

# 见水后产量递减新模型理论研究及应用

杨仁锋, 杨宝泉, 皮建, 杨莉

中海油研究总院, 北京 100027

**摘要** 针对见水后产量递减规律缺乏理论研究以及产量递减预测方法有待完善等问题, 本文以渗流理论为基础, 从相对渗透率曲线和物质平衡原理出发, 推导出产量递减新模型。研究表明, 见水后产量递减规律反映的内在规律是随着开发的进行, 含油饱和度逐渐降低(物质平衡规律的体现), 导致油相相对渗透能力减弱以及水相渗流能力增加(相对渗透率规律的体现); 相对渗透率曲线表达式决定递减规律, 且提出的产量递减新模型通过忽略水油黏度比与水相渗透率的比值项可以得出常规的 3 种产量递减模型。新模型是考虑因素更全面、理论推导更严格统一的产量递减模型。利用 A 油田实际生产资料对新模型进行验证, 与常规递减模型相比新模型预测精度最高。本文对产量递减规律的深层次认识以及提高产量递减预测精度具有一定的参考意义。

**关键词** 产量递减规律; 相对渗透率; 物质平衡

**中图分类号** TE343

**文献标识码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.h1.005

## Seepage Flow Theory and Application of New Production-decline Model After Water Breakthrough and Its Applications

YANG Renfeng, YANG Baoquan, PI Jian, YANG Li

Research Institute of CNOOC, Beijing 100027, China

**Abstract** Currently, the oil production decline after water breakthrough is lack of theoretical research, and the production decline forecasting methods need to be improved. Based on the percolation theory of relative permeability curve and material balance equation, the new model for oil production decline is derived. The research shows that with the oil saturation is getting lower and lower, the relative permeability of oil phase is getting weaker and weaker, and the relative permeability of water phase is getting stronger and stronger. The production decline law is determined by the relative permeability curve expression; three common production decline models could be derived by ignoring the ratio of oil water viscosity ratio to the relative permeability of water phase from the new model. The new model is a more uniform production decline equation, giving consideration to several factors. The research has a certain reference value for deeply understanding the production decline and for increasing forecast accuracy.

**Keywords** production decline; relative permeability; material balance principle

### 0 引言

准确的产量预测是油田产量规划的重要依据, 是油藏动态管理的核心所在。注水开发油藏, 注水前缘突破后产量不可避免的逐渐递减, 很多学者<sup>[1-8]</sup>研究过见水后产量递减规律。目前大多数油田开发工作者倾向于将产量递减规律看作是一种现场统计方法, 缺乏理论认识, 同时在利用产量递减规律进行动态预测时预测, 结果往往与实际存在一定差距。针对上述问题, 本文从相对渗透率曲线和物质平衡原理出发, 理论推导出考虑因素更全面, 理论推导更严格、统一的产

量递减新模型, 通过 A 油田实际生产资料验证, 与常规递减模型预测结果对比, 产量递减新模型预测精度最高。

### 1 见水后产量递减新模型理论推导

注水保持地层压力情况下, 生产压差基本保持不变, 则

$$Q_o = \frac{2\pi K K_m (S_{w, \text{th}}) h}{B_o \mu_o} \frac{\Delta p}{\ln \left( \frac{r_e}{r_w} \right) + s} \quad (1)$$

其中,  $Q_o$  为产油量;  $K$  为储层渗透率;  $K_m$  为油相相对渗透率;  $S_{w, \text{th}}$  为出口端含水饱和度;  $h$  为储层有效厚度;  $B_o$  为油相体积系

收稿日期: 2012-07-10; 修回日期: 2012-08-07

作者简介: 杨仁锋, 工程师, 研究方向为油气田开发、渗流力学, 电子信箱: yrf723@163.com

数;  $\mu_o$  为原油黏度;  $\Delta p$  为生产压差;  $r_e$  为泄油半径;  $r_w$  为井筒半径;  $s$  为表皮系数。

记

$$\alpha = \frac{2\pi Kh}{B_o \mu_o} \frac{\Delta p}{\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) + s} \quad (2)$$

则

$$Q_o = \alpha K_{ro}(S_{w \text{ 出}}) \quad (3)$$

由物质平衡方程可得

$$Q_o = \frac{V_p}{B_o} \frac{d\bar{S}_w}{dt} \quad (4)$$

其中,  $V_p$  为井控范围孔隙体积;  $\bar{S}_w$  为平均含水饱和度;  $t$  为生产时间。

由式(3)、式(4)可得

$$\frac{1}{K_{ro}(S_{w \text{ 出}})} d\bar{S}_w = \frac{\alpha B_o}{V_p} dt \quad (5)$$

而平均含水饱和度以及出口端含水饱和度存在如下关系:

$$\bar{S}_w = S_{w \text{ 出}} + \frac{1-f_{w \text{ 出}}}{f'_{w \text{ 出}}} \quad (6)$$

其中,  $f_{w \text{ 出}}$  为出口端含水率;  $f'_{w \text{ 出}}$  为出口端含水上率。

将式(6)代入式(5)中,微分可得

$$-\frac{f''_{w \text{ 出}}(1-f_{w \text{ 出}})}{(f'_{w \text{ 出}})^2} \frac{1}{K_{ro}(S_{w \text{ 出}})} dS_{w \text{ 出}} = \frac{\alpha B_o}{V_p} dt \quad (7)$$

记  $S_{w \text{ 出}} = S_w$ , 式(7)变为

$$-\frac{f''_w(1-f_w)}{(f'_w)^2} \frac{1}{K_{ro}(S_w)} dS_w = \frac{\alpha B_o}{V_p} dt \quad (8)$$

很多学者的研究<sup>[9-10]</sup>指出

$$\frac{K_{rw}}{K_{ro}} = ae^{-bs_w} \quad (9)$$

其中,  $K_{rw}$  为水相相对渗透率;  $a, b$  为拟合参数, 与孔喉分布及润湿性有关。则

$$f_w = \frac{1}{1 + \frac{\mu_w}{\mu_o} \frac{1}{a} e^{-bs_w}} \quad (10)$$

对式(10)分别求一阶、二阶导数, 可得

$$f'_w = \frac{b \frac{\mu_w}{\mu_o} \frac{1}{a} e^{-bs_w}}{\left(1 + \frac{\mu_w}{\mu_o} \frac{1}{a} e^{-bs_w}\right)^2} \quad (11)$$

$$f''_w = \frac{-b^2 \frac{\mu_w}{\mu_o} \frac{1}{a} e^{-bs_w} \left(1 - \frac{\mu_w}{\mu_o} \frac{1}{a} e^{-bs_w}\right)}{\left(1 + \frac{\mu_w}{\mu_o} \frac{1}{a} e^{-bs_w}\right)^3} \quad (12)$$

将式(10)~式(12)代入式(8), 可得

$$\frac{1 - \frac{\mu_w}{\mu_o} \frac{1}{a} e^{-bs_w}}{K_{ro}(S_w)} dS_w = \frac{\alpha B_o}{V_p} dt \quad (13)$$

即

$$\left[ \frac{1}{K_{ro}(S_w)} - \frac{\mu_w}{\mu_o} \frac{1}{K_{rw}(S_w)} \right] dS_w = \frac{\alpha B_o}{V_p} dt \quad (14)$$

油水两相渗透率可以由多种形式表示, 广泛应用的是如下形式<sup>[9-11]</sup>:

$$K_{rw} = K_{rw}(S_{or}) \left( \frac{S_w - S_{wc}}{1 - S_{wc} - S_{or}} \right)^{n_w} \quad (15)$$

$$K_{ro} = K_{ro}(S_{wc}) \left( \frac{1 - S_w - S_{or}}{1 - S_{wc} - S_{or}} \right)^{n_o} \quad (16)$$

其中, 水相指数  $n_w$ 、油相指数  $n_o$  是取决于储层岩石孔隙结构和润湿性的等因素的两个参数, 其变化范围为 2—4,  $S_{or}$  为残余油饱和度;  $S_{wc}$  为束缚水饱和度。

将式(15)~式(16)代入式(14)中, 积分可得

$$\frac{1}{(n_o - 1)K_{ro}(S_{wc})} \left( \frac{1 - S_w - S_{or}}{1 - S_{wc} - S_{or}} \right)^{-n_o + 1} + \frac{\mu_w}{\mu_o} \frac{1}{(n_w - 1)K_{rw}(S_{or})} \cdot \left( \frac{S_w - S_{wc}}{1 - S_{wc} - S_{or}} \right)^{-n_w + 1} - \frac{1}{(n_o - 1)K_{ro}(S_{wc})} = \frac{\alpha B_o}{V_p(1 - S_{wc} - S_{or})} t \quad (17)$$

将式(3)、式(15)~式(16)代入式(17)可得

$$\frac{1}{(n_o - 1)K_{ro}(S_{wc})} \left[ \frac{Q_o}{\alpha K_{ro}(S_{wc})} \right]^{\frac{-n_o + 1}{n_o}} + \frac{\mu_w}{\mu_o} \frac{1}{(n_w - 1)K_{rw}(S_{or})} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{Q_o}{\alpha K_{ro}(S_{wc})} \right)^{\frac{1}{n_o}} \right]^{-n_w + 1} - \frac{1}{(n_o - 1)K_{ro}(S_{wc})} =$$

$$\frac{\alpha B_o}{V_p(1 - S_{wc} - S_{or})} t \quad (18)$$

式(18)给出了注水保持压力情况下, 产量随时间的变化关系。明显式(17)已不再是常用的指数递减、双曲递减及调和递减模型, 而是对递减规律阐释更加详细明确的产量递减新模型。式(17)经过了严格的数学推导, 从理论上给出了产量递减表达式, 其指出产量递减取决于相渗曲线(相渗曲线端点值、水相指数、油相指数)、油水黏度比、井控储量、渗透率、储层有效厚度以及井的污染情况。

## 2 见水后产量递减新模型与常规递减模型对比分析

第 1 节通过严格的数学推导得出了一个新的产量递减表达式, 其不同于常规的指数、双曲及调和递减模型。下面分析其与常规递减模型的联系与区别。

一般地, 生产井见水时生产井周围储层的含水饱和度已经达到较高程度, 此时  $K_{ro}(S_w)$  较小,  $K_{rw}(S_w)$  较大, 而水油黏度比一般小于 1, 故  $\frac{1}{K_{ro}(S_w)} \gg \frac{\mu_w}{\mu_o} \frac{1}{K_{rw}(S_w)}$ , 可以忽略  $\frac{\mu_w}{\mu_o} \frac{1}{K_{rw}(S_w)}$ 。同时忽略平均含水饱和度和出口端饱和度之间的差别, 式(14)变为

$$\frac{1}{K_{ro}(S_w)} dS_w = \frac{\alpha B_o}{V_p} dt \quad (19)$$

采用不同的相对渗透率曲线表达式, 代入式(19)中积分可以得到不同的产量随时间的变化关系。不同的相对渗透率

形式对应的  $Q_o-t$  汇总如表 1 所示。

表 1 产量递减模型汇总

Table 1 Summary of production-decline models

油相相对渗透率	$Q_o-t$	递减模型
$K_{ro}(S_w)=a \cdot \left(\frac{1-S_w-S_{or}}{1-S_{wc}-S_{or}}\right)^b$	$Q_o=\alpha a \left(1+\frac{b-1}{1-S_{wc}-S_{or}} \cdot \frac{\alpha a B_o}{V_p} t\right)^{\frac{b}{1-b}}$	双曲递减
$K_{ro}(S_w)=a(1-S_w)^b$	$Q_o=\alpha a(1-S_{wc})^b \left[1-\frac{(1-b)\alpha a B_o}{V_p(1-S_{wc})^{1-b}} t\right]^{\frac{b}{1-b}}$	双曲递减
$K_{ro}(S_w)=ae^{-bS_w}$	$Q_o=\frac{\alpha a}{e^{bS_{wc}}+\frac{ab\alpha B_o}{V_p} t}$	调和递减
$K_{ro}(S_w)=a-bS_w$	$Q_o=\alpha(a-bS_{wc})e^{-\frac{abB_o}{V_p} t}$	指数递减

通过上述分析得出:

(1) 相对渗透率曲线表达式决定递减规律模式,不同的相对渗透率曲线表达式将推导出不同的产量递减规律;

(2) 产量递减规律反映的内在规律为随着开发的进行,含油饱和度逐渐降低(物质平衡规律的体现)导致的油相相对渗透能力减弱以及水相渗流能力增加(相对渗透率规律的体现);

(3) 产量递减新模型与 3 种常规递减模型之间既存在联系又存在区别,联系在于常规递减模型可通过产量递减新模型在忽略平均含水饱和度与出口端含水饱和度差异时推导出(忽略掉  $\frac{\mu_w}{\mu_o} \frac{1}{K_{rw}(S_w)}$ );区别在于常规递减模型忽略了  $\frac{\mu_w}{\mu_o} \frac{1}{K_{rw}(S_w)}$ ,产量递减新模型是考虑因素更全面、理论推导更严格的产量递减方程。

下文分析常规递减模型忽略掉的项  $\frac{\mu_w}{\mu_o} \frac{1}{K_{rw}(S_w)}$  对预测结果的影响。产量递减新模型与常规递减模型中都存在  $\alpha, V_p$  值,  $\alpha, V_p$  反映的是实际储层参数、流体参数及边界条件等,可通过对历史生产数据的拟合得出。

A 油田 A-29 并于 2011-03-11 见水,已表现出见水后递减规律,对表 1 中  $Q_o-t$  函数关系运用从 2011-03-11 至 2011-07-31 的实际生产数据进行拟合,拟合系数及相关系数如表 2,并采用不同的产量预测模型对 A-29 井的产量进行预测,预测结果见图 1。

由表 2 可以看出不同的产量递减模型对实际生产数据拟合相关系数分别为 0.8680,0.8617,0.8847,0.8660,拟合精度差距不大,但后期预测结果存在很大差距(图 1),截止 2012 年底预测日产油分别为 725,617,530,322m<sup>3</sup>/d,最大值和最小值相差 403m<sup>3</sup>/d,差距很大。

通过上述分析可以得出两方面认识:(1) 对实际生产数据拟合精度较高,并不能保证预测精度较高;(2) 产量递减新

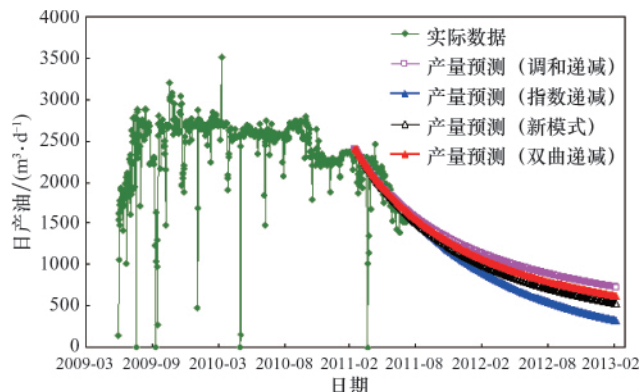


图 1 A-29 井不同模型日产油曲线图

Fig. 1 Production forecast based on different production-decline models for Well A-29

表 2 产量递减方程拟合系数表

Table 2 Table for fitting coefficients of production-decline equation

产量递减模型	相关系数
产量递减新模型(式(18))	0.8847
双曲递减	0.8660
调和递减	0.8680
指数递减	0.8617

模型是介于指数递减模型和调和递减模型之间的一种产量递减模型,与双曲递减模型预测结果相差最小。

### 3 产量递减新模型实例验证

结合 A 油田实际生产资料对产量递减新模型的预测精度进行验证。利用不同的产量递减模型对 A 油田 29 井 2011-07-31 以前的实际产量数据进行拟合,得到各递减模型的参数,对 2011-08-01 至 2011-10-30 期间产量进行预测,预测结果与实际生产数据对比如图 2 所示。

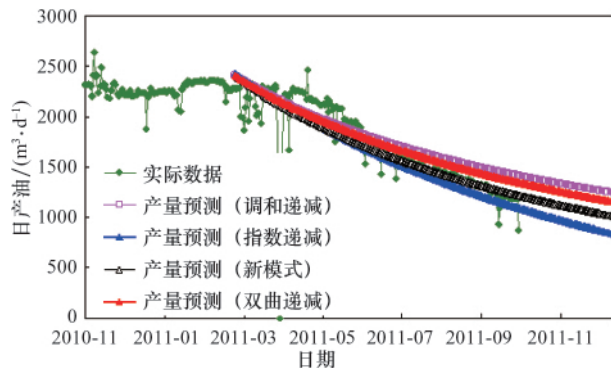


图 2 A-29 井不同产量递减模型预测对比图

Fig. 2 Forecast comparison between different production-decline models for Well A-29

通过图 2 可以看出,产量递减新模型预测结果最接近实际生产数据,预测精度最高。

#### 4 结论及认识

本文以基础渗流理论为基础,推导出不同于常规递减规律的产量递减新模型,利用 A 油田实际数据对提出方法进行合理性检验,通过研究得出如下结论及认识。

(1) 相对渗透率曲线表达式决定递减规律模式,不同的相对渗透率曲线表达式将推导出不同的产量递减规律。

(2) 产量递减规律反映的内在规律是随着开发的进行,含油饱和度逐渐降低(物质平衡规律的体现)导致的油相相对渗透能力减弱以及水相渗流能力增加(相对渗透率规律的体现)。

(3) 本文提出的产量递减新模型与 3 种常规递减模型之间既存在联系又存在区别:常规递减模型可通过产量递减新模型在忽略平均含水饱和度与出口端含水饱和度差异时推导得出。因此产量递减新模型是考虑因素更全面,理论推导更严格、统一的产量递减方程。尤其对于原油黏度偏低的油田,用本文提出的产量递减新模型能一定程度上提高精度。

(4) 本文提出的见水后产量递减规律预测方法与常规产量递减规律研究方法不同,在 A 油田产量预测应用中取得的较高精度,但并不一定适用于所有的油藏,应将其应用到更多的油藏中进行检验,以更好地完善该产量递减预测方法。同时新模型在推导过程中应用的相对渗透率方程及渗流方程是基于中高渗透油藏的,因此本文提出的产量递减适用于中高渗透油藏,并不适用于特殊类型油气藏。

#### 参考文献 (References)

- [1] 俞启泰. 水驱油田产量递减规律[J]. 石油勘探与开发. 1993, 20(4): 72-80.  
Yu Qitai. *Petroleum Exploration and Development*, 1993, 20(4): 72-80.  
[2] 陈元千, 郭二鹏. 新型油田产量递减模型的建立与应用 [J]. 中国海上

- 油气, 2008, 20(6): 379-381.  
Chen Yuanqian, Guo Erpeng. *China Offshore Oil and Gas*, 2008, 20(6): 379-381.  
[3] 计秉玉. 产量递减方程的渗流理论基础[J]. 石油学报, 1995, 16(3): 86-88.  
Ji Bingyu. *Acta Petrolei Sinica*, 1995, 16(3): 86-88.  
[4] 陈新彬, 常毓文, 王燕灵, 等. 低渗透储层产量递减模型的渗流机理及应用[J]. 石油学报, 2011, 32(1): 113-116.  
Chen Xinbin, Chang Yuwen, Wang Yanling, et al. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(1): 113-116.  
[5] 张宗达, 邓维佳, 胡海燕. 油田现行的产量递减率计算方法及分析[J]. 西南石油学院学报, 1998, 20(2): 61-65.  
Zhang Zongda, Deng Weijia, Hu Haiyan. *Journal of Southwest Petroleum Institute*, 1998, 20(2): 61-65.  
[6] 李斌, 袁俊香. 影响产量递减率的因素与减缓递减的途径 [J]. 石油学报, 1997, 18(3): 89-97.  
Li Bin, Yuan Junxiang. *Acta Petrolei Sinica*, 1997, 18(3): 89-97.  
[7] 黄伏生, 赵永胜. 递减曲线研究应用中的一个问题[J]. 石油学报, 1991, 12(4): 96-101.  
Huang Fusheng, Zhao Yongsheng. *Acta Petrolei Sinica*, 1991, 12(4): 96-101.  
[8] 田晓东, 王凤兰, 石成方, 等. 大庆喇萨杏油田产量递减率变化规律[J]. 石油学报, 2006, 27(S1): 137-141.  
Tian Xiaodong, Wang Lanfenglan, Shi Chengfang, et al. *Acta Petrolei Sinica*, 2006, 27(S1): 137-141.  
[9] 秦同洛, 李璁, 陈元千. 实用油藏工程方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 1989: 51-55.  
Qin Tongluo, Li Dang, Cheng Yuanqian. *Practical reservoir engineering method*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1989: 51-55.  
[10] 陈元千. 实用油气藏工程方法[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 1998: 340-345.  
Cheng Yuanqian. *Practical oil & gas reservoir engineering method*[M]. Dongying: China University Press, 1998: 340-345.  
[11] 张金庆, 孙福街. 相渗曲线和水驱曲线与水驱储量的关系[J]. 新疆石油地质, 2010, 12(6): 629-631.  
Zhang Jinqing, Sun Fujie. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2010, 12(6): 629-631.

(责任编辑 刘志远)

#### · 科学共同体介绍 ·

### 中国制冷学会

中国制冷学会 (Chinese Association of Refrigeration) 成立于 1977 年 4 月 25 日, 是全国制冷行业的非营利性学术法人社团, 是中国科学技术协会所属的全国一级学会之一。1978 年 1 月, 经国务院批准加入国际制冷学会 (IIR), 我国成为二级会员国。

中国制冷学会是中国制冷科技工作者和大专院校、科学研究及设计院所、公司、企事业单位等自愿组成。学会依法登记成立, 是跨部门、跨地区、跨行业的全

国性、学术技术性、专业性、公益性和非营利性的法人社会团体, 是中国科学技术协会的组成部分, 是发展我国制冷科技事业的重要社会力量。

中国制冷学会现有单位会员 473 家, 资深会员 84 人, 高级会员 708 余人, 重新登记普通会员 7691 余人, 学生会员 2176 人, 海外会员 3 人。学会下设低温专业委员会、制冷机械设备专业委员会等 6 个专业委员会。目前, 全国已有 25 个省、市、自治区先后成立了制冷学会, 共

发展普通会员二万五千人。

中国制冷学会自成立以来, 广泛开展国内、国际学术交流和科技咨询活动, 编辑出版《制冷学报》和《中国制冷简报》等读物, 制定、修订各种制冷技术、产品标准, 举办和组织参加国际性展览, 并承担了全国制冷标准化技术委员会的工作。

2012 年 4 月, 中国制冷学会第八次全国会员代表大会在北京召开, 选举田元兰任理事长, 金嘉瑞任秘书长。

(责任编辑 秦政)