

# 稠油蒸汽吞吐开发指标预测方法

赵启双<sup>\*</sup> 孙岩 郭福军

(辽河石油勘探局)

## 提 要

从年度部署和长远规划需要出发,以辽河稠油生产过程中积累的大量矿场资料为依据,运用系统工程理论、油藏工程方法及数理统计方法等对稠油油藏吞吐阶段的主要开发指标进行综合分析研究,总结出其变化规律,建立了动态预测模型,推导出预测方法。

**主题词** 稠油油藏 开发指标 数学模型 动态预测 变化规律

## 1 前 言

注蒸汽开发的稠油油藏有许多不同于稀油油藏的特点,例如岩石松散、许多油层物性参数取得颇困难,驱油过程中伴随着油层内部复杂的物理、化学变化,围岩中热能的耗散以及采集等复杂过程,这样就增加了油藏机理研究的难度。多年来,除数值模拟外,尚未有一套完整的预测稠油油藏蒸汽吞吐阶段开发指标的方法,特别是对于稠油油藏的年度部署、长远规划的产量宏观预测问题,一直没有解决。本文将投入开发的稠油油藏看作一个与外界不断进行物质、能量和信息交换的时变动态非线性系统,从系统的角度出发,打破稠油生产中的周期概念,以辽河油区实际生产中的注汽和采油等开发数据指标为依据,加上严密的数学理论,寻找出稠油油藏蒸汽吞吐阶段的开发指标的变化规律,并建立预测模型。

## 2 开发指标的变化规律及预测模型

### 2.1 开发指标的变化规律

#### 2.1.1 年油汽比的变化规律

以断块或油田为单元,对辽河油区所有投入开发的吞吐开采稠油油藏的年油汽比分别进行了分析研究。总结出任何一个开发单元的年油汽比变化可分为三个阶段:

**第一阶段——上升阶段:**描述了油藏投入开发过程中,油井大多数是处于吞吐开采的第一轮次,注蒸汽开采的作用除降粘驱油外,还要对地层起到解堵作用,故年油汽比不可能在投产初期即达到最高值,而是随热驱油过程的完成而迅速上升。

**第二阶段——下降阶段:**在全部吞吐开采油井均进入二、三轮次后,其年油汽比达到最高值,此时为蒸汽吞吐的鼎盛时期;而后随蒸汽吞吐轮次的增加,产量迅速减少,油汽比不断地递

\* 赵启双,1990年毕业于石油大学(函授)。现任辽河勘探开发研究院综合规划室副主任,高级工程师。通讯处:辽宁省盘锦市。邮政编码:124010。

减。

第三阶段——缓慢下降阶段:当油藏中的油井进入后期吞吐后,油气比效果明显较第二阶段变差,但产量递减亦变得较缓,因此年油气比表现出缓慢下降趋势。

图1是辽河油田S175、D66、D84、J25、D48、J7、J45、Q40、G23等9个开发单元的实际年油气比变化规律,图2是年油气比变化理论曲线。

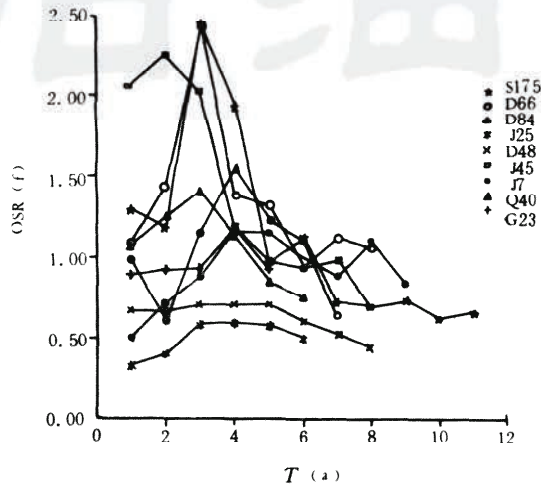


图1 辽河油区实际年油气比变化规律  
Fig.1 Variation regularity of practical yearly OSR in Liaohe oil-field

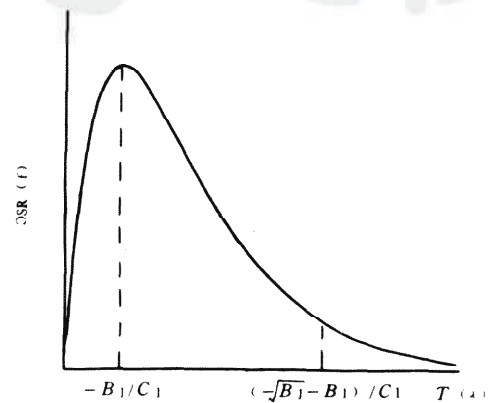


图2 辽河油区年油气比变化理论曲线  
Fig.2 Theoretical variation curve of yearly OSR in Liaohe oil-field

用年油气比的统计描述方法来描述年油气比的统计特征,用下述非线性数学表达式来描述这一变化规律<sup>[1]</sup>。

$$OSR_1 = A_1 k^{B_1} e^{C_1 k} \quad (B_1 \geq 0, C_1 < 0) \quad (1)$$

微分得

$$dOSR_1 = A_1 k^{B_1-1} e^{C_1 k} (C_1 k + B_1) dk \quad (2)$$

令(2)式等于零,从(2)式可知,只有

$$C_1 k + B_1 = 0$$

故有

$$k = -B_1/C_1 \quad (3)$$

将(1)式二阶微分得

$$d^2 OSR_1 = A_1 k^{B_1-2} e^{C_1 k} (C_1^2 k^2 + 2B_1 C_1 k + B_1^2 - B) dk \quad (4)$$

令(4)式等于零,亦只有

$$C_1^2 k^2 + 2B_1 C_1 k + B_1^2 - B = 0$$

则有

$$k = (\pm \sqrt{B_1 - B})/C_1 \quad (5)$$

众所周知,函数的一阶导数是描述函数的变化速度,即递增性或递减性,函数的二阶导数

是刻划函数变化的速率,即加速性或减速性。

$0 < k < (\sqrt{B_1} - B_1)/C_1$  是描述其上升阶段的速率,即缓慢上升阶段,根据稠油油藏年油汽比的变化规律分析,无此阶段,故将此值略去。

所以有以下结论:

— 般情况 ( $B_1 \neq 0$ ):

(1)  $0 < k < (-B_1/C_1)$  时, 上升阶段;

(2)  $-B_1/C_1 < k < (-\sqrt{B_1} - B_1)/C_1$  时, 下降阶段;

(3)  $(-\sqrt{B_1} - B_1)/C_1 < k < +\infty$  时, 缓慢下降阶段。

特例: 当  $B_1 = 0$  时, 则有

$$OSR_1 = A_1 e^{C_1 t} \tag{6}$$

年油汽比呈指数递减。

### 2.1.2 累积产油与累积注汽量的变化规律

蒸汽吞吐开采过程中,注蒸汽是保证稠油油田开发效果的关键,只有保证合理的注汽量,才能保证产量在后期的蒸汽吞吐生产过程中有最小的递减。统计辽河油区所有稠油开发单元的累积产油与累积注汽量的关系,将二者绘制在半对数坐标纸上,分阶段明显地呈现为直线关系(图 3)。为了描述这一关系的全部过程,采用下述非线性数学表达式描述

$$G_i = A_2 e^{B_2 N_p} + C_2 \tag{7}$$

### 2.1.3 回采水率的变化规律

吞吐开采过程中,回采水率大小与地质条件有关,对于无边底水的油藏,回采水率永远小于 100%,而对于具有边底水的油藏,回采水率上升较快,回采水率会超过 100%,当回采水率超过 100% 时表明此时已有地层水产出。回采水率的大小,对将来转汽驱生产时有较大的影响。根据已开发的稠油单元获得的历史数据分析拟合发现,累积产水与时间呈幂函数关系(图 4),即

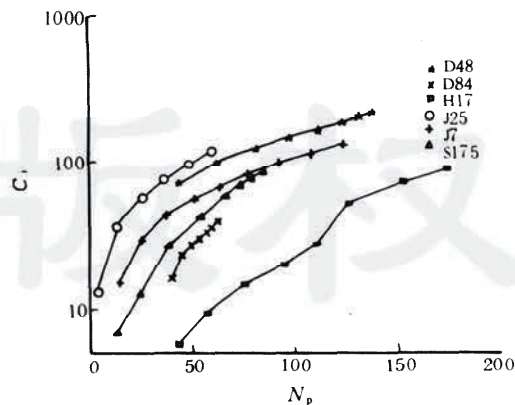


图 3 累积产油与累积注汽实际关系曲线  
Fig. 3 Actual curve of accumulative oil recovery and accumulative steam injection

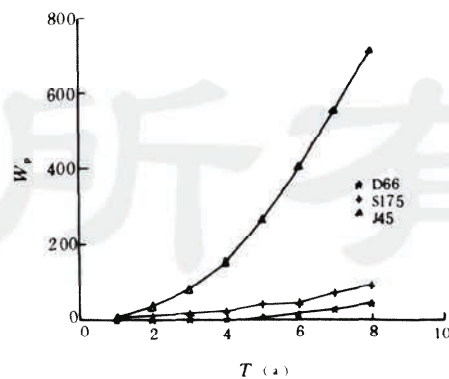


图 4 累积产水实际曲线  
Fig. 4 Actual curve of accumulative water recovery

$$W_p = A_3 k^{B_3} + C_3 \quad (8)$$

则回采水率为

$$W_h = (A_3 k^{B_3} + C_3) / G_i \quad (9)$$

## 2.2 开发指标的数学模型

系统理论认为,对于复杂的非线性系统,必须研究其复杂性和整体性,只有这样才能使系统设计得到正确的性能,才能使系统分析得到正确的结果。油田开发是一项复杂的技术过程,只有用油田的整体指标的非线性关系研究过去油田的地下状况、目前的生产状态和未来的开采趋势,才能全面地再现油田开发的全部动态过程。

基于上面的研究思路,根据稠油油藏吞吐生产过程中开发指标的变化规律的特点,建立如下的时变动态数学模型。

### (1) 年油气比的数学模型

$$\text{OSR}_1(k) = A_1 k^{B_1} e^{C_1 k} + V(k) \quad (10)$$

式中  $\text{OSR}_1(k)$  为第  $k$  年的年油气比;  $k$  为离散时间;  $A_1, B_1, C_1$  为待估时变参数;  $V(k)$  为白噪声。

### (2) 累积产油与累积注汽量的数学模型

$$G_i(k) = A_2 e^{B_2 N_p(k)} + C_2 + V(k) \quad (11)$$

式中  $G_i(k)$  为第  $k$  年的累积注汽量;  $N_p(k)$  为第  $k$  年的累积产油量;  $A_2, B_2, C_2$  为待估时变参数。

### (3) 回采水率的数学模型

$$W_h(k) = (A_3 k^{B_3} + C_3) / G_i(k) + V(k) \quad (12)$$

式中  $W_h(k)$  为第  $k$  年的回采水率;  $A_3, B_3, C_3$  为待估时变参数。

对于模型中的参数估计方法采用优化方法<sup>[2]</sup>、最小二乘法及推广的递推梯度方法<sup>[3]</sup>。根据所建立的预测模型推导出了分项开发指标预测方法。

## 2.3 开发指标的预测方法

$$(1) \text{ 第 } k \text{ 年年油气比} \quad \text{OSR}_1(k) = A_1(k) k^{B_1(k)} e^{C_1(k)k} \quad (13)$$

$$(2) \text{ 第 } k \text{ 年的累积产油} \\ N_p(k) = \text{OSR}_1(k) [A_2(k) e^{B_2(k)N_p(k)} + C_2(k) - A_2(k-1) e^{B_2(k-1)N_p(k-1)} - C_2(k-1)] + N_p(k-1) \quad (14)$$

$$(3) \text{ 第 } k \text{ 年的累积注汽量} \\ G_i(k) = A_2(k) e^{B_2(k)N_p(k)} + C_2(k) \quad (15)$$

$$(4) \text{ 第 } k \text{ 年的年产油} \\ Q_o(k) = \text{OSR}_1(k) [A_2(k) e^{B_2(k)N_p(k)} + C_2(k) - A_2(k-1) e^{B_2(k-1)N_p(k-1)} - C_2(k-1)] \quad (16)$$

$$(5) \text{ 第 } k \text{ 年的年注汽} \\ q_{is}(k) = Q_o(k) / \text{OSR}_1(k) \quad (17)$$

(6)第  $k$  年的年产水

$$Q_w(k) = A_3(k)k^{B_3(k)} + C_3(k) - W_p(k-1) \quad (18)$$

(7)第  $k$  年的年内平均含水

$$f_w(k) = Q_w(k)/[Q_o(k) + Q_w(k)] \quad (19)$$

(8)第  $k$  年的回采水率

$$W_h(k) = [A_3(k)k^{B_3(k)} + C_3(k)]/G_i(k) \quad (20)$$

(9)可采储量

对(14)式微分得瞬时油气比

$$OSR_2(k) = dN_p(k)/dG_i(k) = 1/[A_2(k)B_2(k)e^{B_2(k)N_p(k)}] \quad (21)$$

整理得

$$N_p(k) = \ln\{1/[A_2(k)B_2(k)OSR_2(k)]\}/B_2(k) \quad (22)$$

由(22)式可知,当瞬时油气比达到经济极限  $\lim OSR_2(k)$  时的累积产量便是经济可采储量,即可采储量  $N_R$

$$N_R = \ln\{1/[A_2(k)B_2(k)\lim OSR_2(k)]\}/B_2(k) \quad (23)$$

(10)第  $k$  年的采油速度

$$v(k) = Q_o(k)/N \quad (24)$$

(11)第  $k$  年的采出程度

$$R(k) = N_p(k)/N \quad (25)$$

(12)第  $k$  年的注采比

$$I(k) = q_{in}(k)/[Q_o(k) + Q_w(k)] \quad (26)$$

### 3 实例应用

D66 是辽河油区的一个稠油断块,主要含油层系杜家台油层,属砂泥岩互层层状油藏,储层类型以薄—中厚层状为主。油藏埋深 808.2~1298.4m,平均单层有效厚度 2.2m,地面脱气原油粘度一般(50℃)300~2000mPa·s,1986 年正式投入开发。

我们应用 1986 年至 1991 年 6 组数据建立模型,用 1992、1993 年两年的实际开发数据检验。通过对实际数据的拟合和误差检验,建立预测模型:

(1)年油气比预测模型

$$OSR(k) = 2.187409k^{0.8818082}e^{-0.3694039k}$$

(2)累积产油与累积注汽量预测模型

$$G_i(k) = 34.80575e^{0.01470911N_p(k)} - 35.6789$$

(3)回采水率预测模型

$$W_h(k) = (0.17881k^{3.997166} + 4.99119)/G_i(k)$$

预测拟合结果见表 1。

从拟合结果看,拟合的平均相对误差只有 1.01%,预测的平均相对误差为 1.44%,由此可见,我们建立的模型对该块未来预测是可信的。

表 1 D66 块拟合预测与实际对比表

Table 1 A comparison of practical and predicting values in D66 block

时间 (a)	年 油 汽 比			累 积 注 汽			回 采 水 率		
	实际值 (f)	预测值 (f)	相对误差 (%)	实际值 (10 <sup>4</sup> t)	预测值 (10 <sup>4</sup> t)	相对误差 (%)	实际值 (%)	预测值 (%)	相对误差 (%)
1986	1.435	1.429	0.42	8.501	8.449	0.61	8.737	8.781	0.50
1987	2.442	2.513	2.91	20.893	21.457	2.70	7.860	7.732	1.63
1988	1.382	1.401	1.37	45.587	46.628	2.28	8.642	8.443	2.30
1989	1.311	1.312	0.08	84.814	84.814	0.47	8.932	8.981	0.55
1990	0.947	0.955	0.84	146.88	145.95	0.64	10.934	10.964	0.27
1991	1.124	1.123	0.09	208.06	208.06	0.38	13.540	13.516	0.18
1992	0.931	0.917	1.50	267.19	270.31	1.17	17.149	17.642	2.87
1993	0.705	0.711	1.13	349.19	352.52	0.95	22.296	22.070	1.01

#### 4 结束语

多年来稠油油藏中开发指标预测主要以数值模拟方法为主。本文在统计辽河油区已开发稠油油藏吞吐阶段开发资料基础上,所总结出稠油油藏主要开发指标的变化规律,提出了一种极为现实而简捷的预测途径,对于中长期开发指标的预测,具有较大的实用参考价值。

#### 参 考 文 献

- [1] 数学手册. 北京:人民教育出版社,1979.  
 [2] 席少霖,赵风治. 最优化计算方法. 上海科技出版社,1983.  
 [3] 韩志刚. 非线性离散时间随机系统未知参数估计的一类递推算法. 黑龙江大学自然科学报,1981,(1).

(本文收到日期 1995-02-20)

(编辑 杨 茁)

### A METHOD OF FORECASTING HEAVY CRUDE RESERVOIR PERFORMANCE INDEXES DURING THE HUFF AND PUFF PROCESS

Zhao Qishuang Sun Yan Guo Fujun

(Liaohe Petroleum Exploration Bureau)

#### Abstract

In order to meet the requirements of annual planning and long term programming, the major indexes of heavy crude reservoir performance during the huff and puff process are comprehensively analyzed and studied on the basis of large amount of field data and by applications of system engineering theory, reservoir engineering method, as well as mathematical statistics method. Their variation regularities are summarized. The reservoir performance forecasting model is developed and a forecasting method is inferred.

**Key words** heavy crude reservoirs reservoir performance indexes mathematical model performance prediction variation regularities