

文章编号: 1000 - 2634(2008)05 - 0100 - 04

低渗透油藏垂直井未来流入动态的预测^{*}

刘 顺¹, 姚 军¹, 胥元刚²

(1 中国石油大学石油工程学院, 山东 东营 257061; 2 西安石油大学石油工程学院, 陕西 西安 710065)

摘 要: 针对低渗油藏存在启动压力梯度, 动态预测非常困难的问题。推导了具有启动压力梯度的溶解气驱油藏未来流入动态预测关系式, 分析得出油井的采油指数和流压之间存在线性关系, 且不同地层压力下的流入动态通过最大采油指数联系了起来。同时, 以采油指数为桥梁, 推导了三相流未来流入动态关系式。将此预测方法应用于现场实际, 通过与其他预测方法进行对比, 得出方法可信度高。23 个测试点预测数据显示, 平均误差在 11% 以内, 对油田的生产开发具有指导意义。

关键词: 低渗透油藏; 三相流; 流入动态; 预测; 应用

中图分类号: TE348 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3863/j.issn.1000-2634.2008.05.022

引 言

分析油井流入动态时, 确定井底流压下的产油量是最重要的一个步骤。一口井的地层压力不变, 其流入动态曲线很容易做出。但实际随着井的开采, 地层压力不断减少, 流入动态关系不断变化, 这给现场采油参数的调整带来了困难, 因而准确的未来流入动态曲线可以为油井的及时转抽提供依据。

Standing^[1]第一个提出中高渗溶解气驱油藏的未来 IPR 曲线预测方法, Al-Saadoon^[2]也对其流入动态进行了推理, 但他们都没有考虑压力对油层物性的影响。Fetkovich^[3]、Eickmeier^[4]曾经提出预测中高渗油藏的未来 IPR 曲线方法。Uhril 和 Bount^[5]提出了一种“轴心点”的方法, 在 Vogel 方程的基础上, 能得到中高渗油藏的未来 IPR 曲线。Brown^[6]提供了一种由 Petrobras 建议的方法, 用以确定产水油井的三相流入动态。受到 Russell Jennings 提出的多相流动方程泰勒级数展开式的启示, Wiggins^[7]提出一种形式上类似于 Vogel 方程的方法, 用以预测中高渗三相流的未来动态。对于低渗透油藏, 由于存在启动压力梯度^[8-9], 导致其渗流偏离传统的达西定律, 也使油井的动态预测变得非常困难。

本文在总结前人研究的基础上, 建立了低渗油藏垂直井未来流入动态的预测模型。

1 溶解气驱油藏未来流入动态预测

对稳定的平面径向流, 当油井位于圆形地层中心, 且 $K_{ro} \times (\mu_o B_o)^{-1}$ 看成是压力 p 的线性函数^[10-11] 时, 其产量公式^[12] 为

$$q_{o,i} = \frac{0.543Kh}{\ln r_e / r_w} \left[\left(\frac{1}{2} A (p_e^2 - p_{wf,i}^2) + B (p_e - p_{wf,i}) - G \left(\frac{A}{2} p_e + \frac{A}{2} p_{wf,i} + B \right) r_e \right) \right] \quad (1)$$

式中, $q_{o,i}$ —理想产油量, m^3/d ; K —绝对渗透率, $\times 10^{-3} \mu m^2$; h —油层有效厚度, m ; r_e —供给半径, m ; r_w —井筒半径, m ; p_e —供给压力, MPa ; $p_{wf,i}$ —理想井筒压力, MPa ; G —启动压力梯度, MPa/m ; A —线性函数直线段的斜率; B —线性函数直线段的截距。定义有效地层压力

$$p_{\text{reff}} = p_e - Gr_e \quad (2)$$

且令

$$C = \frac{B + \frac{A}{2} Gr_e}{\frac{A}{2} p_{\text{reff}} + \frac{A}{2} Gr_e + B} \quad (3)$$

当油井为非完善井时, 将流动效率 E_f 定义^[12] 为: 在相同压差下, 非完善井的实际产量 $q_{o,a}$ 与理想完善井的产量 $q_{o,i}$ 之比, 由式 (1), (2), (3) 有

^{*} 收稿日期: 2007 - 11 - 20

作者简介: 刘 顺 (1977 -), 男 (汉族), 湖南涟源人, 博士研究生, 主要从事油气田开发理论与系统工程方面的研究。

$$\frac{q_{o,a}}{q_{o,max,a}} = 1 - c \left(\frac{p_{wf,a}}{p_{reff}} \right) - (1 - c) \left(\frac{p_{wf,a}}{p_{reff}} \right)^2 \quad (4)$$

式中, $q_{o,max,a}$ —实际最大产油量, m^3/d ; $p_{wf,a}$ —实际井筒压力, MPa。由式 (4) 得到实际产油指数 $J_{o,a}$

$$J_{o,a} = - \frac{dq_{o,a}}{dp_{wf,a}} = \frac{q_{o,max,a}}{p_{reff}} \left[c + 2(1 - c) \frac{p_{wf,a}}{p_{reff}} \right] \quad (5)$$

当 $p_{wf,a} = p_{reff}$ 时, 由式 (5) 可得实际最大产油指数 $J_{o,max,a}$

$$J_{o,max,a} = (2 - c) \frac{q_{o,max,a}}{p_{reff}} = \frac{0.543Kh}{\ln \frac{r_e}{r_w}} \times \left[A \left(p_e - \frac{Gr_e}{2} \right) + B \right] \quad (6)$$

式 (5) 除以式 (6), 得

$$\frac{J_{o,a}}{J_{o,max,a}} = \frac{c}{2 - c} + \frac{2 - 2c}{2 - c} \times \frac{p_{wf,a}}{p_{reff}} \quad (7)$$

又由式 (6) 得

$$\frac{(J_{o,max,a})_p}{(J_{o,max,a})_f} = \frac{\left[A \left(p_e - \frac{Gr_e}{2} \right) + B \right]_p}{\left[A \left(p_e - \frac{Gr_e}{2} \right) + B \right]_f} \quad (8)$$

式 (8) 中下标 p 和 f 分别代表目前和将来的时间。

式 (8) 即为所求的低渗透溶解气驱油藏目前与未来最大采油指数关系式。由于各参数是定值, 通过此关系式, 把不同地层压力下的流入动态关系联系起来。式 (4) 和式 (8) 构成了具有启动压力梯度的溶解气驱油藏未来流入动态预测关系式。

同时, 由式 (7) 看出, $\frac{J_{o,a}}{J_{o,max,a}}$ 与 $\frac{p_{wf,a}}{p_{reff}}$ 成线性关系。

当 $c = 0.2$ 时, 得到低渗透溶解气驱油藏流入动态关系和采油指数关系 (图 1)。

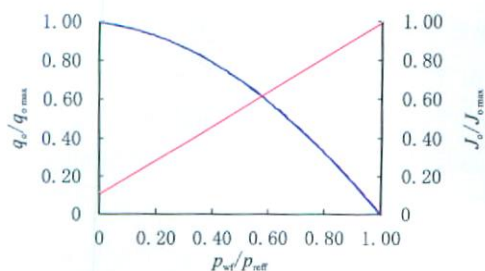


图 1 低渗透溶解气驱油藏流入动态关系和采油指数关系图 ($c = 0.2$)

2 三相流未来流入动态的预测

对于三相流, 目前与未来的采液指数间也一定

存在联系, 据此, 得到了低渗透油藏绘制未来的流入动态曲线的方程。

(1) 有效地层压力 $\geq$ 饱和压力, 即 $p_{reff} \geq p_b$

井筒压力 $\geq$ 饱和压力, 即 $p_{wf,a} \geq p_b$

$$Q_{总} = J(p_{reff} - p_{wf,a}) \quad (9)$$

井筒压力 $\leq$ 饱和压力, 即 $p_{wf,a} \leq p_b$ 时

三相流的生产指数 J , 为高于饱和压力时的产水指数。三相流的总产量由 Petrobras 提出的油水加权平均法得到, 即

$$Q_{总} = f_o Q_o + f_w Q_w \quad (10)$$

三相流的生产指数 J

$$J = \frac{Q_w}{p_{reff} - p_{wf,a}} = \frac{Q_{总} - f_o Q_o}{f_w (p_{reff} - p_{wf,a})} = \frac{Q_{总}}{f_w (p_{reff} - p_{wf,a})} - \frac{f_o}{f_w} \times \frac{0.543Kh}{\ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{1}{2} + s} \times \left[\frac{A}{2} (p_e + p_{wf,a}) + B \right] \quad (11)$$

式中, $Q_{总}$ —总的产液量, m^3/d ; Q_o —油的产液量, m^3/d ; Q_w —水的产量, m^3/d ; f_o —含油率, 小数; f_w —含水率, 小数。将式 (4) 代入式 (10) 得

$$Q_{总} = J(1 - f_w) \times \left\{ p_{reff} - p_b + \frac{p_b}{2 - c} \left[1 - c \left(\frac{p_{wf,a}}{p_b} \right) - (1 - c) \left(\frac{p_{wf,a}}{p_b} \right)^2 \right] \right\} + f_w J (p_{reff} - p_{wf,a}) \quad (12)$$

将式 (12) 代入式 (11), 得

$$J = \frac{(p_{reff} - p_{wf,a})}{p_{reff} - p_b + \frac{p_b}{2 - c} \left[1 - c \left(\frac{p_{wf,a}}{p_b} \right) - (1 - c) \left(\frac{p_{wf,a}}{p_b} \right)^2 \right]} \times \frac{0.543Kh}{\ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{1}{2} + s} \times \left[\frac{A}{2} (p_e + p_{wf,a}) + B \right] \quad (13)$$

式 (13) 也为三相流最大产液指数。对于未来的地层情况, 由目前地层情况, 根据式 (13) 就可得出未来的生产指数

$$\frac{J_f}{J_p} = \frac{(p_{reff} - p_{wf,a})_f \times \left[\frac{A}{2} (p_e + p_{wf,a}) + B \right]_f \times \left\{ \ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{1}{2} + s \right\}_p}{(p_{reff} - p_{wf,a})_p \times \left[\frac{A}{2} (p_e + p_{wf,a}) + B \right]_p \times \left\{ \ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{1}{2} + s \right\}_f} \times \frac{p_{reff,p} - p_b + \frac{p_b}{2 - c} \left[1 - c \left(\frac{p_{wf,a}}{p_b} \right) - (1 - c) \left(\frac{p_{wf,a}}{p_b} \right)^2 \right]_p}{p_{reff,f} - p_b + \frac{p_b}{2 - c} \left[1 - c \left(\frac{p_{wf,a}}{p_b} \right) - (1 - c) \left(\frac{p_{wf,a}}{p_b} \right)^2 \right]_f} \quad (14)$$

联立式(12)和式(14)就可预测未来产液量。

(2) 有效地层压力 $\leq$ 饱和压力, 即 $p_{\text{reff}} < p_b$

此时, 目前与将来的生产指数比方程将有所变化。式(13)变成

$$J = \frac{(p_{\text{reff}} - p_{\text{wf},a})}{\frac{p_{\text{reff}}}{2 - c} \left[1 - c \left(\frac{p_{\text{wf},a}}{p_{\text{reff}}} \right) - (1 - c) \left(\frac{p_{\text{wf},a}}{p_{\text{reff}}} \right)^2 \right]} \times \frac{0.543}{\ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{1}{2} + s} \times \left[\frac{A}{2} (p_e + p_{\text{wf},a}) + B \right] \quad (15)$$

目前与未来生产指数之间的关系是

$$\frac{J_f}{J_p} = \frac{(p_{\text{reff}} - p_{\text{wf},a})_f \left\{ \frac{A}{2} (p_e + p_{\text{wf},a}) + B \right\}_f \left\{ \ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{1}{2} + s \right\}_p}{(p_{\text{reff}} - p_{\text{wf},a})_p \left\{ \frac{A}{2} (p_e + p_{\text{wf},a}) + B \right\}_p \left\{ \ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{1}{2} + s \right\}_f} \times \frac{p_{\text{reff},p} \left[1 - c \left(\frac{p_{\text{wf},a}}{p_{\text{reff}}} \right) - (1 - c) \left(\frac{p_{\text{wf},a}}{p_{\text{reff}}} \right)^2 \right]_p}{p_{\text{reff},f} \left[1 - c \left(\frac{p_{\text{wf},a}}{p_{\text{reff}}} \right) - (1 - c) \left(\frac{p_{\text{wf},a}}{p_{\text{reff}}} \right)^2 \right]_f} \quad (16)$$

联立式(12)和式(16)可预测未来产液量。

对于其他情况, 在上述原理上进行组合, 就可以得到其生产指数之间的关系。

3 启动压力梯度对流入动态关系的影响

某低渗透油藏, 已知地层压力 $p_e = 20 \text{ MPa}$, $r_e = 100 \text{ m}$, 由 $K_{\text{ro}} \times (\mu_o B_o)^{-1}$ 和压力 p 的线性关系知 $A = 0.038$, $B = 0.015$ 。比较启动压力梯度分别为 $0, 0.02 \text{ MPa/m}, 0.04 \text{ MPa/m}$ 时的流入动态关系和采油指数关系(图2)。

从图2可知: (1) 启动压力梯度对油井产量的影响很大, 随着启动压力梯度的增加, 产量呈明显递减趋势。如当启动压力梯度为 0.02 MPa/m 时, 在其他条件相同的情况下, 启动压力就为地层压力的 10% , 相对于中高渗渗流状况而言, 产油量有很大减少; (2) 启动压力梯度越大, 最大采油指数越小; 但无因次采油指数与无因次压力关系却随着启动压力梯度的增大越往上移; (3) 公式中系数 c 与启动压力梯度有关, 且启动压力梯度越大, 低渗透渗流无因次产量、采油指数和无因次压力的关系曲线与中高渗渗流无因次产量、采油指数和压力的关系曲线偏

离程度越大。

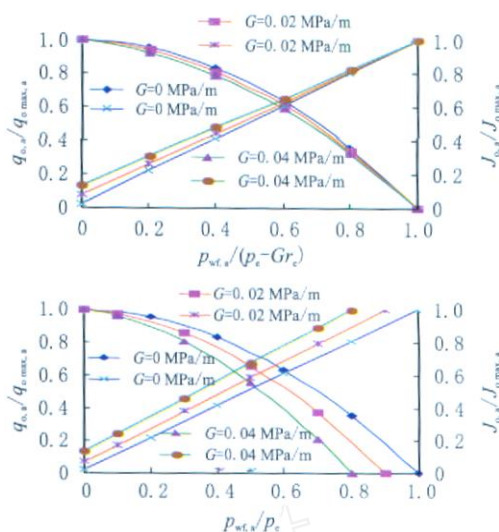


图2 某低渗透溶解气驱油藏不同启动压力梯度的流入动态关系和采油指数关系图

4 未来流入动态关系预测的应用

某油田为典型的低渗油田, 其有效孔隙度 $11\% \sim 14\%$, 空气渗透率 $(1 \sim 2) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。其某生产区 1993 ~ 2001 年的现场生产动态数据, 总共 23 个测试点, 但各测试点的值是在不同地层压力下测得。

4.1 预测模型的应用思路

(1) 从油井所测动态数据中, 选取一组动态数据作为基点; (2) 用最小二乘法求油井的启动压力; (3) 由求得的启动压力求取预测点的产量; (4) 本文的低渗流入动态关系模型、Petrobras + 本文未来流入动态预测方法结合而成的中高渗流入动态关系模型、Wiggins^[7]方法等 3 种预测方法的误差进行比较。

4.2 求取启动压力的数学描述

假设油井实测数据点的产量为 $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$, 预测数据点的产量为 $q_1, q_2, \dots, q_n$ 。根据曲线拟合方法, 启动压力的求解问题就转化为如下的最优优化问题:

$$\min S(G r_e) = \min \sum_{k=1}^n (q_k - Q_k)^2 \quad \text{s.t.} \begin{cases} q_k > 0 \\ G r_e > 0 \end{cases} \quad (17)$$

4.3 结果分析

用 3 种方法进行预测计算, 误差结果见表 1, 可以看出, 本文低渗模型的相对误差范围 $0.80\% \sim 37.22\%$, 平均 10.46% ; 第 2 种方法的误差范围 $0.80\% \sim$

111.03%, 平均 47.82%; Wiggins 方法的预测范围 74.20% ~ 98.10%, 平均 89.32%。

图 3 为用本文预测方法得到的 C 油井 $\frac{p_{wf,a}}{p_e} \sim \frac{q_{t,a}}{q_{max,a}}$

表 1 三种不同方法计算的预测误差值

井 号	误 差	本文低渗模型方法预测相对误差 / %	Petrobras + 本文将来流入动态预测方法预测相对误差 / %	Wiggins 方法预测相对误差 / %
A	误差范围	2.00 ~ 23.37	42.97 ~ 111.03	74.20 ~ 94.60
	平均误差	10.96	65.27	88.32
B	误差范围	2.43 ~ 25.87	2.70 ~ 100.00	83.70 ~ 98.10
	平均误差	9.11	45.84	92.84
C	误差范围	2.30 ~ 8.00	0.80 ~ 52.00	81.50 ~ 97.50
	平均误差	4.96	26.74	89.24
D	误差范围	0.80 ~ 37.22	27.81 ~ 93.79	77.10 ~ 96.40
	平均误差	16.81	53.43	86.28
总的平均误差		10.46	47.82	89.32

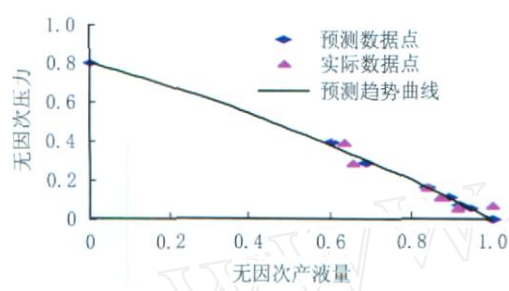


图 3 本文预测方法的 C 油井无因次流入动态曲线

关系图,也是流入动态曲线图,可以看出,预测值与实际值吻合程度相当好。本文低渗方法误差最小,最接近实际情况,且整体误差在 11%以内,可推广于工程应用。

5 结 论

- (1) 推导了低渗溶解气驱油藏未来流入动态预测关系式,分析得出其目前和未来最大采油指数之间存在联系;低渗溶解气驱油藏油井的采油指数和流压之间存在线性关系。
- (2) 通过推导三相流采液指数,给出了低渗油藏垂直井三相流未来流入动态的预测方法。
- (3) 随启动压力梯度的增加,产量呈明显递减趋势,无因次产量及采油指数和无因次压力的关系曲线的偏离程度越大。
- (4) 用本文低渗流入动态关系模型预测油井产量的平均相对误差为 10.46%,而其他方法的误差非常大;本文低渗预测方法总体误差在 11%以内,可推广于工程应用。

参考文献:

[1] Standing M B. Concening the Calculation of inflow performance of wells producing from solution gas drive reservoirs[J]. JPT, 1971, 16 (24): 1141 - 1152

[2] Saadoon F T. Predicting present and future well productivities for solution gas drive reservoirs [J]. JPT, 1980, 25 (5): 868 - 870.

[3] Fetkovich M J. The isochronal resting of oil wells[J]. SPE 4529, 1973

[4] Eickmeier, James R. How to accurately predict future well productivities[J]. World Oil, 1968, 20 (5): 99

[5] Uhri D C, Blount E M. Pivot point method wuickly predicts well performance[J]. World Oil, 1982, 34 (3): 153 - 164

[6] Brown K E. The technology of artificial lift methods[M]. Vol 4Tulsa: Penn Well Publishing Company, 1984

[7] Wiggins M L. Generalized inflow performance relationships for three-phase flow[J]. SPE 25458, 1993

[8] 阎庆来,何秋轩. 低渗透油层中单相液体渗流特征的实验研究 [J]. 西安石油学院学报, 1990, 5 (5): 24 - 27.

[9] 戈尔布诺夫 A Z T 异常油田开发 [M]. 北京:石油工业出版社, 1987.

[10] 布朗 K E 升举法采油工艺 (卷四) [M]. 孙学龙,译. 北京:石油工业出版社, 1987.

[11] 贾振歧. 关于沃格尔流动方程及其系数关系的推证 [J]. 大庆石油学院学报, 1986, 15 (1): 18 - 24

[12] 胥元刚,刘顺. 低渗油藏油井流入动态关系研究 [J]. 石油学报, 2005, 26 (4): 77 - 80

(助理编辑:荀 威)

and stress sensitivity. Finally, relevant theory chart board is convenient for field application.

Key words: ultra- low permeability; producer- injector spacing; expected productivity; threshold pressure gradient; stress sensitivity

DEVELOPMENT TECHNOLOGY OF LOW PERMEABILITY OIL RESERVOIRS IN SHENGLI OILFIELD

LI Xi- sheng, WANG Ling- bi (Faculty of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Changping Beijing 102249, China). *JOURNAL OF SOUTHWEST PETROLEUM UNIVERSITY (SCIENCE & TECHNOLOGY EDITION)*, VOL. 30, NO. 5, 97 - 99, 2008 (ISSN 1000 - 2634, IN CHINESE)

Abstract: Low permeability oil reservoirs are one of the vital oil resources in Shengli Oilfield. Enhancing development technology and making a good use of the kinds of reservoirs are very important to the stable and sustainable development of both Shengli Oilfield and the whole industry of our country. Shengli Oilfield has made great progress on study of features of reservoirs, technologies of slim hole drilling, horizontal well drilling and hydraulic fracturing. New acknowledgment has gained on reservoir flow mechanism through porous media, gas injection miscible flooding technology. Research direction of development technology in the near future should focus on detailed studying on reservoir flow mechanism through porous media, gas injection miscible flooding and immiscible flooding, studying and introducing international advanced fracturing technology and materials, studying flow mechanism of extra- low permeability oil reservoirs and water flooding technology so as to enhance reserves productivity and utilize oil resource effectively.

Key words: Shengli Oilfield; low permeability reservoir; development technology; theory studying; adaptability technology

THE PREDICTION OF FUTURE IPR OF VERTICAL WELLS IN LOW PERMEABILITY RESERVOIRS

LIU Shun¹, YAO Jun¹, XU Yuan- gang² (1. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Dongying Shandong 257061, China; 2. College of Petroleum Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an Shaanxi 710065, China). *JOURNAL OF SOUTHWEST PETROLEUM UNIVERSITY (SCIENCE & TECHNOLOGY EDITION)*, VOL. 30, NO. 5, 100 - 103, 2008 (ISSN 1000 - 2634, IN CHINESE)

Abstract: With common permeability reservoirs coming into their low productivity periods, the development of low-permeability reservoirs becomes more vital. But the performance analysis prediction of reservoirs is very difficult because threshold pressure gradient. Based on investigation results, the prediction of inflow performance in low-permeability solution- gas- drive reservoirs existing threshold pressures is presented. There is a linear relation between productivity index and bottomhole flow pressure. The inflow performances in different reservoir pressure are connected with ultimate PI. According to the fluid PI, a new calculating method that predicts future three-phase flow performance of vertical wells in low-permeability reservoir is established. The application of 23 sets of oil field data to validate the models shows that the average calculation errors is within 11%. The established predicting future IPR is suitable for different cases and can be widely used in practice.

Key words: low permeability reservoir; three-phase flow; IPR; prediction; application

MULTI-PULSE GAS LOAD FRACTURING AND DELIVERABILITY EVALUATION OF HORIZONTAL WELL

SUN Zhi- yu, PU Chun- sheng, LUO Ming- liang, ZHOU Min (School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Dongying Shandong 257061, China). *JOURNAL OF SOUTHWEST PETROLEUM UNIVERSITY (SCIENCE & TECHNOLOGY EDITION)*, VOL. 30, NO. 5, 104 - 107, 2008 (ISSN 1000 - 2634, IN CHINESE)