

文章编号: 0253-2697(2017)01-0084-07 DOI:10. 7623/syxb201701009

考虑稠油非牛顿性质的蒸汽吞吐产能预测模型

杨 戡^{1,2} 李相方² 陈掌星^{2,3} 田 冀¹ 黄 亮² 刘新光¹

(1. 海洋石油高效开发国家重点实验室 北京 102200; 2. 中国石油大学石油工程学院 北京 102249;
3. 卡尔加里大学化学与石油工程学院 加拿大卡尔加里 T2N1N4)

摘要:与常规油不同,当达到某特定温度时,稠油呈现牛顿流体状态,而在该温度值以下时,稠油呈现非牛顿流体状态,即存在启动压力梯度。经典的解析模型将蒸汽吞吐分为热区与冷区 2 个部分,热区温度为蒸汽温度,冷区温度为原始地层温度。然而在实际过程中,热区到冷区的温度是一个非等温的渐变过程,不会存在热区与冷区的边界处的突变现象。而且在生产过程中,稠油在不同区域呈现牛顿流体与非牛顿流体 2 种状态,不同区域的稠油渗流方程不同。针对这种情况,基于 Marx-Langenheim 方程,对蒸汽吞吐的解析模型进行了改进。在注入阶段,考虑了热区非等温分布的特征;在生产阶段,考虑了稠油牛顿流体区与非牛顿流体区的渗流耦合。模型应用结果表明,该模型更加接近实际生产情况,有较好的应用价值。

关键词:蒸汽吞吐;非牛顿性质;启动压力梯度;产能预测;耦合渗流

中图分类号:TE357.4

文献标识码:A

A productivity prediction model for cyclic steam stimulation in consideration of non-Newtonian characteristics of heavy oil

Yang Jian^{1,2} Li Xiangfang² Chen Zhangxing^{2,3} Tian Ji¹ Huang Liang² Liu Xinguang¹

(1. State Key Laboratory of Offshore Oil Exploitation, Beijing 102200, China; 2. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 3. Institute of Chemical and Petroleum Engineering, University of Calgary, Calgary T2N1N4, Canada)

Abstract:Unlike conventional oil, heavy oil exhibits Newtonian fluid state when it reaches a specified temperature. Specifically, heavy oil shows non-Newtonian fluid state at a temperature below the specified value, i. e., a threshold pressure gradient occurs. In a classical analytical model, the reservoir for cyclic steam stimulation is divided into hot zone and cold zone; the temperature of hot zone is steam temperature while that of cold zone is initial formation temperature. However, in practice, temperature transition from hot zone to cold zone is a non-isothermal gradual change process, and no abrupt change will occur at the boundary between hot zone and cold zone. Moreover, during production, heavy oil presents two states in different zones, i. e., Newtonian fluid and non-Newtonian fluid; correspondingly, heavy oil flow equations are also different. In light of the two points above, the analytical model of cyclic steam stimulation was modified on the basis of Marx-Langenheim equations. Considerations included non-isothermal distribution characteristics of hot zone during injection stage and flow coupling of heavy oil in Newtonian fluid zone and non-Newtonian fluid zone during production stage. The results of the model application shows that this model is more close to actual production situation and has better applicability.

Key words:cyclic steam stimulation; non-Newtonian characteristics; threshold pressure gradient; productivity prediction; coupled flow

引用:杨戡,李相方,陈掌星,田冀,黄亮,刘新光.考虑稠油非牛顿性质的蒸汽吞吐产能预测模型[J].石油学报,2017,38(1):84-90.

Cite:YANG Jian,LI Xiangfang,CHEN Zhangxing,TIAN Ji,HUANG Liang,LIU Xinguang. A productivity prediction model for cyclic steam stimulation in consideration of non-Newtonian characteristics of heavy oil[J]. Acta Petrolei Sinica,2017,38(1):84-90.

蒸汽吞吐广泛应用于陆地及海上稠油热采^[1-8]。首先蒸汽能够显著降低稠油的黏度^[9-10];其次,蒸汽吞吐操作简单,安全性高^[11],而且蒸汽吞吐能够有效促进井间热连通,从而成为蒸汽驱等后续开发方式的先

导方式^[12-13]。

许多学者提出了关于蒸汽吞吐的解析模型。Marx-Langenheim^[14]最先提出了预测注蒸汽过程中地层加热及顶底盖层热损失的模型,该模型可以求出热区

基金项目:海洋石油高效开发国家重点实验室开放基金项目(2015-YXKJ-001)资助。

第一作者:杨 戡,男,1989 年 3 月生,2011 年获中国石油大学(华东)石油工程专业学士学位,现为中国石油大学(北京)油气田开发工程专业博士研究生,主要从事油藏工程及渗流理论的研究。Email:yangjian315@126.com

通信作者:李相方,男,1955 年 5 月生,1982 年获石油大学(华东)学士学位,1992 年获石油大学(北京)博士学位,现为中国石油大学(北京)石油工程学院教授、博士生导师,主要从事非常规油气渗流及开发的研究工作。Email:lixf2013@vip. 163.com

的体积。William^[15]假设该热区为圆柱形,因此得到了蒸汽吞吐的加热半径。Mandl-Volek 模型^[16]基于 Marx-Langenheim 模型提出了临界时间的概念,有效提高了模型的精确性。现有模型^[14-17]均对预测蒸汽吞吐的产能有重要意义。但是以上模型假设地层被分为冷区和热区。热区的温度是蒸汽温度 T_s ,冷区的温度为原始地层温度 T_r 。由于地层温度的降低是一个渐变过程,并不是一个突变过程,因此该假设具有一定的局限性。为了改善该模型的局限性,李春兰等^[18-19]、郑舰等^[20]分别假设热区内的温度为线性下降与指数下降,对热区的温度进行了重新定义,但是未考虑蒸汽的干度及潜热问题;何聪鸽等^[21]所建立的模型考虑了蒸汽的干度及潜热,但是没有考虑稠油在低温下的非牛顿特性,因此上述模型与实际情况均有偏差,使得计算不够准确。根据上述情况,笔者考虑蒸汽的干度及潜热,对蒸汽吞吐过程中地层的加热情况进行深入描述;并且考虑稠油的非牛顿特性,对稠油的牛顿流体区及非牛顿流体区的渗流特征进行了耦合,建立了产能模型。

1 数学模型

1.1 模型假设

由于蒸汽具有潜热,因此热区的温度在一定区域内保持饱和蒸汽温度 T_s ,然后向外扩展逐渐降低至原始地层温度 T_r 。为了简化模型,并使模型更加合理,对该模型作如下假设:

(1) 在注汽阶段,该模型分为潜热区、显热区及未加热区。在潜热区中,地层温度为饱和蒸汽温度 T_s ;在显热区中,地层温度随半径的增加而线性下降,从 T_s 线性降低至原始地层温度 T_r ^[18,21];在未加热区中,地层温度为原始地层温度。每一个区域均为圆柱形。

(2) 在焖井及生产阶段,该模型分为牛顿流体区与非牛顿流体区。在牛顿流体区,渗流遵循达西定律;在非牛顿流体区,基于之前学者的研究,稠油渗流存在启动压力梯度,满足宾汉流体的渗流规律^[22-27]。

(3) 在生产阶段,注入的蒸汽将转变为热水,而热水分布于牛顿流体区内。在非牛顿流体区,含水饱和度为地层的初始含水饱和度。由上述假设可以看出,牛顿流体区为两相流,非牛顿流体区为单相流。

(4) 每个周期的注入参数与生产参数均相同。

1.2 注蒸汽周期

在注蒸汽周期,蒸汽加热区域被划分为 3 个不同的区域,分别为潜热区、显热区及未加热区。区域划分情况如图 1 所示。

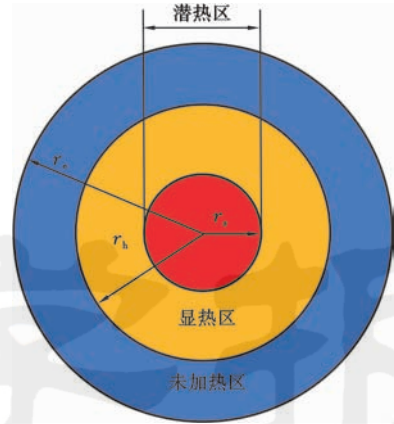


图 1 潜热区、显热区及未加热区的分布
Fig. 1 Distribution of latent heat zone, sensible heat zone and unheated zone

1.2.1 潜热区半径

潜热区内温度恒定,为蒸汽温度 T_s 。由 Marx-Langenheim 公式可以得到能量守恒方程:

$$i_s x h_s = 2 \int_0^t \frac{\lambda_s (T_s - T_r)}{\sqrt{\pi \alpha_s}} \cdot \frac{dA}{d\delta} + M_r h (T_s - T_r) \frac{dA}{dt} \quad (1)$$

由 Laplace 变换,得到潜热区面积:

$$A(t)_s = \frac{i_s x h_s M_r h \alpha_s}{4 \lambda_s^2 (T_s - T_r)} \cdot \left[e^{t_D} \operatorname{erfc}(\sqrt{t_D}) + 2 \sqrt{\frac{t_D}{\pi}} - 1 \right] \quad (2)$$

其中, $t_D = \frac{4 \lambda_s^2}{M_r^2 h^2 \alpha_s} t_{inj}$ 。

因此潜热区的半径为:

$$r_s = \sqrt{\frac{i_s x h_s M_r h \alpha_s}{4 \lambda_s^2 \pi (T_s - T_r)}} \cdot \left[e^{t_D} \operatorname{erfc}(\sqrt{t_D}) + 2 \sqrt{\frac{t_D}{\pi}} - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

1.2.2 显热区半径

由于假设显热区的温度随半径的扩展线性下降,因此温度分布为:

$$T(r) = \frac{T_s - T_r}{r_s - r_h} r + \frac{T_r r_s - T_s r_h}{r_s - r_h} \quad (4)$$

因此该区域的能量守恒方程为:

$$i_s C_w (T_s - T_r) = 2 \int_0^t \frac{\lambda_s [T(r) - T_r]}{\sqrt{\pi \alpha_s (t - \delta)}} \cdot \frac{dA}{d\delta} + M_r h [T(r) - T_r] \frac{dA}{dt} \quad (5)$$

同样利用 Laplace 变换,由式(5)可以得到显热区的半径:

$$r_h = \frac{1}{2} \left\{ -r_s + \left\{ r_s^2 + 4 \left[2r_s^2 + \frac{3C}{\pi(T_s - T_r)} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (6)$$

式(6)中 C 的表达式为:

$$C = \frac{1}{4\lambda_s^2} [i_s C_w (T_s - T_r) M_r h \alpha_s] \cdot [\exp(\sqrt{t_D}) \operatorname{erfc}(\sqrt{t_D}) + 2\sqrt{t_D/\pi} - 1] \quad (7)$$

1.2.3 地层压力

当地层中注入热流体时,由于地层中流体体积的增加及地层的热膨胀,地层中的压力会增加。因此注入蒸汽后,地层中的压力为:

$$p_{e1} = p_e + \frac{G_i B_w}{1000 N B_o C_e} + \frac{N_{oh} (T_{navg} - T_r) \beta_e}{1000 N C_e} \quad (8)$$

1.3 焖井及生产阶段

1.3.1 焖井阶段

由假设可知,该阶段地层被分为2个区域,牛顿流体区与非牛顿流体区,如图2所示。

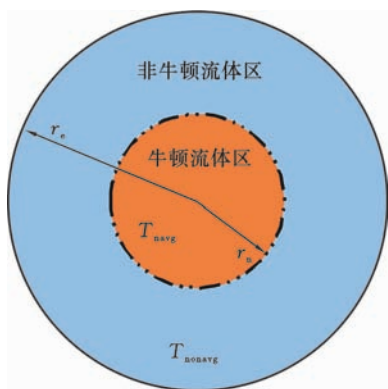


图2 牛顿流体区与非牛顿流体区分布

Fig. 2 Distribution of Newtonian fluid zone and non-Newtonian fluid zone

(1) 牛顿流体区与非牛顿流体区的边界

根据热区温度线性分布的假设,可以得到油藏中牛顿流体区的半径:

$$r_n = r_h - \frac{(r_h - r_s)(T_{navg} - T_r)}{T_s - T_r} \quad (9)$$

(2) 牛顿流体区与非牛顿流体区的平均温度

由图2所示,利用加权平均值得到牛顿流体区的平均温度。根据上述假设,牛顿流体区的平均温度为:

$$T_{navg} = [T_s r_s^2 + \frac{2}{3} \frac{T_s - T_r}{r_s - r_h} (r_n^3 - r_s^3) + \frac{T_r r_s - T_s r_h}{r_s - r_h} (r_n^2 - r_s^2)] / r_n^2 \quad (10)$$

同理,非牛顿流体区的平均温度为:

$$T_{nonavg} = \frac{\frac{2}{3} \frac{T_s - T_r}{r_s - r_h} (r_h^3 - r_n^3)}{r_e^2 - r_n^2} + \frac{\frac{T_r r_s - T_s r_h}{r_s - r_h} (r_h^2 - r_n^2)}{r_e^2 - r_n^2} + \frac{T_r (r_e^2 - r_h^2)}{r_e^2 - r_n^2} \quad (11)$$

(3) 牛顿流体区内相对渗透率

根据所作的假设,注入蒸汽冷凝为热水,分布于牛顿流体区内。在注入蒸汽后,牛顿流体区内的含水饱和度为:

$$S_{w1} = S_w + \frac{24 i_s t_{inj}}{1000 \phi \pi r_n^2 h} \quad (12)$$

因此牛顿流体区内的含油饱和度为:

$$S_{o1} = 1 - S_{w1} \quad (13)$$

结合区块的油-水相渗曲线,可得到在式(12)及式(13)条件下的油、水相对渗透率。

1.3.2 生产阶段

(1) 产能公式

在牛顿流体区域利用达西公式计算产量,因此渗流方程为:

$$v_{no} = \frac{KK_{ro}}{\mu_{oh}} \cdot \frac{dp}{dr} \quad (14)$$

$$v_w = \frac{KK_{rw}}{\mu_w} \cdot \frac{dp}{dr} \quad (15)$$

则牛顿流体区内流体的渗流速度为:

$$v = v_{no} + v_w = \left(\frac{KK_{ro}}{\mu_{oh}} + \frac{KK_{rw}}{\mu_w} \right) \cdot \frac{dp}{dr} \quad (16)$$

通过达西定律,能够得到:

$$\frac{Q_w + Q_o}{2\pi rh} = \left(\frac{KK_{ro}}{\mu_{oh}} + \frac{KK_{rw}}{\mu_w} \right) \cdot \frac{dp}{dr} \quad (17)$$

对式(17)积分,能够得到牛顿流体边界处的压力:

$$p_n = \frac{Q_w + Q_o}{2\pi rh \left(\frac{KK_{ro}}{\mu_{oh}} + \frac{KK_{rw}}{\mu_w} \right)} \cdot \ln(r_n/r_w) + p_{wf} \quad (18)$$

由于非牛顿流体区域内为单相原油渗流,而该区域内的水为束缚水,因此由非牛顿流体区的渗流方程可以得出边界处的压力为:

$$p_n = p_e - \left[\frac{\mu_{oc} Q_{non}}{2\pi Kh} \ln(r_e/r_n) + \lambda(r_e - r_n) \right] \quad (19)$$

由边界处的流动连续性可得:

$$Q_{non} = Q_w + Q_o \quad (20)$$

联立式(18)、式(19),得到水、油的产能方程:

$$Q_w = (2\pi KK_{rw} h / \mu_w) \cdot \frac{p_e - p_{wf} - \lambda(r_e - r_n)}{\ln(r_n/r_w) + \left(\frac{K_{ro}}{\mu_{oh}} + \frac{K_{rw}}{\mu_w} \right) \mu_{oc} \ln(r_e/r_n)} \quad (21)$$

$$Q_o = (2\pi KK_{ro} h / \mu_{oh}) \cdot \frac{p_e - p_{wf} - \lambda(r_e - r_n)}{\ln(r_n/r_w) + \left(\frac{K_{ro}}{\mu_{oh}} + \frac{K_{rw}}{\mu_w} \right) \mu_{oc} \ln(r_e/r_n)} \quad (22)$$

(2) 地层压力

当地层的原油及水被采出后,地层压力为:

$$p_{e1}' = p_e' - \frac{Q_w B_w + Q_o B_o}{1\,000 N B_o C_e} - \frac{N_{oh}(T_{navg} - T_r)\beta_e}{1\,000 N C_e}$$

(23)

(3) 饱和度
当水从地层中产出,牛顿流体区内的含水饱和度为:

$$S_{w2} = S_{w1} - \frac{Q_w}{\phi \pi r_n^2 h}$$

(24)

含油饱和度为:
$$S_{o2} = 1 - S_{w2}$$

(25)

(4) 各区域的平均温度

由于在生产过程中,热流体的产出及顶底盖层热损失均会降低热区的平均温度。在生产过程中,牛顿流体区的温度降低,半径会减小。由 Boberg-Lantz 模型可以得到,牛顿流体区的平均温度为:

$$T_{navg(n)} = T_r + [T_{navg(n-1)} - T_r] \cdot [T_{rD1} \cdot T_{zD}(1 - \xi_1) - \xi_1]$$

(26)

由于在生产过程中,热量会持续散失。在这个过程中,牛顿流体区域不断缩小,牛顿流体区域的温度不断降低。由能量守恒方程可以得到:

$$M_r [T_{navg(n)} - T_{navg(n-1)}] \pi r_{n(n)}^2 h = M_r [T'_{navg(n)} - T_{navg(n-1)}] \pi r_{n(n)}^2 h$$

(27)

其中, $T'_{navg(n)}$ 为考虑生产过程中牛顿流体区体积变化后的牛顿流体区平均温度,其表达式为:

$$T'_{navg(n)} = T_{navg(n-1)} + [T_{navg(n)} - T_{navg(n-1)}] \cdot \frac{r_{n(n-1)}^2}{r_{n(n)}^2}$$

(28)

其中, $r_{n(n)}$ 为第 n 个时间步条件下的牛顿流体区的半径。由温度的线性分布,得到 $r_{n(n)}$ 的表达式为:

$$r_{n(n)} = \frac{T_{navg(n)}}{T_{navg(n-1)}} \cdot r_{n(n-1)}$$

(29)

由式(28)可以看出, $T_{navg(n-1)} < T'_{navg(n)} < T_{navg(n)}$, 即当考虑了牛顿流体区半径的减小这一过程后,所得到的第 n 个时间步下牛顿流体区新的平均温度 $T'_{navg(n)}$ 低于第 $n-1$ 个时间步下牛顿流体区的平均温度 $T_{navg(n-1)}$,但是略高于未考虑牛顿流体区半径减小过程中的平均温度 $T_{navg(n)}$ 。

与牛顿流体区的平均温度推导相似,非牛顿流体区的平均温度为:

$$T_{nonavg(n)} = T_r + [T_{nonavg(n-1)} - T_r] \cdot [T_{rD2} \cdot T_{zD}(1 - \xi_2) - \xi_2]$$

(30)

(5) 生产后的地层余热

进行下一轮蒸汽吞吐周期之前,地层中会有上一轮蒸汽吞吐后的余热。对于多轮次蒸汽吞吐的模型,预测下一个周期的生产需要加上前一个周期的余热。因此蒸汽吞吐的余热公式为:

$$Q_{r(n-1)} = M_r \pi r_{n(n-1)}^2 h [T_{navg(n-1)} - T_r] + M_r \pi [r_{h(n-1)}^2 - r_{n(n-1)}^2] h [T_{nonavg(n-1)} - T_r]$$

(31)

2 求解方法及算法流程

模型求解步骤为:

- ①给模型赋初值,输入地层参数、注入蒸汽参数、注入周期数 N_3 、每周期生产天数 N_4 及原油的物性参数。
- ②利用式(3)及式(6)计算注蒸汽第 1 周期第 1 天生产的潜热半径、显热半径,利用式(8)一式(13)计算地层压力及牛顿流体区的参数。
- ③利用式(21)及式(22)计算产量,利用式(23)一式(25)计算生产后牛顿区的参数,利用式(28)及式(30)计算牛顿流体区及非牛顿流体区的平均温度。
- ④判断生产天数是否小于初始值 N_4 ,如果是,重复步骤①—③,直至生产天数满足等于 N_4 为止。
- ⑤利用式(31)计算地层余热,然后重复步骤①—④,计算以后每个周期的生产特征,直到周期数为 N_3 为止。

3 实例验证

3.1 不考虑非牛顿特性模型

由于该模型中的 λ 代表启动压力梯度,即非牛顿流体的渗流特征。而现阶段常用的数值模拟软件 CMG 中将稠油考虑为牛顿流体,因此在验证模型与数值模拟软件的吻合性时,令模型中的 $\lambda = 0$,从而验证该模型的正确性。模型及数值模拟的参数如表 1 所示,其注采参数及生产时间如表 2 所示。

当忽略启动压力梯度的因素时,模型与 CMG 数值模拟计算的压力、产油速率及累积产油量的对比见图 3—图 5。

通过上述验证,可以得到当所提出的模型中忽略启动压力梯度 λ 时,其计算结果与 CMG 结果接近,因此在牛顿流体范畴,所建立的模型合理。

表 1 模型及数值模拟参数

Table 1 Parameters of analytical model and numerical simulation

地层及流体参数	数 值
油藏渗透率 /mD	2 100
孔隙度	0. 315
初始地层含水饱和度	0. 25
井径 /m	0. 1
水的密度/(kg•m ⁻³)	1 000
原油密度/(kg•m ⁻³)	970
驱替半径 /m	100
初始地层压力/MPa	8. 5

表 2 蒸汽吞吐注采参数

Table 2 Injection and production parameters of cyclic steam stimulation

参 数	第 1 周期	第 2 周期	第 3 周期
蒸汽注入速率/(m ³ ·d ⁻¹)	150	150	150
注入时间/d	10	10	10
焖井时间/d	5	5	5
蒸汽干度	0.6	0.6	0.6
生产时间/d	270	270	270

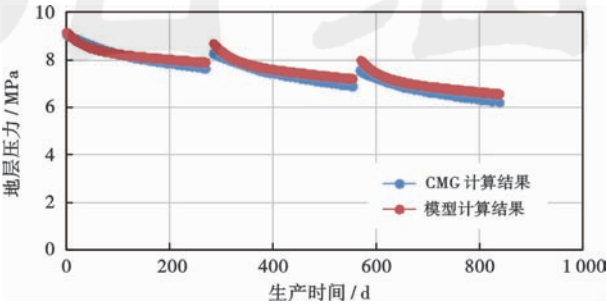


图 3 地层压力两种方法计算结果对比

Fig. 3 Comparison of reservoir pressure calculated by two methods

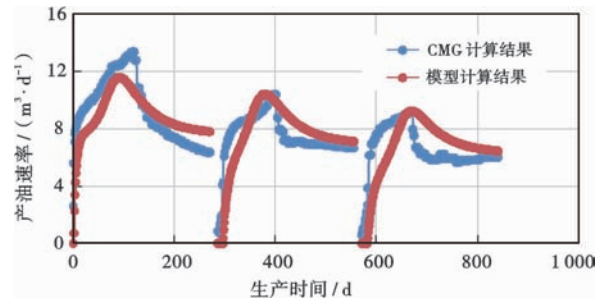


图 4 产油速率两种方法计算结果对比

Fig. 4 Comparison of oil production rate calculated by two methods

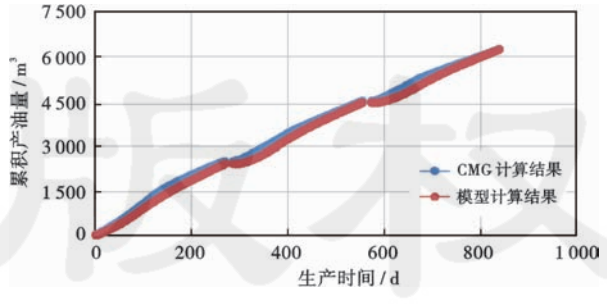


图 5 累积产油量两种方法计算结果对比

Fig. 5 Comparison of cumulative oil production calculated by two methods

3.2 考虑非牛顿特性模型

由于启动压力梯度存在于稠油的渗流过程中,当启动压力梯度较为明显时,该作用对注采参数的影响不能

忽略。以辽河油田 M 区块为例,对该模型进行验证。

辽河油田 M 区块为稠油区块,其地质参数、注采参数如表 3 所示,在数值模拟及解析模型计算中采用现场实际地质参数。

表 3 现场地质及注采参数

Table 3 Geological and injection-production parameters of the field

参 数	取值
平均渗透率/mD	2 100
平均孔隙度	0.315
初始油藏温度/℃	40
平均油藏厚度/m	10
蒸汽干度	0.6
蒸汽温度/℃	245
蒸汽注入体积/m ³	2 500
原油密度/(kg·m ⁻³)	970
井距/m	100
井径/m	0.1

研究表明,普通稠油的启动压力梯度一般小于 0.01 MPa/m^[28-29]。结合文献中启动压力梯度的实验数据^[30-32],稠油的启动压力梯度定为 0.005 MPa/m。表 4 为本文模型平均产油速率计算结果与 CMG-STARS 模块计算结果及现场生产结果的对比。

表 4 现场区块、数值模拟及解析模型的平均产油速率计算结果对比

Table 4 Comparison of oil production rate of field data, numerical simulation and analytical model

周 期	平均产油速率/(m ³ ·d ⁻¹)		
	CMG-STARS 模块计算结果	本文模型 计算结果	现场 生产结果
第 1 周期	11.85	9.31	9.5
第 2 周期	8.93	7.95	7.7
第 3 周期	7.72	6.55	6.3

由表 4 可以看出,CMG-STARS 模块计算的结果均高于现场实际的生产结果,而本文的解析模型所计算的结果与现场结果相差不大。可以证明,该稠油在渗流的过程中,启动压力梯度实际存在。由于 CMG-STARS 模块没有考虑启动压力梯度的影响,因此其结果与实际结果存在一定的误差。

4 结 论

(1) 建立了一个考虑稠油非牛顿渗流性质的模型。该模型分为注汽与生产 2 个过程进行考虑。在注汽周期,模型被分为潜热区、显热区及未加热区;在生产周期,模型被分为非牛顿流体区与牛顿流体区。在该模型中,非牛顿流体区考虑了启动压力梯度对产能的影响,推导了蒸汽吞吐加热过程及考虑启动压力梯

度的生产预测模型。

(2) 通过对该模型的验证可知,当模型忽略启动压力梯度的影响时,模型计算结果与 CMG-STARs 模块的计算结果接近,证明当稠油被考虑为牛顿流体时,该模型是适用的。当模型考虑启动压力梯度的影响时,该模型的计算结果比 CMG-STARs 的计算结果更接近现场实际,因此当稠油在低温条件下被考虑为非牛顿流体时,该模型是适用的,可以用来预测实际油田的生产过程。

符号注释: i_s —蒸汽的注入速率, kg/h; x —蒸汽干度; h_s —饱和蒸汽焓, kJ/kg; h —油藏的厚度, m; α_s —顶底盖层热扩散系数, m^2/h ; λ_s —岩石导热系数, $\text{kJ}/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$; t_{inj} —注蒸汽时间, d; M_r —地层岩石的热容, $\text{kJ}/(\text{m}^3\cdot^\circ\text{C})$; T_r —原始地层温度, $^\circ\text{C}$; T_s —饱和蒸汽温度, $^\circ\text{C}$; δ —加热面积扩展前缘对应的时间, s; r_s —潜热区半径, m; r_h —显热区半径, m; r_e —蒸汽吞吐的泄油半径, m; C_w —水的热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$; p_e —注入蒸汽之前的地层压力, MPa; N —地层中流体的储量, m^3 ; G_i —注入地层中蒸汽体积, m^3 ; B_w —水的体积系数; B_o —原油的体积系数; C_e —综合压缩系数, MPa^{-1} ; β_e —综合热膨胀系数, $1/^\circ\text{C}$; N_{oh} —热区的原油储量, m^3 ; T_{navg} —牛顿流体区的平均温度, $^\circ\text{C}$; T_{nonavg} —非牛顿流体区的平均温度, $^\circ\text{C}$; r_n —牛顿流体区的半径, m; S_{w1} —注蒸汽之前牛顿流体区内的含水饱和度; S_{w1} —注蒸汽之后牛顿流体区内的含水饱和度; ϕ —油藏地层孔隙度; K —地层的渗透率, mD; K_{ro} —油相相对渗透率; K_{rw} —水相相对渗透率; μ_{oh} —牛顿流体区原油平均黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; μ_{oc} —非牛顿流体区原油平均黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; μ_w —水的黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; p_{wf} —井底流压, MPa; p_n —牛顿流体区与非牛顿流体区交界处的压力, MPa; λ —稠油在非牛顿流体状态下的启动压力梯度, MPa/m ; Q_w 、 Q_o —分别为产水量、产油量, m^3/d ; Q_{non} —非牛顿区产油量, m^3/d ; p'_e —生产之前的地层压力, MPa; p'_{e1} —生产之后的地层压力, MPa; S_{w2} —开始生产后牛顿流体区内的含水饱和度; S_{o2} —开始生产后牛顿流体区内的含油饱和度; T_{rd1} 、 T_{rd2} —分别为牛顿区和非牛顿区径向热损失导致温度下降的百分数; ξ_1 —牛顿流体区带出热量的修正系数; $T_{\text{navg}(n)}$ —第 n 个时间步内牛顿流体区的平均温度, $^\circ\text{C}$; $T'_{\text{navg}(n)}$ —考虑生产过程中牛顿流体区体积变化后的牛顿流体区平均温度, $^\circ\text{C}$; $Q_{r(n-1)}$ —第 $n-1$ 个周期后地层余热, J; $T_{\text{nonavg}(n)}$ —第 n 个时间步下非牛顿流体区的平均温度, $^\circ\text{C}$; $r_{h(n-1)}$ 、 $r_{n(n-1)}$ —分别为第 $n-1$ 个时间步内显热区及牛顿流体区的半径, m; ξ_2 —非牛顿流体区带出热量的修正系数; $A(t)_s$ —潜热区面积, m^2 ; r —加热半径, m;

p_{e1} —注入蒸汽后地层压力, MPa; S_{o1} —牛顿流体区的含油饱和度; v —牛顿流体区的流体渗流速度, m/s ; v_{no} —非牛顿流体区的油相渗流速度, m/s ; v_w —水相渗流速度, m/s ; T_{d1} —垂向热损失导致温度下降的百分数; N_3 —注入周期数; N_4 —每周期生产天数, d。

参 考 文 献

- [1] FAROUQ Ali S M, JONES J A, MELDAU R F. Practical heavy oil recovery[M]. Calgary: University of Calgary Press, 1997.
- [2] BOBERG T C. Thermal methods of oil recovery[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1988.
- [3] XU Wenjiang, CHEN Zhangxing, SHAN Jincheng, et al. Studies and pilot project on steam stimulation with multiple fluids for offshore heavy oil reservoirs[R]. SPE 165383, 2013.
- [4] 杜殿发, 姚军, 刘立支. 边水稠油油藏水驱后蒸汽吞吐方案设计[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2000, 24(2): 44-46.
DU Dianfa, YAO Jun, LIU Lizhi. Program of steam soak for heavy oil reservoir after water flooding[J]. Journal of the University of Petroleum, China, Edition of Natural Science, 2000, 24(2): 44-46.
- [5] 陈月明. 注蒸汽热力采油[M]. 东营: 石油大学出版社, 2006: 86-125.
CHEN Yueming. Thermal recovery method by steam injection[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2006: 86-125.
- [6] 吴正彬, 庞占喜, 刘慧卿, 等. 稠油油藏高温凝胶改善蒸汽驱开发效果可视化实验[J]. 石油学报, 2015, 36(11): 1421-1426.
WU Zhengbin, PANG Zhanxi, LIU Huiqing, et al. A visible experiment on adoption of high-temperature gel for improving the development effect of steam flooding in heavy oil reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(11): 1421-1426.
- [7] 江航, 许强辉, 马德胜, 等. 注空气开采过程中稠油结焦量影响因素[J]. 石油学报, 2016, 37(8): 1030-1036.
JIANG Hang, XU Qianghui, MA Desheng, et al. Influence factors of coking amount during recovery of heavy oil by air injection[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(8): 1030-1036.
- [8] 李萍, 刘志龙, 邹剑, 等. 渤海旅大 27-2 油田蒸汽吞吐先导试验注采工程[J]. 石油学报, 2016, 37(2): 242-247.
LI Ping, LIU Zhilong, ZOU Jian, et al. Injection and production project of pilot test on steam huff-puff in oilfield LD27-2, Bohai Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(2): 242-247.
- [9] 曹嫣妮, 刘冬青, 王善堂, 等. 中深层稠油油藏化学辅助蒸汽驱三维物理模拟与应用[J]. 石油学报, 2014, 35(4): 739-744.
CAO Yanbin, LIU Dongqing, WANG Shantang, et al. Three-dimensional physical simulation and application of chemistry assistant steam flooding on middle and deep heavy oil reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(4): 739-744.
- [10] HOU Jian, ZHOU Kang, ZHAO Hui, et al. Hybrid optimization technique for cyclic steam stimulation by horizontal wells in heavy oil reservoir[J]. Computers and Chemical Engineering, 2016, 84: 363-370.
- [11] ZHANG Chao, LI Zhaomin, WANG Houyu, et al. Performance of flue gas and foam assisted steam huff and puff with horizontal

- well in enhanced recovery of Fengcheng oil field [R]. SPE 170105, 2014.
- [12] AN Jiuquan, JI Li, HUA Jiang. Steam-flood trial and research on mid-deep heavy oil reservoir Qi40 Block in Liaohe oilfield [R]. SPE 104403, 2006.
- [13] 张兆祥, 刘慧卿, 杨阳, 等. 稠油油藏蒸汽驱评价新方法[J]. 石油学报, 2014, 35(4): 733-738.
- ZHANG Zhaoxiang, LIU Huiqing, YANG Yang, et al. A new evaluation method of steam flooding for heavy oil reservoirs [J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(4): 733-738.
- [14] MARX J W, LANGENHEIM R H. Reservoir heating by hot fluid injection [R]. SPE 1266, 1959.
- [15] WILLMAN B T, VALLEROY V V, RUNBERG G W, et al. Laboratory studies of oil recovery by steam injection [J]. Journal of Petroleum Technology, 1961, 13(7): 681-690.
- [16] MANDL G, VOLEK C W. Heat and mass transport in steam-drive processes [J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1969, 9(1): 59-79.
- [17] DOU Hong'en, CHANG Yuwen, YU Jun, et al. A new mathematics model and theory for heavy-oil reservoir heating by huff 'n' puff [R]. SPE 106234, 2007.
- [18] 李春兰, 杨炳秀. 稠油蒸汽吞吐开采非等温渗流产量预测模型 [J]. 石油钻采工艺, 2003, 25(5): 89-90.
- LI Chunlan, YANG Bingxiu. Production model for cyclic steam stimulation in heavy oil reservoir considering non-isothermal flow [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2003, 25(5): 89-90.
- [19] 李春兰, 程林松. 稠油蒸汽吞吐加热半径动态计算方法 [J]. 新疆石油地质, 1998, 19(3): 247-249.
- LI Chunlan, CHENG Linsong. A model for calculation heating radius in steam stimulation of viscous reservoir [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1998, 19(3): 247-249.
- [20] 郑舰, 陈更新, 刘鹏程. 一种新型蒸汽吞吐产能预测解析模型 [J]. 石油天然气学报, 2011, 33(5): 111-114.
- ZHENG Jian, CHEN Gengxin, LIU Pengcheng. A new analytical model for productivity prediction in steam soak [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2011, 33(5): 111-114.
- [21] 何聪鸽, 穆龙新, 许安著, 等. 稠油油藏蒸汽吞吐加热半径及产能预测新模型 [J]. 石油学报, 2015, 36(12): 1564-1570.
- HE Congge, MU Longxin, XU Anzhu, et al. A new model of steam soaking heating radius and productivity prediction for heavy oil reservoirs [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(12): 1564-1570.
- [22] WU Yushu. Theoretical studies of non-Newtonian and Newtonian fluid flow through porous media [D]. Berkeley, California: University of California, 1990.
- [23] WANG Shaojun, HUANG Yanzhang, CIVAN F. Experimental and theoretical investigation of the Zaoyuan field heavy oil flow through porous media [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2006, 50(2): 83-101.
- [24] PRADA A, CIVAN F. Modification of Darcy's law for the threshold pressure gradient [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 1999, 22(4): 237-240.
- [25] DONG Xiaohu, LIU Huiqing, WANG Qing, et al. Non-Newtonian flow characterization of heavy crude oil in porous media [J]. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 2013, 3(1): 43-53.
- [26] LIU H, WANG J, XIE Y, et al. Flow characteristics of heavy oil through porous media [J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2011, 34(4): 347-359.
- [27] SOCHI T. Pore-scale modeling of Non-Newtonian flow in porous media [D]. London: Imperial College London, 2007.
- [28] 许家峰. 考虑启动压力梯度普通稠油渗流规律研究 [D]. 北京: 中国石油大学, 2007.
- XU Jiafeng. The seepage law of ordinary heavy oil considering of TPG [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2007.
- [29] 许家峰, 程林松, 李春兰, 等. 普通稠油油藏启动压力梯度求解方法与应用 [J]. 特种油气藏, 2006, 13(4): 53-57.
- XU Jiafeng, CHENG Linsong, LI Chunlan, et al. Starting pressure gradient calculation and its application in conventional heavy oil reservoir [J]. Special Oil and Gas Reservoir, 2006, 13(4): 53-57.
- [30] 蒋明, 许震芳, 齐 40 块稠油流变特性实验研究 [J]. 断块油气田, 1997, 4(6): 19-22.
- JIANG Ming, XU Zhenfang. Experimental study on rheologic properties of heavy oil for Block Qi-40 [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 1997, 4(6): 19-22.
- [31] 张金亮, 王为民, 申龙涉, 等. 辽河油田超稠油流变特性的试验研究 [J]. 油气田地面工程, 2006, 25(7): 11.
- ZHANG Jinliang, WANG Weimin, SHEN Longshe, et al. Experimental study on rheologic properties of heavy oil in Liaohe oil field [J]. Oil-Gasfield Surface Engineering, 2006, 25(7): 11.
- [32] 张凯, 李阳, 王琳娜, 等. 稠油流变特性实验研究 [J]. 油气地质与采收率, 2007, 14(5): 91-94.
- ZHANG Kai, LI Yang, WANG Linna, et al. Experimental study on rheological characteristics of heavy oil [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2007, 14(5): 91-94.

(收稿日期 2016-04-11 改回日期 2016-09-04 编辑 王培玺)