

超稠油油藏蒸汽驱动态预测模型

付金刚^{1,2}, 杜殿发², 郑洋², 巴忠臣³, 李冬冬²

[1. 山东科瑞油田服务集团股份有限公司, 山东 东营 257000; 2. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东 青岛 266580;

3. 中国石油新疆油田分公司, 新疆 克拉玛依 834000]

摘要:蒸汽驱是超稠油开发中最为有效且成熟的方法之一,目前对于蒸汽驱的驱替机理以及技术工艺等研究已相对完善。但对数学模型的研究还不够,对于蒸汽驱动态预测模型的研究还相对滞后。在蒸汽腔演化理论和地层热损失率计算研究的基础上,将汽驱过程中的整个油藏分为蒸汽区、过渡区和原油区,运用能量转换和守恒原理,推导蒸汽驱过程中各区域内物理参数表达式,建立汽驱注采模型。同时,针对井网形式和转驱前蒸汽吞吐的影响,推导得到五点井网汽驱动态预测模型。对建立的数学模型进行编程求解,并应用新疆重32井区实际数据进行预测。结果表明:应用该模型可以对蒸汽腔前缘和油水过渡前缘位置进行准确预测,同时可以对产油产水情况进行预测。

关键词:动态预测;能量守恒;动态调控;蒸汽驱;超稠油;油藏开发

中图分类号:TE345

文献标识码:A

Dynamic prediction model of steam flooding in extra heavy oil reservoirs

Fu Jingang^{1,2}, Du Dianfa², Zheng Yang², Ba Zhongchen³, Li Dongdong²

(1. Shandong Kerui Oilfield Services Co., Ltd., Dongying, Shandong 257000, China; 2. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266580, China; 3. PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Karamay, Xinjiang 834000, China)

Abstract: Steam flooding is one of the most effective and mature methods for the development of super-heavy oil reservoirs. The displacement mechanisms of steam flooding and its technical processes are well understood at present. However, the study of mathematical model and performance prediction model still needs to be further strengthened. Based on the theory of steam chamber growth and the study of subsurface heat loss, the reservoirs in steam flooding process are divided into steam zone, transition zone and crude oil zone. The energy conversion and conservation principles are used to get the expressions of physical parameters in each zone of steam flooding and build injection-production models for steam flooding. At the same time, a performance prediction model is built for five-spot well pattern according to well patterns and the influences of cyclic steam stimulation before steam flooding. The model is solved by programming and the actual data of Zhong32 Block in Xinjiang are used to test it. The results show that the model can accurately predict the locations of fronts of steam chamber and oil-water transition zone. In addition, it also can predict oil and water production.

Key words: dynamic prediction, energy conservation, dynamic regulation, steam flooding, extra heavy oil, oilfield development

蒸汽驱是超稠油油藏开发的有效途径,蒸汽驱动态预测模型对于判断蒸汽驱开发阶段,进行分阶段调控和制定合理的开发方案具有重要的指导意义。Lauwerier^[1]在1955年第一次在合理的假设条件下,推导出了注入热流体后的油藏内和相邻地层中的温度分布函数;Marx和Langeheim^[2]在1959年提出了一个理论模型,可以估算热侵速率、累积加热区和以恒定的速

率向理想化的油藏中稳定注入热量的理论经济极限;Mandl和Volek等人^[3]在1969年考虑了蒸汽驱油藏的蒸汽带和冷区之间,由蒸汽前缘对流的热传导作用引起的热交换,从而引入了“临界时间”概念;Neuman^[4]在1975年提出了一个蒸汽驱的重力超覆模型,推动了蒸汽驱理论研究的发展;Lookeren^[5]在1977年在考虑蒸汽超覆的情况下分析汽液界面形状,提出可利用界

收稿日期:2017-03-17;修订日期:2018-01-03。

第一作者简介:付金刚(1988—),男,工程师,油田开发。E-mail: fujingang86@sina.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(51274226)。

面形状系数优化地面注汽速率和预测蒸汽带平均厚度; Jones^[6]在1981年建立了一个简化的预测模型, 依赖基于现场情况的经验可调参数, 其可以模拟一定蒸汽注入速率下的原油生产史; Pope和Aydelotte^[7]在1983年认真分析了蒸汽驱油藏的温度场、压力场及饱和度场分布特点, 提出了预测蒸汽驱动态的新方法。随后众多学者又分别在前人研究基础上, 提出了多种蒸汽驱动态预测理论模型^[8-11], 但都没有考虑井网形式和蒸汽驱前蒸汽吞吐的影响。超稠油蒸汽超覆现象严重, 需要考虑蒸汽超覆对蒸汽腔前缘和热损失率的影响。基于蒸汽腔演化理论、地层热损失率研究和能量守恒原理, 对蒸汽驱过程中流体性质及能量转化进行分析研究^[12-14], 考虑蒸汽超覆和地层热损失的同时^[15-16], 将整个汽驱过程分为蒸汽区域、过渡区域和原油区域, 建立考虑井网形式和蒸汽驱前蒸汽吞吐的蒸汽驱动态预测模型。应用该预测模型可以判断汽驱阶段, 预测蒸汽驱各阶段的产油产水情况, 同时为蒸汽驱油藏的筛选和注采参数的优化提供指导。

1 模型建立假设

基于对蒸汽前缘动态预测模型和考虑了地层超覆情况下的地层热损失率计算的研究, 假设在蒸汽和原油之间存在一个过渡带, 将超稠油蒸汽驱油藏分为3个区域(图1), 并做出如下假设:

1) 地层热损失的过程也是在一定条件下压力为 p 、质量为 m 的蒸汽降温到一定的温度 T 变成热水, 同时释放热量的过程。

2) 由于热量散失后转化成的这部分热水与加热驱替的原油混合在一起形成热过渡区域, 忽略冷水驱油的区域。

3) 将整个驱替油藏分为蒸汽区、热流体过渡区和原油区; 蒸汽区域的压力为 p_s 、此压力条件下的温度为 T_s 、含油饱和度为残余油饱 S_{or} ; 原油区温度为 T_i 、原始含油饱和度为 S_{oi} 。

4) 油藏为水平均质油藏, 蒸汽区、原油区和过渡



图1 蒸汽驱各区域示意图

Fig.1 Schematic diagram showing different zones of reservoirs in steam flooding

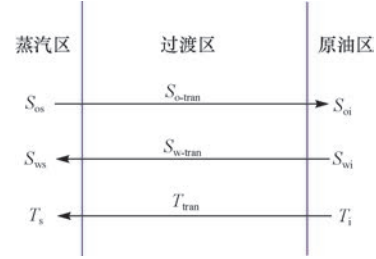


图2 过渡区各物理量示意图

Fig.2 Schematic diagram showing each physical quantity in transition zone

区温度恒定, 且过渡区中各物理量从蒸汽区到原油区均匀过渡。

5) 关于过渡区前缘的假设: 过渡区前缘在蒸汽区前缘的法线方向, 向外推移 Δx 的距离, 且各点处推移距离相同。

6) 热流体的过渡带形状与汽驱前缘形状相同且其温度场和饱和度场是均匀过渡的, 过渡区物理量参数变化(图2), 则可计算过渡带内的热水的能量(由于在计算热损失率时已将原油吸收的热量计算在内, 故过渡带内原油携带的能量不再计算在内)。

2 数学模型的建立

2.1 各区域内物理量的计算

1) 蒸汽区各物理量的计算

在蒸汽驱过程中, 根据能量守恒原理及热量在地层中的传递和转化规律可用如下的公式来描述^[17-19]:

在不考虑管线及井筒热损失的情况下, 累积注入地层中的热量为

$$Q_{H,i} = i_{s,i} H_{st} t \quad (1)$$

式中: $Q_{H,i}$ 为累积注入热量, J; $i_{s,i}$ 为蒸汽注入速率, kg/s; H_{st} 为注入蒸汽的热焓, J/kg; t 为注入时间, s。

热损失后累积注入的有效热量为

$$Q_{H,f} = (1 - \eta_L) Q_{H,i} \quad (2)$$

同时, 由蒸汽腔计算的累积注入的有效热量为

$$Q_{H,f} = V_{b,st} M (T_{st} - T_f) \quad (3)$$

式中: $Q_{H,f}$ 为蒸汽腔内蒸汽热量, J; $V_{b,st}$ 为蒸汽腔的体积, m^3 ; T_{st} 为蒸汽温度, K; T_f 为地层温度, K; M 为油层的热容, $kJ/(m^3 \cdot ^\circ C)$, 其大致范围是 $2.3 \sim 2.8$ $kJ/(m^3 \cdot ^\circ C)$; η_L 为地层热损失率, 无因次。

在不考虑井筒热损失的情况下, 综合上述方程得:

$$i_{s,i} H_{st} t (1 - \eta_L) = V_{b,st} M (T_{st} - T_f) \quad (4)$$

则由热量推导的蒸汽腔体积为:

$$V_{b,st} = \frac{i_{s,i} H_{st} t (1 - \eta_L)}{M(T_{st} - T_f)} \quad (5)$$

根据已有的汽驱前缘方程^[20-21]以及基于蒸汽超覆理论推导的蒸汽腔体积方程^[22-24],可以计算出蒸汽区的前缘位置。

$$\frac{i_{s,i} H_{st} t (1 - \eta_L)}{M(T_{st} - T_f)} = \pi r_b^2 h - \pi r_e^2 A_{rd} h \omega (1 - M')^{\frac{1}{2}} \left\{ \frac{a}{e^{2a^2}} + \frac{\sqrt{2\pi}}{4} [\operatorname{erfc}(\sqrt{2}a) - 1] \right\} \quad (6)$$

$$h_s = A_{rd} h \omega \sqrt{\ln \frac{r_e}{r}} \quad (7)$$

$$a = \sqrt{\ln \frac{r_e}{r_b}} \quad (8)$$

式中: A_{rd} 为汽-液界面形状系数,即蒸汽超覆系数; h_s 为蒸汽带厚度,m; h 为油层厚度,m; ω 为蒸汽速率系数; M' 为径向驱的拟流度比; r_e 为蒸汽腔顶部半径,m; r_b 为蒸汽腔底部半径,m; a 为无因次参数。

由已知蒸汽腔体积,可以得:

蒸汽区域的残余油量为

$$V_{s-or} = V_{b,st} \Phi S_{os} \quad (9)$$

蒸汽区域的残余水量为

$$V_{s-wr} = V_{b,st} \Phi S_{ws} \quad (10)$$

蒸汽腔扩展所驱出的油量为

$$V_{s-o} = V_{b,st} \Phi (S_{oi} - S_{os}) \quad (11)$$

蒸汽腔扩展所驱出的水量为

$$V_{s-w} = V_{b,st} \Phi (S_{wi} - S_{ws}) \quad (12)$$

式中: S_{os} 为蒸汽区平均含油饱和度,小数,可近似为 $S_{os} \approx S_{or}$; S_{ws} 为蒸汽区平均含水饱和度,小数,可近似为 $S_{ws} \approx S_{wr}$; S_{oi} 为油层原始含油饱和度,小数; S_{wi} 为油层原始含水饱和度,小数; Φ 为油层孔隙度,小数。

2) 过渡区各物理量的计算

汽驱过程中,经过油藏顶底层热量的热散失后,部分蒸汽转化为热水,位于蒸汽驱前缘以后,在蒸汽前缘部位形成热水与原油的混合热流体,形成所谓的热流体区域,此部分热水中也存在一部分热量。由于过渡区各个物理量均匀过渡,则可得到:

过渡区中热水平均温度为

$$T_{tran} = (T_s + T_i)/2 \quad (13)$$

过渡区中平均含油饱和度为

$$S_{o-tran} = (S_{or} + S_{oi})/2 \quad (14)$$

过渡区中平均含水饱和度为

$$S_{w-tran} = 1 - S_{o-tran} \quad (15)$$

由蒸汽变为热水的过程中总共释放的热量(即热损失量)为

$$Q_L = i_{s,i} H_{st} \eta_L t \quad (16)$$

式中: Q_L 为热损失量,J; S_{or} 蒸汽区残余油饱和度,小数。

由于模型中的饱和度代表的是油藏的平均水平,因此不同的油田其值也不确定,一些油田采用经验公式为 $S_{os} = 0.20 S_{oi}$, $S_{o-tran} = 0.75 S_{oi}$,根据具体油田的数据可以对这两个参数进行修正。根据水蒸气中热焓计算方法,计算可得到蒸汽区条件下蒸汽的热焓为 H_s ,同样可得到过渡区条件下热水的热焓为 H_w ,则可计算出参与能量转的蒸汽的质量为 $m_s = Q_L / (H_s - H_w)$;过渡区中比原油藏增加水的体积为 $V_w = m_s / (\rho_w g)$;过渡区地层体积为 $V_{F-tran} = (V_w + V_{s-w}) / [\Phi(S_{w-tran} - S_{wi})]$ 。

由过渡区域体积和对过渡区前缘形状的假设可得到过渡区前缘位置 h_t 的方程, $V_T = V_{F-tran} + V_{b,st}$ 根据 V_T 可认为过渡区前缘与蒸汽腔前缘形状相同,可求出 h_t 。

由上述一系列公式可推导得到过渡区的体积:

$$V_{F-tran} = [Q_L / \rho_w g \Phi (H_s - H_w) + V_{s-w}] / (1 - S_{o-tran} - S_{wi}) \quad (17)$$

过渡区域驱出的油量为

$$V_{T-o} = V_{F-tran} \Phi (S_{oi} - S_{o-tran}) \quad (18)$$

2.2 各阶段产量的计算

第一阶段:在汽驱一段时间 t 后,过渡区前缘运移尚未到生产井(图3)。此时没有水产出,即为无水产油期 $Q_w = 0$,而产油量为 $Q_o = V_{s-o} + V_{T-o}$ 。

第二阶段:在过渡区前缘到达生产井但蒸汽前缘尚未到达生产井时(图4)。可借鉴两相水驱前缘理论中含水饱和度的变化规律,假定过渡区前缘达到生产井后继续向前推进,而实际上被驱替的这部分已经被采出。

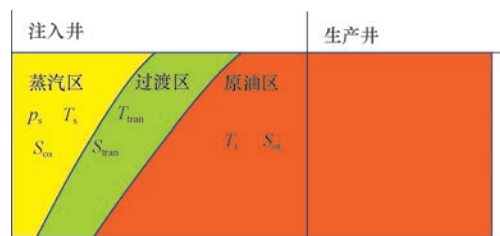


图3 汽驱第一阶段各前缘变化示意图

Fig. 3 Schematic diagram showing changes of every fronts in the first stage of steam flooding

可根据过渡区前缘位置 h_i 的方程和注采井距 L 计算得到运移超过生产井的过渡区体积 $V_{T-L} = \int_L^{r_c} 2\pi h_i r dr$, 即被采出的体积, 此部分驱出的油量为 $V_{TL-o} = V_{T-L} \Phi S_{o-tran}$; 此部分驱出的水量为 $V_{TL-w} = V_{T-L} \Phi S_{o-tran}$, 此时产水量为 $Q_w = V_{TL-w}$, 而产油量为 $Q_o = V_{s-o} + V_{T-o} - V_{T-L} \Phi (S_{oi} - S_{o-tran})$ 。

第三阶段: 蒸汽区到达生产井时 (图 5)。可按第二阶段的假设继续向前推进, 此时蒸汽会发生突破现象, 产水量更要高, 汽驱效果变差。

汽驱突破过程中, 蒸汽区突破从生产井产生的蒸汽体积为 V_{S-L} 。

此阶段的产水量为 $Q_w = V_{TL-w} + V_{S-L} \Phi S_{ws-o}$ 。

而产油量为 $Q_o = V_{s-o} + V_{T-o} - V_{T-L} \Phi (S_{oi} - S_{o-tran}) - V_{S-L} \Phi (S_{oi} - S_{os})$ 。

2.3 井网模型的建立

假设井间距为 l (假设井距 70 m), 油藏孔隙度为 Φ , 原始含油饱和度为 S_{oi} , 在五点井网中 (图 6), 油水井均匀分布, 相邻井构成正方形, 注入井在油井所构成的正方形的中心, 则生产井与注入井之比 $m = 1 : 1$, 每口井控制的面积单元为 $F = 2l^2$, 单井控制面积为 $S = l^2$ 。假设吞吐阶段的采收率为 R_{io} (一般吞吐阶段的采收率为 20% 左右), 单井组的原油地质储量为 $N = 4l^2 h \Phi S_{oi}$, 吞吐阶段的采油量为 $Q_T = NR_{io}$ 。

假设由于蒸汽吞吐预热所形成的预热区域为理想的锥体状, 根据井网、地层参数和吞吐阶段的采收率, 可计算出预热区域的体积及预热半径。

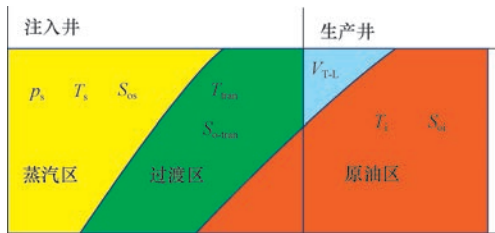


图 4 汽驱第二阶段各前缘变化示意图

Fig. 4 Schematic diagram showing changes of every fronts in the second stage of steam flooding

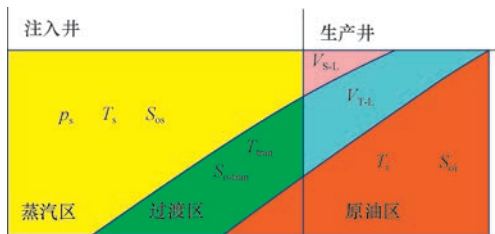


图 5 汽驱第三阶段各前缘变化示意图

Fig. 5 Schematic diagram showing changes of every fronts in the third stage of steam flooding

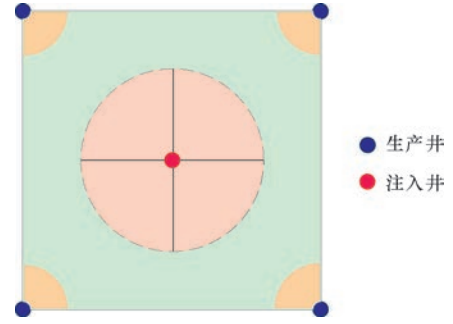


图 6 五点井网注采示意图

Fig. 6 Schematic diagram of five-spot well pattern

吞吐阶段单井的采油量为 $q_o = l^2 h \Phi S_{oi} R_{io} = \frac{1}{12} \pi r^2 h \Phi S_{oi}$, 因此 $r = \sqrt{\frac{12 l^2 R_{io}}{\pi}}$ 。当注汽井注入一段时间的蒸汽时, 原油被驱替到生产井周围, $\frac{1}{4} Q_o = \frac{1}{4} \pi \Delta r^2 h$,

因此, $\Delta r = \sqrt{\frac{Q_o}{\pi h}}$ 。由于 $\frac{\Delta r}{\Delta h} = \frac{r}{h}$, 因此 $\Delta h = \frac{h \Delta r}{r} =$

$\sqrt{\frac{Q_o h}{12 l^2 R_{io}}}$ 。此时实际驱出原油的体积为 $Q_m =$

$\frac{2}{3} \pi \Delta r^2 \Delta h \Phi S_{oi} = \Phi S_{oi} \sqrt{\frac{Q_o^3}{27 l^2 R_{io} h}}$ 。

3 模型应用

克拉玛依油田重 32 井区齐古组超稠油油藏位于准噶尔盆地西北边缘, 为一受断裂控制的构造岩性油藏。在 2007 年开发试验的基础上, 初期采用蒸汽吞吐方式进行开发, 后期经过多轮次蒸汽吞吐后, 从 2012 年逐步转为蒸汽驱。利用该区块油藏基本参数及注汽参数 (表 1), 运用 MATLAB 对本文建立的数学模型进行编程求解, 可以获得不同时刻的蒸汽驱前缘曲线和过渡区前缘曲线 (图 7), 同时利用该模型可以实现不同阶段的各生产指标预测 (图 8)。

4 结论

1) 基于对蒸汽腔演化理论、地层热损率研究和能量守恒原理, 考虑超稠油蒸汽驱特征下将整个汽驱过程分为蒸汽区域、过渡区域和原油区域, 从而建立蒸汽驱数学模型, 推导出汽驱各阶段产油产水量, 考虑吞吐预热及井网形式, 得到了井网中的产量公式。

2) 应用该模型进行编程求解, 运用油田实际数据, 可以准确预测超稠油蒸汽驱蒸汽腔前缘和过渡区

表 1 油藏基本参数及注汽参数

Table 1 Basic parameters of reservoirs and steam injection parameters

基本参数	数值	基本参数	数值
油层厚度/m	17.8	原油密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	970
孔隙度/%	32.6	蒸汽密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	15
渗透率/($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	3 151	转驱前含油饱和度/%	50 ~ 55
原油体积系数	1.061	综合压缩系数	1.3×10^{-4}
压力系数	0.996	转驱前地层平均压力/MPa	1 ~ 2
原油动力粘度/($\text{mPa} \cdot \text{s}$)	2 141	转驱前地层平均温度/ $^{\circ}\text{C}$	70
油层岩石热容/($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^{\circ}\text{C}$)	2 113.01	注汽速度/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	100
油层岩石导热系数/($\text{kJ} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$)	140	注汽压力/MPa	3 ~ 4
顶底层岩石热容/($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^{\circ}\text{C}$)	2 534.7	注汽温度/ $^{\circ}\text{C}$	300
顶底层岩石导热系数/($\text{kJ} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$)	238.24	蒸汽渗透率/($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	500
水蒸气动力粘度/($\text{mPa} \cdot \text{s}$)	0.003 2	井底蒸汽干度/%	60

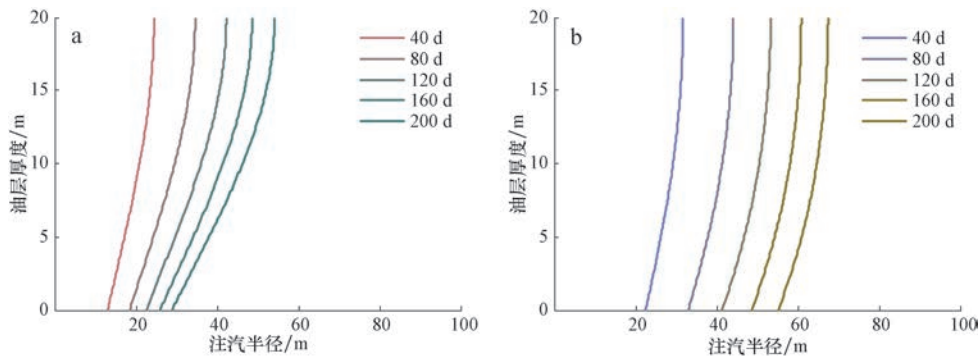


图 7 前缘位置随时间变化图

Fig. 7 Locations of steam front at different time

a. 蒸汽腔前缘曲线;b. 过渡区前缘曲线

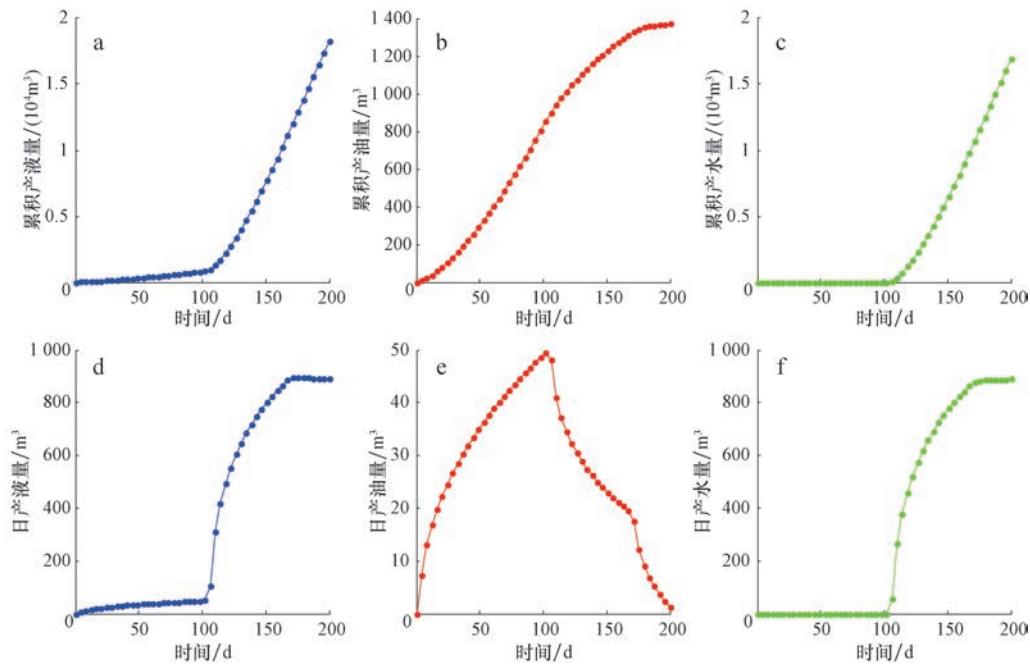


图 8 模型预测的生产曲线

Fig. 8 Production curve predicted with the model

a. 累积产油量与时间关系;b. 累积产油量与时间关系;c. 累积产水量与时间关系;d. 日产油量与时间关系;
e. 日产油量与时间关系;f. 日产水量与时间关系

前缘位置,同时能够对产油产水情况做出很好的预测,对蒸汽驱实施具有重要的指导作用。

参 考 文 献

- [1] Lauwerier H A. The transport of Heat in an oil layer caused by the injection of hot fluid [J]. Applied Scientific Research, 1955, 5(2-3): 145-150.
- [2] Marx J W, Langenheim R H. Reservoir heating by hot fluid injection [J]. SPE1266, 1969: 302-312.
- [3] Mandl G, Volek C W. Heat and mass transport in steam-drive processes [J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1969, 9(1): 59-79.
- [4] Neuman. A mathematical model of the steam drive process. applications [J]. SPE4757, 1975.
- [5] Lookeren V. Calculation methods for linear and radial steam Flow in oil reservoirs [J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1983, 23(3): 427-439.
- [6] Jones J. Steam drive model for hand-held programmable calculators [J]. Journal of Petroleum Technology, 1980, 33(9): 1583-1598.
- [7] Aydelotte S R, Pope G A. A simplified predictive model for steam-drive performance [J]. Journal of Petroleum Technology, 1983, 35(5): 991-1002.
- [8] 赵田, 高亚丽, 乙广燕, 等. 水平井蒸汽辅助重力驱数学模型的建立及求解方法[J]. 大庆石油地质与开发, 2005, 24(4): 40-41.
Zhao Tian, Gao Yali, Yi Guangyan, et al. Establishment of mathematical model for horizontal well SAG flooding and its solution method [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2005, 24(4): 40-41.
- [9] 程林松, 刘东, 高海红, 等. 考虑拟流度比的蒸汽驱前缘预测模型研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2009, 31(2): 159-162.
Cheng Linsong, Liu Dong, Gao Haihong, et al. The study on steam flooding frontier prediction model considering pseudo mobility ratio [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2009, 31(2): 159-162.
- [10] Gonzalez K, Bashbush J, Rincon A. Simulation study of steam flooding with horizontal producers using PEBI Grids [J]. SPE121488-MS, 2009.
- [11] Livescu L J. A semianalytical thermal multiphase wellbore-flow model for use in reservoir simulation [J]. SPE115796-PA, 2010.
- [12] 赖令彬, 潘婷婷, 胡文瑞, 等. 基于蒸汽超覆的稠油蒸汽驱地层热效率计算模型[J]. 重庆大学学报, 2014, 37(5): 91-96.
Lai Lingbin, Pan Tingting, Hu Wenrui, et al. A calculation model for thermal efficiency based on steam overlap in heavy oil steam flooding [J]. Journal of Chongqing University, 2014, 37(5): 91-96.
- [13] 赖令彬, 潘婷婷, 秦耘, 等. 考虑蒸汽超覆的蒸汽驱地层热损失率计算方法[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2014, 44(1): 104-108.
- [14] 苏玉亮, 高海涛. 稠油蒸汽驱热效率影响因素研究[J]. 断块油气田, 2009, 16(2): 73-74.
Su Yuliang, Gao Haitao. Influencing factors of thermal efficiency during heavy oil steam drive [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2009, 16(2): 73-74.
- [15] 姜继水, 宋吉水. 提高石油采收率技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999: 124-126.
Jiang Jishui, Song Jishui. Enhanced oil recovery technology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999: 124-126.
- [16] 凌建军, 王珏, 王书林. 注汽速度对蒸汽驱全系统热损失的影响[J]. 江汉石油学院学报, 1995, 17(2): 60-64.
Ling Jianjun, Wang Jue, Wang Shulin. Effects of steam injection rate on the whole system heat losses in steam flooding [J]. Journal of Jiangnan Petroleum Institute, 1995, 17(2): 60-64.
- [17] 张锐. 稠油热采技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999: 266-267.
Zhang Rui. Heavy oil thermal recovery technology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999: 266-267.
- [18] 陈月明. 注蒸汽热力采油[M]. 东营: 石油大学出版社, 1996: 255-257.
Chen Yueming. Steam injection thermal recovery [M]. Dongying: Petroleum University Press, 1996: 255-257.
- [19] 刘文章. 稠油注蒸汽热采工程[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997: 106-116.
Liu Wenzhang. Steam injection thermal recovery project of heavy oil [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997: 106-116.
- [20] Jamshidnezhad M, Shen C, Kool P H, et al. Improving injectivity to fight gravity segregation in gas enhanced oil recovery [J]. SPE Journal, 2010, 15(1): 91-104.
- [21] Jamshidnezhad M. Gravity segregation in gas improved oil recovery of tilted reservoirs [J]. Transport in Porous Media, 2009, 86(3): 695-704.
- [22] Willman B T, Valleroy V V, Runberg, G W, et al. Laboratory studies of oil recovery by steam injection [J]. Trans AIME, 1961, 222: 681-690.
- [23] Neuman C H. A gravity override model of steamdrive [J]. Journal of Petroleum Technology, 1985, 37(1): 163-169.
- [24] 杜殿发, 付金刚, 张婧, 等. 超稠油蒸汽驱地层热损失率计算方法研究[J]. 特种油气藏, 2016, 23(2): 73-76.
Du Dianfa, Fu Jingang, Zhang Jing, et al. A calculation method of heat loss for extra heavy oil with steam drive [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2016, 23(2): 73-76.

(编辑 张亚雄)