

一种适用于早期注聚油田阻力系数计算的新方法

张志军,王宏申,魏 俊,周 薛,尹 鹏,徐 浩

(中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司,天津 300452)

摘要:早期聚驱油田水驱时间短或无水驱阶段,无法采用传统的霍尔曲线法进行聚驱效果评价。通过霍尔曲线转换及油藏工程理论等,建立了阻力系数与注入参数、物性之间的关系,提出了一种适合早期聚驱油田阻力系数计算的新方法。实例表明,新型计算方法对水驱历史较短的聚驱油田结果与矿场认识十分吻合。新方法中的评价参数均取自聚驱阶段,容易获取,因此利用该方法可以方便、快捷地评价水驱历史较短或无水驱历史油田的早期聚驱效果,对早期聚驱油田效果评价及措施调整起到一定的理论指导作用。

关键词:早期聚驱;阻力系数;霍尔曲线;效果评价

中图分类号:TE357.46 文献标识码:A

A new method for calculating resistance coefficient in early polymer flooding

ZHANG Zhijun, WANG Hongshen, WEI Jun, ZHOU Xue, YIN Peng, XU Hao

(CNOOC Ener. Tech. Drilling & Production Co., Tianjin 300452, China)

Abstract: In the early stage of polymer flooding with a short time or without water flooding, the traditional Hall curve method can not be used to evaluate the effect of polymer flooding. Based on the conversion of the Hall curve and reservoir engineering theory, it was established the relationship between resistance coefficient and injection parameters or physical properties. The examples show that the result of the new calculation method for polymer flooding oilfields with a short history of water flooding is very consistent with the field's understanding. The evaluation parameters in the new method are all taken from the polymer flooding stage, which is easy to obtain. Therefore, the method can be used to evaluate the early effect of polymer flooding with short time or without water flooding conveniently and quickly, which plays a theoretical guiding role in the effective evaluation and measure adjustment of the early polymer flooding.

Key words: polymer flooding in early stage; resistance coefficient; Hall curve; effect evaluation

聚驱是一种改善水驱流度比,扩大波及体积,提高原油采收率的有效方法^[1-3],其改善程度可通过霍尔曲线的斜率比值来评价,而斜率的求取可通过注入井的注入压力及注入量来实现。其原理是注入井注入不同的流体,在霍尔曲线图上反映出不同的直线段,前后斜率之比体现了渗流阻力变化,其变化幅度反映了聚驱有效性^[4-8]。但对于注水时间短或无水驱阶段的海上早期注聚油田^[9-10],霍尔曲线上的斜率不能真实反映聚驱后渗流特征,从而影响聚驱效果评价。因此亟需建立新的评价方法,用以评价早期注聚油田的聚驱效果评价。

本文从分析常规霍尔曲线公式出发,基于油藏工程理论和微积分原理进行参数转换,建立了一套新的求取聚驱阻力系数方法。该方法很好地解决了

水驱阶段短或缺少水驱历史的油田聚驱效果评价难问题,实现了对早期注聚油田开发效果的评价。

1 新型计算方法的建立

常规水驱霍尔曲线^[11-12]在油井见水前后其数学表达式为:

$$\int(p_w - p_e)dt = \frac{1.867\mu_w B_w [\ln(\frac{R_e}{R_w}) + S]}{K_h} W_i \quad (1)$$

收稿日期:2019-08-19;改回日期:2019-09-17。

第一作者简介:张志军(1989—),硕士,工程师,现从事提高采收率技术。E-mail: zhangzhj43@cnooc.com.cn。

基金项目:“十三五”国家科技重大专项示范工程 58“渤海油田高效开发示范工程”(编号 2016ZX05058)经费资助。

式中: p_w 为井底流压, MPa; p_e 为油藏压力, MPa; μ_w 为水相黏度, mPa·s; B_w 为水相体积系数; R_e 为油藏供给半径, m; R_w 为井筒半径, m; S 为表皮系数; K_e 为地层水相有效渗透率, $10^{-3}\mu\text{m}^2$; h 为油层有效厚度, m; W_i 为某一时间对应的累积注入量, m^3 。

当油层进行聚驱时, 油藏可等效为两部分, 内环为聚合物波及区域, 外环为原始油水状态 (见图1)。聚驱后霍尔曲线表达式为:

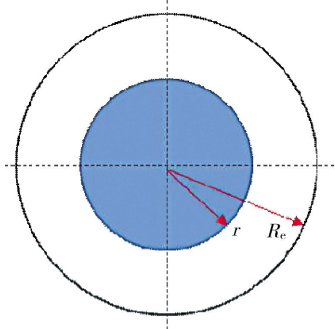


图1 聚驱后油藏等效示意

$$\int (p_w - p_e) dt = \frac{1.867\mu_{\text{eff}}B_w}{K_e h} \left[R_i \left(\ln \frac{r}{R_w} + S \right) + \ln \frac{R_e}{r} \right] W_i \quad (2)$$

式中: R_i 为聚合物阻力系数, r 为聚合物驱替前缘半径, m; μ_{eff} 为聚合物波及区域非油相有效黏度, mPa·s。

等式两边对累积注量 (W_i) 微分, 可得:

$$\frac{d \left[\frac{\int (p_h + \rho g h + \Delta p - p_e) dt}{W_i} \right]}{dW_i} = \frac{d \left[\frac{1.867\mu_{\text{eff}}B_w}{K_e h} \left[R_i \left(\ln \frac{r}{R_w} + S \right) + \ln \frac{R_e}{r} \right] \right]}{dW_i} \quad (3)$$

式中: p_h 为井口油压, MPa; ρ 为水的密度, kg/m^3 ; H 为井深, m; g 为重力加速度; Δp 为摩阻产生的压力, MPa。

根据累积注入量与驱替半径的关系可知:

$$dW_i = 2\pi r dr h \Phi \quad (4)$$

式中: Φ 为孔隙度。

则式(3)右边可化简为:

$$\frac{d \left[\frac{1.867\mu_{\text{eff}}B_w}{K_e h} \left[R_i \left(\ln \frac{r}{R_w} + S \right) + \ln \frac{R_e}{r} \right] \right]}{dW_i} = \frac{1.867\mu_{\text{eff}}B_w(R_i - 1)}{2K_e h W_i} \quad (5)$$

则式(5)带入式(3), 化简为:

$$d \left[\frac{\int (p_h + \rho g h + \Delta p - p_e) dt}{W_i} \right] = \frac{1.867\mu_{\text{eff}}B_w(R_i - 1)}{2K_e h W_i} dW_i \quad (6)$$

根据积分的定义可将式(6)表达为:

$$\frac{\int (p_h + \rho g h + \Delta p - p_e) dt}{W_i} = \frac{1.867\mu_{\text{eff}}B_w(R_i - 1)}{2K_e h W_i} \ln W_i + C \quad (7)$$

当注入井井身结构确定时, 其井深及其对应的液柱压力也为定值, 通常在开发过程中油藏压力基

本稳定或缓慢下降, 在计算过程中可以视为常数, 故式(7)可进一步简化为井口油压 p_h 与 W_i 累注量的数学关系式:

$$\frac{\int p_h dt}{W_i} = \frac{1.867\mu_{\text{eff}}B_w(R_i - 1)}{2K_e h} \ln W_i + C_1 \quad (8)$$

令系数 $a = \frac{1.867\mu_{\text{eff}}B_w(R_i - 1)}{2K_e h}$, 则式(8)可简化为

$$\frac{\int p_h dt}{W_i} = a \ln W_i + C_1 \quad (9)$$

由式(9)可知: $\frac{\int p_h dt}{W_i}$ 与 $\ln W_i$ 呈线性关系, 通过拟合直线段斜率, 可得到聚驱阻力系数 R_i , 即

$$R_i = 1 + \frac{2K_e h}{1.867\mu_{\text{eff}}B_w} a \quad (10)$$

从式(10)可以看出, 确定注入井的有效渗透率、厚度、地层水相的有效黏度与体积系数后, 便可计算出阻力系数。

注聚后由于聚合物的黏度与水差异较大, 因此无法再用水的黏度作为水相的黏度参与计算。为了计算阻力系数, 利用油藏工程理论方法来计算聚合物在地下的黏度。

这里借鉴文献^[13]的研究成果, 聚驱条件下其数学表达式为:

$$\frac{p_w - p_o}{Q} = \frac{\mu_{\text{eff}} \ln \frac{R_e}{r} + \mu_o \ln \frac{r}{R_w} + S}{2\pi K_e h} \quad (11)$$

式中: μ_o 为油相黏度, mPa·s。

利用求解阻力系数的数学方法即可得到聚合物波及区域非油相有效黏度与地层物性参数的关系, 即

$$\mu_{\text{eff}} = \mu_o - 4\pi a K_e h \quad (12)$$

将式(12)与式(10)结合, 可以得到阻力系数表达式为:

$$R_i = 1 + \frac{2K_e h a_1}{1.867(\mu_o - 4\pi K_e h a_2)B_w} \quad (13)$$

式中: a_1 为 $\frac{\int p_h dt}{W_i}$ 与 $\ln W_i$ 线性关系的斜率, a_2 为

$\frac{p_h}{Q}$ 与 $\ln W_i$ 线性关系的斜率。

对水驱时间较长的油田进行聚驱效果评价时, 其计算过程与常规霍尔曲线难易程度相当; 对于水驱时间短或无水驱阶段的油田, 常规霍尔曲线已不再适用, 而式(12)由于参与拟合计算的动态数据仅来源于聚合物驱阶段, 没有涉及到水驱阶段的动态数据, 因此该公式可以实现水驱历史较短或无水驱阶段的聚驱油田开发效果的评价。

2 实例应用

渤海 L 油田构造形态属于半背斜,储层孔隙度 24%~33%,渗透率 $(50\sim5\,000)\times 10^{-3}\,\mu\text{m}^2$,具有高孔、高渗物性特征,地层原油黏度 7.20~19.43 mPa·s。

渤海 L 油田 L23 井注水时间仅 4 个月,L10 井注水时间仅 6 个月,利用常规的霍尔曲线法求取的阻力系数(见图 2)分别为 170 和 226,该结果远不符合矿场动态认识。因此亟需寻找新的计算阻力系数的方法,以评价早期注聚井的聚驱效果。

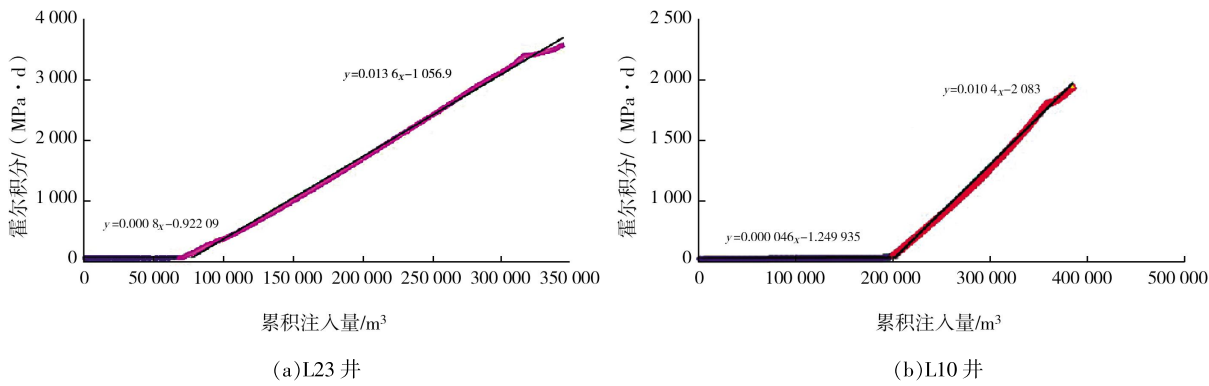


图 2 渤海 L 油田 2 口井霍尔曲线法求阻力系数曲线

基于聚合物驱阶段动态数据,利用新型计算方法求取阻力系数,见图 3,4。计算结果见表 1。

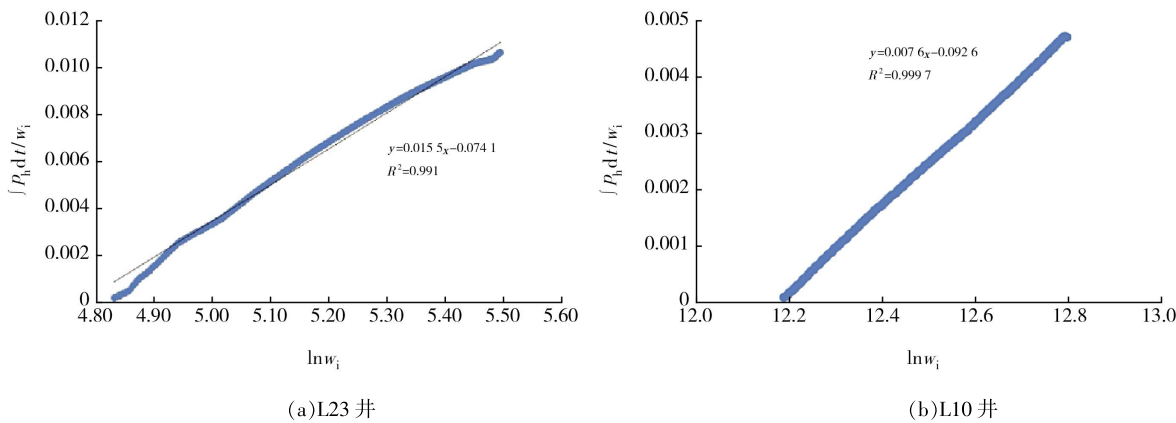


图 3 渤海 L 油田 2 口井 $\frac{\int P_h dV}{W_i}$ 与 $\ln W_i$ 关系曲线

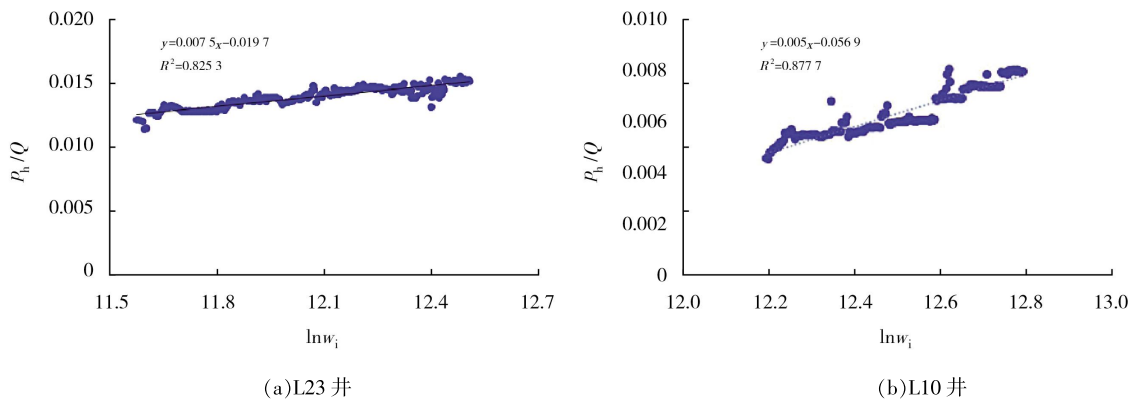


图 4 渤海 L 油田 2 口井 $\frac{P_h}{Q}$ 与 $\ln W_i$ 关系曲线

表 1 渤海 L 油田 2 口注聚井阻力系数计算结果

井号	霍尔曲线法	新型方法
L10	226	1.06
L23	170	1.15

由表 1 可知,新型计算方法所得阻力系数值符合阻力系数的正常取值范围。另外,从计算结果图看,聚合物溶液注入后,曲线呈逐渐稳步上升,注聚效果逐渐显现,这也符合矿场认识。因此,与传统方法计算早期注聚阻力系数不合理相比,本方法可以更加准确地求取早期注聚井的阻力系数,从而更加科学合理地评价早期注聚油田聚驱开发效果。

3 结论

(1)建立了一种适用于早期注聚井求取阻力系数的新方法,成功解决了聚驱前缘半径难以求取的难题,从而更加方便地求取聚驱时的阻力系数。

(2)新型计算方法与常规霍尔曲线相比,无需涉及水驱阶段的动态数据,因此能有效解决常规霍尔曲线无法求取水驱历史较短的早期注聚井阻力系数的难题。

参考文献:

[1] 王德民,程杰成,吴军政,等.聚合物驱油技术在大庆油田的应用[J].石油学报,2005,26(1):74-78.
[2] 张凤久,姜伟,孙福街,等.海上稠油聚合物驱关键技术研究与矿场试验[J].中国工程科学,2011,13(5):28-33.

[3] 王宏申,石勇,周亚利,等.旅大 10-1 油田早期注聚可行性研究[J].海洋石油,2006,26(3):40-45.
[4] 张景存.三次采油[M].北京:石油工业出版社,1995.
[5] 马世煜.聚合物驱油实用工程方法[M].北京:石油工业出版社,1995.
[6] 张宏方,王德民,王立军.聚合物溶液在多孔介质中的渗流规律及其提高驱油效率的机理[J].大庆石油地质与开发,2002,21(4):57-60.
[7] 高清玲,邵振波,顾根深.霍尔曲线在聚合物驱油过程中的应用[J].大庆石油地质与开发,2007,26(6):119-121.
[8] 康晓东,冯国智,张贤松,等.评价注聚效果的 Hall 导数曲线法[J].中国海上油气,2007,19(3):173-175.
[9] 张贤松,唐恩高,谢晓庆.海上油田早期注聚开发特征及注入方式研究 [J]. 石油天然气学报,2013,35(7):123-126.
[10] 姜汉桥,郑伟,张贤松,等.渤海油田早期聚合物驱动态规律及见效时间判断方法[J].中国石油大学学报:自然科学版,2011,35(6):95-98.
[11] 张凤义,张言辉,张宏友,等.一种早期注聚效果评价新方法[J].中国海上油气,2015,27(3):73-78.
[12] 么世椿,赵群,王昊宇,等.基于 Hall 曲线的复合驱注采能力适应性[J].大庆石油地质与开发,2013,32(3):102-106.
[13] 张志军,李芳,魏俊,等.一种聚合物地下黏度计算新方法[J].特种油气藏,2018,25(4):109-111.

(编辑 谢 葵)