

文章编号:1673-5005(2007)05-0069-05

低渗透油藏油井产能预测新方法

何岩峰¹, 吴晓东¹, 韩增军², 赵 军³, 张立会⁴

(1. 中国石油大学 石油工程教育部重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油大庆油田公司 第九采油厂, 黑龙江 大庆 163853; 3. 中联煤层气有限责任公司 国际合作部, 北京 100011; 4. 中国石油青海油田分公司 钻采工艺研究院, 甘肃 敦煌 736202)

摘要:为了准确预测低渗透油藏油井的产能,基于达西公式,考虑高压和低压状态下油藏流体性质以及启动压力梯度对渗流规律的影响,推导了新的低渗透油藏油井组合型产能预测模型。给出了极限井底流压和产量拐点的求解方法,分析了启动压力梯度、流体性质等因素对低渗透油藏油井产能的影响。将新模型与现有模型的预测结果进行了对比,并用实测数据进行了验证。结果表明,新模型预测出的流入动态关系更接近于实测数据,准确度较高,能用于工程计算。

关键词:低渗透油藏; 达西公式; 启动压力梯度; 产能预测

中图分类号:TE 328

文献标识码:A

New prediction method of oil well deliverability of low permeability reservoir

HE Yan-feng¹, WU Xiao-dong¹, HAN Zeng-jun², ZHAO Jun³, ZHANG Li-hui⁴

(1. MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;
2. 9th Oil Production Plant of Daqing Oilfield Company, PetroChina, Daqing 163853, Heilongjiang Province, China;
3. Department of International Cooperation of China United Coalbed Methane Corporation Limited, Beijing 100011, China;
4. Drilling and Production Technology Research Institute of Qinghai Oilfield Company, PetroChina, Dunhuang 736202, Gansu Province, China)

Abstract: In order to predict oil well deliverability of low permeability reservoir accurately, a combination deliverability prediction model was presented based on Darcy law. The effects of reservoir fluid property in high and low pressure and the starting pressure gradient on the percolation laws were taken into account in this model. The solution methods of ultimate bottom-hole producing pressure and production turning point in inflow performance relation curve were given out. And the effects of reservoir fluid property and the starting pressure gradient on the oil well deliverability in low permeability reservoir were analyzed. The prediction results of the new model were compared with that of old models and verified with real data. It is proved that the new method has high accuracy and can be used in engineering calculation.

Key words: low permeability reservoir; Darcy equation; starting pressure gradient; deliverability prediction

对于低渗透油藏油井产能的研究,前人在实验、数值模型计算及渗流等方面已做了大量的工作^[1-14]。低渗油田生产实践与渗流规律的研究结果表明,启动压力梯度影响低渗油藏油井的产能,导致低渗透油藏的流入动态曲线存在拐点^[1]。一般,当压力梯度低于启动压力梯度时,认为渗流速度为零^[2]。研究者在推导低渗油井产能预测公式时,大

多认为流压为零时油井产能最大,而对油藏流体物性和地层性质随压力的改变考虑较少,或直接替换达西公式中的流体物性、渗透率而得到产能预测公式。笔者基于达西定律,结合启动压力梯度和流体物性规律推导低渗透油藏油井产能预测新模型,并对影响低渗油藏油井产能的主要因素进行分析。

收稿日期:2007-05-23

作者简介:何岩峰(1973-),男(汉族),浙江义乌人,讲师,博士研究生,主要研究方向为采油工程理论与技术。

1 低渗油藏油井产能预测新模型

建立新产能预测模型时设定,低渗油藏油井在井底流压为零时油井产能并不是最大值,流入动态曲线存在拐点,引入油藏流体性质与压力之间的关系式和启动压力梯度。

1.1 单相流体产能预测公式

假设各向同性均质圆形地层中心一口井,流体稳定流动。根据 Darcy 公式^[15],单相流体平面径向流的压力梯度为

$$\frac{dp}{dr} = \frac{\mu_o B_o q_o}{2\pi r H k} + G. \quad (1)$$

式中, q_o 为油井产量, m^3/d ; k 为渗透率, μm^2 ; H 为油层厚度, m ; μ_o 为原油的粘度, $mPa \cdot s$; B_o 为原油体积系数; G 为启动压力梯度, MPa/m 。

对式(1)移项并积分,得

$$q_o = \frac{2\pi H}{\ln(R_e/R_w)} \frac{k}{\mu_o B_o} [p_e - p_w - G(R_e - R_w)]. \quad (2)$$

显然,当 $R_e \gg R_w$ 时,

$$q_o = \frac{2\pi H}{\ln(R_e/R_w)} \frac{k}{\mu_o B_o} (p_e - p_w - GR_e). \quad (3)$$

式中, R_e 为供给半径, m ; R_w 为井筒半径, m ; p_e 为油藏压力, MPa ; p_w 为井底流压, MPa ;

式(3)即为低渗油藏单相流体流入动态公式。

1.2 油、气两相产能预测新模型

考虑启动压力梯度的低渗油藏油、气两相平面径向流压力梯度计算公式为

$$\frac{dp}{dr} = \frac{q_o}{2\pi r H k} \frac{\mu_o B_o}{K_{ro}} + G. \quad (4)$$

式中, K_{ro} 为原油的相对渗透率。

根据渗流理论,压力较低时, $\frac{K_{ro}}{\mu_o B_o}$ 与压力之间呈指数关系,即

$$K_{ro}/(\mu_o B_o) = mp^{1/n}; \quad (5)$$

而在压力较高时呈线性规律^[16],即

$$K_{ro}/(\mu_o B_o) = a + bp. \quad (6)$$

式中, a, b, m, n 为流体系数,可以根据实验结果回归得到。

低渗油藏油井往往产量较小,在近井地带地层压力梯度较大,井底流压较小。为求出此时井筒的流入量,将公式(5)代入到公式(4)后进行积分求解,得到低压产能预测公式,即

$$q_o = \left\{ 2\pi H k m \left[\frac{n}{(1+n)} (p_e^{1/n+1} - p_w^{1/n+1}) - \right. \right.$$

$$\left. \frac{G}{2} (p_e^{1/n} - p_w^{1/n}) (R_e - R_w) \right] \Bigg\} / \ln(R_e/R_w). \quad (7)$$

引入 $R_e \gg R_w$, 并对式(7)进行化简,得

$$q_o = \frac{2\pi H k m}{\ln(R_e/R_w)} p_e^{1/n+1} \times \left[\frac{n}{(1+n)} - \frac{GR_e}{2p_e} + \frac{GR_e}{2p_e} \left(\frac{p_w}{p_e} \right)^{1/n} - \frac{n}{(1+n)} \left(\frac{p_w}{p_e} \right)^{1/n+1} \right]. \quad (8)$$

对式(8)求得

$$\frac{dq_o}{dp_w} = \frac{2\pi H k m p_e^{1/n+1} \left[\frac{GR_e}{2np_e^2} \left(\frac{p_w}{p_e} \right)^{1/n-1} - \left(\frac{p_w}{p_e} \right)^{1/n} \frac{1}{p_e} \right]}{\ln(R_e/R_w)}. \quad (9)$$

定义极限井底流压为油井达到最大产能时对应的井底流压,令式(9)右边为0,可通过变换求出极限井底流压 p_{wmin} 为

$$p_{wmin} = \frac{GR_e}{2n}. \quad (10)$$

分析式(10)可以看出,当油藏启动压力梯度为零时,最小井底流压即为零;而对于低渗油藏,油井必然存在一个极限井底流压,流压低于此点时,产量随生产压差增加而下降。同时,随着低渗油藏启动压力梯度的增加,极限井底流压增加,即启动压力梯度越大,井底流压的可调节范围越小。

类似地,将公式(6)代入公式(4),得到井底流压较高时的油井产能预测公式为

$$q_o = \frac{2\pi H k}{\ln(R_e/R_w)} \times \left[\frac{a}{b} (p_e - p_w) + \frac{(p_e^2 - p_w^2)}{2b} - G(R_e - R_w) \right]. \quad (11)$$

从高压产能预测公式(11)可以看出,由于启动压力梯度 G 的影响,当井底流压增加到地层压力之后,产量为零。对式(11)两边同时关于井底流压求导,得

$$\frac{dq_o}{dp_w} = \frac{2\pi H k}{\ln(R_e/R_w)} \left(-\frac{a}{b} - \frac{p_w}{b} \right). \quad (12)$$

显然,井底流压自高向低变化时,油井产能变化应该是连续的,在高压和低压产能公式的组合点产量应相等且产量的导数也应相等,即在组合点处公式(12)应等于公式(9),由此得到组合点压力公式为

$$p_w - mbp_w^{1/n} + \frac{mb}{2n} G p_w^{1/n-1} R_e - \frac{b}{2} GR_e + a = 0. \quad (13)$$

公式(13)为一个非线性方程,当流体系数 a, b, m, n 和启动压力梯度、井底流压、供给半径已知时,

可通过试算法求出组合点的压力。

在已知井底流压时,先根据公式(13)计算出组合点压力,然后根据当前井底流压与组合点压力的关系选择公式(7)或公式(11)计算油井产能。公式(7),(11)和(13)即组成低渗油藏产能预测新模型。

2 模型应用与分析

从低渗油藏油井产能预测新模型可以看出,影响产能的因素包括生产压差、井底流压、启动压力梯度、流体系数和渗透率、油层厚度等。以大庆油田低渗区块某井的数据为基础进行计算,对这些因素进行敏感性分析。油井初始条件为:油层中深1826.3 m,油层有效厚度14 m,地层压力12.8 MPa,有效孔隙度11%,空气渗透率 $28.18 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,启动压力梯度0.035 MPa/m,井距300 m。回归出的流体系数 m, n, a, b 分别为0.406, 2.127, 0.192, 5.216。

2.1 预测结果

利用如上数据进行产能预测,预测结果与实测数据的对比如图1所示。计算出该区块的最大产量为6.988 t/d, p_{wmin} 为1.3 MPa,高、低压产能预测公式的组合点处井底流压为6.78 MPa。计算结果表明,低渗油藏油井的流入动态曲线存在拐点,不能为了追求产量而过多提高生产压差。

使用胥元刚等人的方法^[13-14]对同一组数据进行了预测。新方法预测结果的最大相对误差为5.61%,随井底流压降低,低渗油藏油井的产量先增加后减小。新方法预测结果与生产现场的实际情况相一致,而胥元刚等人方法的预测结果近似呈直线。

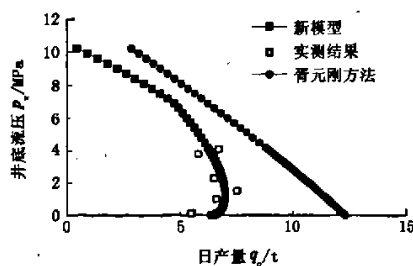


图1 模型计算结果与实测数据的对比

2.2 模型预测结果敏感性分析

使用新建的模型对油井产能进行敏感性分析,只变化一个参数的数值,其他参数仍取为初始的基础数据。

2.2.1 井底流压

由于低渗透油藏具有压力敏感性,因此油井产能不仅取决于生产压差,而且与井底流压的绝对值

有关。比较结果表明,井底流压不同,产能的计算方法不同,单独使用高压产能公式或低压产能公式,不能准确计算各种井底流压下的产能(如图2)。前人的模型^[10,12-14]中均未考虑井底流压不同时产能预测公式形式的变化。

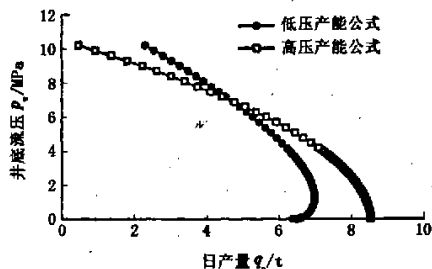
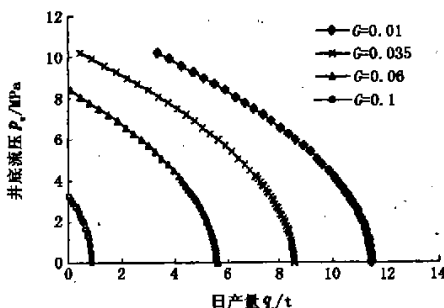


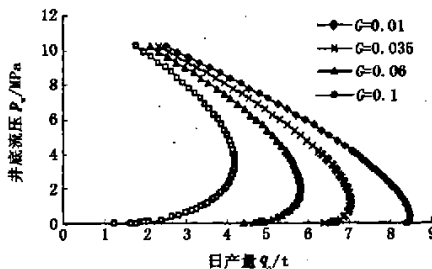
图2 新模型的产能预测结果

2.2.2 启动压力梯度

流入动态与启动压力梯度的关系曲线见图3。



(a) 高压产能公式



(b) 低压产能公式

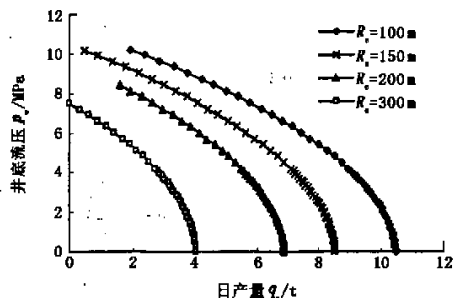
图3 流入动态与启动压力梯度的关系

随着启动压力梯度的增加,高压产能和低压产能公式对应的流入动态曲线均向左偏移,两条曲线预测出的最大产量点均逐渐变小。同时从高压产能公式与纵轴的交点可以看出,油井开始生产的初始生产压差变大。此现象说明当供给半径不变时,随着启动压力梯度的增加,启动压差变大,原油流动必须克服更大的流动阻力,油井产能因而变小。

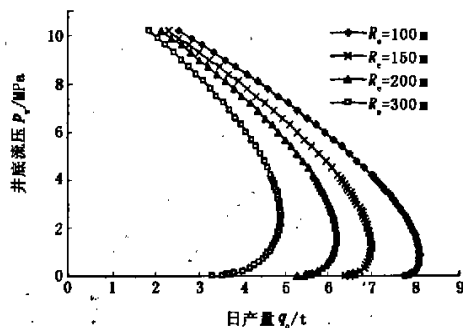
2.2.3 供给半径

供给半径对油井产能的影响见图4。随着供给

半径的增加,预测出的流入动态曲线均向左偏移。这说明当启动压力梯度不变时,随着供给半径的增加,启动压差增加,油井产能减小。在现场生产中,同一油藏随着油井供给面积增加,相同的生产压差下,油井的产能减小。



(a) 高压产能公式



(b) 低压产能公式

图4 流入动态与供给半径的关系

2.2.4 流体系数

高压产能公式中流体系数对油井产能的影响见图5和图6。当流体系数 b 保持不变, a 变大时,油井产能变大,流入动态曲线曲率变小;而当流体系数 a 保持不变, b 变大时,油井产能变小,流入动态曲线曲率也变小。

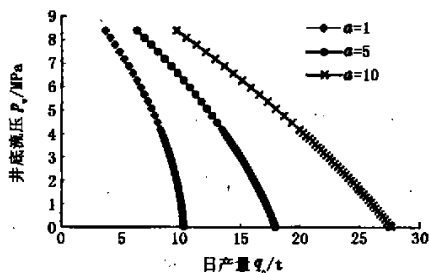


图5 流入动态与流体系数 a 的关系

低压产能公式中流体系数对油井产能的影响见图7和图8所示。当流体系数 n 保持不变, m 变大时,油井产能变大,流入动态曲线曲率变大,最大产

量点对应的井底流压变大。当流体系数 m 保持不变, n 变大时,油井产能变小,流入动态曲线曲率变小,最大产量点对应的井底流压变小。

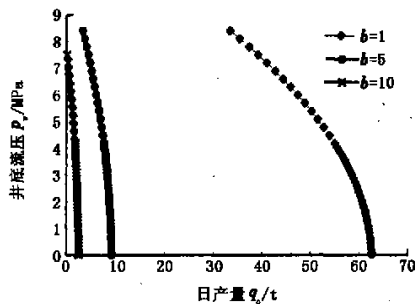


图6 流入动态与流体系数 b 的关系

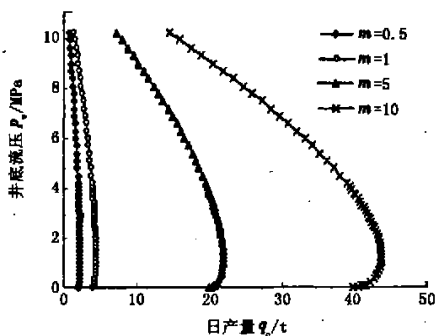


图7 流入动态与流体系数 m 的关系

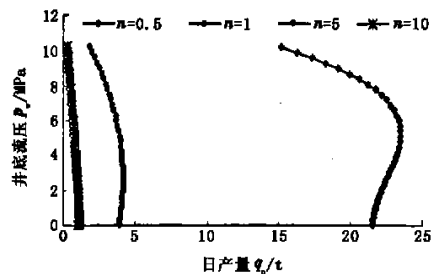


图8 流入动态与流体系数 n 的关系

3 结论

(1)建立了考虑低渗油藏启动压力梯度的组合型产能预测模型,给出了组合型流入动态曲线的计算方法。

(2)使用低渗油藏油井产能预测新方法可以求出产能公式组合点压力、极限井底流压及其对应的最大产量。不能为了追求产量而过于提高低渗油藏油井的生产压差。

(3)启动压力梯度越大或供给半径越大,极限井底流压越大,低渗透油藏油井正常生产所需的生

产压差就越大。流体系数对于油井的产能具有较大的影响。

(4)新模型的产能预测结果与低渗油藏油井流入动态规律更为一致,较符合现场生产实际。

参考文献:

- [1] 高玉普. 陕北低压低渗透油田开发实践[M]. 北京:中国石化出版社,2004:76.
- [2] 黄延章. 低渗透油层渗流机理[M]. 北京:石油工业出版社,1998:94.
- [3] 陈兴越,朱龙权. W2 断块低渗透油藏渗流规律及稳产潜力研究[J]. 小型油气藏,2006,25(6):27-32.
CHEN Xing-yue, ZHU Long-quan. The percolation law and production stabilization potential of W2 fault block low permeability reservoir [J]. Small Hydrocarbon Reservoir, 2006,25(6):27-32.
- [4] 秦积舜. 变围压条件下低渗透砂岩储层渗透率变化规律研究[J]. 西安石油学院学报:自然科学版,2002,17(4):28-31,35.
QIN Ji-shun. Variation of the permeability of the low-permeability sandstone reservoir under variable confined pressure[J]. Journal of Xi'an Petroleum Institute(Natural Science Edition), 2002,17(4):28-31,35.
- [5] 贾振岐,王延峰,付俊林,等. 低渗透低速非达西渗流特征及影响因素[J]. 大庆石油学院学报,2001,25(3):73-76.
JIA Zhen-qi, WANG Yan-feng, FU Jun-lin, et al. Characteristics of non-Darcy percolation and under the condition of low-permeability and low-velocity[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2001,25(3):73-76.
- [6] 阮敏,何秋轩. 低渗透非达西渗流临界点及临界参数判别法[J]. 西安石油学院学报:自然科学版,1999,14(3):9-10.
RUAN Min, HE Qiu-xuan. Determination of the critical point of non-Darcy flow through low permeability porous media and judgement of Darcy flow and non-Darcy flow [J]. Journal of Xi'an Petroleum Institute(Natural Science Edition), 1999,14(3):9-10.
- [7] 刘建军,刘先贵,胡雅初,等. 低渗透储层流-固耦合渗流规律的研究[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(1):88-92.
LIU Jian-jun, LIU Xian-gui, HU Ya-reng, et al. Study of fluid-solid coupling flow in low permeable oil reservoir[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002,21(1):88-92.
- [8] 周涌沂,彭仕宓,李允. 低速非达西渗流的全隐式模拟模型[J]. 石油勘探与开发,2002,29(2):90-93.
ZHOU Yong-yi, PENG Shi-mi, LI Yun. Fully implicit simulation model for low-velocity non-Darcy flow[J]. Petroleum Exploration and Development, 2002,29(2):90-93.
- [9] 夏惠芬,李福军,梅启太. 油井 IPR 曲线拐点分析及计算[J]. 大庆石油地质与开发,1996,15(2):28-32.
XIA Hui-fen, LI Fu-jun, MEI Qi-tai. Analysis and computation of flex points on IPR curve of oil wells[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 1996,15(2):28-32.
- [10] 王岩楼,张传绪,郭殿军,等. 大庆西部外围油田开发实践[M]. 北京:石油工业出版社,2005:124.
- [11] 高艳秋,于永波,赵乐军,等. 低渗透油田产能预测方法研究[J]. 油气田地面工程,2005,24(11):9.
GAO Yan-qiu, YU Yong-bo, ZHAO Le-jun, et al. Research on deliverability prediction method of low permeability reservoir[J]. Oil-Gasfield Surface Engineering, 2005,24(11):9.
- [12] 郑祥克,陶永建,门承全,等. 低速非达西渗流产能方程的建立[J]. 新疆石油地质,2003,24(2):158-160.
ZHENG Xiang-ke, TAO Yong-jian, MEN Cheng-quan, et al. Development of inflow performance relationships for non-Darcy flow in low permeability reservoir [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2003,24(2):158-160.
- [13] 胥元刚,刘顺. 低渗透油藏油井流入动态研究[J]. 石油学报,2005,26(4):77-80.
XU Yuan-gang, LIU Shun. Study on inflow performance of oil wells in low-permeability reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinic, 2005,26(4):77-80.
- [14] 刘顺,胥元刚,魏红玫. 低渗油藏油气两相渗流的理论模型[J]. 西安石油大学学报:自然科学版,2004,19(6):20-22.
LIU Shun, XU Yuan-gang, WEI Hong-mei. A theoretical model of oil gas two phase flow in low permeability reservoir[J]. Journal of Xi'an Shiyu University(Natural Science Edition), 2004,19(6):20-22.
- [15] 张琪. 采油工程原理与设计[M]. 东营:石油大学出版社,2003:4-5.
- [16] 翟云芳. 渗流力学[M]. 北京:石油工业出版社,1999.

(编辑 李志芬)