波及系数 E_A 的函数关系,可以得到式(7):

$$E_A = B \sqrt{\frac{1+M}{2M}} \quad (7)$$

利用含水率和波及系数关系曲线,可以计算出 B。此时, $E_A = 0.35$, 反求出 $B = 0.4583$ 。

对于 C 和 D,因为只有两个未知数,计算时可借助含水率和波及系数关系曲线,任意选取两个点为基准点组成一个二元一次方程组进行求解。例如,当 $M = 6$ 时,选取 $(0.55, 0.4578)$ 和 $(0.95, 0.7686)$ 这两个点为基准点,面积波及系数 E_A 的函数关系可简化为

$$\begin{cases} 0.35 + \frac{0.55C}{1+0.55D} = 0.4578 \\ 0.35 + \frac{0.95C}{1+0.95D} = 0.7686 \end{cases} \quad (8)$$

对式(8)进行求解得到 $C = 0.1711$, $D = -0.7872$ 。

3.1.2 求解参数 F

“二三结合”开发模式的实施对象通常为老油田,因此,很容易获得目标油藏的采收率与渗透率变异系数关系曲线。求取参数 F 的过程,实质上就是拟合这条关系曲线的过程。由于采收率和渗透率变异系数的取值范围都是 0~1 的正数,因此可以将关系曲线转为对数坐标,使其线性化以简化拟合过程。

根据采收率 E_R 与渗透率变异系数 V_k 关系曲线可以得到

$$E_R = 1 - V_k^F \quad (9)$$

将式(9)化简后两边同时取对数,即可得到

$$\ln(1 - E_R) = F \ln V_k \quad (10)$$

从式(10)中可以看出,式(10)相较于式(9)为线性关系,拟合更为简单。依据式(10)绘制出 $\ln(1 - E_R)$ 和 $\ln V_k$ 关系曲线,拟合曲线得到的斜率即为参数 F。以大港某油藏实际采收率与渗透率变异系数关系为例,拟合 $\ln(1 - E_R)$ 和 $\ln V_k$ 关系曲线,得到 $F = 3$ 。

3.1.3 求解参数 E、G、H

对于 E、G、H 这 3 个参数可采用类似于求解 B、C、D 的方法,给出其可供选择的一个参数与胡斯努林公式对比得出。以大港某油藏实际油藏流体参数为例,当地下原油黏度 $\mu_o = 5 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, 储层平均渗透率 $K = 200 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, $M = 6$ 时,说明 E、G、H 这 3 个参数的具体求解过程。

常用的改进胡斯努林公式表征了采收率与储层参数和井网密度之间的关系,其函数表达式为

$$E_R = \left(0.698 + 0.166 \lg \frac{K}{\mu_o} \right) e^{\frac{-0.792}{n} \left(\frac{K}{\mu_o} \right)^{-0.253}} \quad (11)$$

将式(11)中的原油黏度 μ_o 替换为油水流动度比 M,对比式(11)与式(1)的公式形式,可以建立如下等式关系:

$$0.698 + 0.166 \lg \frac{K}{\mu_o} = a \left(1 + E \lg \frac{K}{M} \right) \quad (12)$$

代入油田实际参数求解式(12),得到 $a = 0.777$, $E = 0.214$ 。

同理,将改进的胡斯努林公式指数部分与式(1)指数部分的公式形式进行对比,代入油田实际参数求解得到 $H = 0.148$, $G = 1.095$ 。

3.1.4 求解参数 A

将前面计算得到的 B、C、D、F、E、G、H 各参数的数值代入式(1)化简可得

$$E_R = A \left[0.4583 \sqrt{\frac{1+M}{2M}} + \frac{0.1711 f_w(S_{we})}{1-0.7872 f_w(S_{we})} \times \left(1-0.4583 \sqrt{\frac{1+M}{2M}} \right) \left(1+0.214 \lg \frac{K}{M} \right) \times \frac{S_{we} + \frac{1-f_w(S_{we})}{f'_w(S_{we})} - S_{wc}}{1-S_{wc}-S_{or}} (1-V_k^3) e^{-\frac{1.095}{n} \left(\frac{K}{M} \right)^{-0.148}} \right] \quad (13)$$

式(1)所建立的采收率计算公式中, A 所起的作用为最后的归一化。用改进的胡斯努林公式计算采收率和式(13)作比较, 得出 A 的取值, 作为实际油藏参数不够准确、利用水驱指标校正时的调整系数。

3.2 评价理论模型验证与应用

以大港油田实际油藏参数为例, 对“二三结合”提高采收率评价理论模型进行求解和验证。通过对比该实际油藏在水驱开发阶段的油田综合含水到 90% 后, 分别采取后续水驱开发、二次加密开发、二次开发+聚合物驱的“二三结合”开发、二次开发+三元复合驱的“二三结合”开发共 4 种不同的开发方式下, 评价理论模型的计算采收率与油藏数值模拟的模拟采收率之间的差异程度, 来验证“二三结合”提高采收率评价理论模型的可靠性。对比结果如图 1 所示。

从图 1 可以看出, 该油藏常规水驱阶段结束后, 二次开发+聚合物驱和二次开发+三元复合驱这 2 种“二三结合”开发方式的计算采收率与模拟采收率总体吻合程度较好, “二三结合”提高采收率评价理论模型具有一定的可靠性, 但其可靠程度及适用性, 还需要通过误差分析来进一步验证。

鉴于两种“二三结合”开发方式下的最低含水率差异较大, 对计算采收率与模拟采收率的误差分析, 无法采用对比相同含水率下的采出程度的方法来实现。因此, 依据图 1 所示的含水率与采出程度对应关系曲线, 通过分析相同采出程度条件下对应含水率的误差, 来间接实现分析不同预测方式下的采收率误差的目的。相同采出程度条件下对应含水率的误差分析结果如图 2 所示。

从图 2 可以看出, “二三结合”开发的三次采油方式对评价模型计算结果的准确性有一定影响, 二次开发+聚合物驱的误差结果明显小于二次开发+三元复合驱的误差结果。其中, 二次开发+聚合物驱的误差值范围为 0%~3%, 二次开发+三元复合驱的误差值范围为 -1%~10%。表明“二三结合”开发方式越复杂, 评价模型计算结果的误差

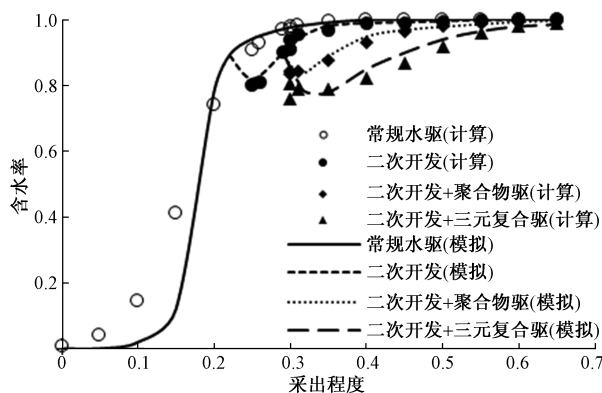


图 1 不同开发方式下两种采收率预测方法对比

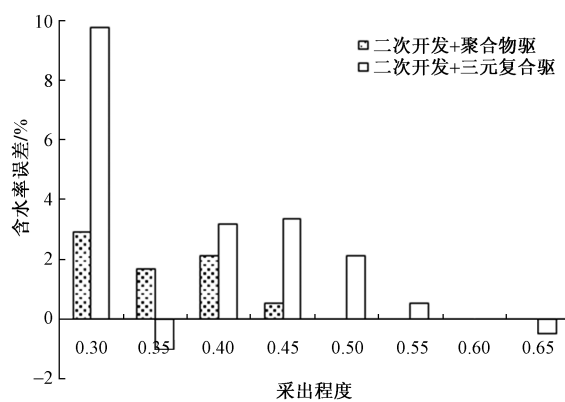


图 2 误差分析结果

越大, 准确性越差, 但误差尚在工程允许的范围。这是因为“二三结合”开发方式越复杂, 涉及的开发机理及影响因素就越多, 在评价模型计算过程中确定参数取值的难度就越大, 由此导致计算结果与模拟结果的误差偏大。

同时也可以看出, 对于图 2 中所示的两种“二三结合”开发方式, 误差偏大的数值主要产生在“二三结合”开发早期; 在“二三结合”开发的中期和后期, 误差绝对值普遍小于 4%。这是因为在开发早期“二三结合”的三次采油过程尚不完全, 使得相关驱油机理尚没完全形成, 而“二三结合”提高采收率评价理论模型是基于驱油机理完全呈现的条件下建立的, 因此对于开发早期的预测结果误差较大。

综上所述, “二三结合”提高采收率评价理论模型的构建方法及公式形式是合理的, 具有较好的可靠性和较强的适用性, 可以满足油田对于最终采收率预测的需要。

如图 1 所示, 通过对比不同开发方式下“二三结合”提高采收率评价理论模型的计算结果可以看出, “二三结合”开发方式要明显好于常规水驱开发

和二次开发,但“二三结合”的三次采油方式对最终开发效果有影响。二次开发+三元复合驱的开发效果要明显好于二次开发+聚合物驱的开发效果,“二三结合”开发阶段内的含水率下降幅度更明显,含水率小于90%时对应的采出程度更高,但油藏最终采收率(含水率接近100%)差异不大。“二三结合”采收率提高幅度的数值详见表4。

从表4中看出,在整个开发期含水率不超过90%的情况下,“二三结合”开发方式明显优于常规水驱和二次开发。其中,二次开发+聚合物驱相较于常规水驱采收率提高了69.6%,相较于二次开发采收率提高了39.3%;二次开发+三元复合驱相较于常规水驱采收率提高了121.7%,相较于二次开发采收率提高了82.1%。二次开发+三元复合驱相较于常规水驱和二次开发的采收率提高幅度,大约是二次开发+聚合物驱的两倍。因此,在油藏最终采收率差异不大的情况下,“二三结合”开发方式中的三次采油方式对于整个开发期内的含水率控制具有不可忽视的影响。

表4 “二三结合”采收率提高幅度

开发方式	$f_w=90\%$ 时的采出程度	相较于常规水驱采收率提高幅度/%	相较于二次开发采收率提高幅度/%
常规水驱	0.23	0	—
二次开发	0.28	21.7	0
二次开发+聚合物驱	0.39	69.6	39.3
二次开发+三元复合驱	0.51	121.7	82.1

4 结论

1)在国内外现有的提高采收率评价方法综合分析分类的基础上,提出基于静态法构建“二三结合”提高采收率评价理论模型的研究思路,尤其是通过理论公式法构建。

2)基于国内油田“二三结合”的开发特点和开发实践,筛选出7项对“二三结合”采收率影响较大的关键相似准则及参数,包括:水油流度比、含水饱和度和、含水率、垂向非均质系数、井网密度、储层平均渗透率、储层渗透率与流度比协同参数。

3)从渗流力学和油藏工程角度出发,创建表征油藏属性、渗流特性、时变特性对采收率影响的“二三结合”提高采收率评价理论模型。考虑多层非均质已开发油藏的储层非均质性和油气水分布不均特性,引入全藏渗透率洛伦兹系数、全藏流度洛伦兹系数,实现“二三结合”提高采收率评价理论模型的修正。

4)以大港某油藏实际开发动态参数和五点井网为例,给出了“二三结合”提高采收率评价理论模型中系数参数(A、B、C、D、E、F、G、H)的求解方法,应用此模型得到该油藏“二三结合”提高采收率预测曲线,通过与数值模拟结果对比表明模型具有较好的可靠性和较强的适用性。

参考文献

- [1] 吕恒宇,胡永乐,邹存友.高含水油藏“二三结合”优化技术研究进展[J].科学技术与工程,2018,18(4):210-220.
- [2] 宋新民,曲德斌,邹存友.低油价常态下中国油田开发低成本战略[J].石油勘探与开发,2021,48(4):869-878.
- [3] 刘卫东,王高峰,廖广志,等.化学复合驱“二三结合”油藏产量计算方法[J].石油勘探与开发,2021,48(6):1218-1223.
- [4] 安伟煜.大庆油田“二三结合”挖潜技术的实践与认识[J].中国石油和化工标准与质量,2012(5):179-180.
- [5] 赵云飞,王朋,邓彩凤.喇嘛甸油田“二三结合”试验开发评价[J].长江大学学报(自然科学版),2014,11(16):103-106.
- [6] 王占红.高含水期二三结合挖潜技术探究[J].内蒙古石油化工,2015(18):113-115.
- [7] 张舒琴.J16块二三结合挖潜效果分析[J].内蒙古石油化工,2020,46(9):24-25.
- [8] 赵凡溪.多层砂岩油藏“二三结合”技术研究与应用[J].清洗世界,2020,36(3):61-62.
- [9] 李爽.双高多层砂岩油藏二三结合精细调整技术研究[J].科技资讯,2020,18(7):43,45.
- [10] 武毅,石利华,阴艳芳,等.辽河油田注水开发技术与实践[J].特种油气藏,2020,27(6):40-46.
- [11] 孙琦,孙海燕,杨凯,等.大港油田港东二区四五断块聚合物注采实践[J].录井工程,2020,31(4):115-120.
- [12] 朱旭,翟泽宇.大港油田“二三结合”提高采收率研究与试验[J].石油工业技术监督,2020,36(4):8-11,20.
- [13] 赵平起,蔡明俊,武玺,等.复杂断块油田二次开发三次采油结合管理模式创新实践[J].国际石油经济,2019,27(5):79-84.
- [14] 马亮.二次采油与三次采油结合技术及进展[J].石化技术,2015(9):75.
- [15] 王星.二次采油与三次采油的结合技术及其发展[J].中国新技术新产品,2012(9):106.
- [16] 朱美思.浅谈二次采油与三次采油的结合技术及其进展[J].石化技术,2015(5):81.
- [17] 张传宝.低渗透油藏CO₂驱采收率评价理论模型[J].油气地质与采收率,2021,28(4):131-139.
- [18] 赵欢,尹洪军,李国庆,等.“二三结合”开发模式渗流特征研究[J].河北科技大学学报,2015,36(4):437-444.
- [19] 冉艳,李标,鲁瑞彬,等.北部湾盆地油藏开发类比知识库研究及应用[J].科技和产业,2021,21(6):169-176.
- [20] 孙玉豹,王少华,吴春洲,等.海上N油田蒸汽驱注采参数智能优化设计[J].科技和产业,2020,20(11):221-228,256.

Study on Theoretical Model of Secondary-tertiary Combination for EOR Evaluation in High Water-cut Oilfield

ZHAO Pingqi¹, ZHANG Jialiang¹, LIU Tongjing², NI Tianlu¹, YU Zhou¹,
ZHANG Jin¹, WANG Qiang¹

(1. PetroChina Dagang Oilfield Company, Tianjin 300280, China;

2. Petroleum Institute, China University of Petroleum-Beijing at Karamay, Karamay 834000, Xinjiang, China)

Abstract: Secondary-tertiary combination was a new development concept and mode in recent years for China's high-water-cut old oilfields under the environment of medium and low oil prices, which has entered the stage of industrial application. In view of the absence of EOR evaluation theoretical model for the development characteristics of "secondary-tertiary combination", based on the comprehensive analysis of the existing EOR evaluation methods at home and abroad, proposed to construct the EOR evaluation theoretical model based on the static method. According to the development characteristics and practice of secondary-tertiary combination in domestic oilfields, seven key similarity criteria and parameters which have great influence on the recovery rate of secondary-tertiary combination were selected. Based on the action mechanism and characterization mechanism of secondary-tertiary combination, the theoretical model of secondary-tertiary combination for EOR evaluation was established to characterize reservoir properties, percolation characteristics and time-varying characteristics from the perspectives of percolation mechanics and reservoir engineering. Considering the heterogeneity of reservoir and the uneven distribution of oil, gas and water in multilayer heterogeneous developed reservoirs, introduced the whole reservoir permeability Lorentz coefficient and the whole reservoir fluidity Lorentz coefficient to modify the theoretical model of secondary-tertiary combination for EOR evaluation. Taking the actual development dynamic parameters and five-point well network of a reservoir in Dagang oilfields as an example, the calculation method of the coefficient in the theory model of secondary-tertiary combination for EOR evaluation was presented, and the enhanced oil recovery prediction curves of secondary-tertiary combination were obtained. It showed that the model had better reliability and applicability by the comparison results with numerical simulation. It provided scientific basis and technical support for the evaluation and prediction of the development effect of secondary-tertiary combination and the economic and effective development of old oilfields.

Keywords: secondary-tertiary combination; enhanced oil recovery(EOR); evaluation method; time-varying characteristics; theoretical model