

文章编号: 1000 0747(2005)05 0108 05

水平井蒸汽吞吐热采过程中水平段 加热范围计算模型

倪学锋, 程林松

(中国石油大学(北京))

基金项目: 国家自然科学基金(50276040); 中国石油天然气集团公司中青年创新基金(03E7014)

摘要: 对于稠油水平井的产能评价和动态预测, 注蒸汽吞吐生产过程中水平段的加热范围至关重要。由于油藏中水平井水平段长度比直井中直井段长得多, 蒸汽的压力、温度和干度沿着水平段分布不均匀; 根据水平井变质量流的思想, 用动量定理和能量守恒定理建立蒸汽沿水平段的压力、温度和干度分布计算模型; 同时根据传热学等有关学科知识, 考虑水平井中水平段加热过程和机理不同于直井的加热过程和机理, 建立了水平井注蒸汽吞吐加热范围计算模型。根据辽河油田冷42块油藏基本参数, 用所建立的模型对水平段加热范围进行了计算, 对计算结果进行的研究表明: 蒸汽压力、温度、干度、加热范围沿水平段不是均匀分布的, 第一临界时间、第二临界时间的概念反映了蒸汽在油层的运移过程。图4参15

关键词: 水平段; 蒸汽吞吐; 压力分布; 温度分布; 干度分布; 加热模型

中图分类号: TE345

文献标识码: A

0 引言

计算直井蒸汽吞吐加热面积或体积的方法很多, 最常用的加热模式有: 马克斯兰根海姆(Marx-Langenheim)法^[1]、威尔曼(Willman)法^[2]。但是这些方法都是用来计算直井加热范围的, 对水平井不适用。

在油藏中水平井水平段长度比直井中直井段长得多, 蒸汽沿着水平段流动有摩擦损失, 蒸汽的压力越来越小, 因此蒸汽沿着水平段吸气量并非均匀分布。蒸汽沿着水平段的流动是变质量流的过程, 随着蒸汽不断被油层吸收, 给油层传递热量, 不仅沿着水平段的蒸汽质量流量越来越小, 而且蒸汽的干度也在逐渐变化。

由于水平段吸汽过程不是均匀吸汽过程, 因此沿水平段的加热范围不一样。对于直井, 蒸汽在加热直井段油层时, 顶、底层同时向外界散失热量; 而对于水平井, 蒸汽先加热水平段穿过的油层, 随着蒸汽的运移, 经过一段时间后蒸汽到达油层顶、底, 蒸汽才向外界散失热量。因此, 水平段的加热机理不同于直井中直井段的加热机理, 对水平井加热范围的计算不能用直井的加热模式进行简单转换, 必须从水平井油层加热过程和机理出发, 重新推导加热范围计算方法。

1 数学模型的建立

基本假设: ①地层均质, 注入流体在油层中沿着水平井径向一维流动; ②在油层中, 垂直水平段方向的热传导系数为无限大, 而平行水平段方向的热传导系数

为零; ③油层温度在加热范围内为蒸汽温度, 在加热范围外则为原始油层温度(此假设忽略了蒸汽前缘的热水汇集区温度逐渐变低这一现象); ④岩石和流体的物性为常量; ⑤水平段跟端处注入的蒸汽温度、压力、干度和流量不变; ⑥水平段的长度为 l , 分成 N 个微元段, 在同一个微元段上蒸汽均匀吸入油层, 而各个微元段的吸汽量不等, 吸汽量与蒸汽压力有关, 即假设同一微元段线汇为均匀吸汽线汇, 而各个微元段线汇的吸汽量不相等。

1.1 蒸汽压力、温度和干度沿着水平段分布模型

1.1.1 微元段的压力、温度和干度分布模型

在文献[3]推导水平井筒生产压力降的基础上, 利用动量定理, 建立求蒸汽压降的方程。微元段压降为:

$$\Delta p_i A_h = -\tau_i + \rho_i v_i^2 A_h - \rho_{i+1} v_{i+1}^2 A_h \quad (1)$$

微元段能量守恒方程为:

$$\frac{dQ_{si}}{dl} + \frac{dW_i}{dl} = -i_{si} \frac{dh_{mi}}{dl} - i_{si} \frac{d}{dl} \left(\frac{v^2}{2} \right) \quad (2)$$

(2)式的物理意义为: 微元段在单位长度、单位时间内的内能变化和机械能变化之和等于微元段向油层传递的热量和摩擦损失之和。(2)式建立在文献[4-7]研究基础上, 不仅考虑了微元段内蒸汽的机械能变化和自身内能变化以及蒸汽向外界传递的热量, 而且考虑了蒸汽流动过程中摩擦损失的能量, 可以用来推导蒸汽干度变化新方程。

蒸汽压力与温度关系^[8]为：

$$t_s = 210.2376p_s^{0.21} - 30 \quad (3)$$

$$p_{si+1} = p_{si} + \Delta p_{si} \quad (4)$$

其他辅助方程^[4]：

$$\frac{dh_m}{dl} = (h_s - h_w) \frac{dx}{dl} + \frac{dh_w}{dp_s} \frac{dp_s}{dl} + \left(\frac{dh_s}{dp_s} - \frac{dh_w}{dp_s} \right) \frac{dp_s}{dl} x \quad (5)$$

1.1.2 模型中未知物理量的处理

摩擦力的求解采用流体力学^[9,11]中介绍的计算摩擦力的方法： $\tau_i = \pi f D dl \rho [(v_i + v_{i+1})/2]^2 / 8$ 。

其中， f ^[9]（水蒸汽和管壁的摩擦系数）是两相流动的雷诺数

$$Re = \frac{D[(v_i + v_{i+1})/2][\rho_l E_1 + \rho_g(1 - E_1)]}{\mu_l E_1 + \mu_g(1 - E_1)}$$

和管壁相对粗糙度 $\Delta' = \epsilon/D$ 的函数。当 $Re \leq 2000$ 时， $f = 64/Re$ ； $Re > 2000$ 时，

$$f = [1.14 - 2 \lg(\Delta' + 21.25Re^{-0.9})]^{-2}$$

微元段向油层传递热量用传统计算方法求解^[4]。

摩擦力做功的求解。由于蒸汽的流动方向与摩擦力的方向相反，因此蒸汽的流动过程中摩擦力作负功，单位时间内 dl 长度内摩擦力所作的功为：

$$dW = \frac{\tau_i dl}{dt} = \frac{\tau_i dl}{2dl/(v_i + v_{i+1})} = \frac{\tau_i(v_i + v_{i+1})}{2} \quad (6)$$

1.2 水平微元段吸汽量的计算

根据对 Williams 等^[12]提出的蒸汽注入速率和井底注汽压力关系式的研究^[13,14]，以及水平井变质量流的研究思想，对每个微元段的吸汽量建立数学模型如下。

水平微元段的吸汽量：

$$q_i = \Delta p_{inj} J_{Li} I_{si} = (\bar{p}_{si} - p_R) J_{Li} I_{si} \quad (7)$$

$$\bar{p}_{si} = (p_{si} + p_{si+1}) / 2 \quad (8)$$

$$J_{Li} = \frac{2\pi \sqrt{\frac{K_h}{K_v}} K_v dl \beta \left[\frac{K_{ro}}{B_o \mu_o} + \frac{K_{rw}}{B_w \mu_w} \right]}{\ln \frac{0.571 A_{oi}^{0.5}}{r_w} - 0.75 + S} \quad (9)$$

$$I_{si} = \frac{2 \ln(A_{oi}/r_w^2) - 3.86}{\ln(A_{oi}/r_w^2) - 2.71} \quad (10)$$

质量守恒方程：

$$i_s = \sum_{i=1}^{j-1} i_{si} + i_{sj} \quad (11)$$

质量流量与体积流量的转换：

$$Q = i_s(1 - x) / \rho_l + i_s x / \rho_g \quad (12)$$

1.3 水平微元段加热范围的计算

1.3.1 蒸汽未到达顶、底边界

当油层无穷厚或厚度有限时，蒸汽未到达顶、底边界时，水平微元段沿着径向的加热面积为圆形。根据能量守恒方程：

$$H_o = i_s h_o = M_R dl \Delta t \frac{dA}{d\tau} = 2\pi M_R dl (t_s - t_r) r \frac{dr}{d\tau} \quad (13)$$

令 $C = \frac{i_s h_o}{\pi M_R dl (t_s - t_r)} = \frac{i_s (h_s - h_{rw})}{\pi M_R dl (t_s - t_r)}$

即 $C = \frac{i_s (x l_v + h_{sw} - h_{rw})}{\pi M_R dl (t_s - t_r)}$

则： $C d\tau = dr^2$ ，两边积分，得 $C \tau |_0^\tau = r^2 |_0^r$ ；即

$$r = \sqrt{C\tau} \quad (14)$$

1.3.2 蒸汽同时到达顶、底边界

当水平井布置于油层中部，油层厚度 (h) 有限时，蒸汽到达顶、底边界后，水平微元段沿径向的加热面积见图 1a。

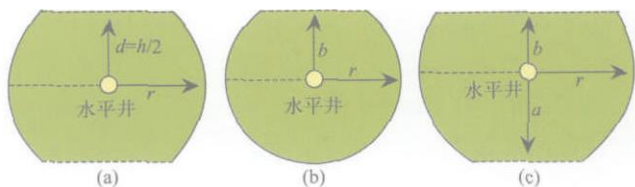


图 1 水平段不同加热时刻径向加热范围图

由 (14) 式，当 $r = d$ 时，

$$\tau_{cd} = d^2 / C \quad (15)$$

当 $\tau > \tau_{cd}$ ，由能量守恒方程，

$$\int_{\tau_{cd}}^\tau i_s h_o d\tau = \int_d^r M_R dl \Delta t dA + 2 \int_{\tau_{cd}}^\tau \left[\int_d^r \frac{\lambda \Delta t}{\sqrt{\pi \alpha (\tau - \tau_{cd})}} dB \right] d\tau \quad (16)$$

(16) 式等号左边的项表示在 τ 时间内水平微元段内总共吸收的热量，这些热量一部分用于向油层供热，一部分用于顶、底层的热损失；等号右边的第一项表示油层因升温吸收的热量，而第二项表示蒸汽到达之处顶、底层的散热量；此式就是根据能量守恒方程而来的。因为：

$$dA = [2\pi r - 4r \arccos(d/r)] dr \quad (17)$$

$$dB = (2rdl / \sqrt{r^2 - d^2}) dr \quad (18)$$

把(17)式、(18)式代入(16)式得:

$$\begin{aligned} i_s h_o d\tau(\tau - \tau_{cd}) &= \pi M_R d l \Delta t (r^2 - d^2) + \frac{8\lambda\Delta t d l}{\sqrt{\pi\alpha}} \\ &\times \sqrt{\tau - \tau_{cd}} \sqrt{r^2 - d^2} - 4M_R d l \Delta t \int_d^r r \arccos \frac{d}{r} dr \end{aligned} \quad (19)$$

当 τ 一定时,等式左边的值可求;等式右边第一项是关于 r 的二次函数,第二项是当 τ 一定时关于 r 的开平方函数,第三项是用微积分求解不出来原函数,即使解出来也是关于 r 的超越方程。因此,只能采用试算法对(19)式进行求解:当 τ 一定,给定一个 r 时等式右边第一项、第二项可求,第三项采用变步长辛普森求积法或者自适应梯形求积法求解。若等式两边误差在规定的很小范围内,则 r 就求出来;若误差大,改变 r 继续试算,直到找到满意的 r 值为止。

1.3.3 蒸汽不同时到达顶、底边界

当水平井未布置在油层中部且油层厚度有限时,距油层底的距离为 a ,距油层顶的距离为 b ,则 $a+b=h$;不妨设 $a>b$,则由(14)式,当 $r=b$ 时,

$$\tau_{cd1} = b^2 / C \quad (20)$$

当 $\tau_{cd2} > \tau > \tau_{cd1}$ 时,水平微元段沿着径向加热形状见图1b。由能量守恒方程,有:

$$\int_{\tau_{cd1}}^{\tau} i_s h_o d\tau = \int_b^r M_R d l \Delta t dA + \int_{\tau_{cd1}}^{\tau} \left[\int_b^r \frac{\lambda\Delta t}{\sqrt{\pi\alpha(\tau - \tau_{cd1})}} dB_1 \right] d\tau \quad (21)$$

简化(21)式,即得水平井未布置在油层中部时,蒸汽加热范围到达其中一个层后,计算加热范围半径的积分表达式:

$$\begin{aligned} \int_{\tau_{cd1}}^{\tau} i_s h_o d\tau &= \int_b^r M_R d l \Delta t \left(2\pi r - 2r \arccos \frac{b}{r} \right) dr \\ &+ 2 \int_{\tau_{cd1}}^{\tau} \left[\int_b^r \frac{\lambda\Delta t}{\sqrt{\pi\alpha(\tau - \tau_{cd1})}} - \frac{rdl}{\sqrt{r^2 - b^2}} dr \right] d\tau \end{aligned} \quad (22)$$

当 $r=a$, $\tau = \tau_{cd2}$ 时,由(22)式得:

$$\begin{aligned} \int_{\tau_{cd1}}^{\tau_{cd2}} i_s h_o d\tau &= \int_b^a M_R d l \Delta t \left(2\pi r - 2r \arccos \frac{b}{r} \right) dr \\ &+ 2 \int_{\tau_{cd1}}^{\tau_{cd2}} \left[\int_b^a \frac{\lambda\Delta t}{\sqrt{\pi\alpha(\tau - \tau_{cd1})}} - \frac{rdl}{\sqrt{r^2 - b^2}} dr \right] d\tau \end{aligned} \quad (23)$$

当 $\tau > \tau_{cd2}$ 时,水平微元段沿着径向加热形状见图1c。由能量守恒方程知:

$$\begin{aligned} \int_{\tau_{cd2}}^{\tau} i_s h_o d\tau &= \int_a^r M_R d l \Delta t dA + \int_{\tau_{cd2}}^{\tau} \left[\int_a^r \frac{\lambda\Delta t}{\sqrt{\pi\alpha(\tau - \tau_{cd2})}} dB_1 \right] d\tau \\ &+ \int_{\tau_{cd2}}^{\tau} \left[\int_a^r \frac{\lambda\Delta t}{\sqrt{\pi\alpha(\tau - \tau_{cd2})}} dB_2 \right] d\tau \end{aligned} \quad (24)$$

简化(24)式,得水平井未布置到油层中部时,蒸汽加热范围到达顶、底边界后,计算加热范围半径的积分表达式:

$$\begin{aligned} \int_{\tau_{cd2}}^{\tau} i_s h_o d\tau &= \int_a^r M_R d l \Delta t \left(2\pi r - 2r \arccos \frac{b}{r} - 2r \arccos \frac{a}{r} \right) dr \\ &+ 2 \int_{\tau_{cd2}}^{\tau} \left[\int_a^r \frac{\lambda\Delta t}{\sqrt{\pi\alpha(\tau - \tau_{cd2})}} \left(\frac{rdl}{\sqrt{r^2 - b^2}} dr + \frac{rdl}{\sqrt{r^2 - a^2}} dr \right) \right] d\tau \end{aligned} \quad (25)$$

(22)式、(23)式和(25)式的求解方法和思路与(19)式相同。

2 模型求解步骤

模型求解分4步。

①以水平段跟端为起点,求出第1微元段的摩擦力、摩擦力做功、微元段向井筒传递的热量。微元段其他一些物性参数求解可参考 Beggs Brill^[15]气液两相流中物性参数计算方法,根据(1)式求出微元段压降,根据(2)式和(5)式求出蒸汽干度变化,根据(3)式求出微元段的蒸汽温度。

②求出第1微元段的蒸汽压力、温度和干度变化后,计算第1微元段的蒸汽平均压力、温度和干度,根据(6)式至(10)式计算微元段的体积吸汽量,根据(12)式转换成微元段质量吸汽量,根据(11)式计算下一微元段蒸汽沿水平井筒的质量流量,如果微元段的吸汽量大于蒸汽沿水平井筒的流量,则此时微元段吸汽量等于蒸汽的流量,余下的微元段吸汽量都为零。

③根据水平井的纵向布井位置以及其他的油层物性参数,根据(14)式或(19)式、(22)式、(25)式,计算出水平微元段的加热半径。

④重复步骤①~③,计算下一个微元段的蒸汽压力、温度和干度变化及分布,算出微元段的吸汽量以及加热半径,依次计算,直到第 N 微元段为止。

3 实例计算

本文根据辽河油田冷42块油藏基本参数,对水平井

加热范围进行了计算。油藏参数为：油层厚度 60m，油层温度 63℃，油层压力 16.8MPa，孔隙度 28.0%，水平渗透率 1.850D，垂向渗透率 1.224D，含水饱和度 33.9%，含油饱和度 66.1%，油层热容量 2347.0kJ/(m³·℃)，顶底层热扩散系数 0.0045m²/h，顶底层导热系数 6.229kJ/(h·m·℃)，地层孔隙压缩系数 0.00735/MPa；水平井参数为：水平段长度 300m，水平井离油层顶的距离 30m，水平微元段长度 3.0m，水平井筒半径 0.11m，水平井筒表皮系数 -2.5，水蒸汽跟端压力 21.05MPa，水蒸汽跟端温度 368.66℃，水蒸汽跟端干度 45.0%，水蒸汽质量流量 20.0t/h，注汽时间 15d，焖井时间 5d，生产时间 240d；流体物性参数为：水的比热 4.2kJ/(kg·℃)，水的热膨胀系数 0.000006/℃，水的压缩系数 0.0005/MPa，水的体积系数 1.01，油的比热 2.1kJ/(kg·℃)，油的热膨胀系数 0.00001/℃，油的压缩系数 0.0007/MPa，油的体积系数 1.05，地层原油密度 981.2kg/m³。计算结果见图 2 至图 4。

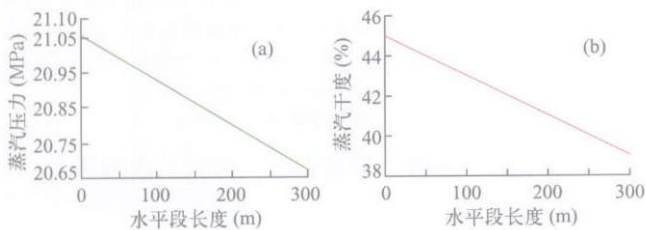


图 2 蒸汽压力、干度沿水平段分布关系图

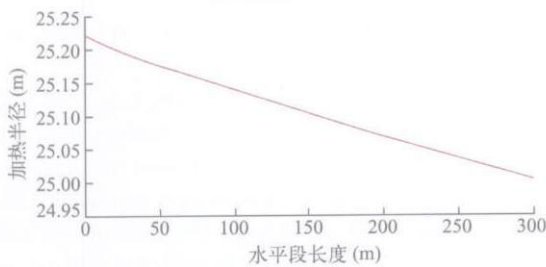


图 3 第 4 周期加热半径沿着水平段分布关系图

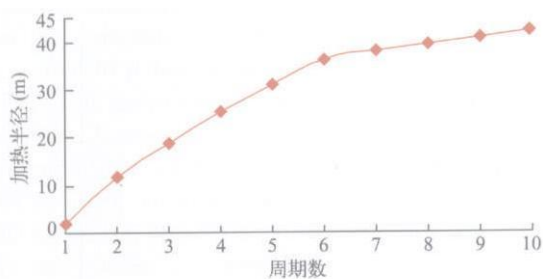


图 4 水平段平均加热半径与周期数的关系图

由图 2 可以看出：蒸汽压力、干度沿着水平段不再是均匀分布，而是逐步降低的，验证了本文模型的正确性。

由于蒸汽压力和干度沿着水平段逐步降低，油层

吸汽量和蒸汽内能沿着水平段也逐渐降低，因此蒸汽沿着水平段的加热半径也越来越小(见图 3)。

随着吞吐周期数的增加，水平段的加热半径越来越大，第 1 周期加热半径最小(见图 4)；这是由于油层在第 1 周期处于原始状态下，没有余热，地层压力很大，原油的黏度很大，几乎不流动，因此油层吸汽量很少，水平段加热半径就很小；而之后的吞吐周期，由于油层中有上一个吞吐周期的余热，原油流动性相对变好，吞吐生产一个周期后，地层开始亏空，地层压力降低，因此沿着水平段的吸汽量明显增多，水平段的加热半径也逐渐变大，但是随着周期数的增加，加热半径变化幅度越来越小。

4 结论

本文建立的蒸汽压力、温度和干度沿水平段分布数学模型，反映了蒸汽压力、温度和干度沿水平段分布不再是常量的特征；降低的幅度与蒸汽在水平段跟端的物性参数以及注入速率有关。

本文建立的水平段蒸汽吞吐加热模型提出了第一临界时间、第二临界时间的概念，这些概念反映了蒸汽在油层中的运移过程，有助于理解蒸汽加热过程；第一临界时间、第二临界时间取决于注汽速率、注汽干度、注汽压力、注汽温度、油层热容量、油层厚度以及水平井在油层的纵向位置等。

符号注释：

A_h ——水平井筒的截面积 m²； ρ ——水蒸汽的入口密度，kg/m³； v ——水蒸汽的入口流速 m/s； τ_f ——水蒸汽所受的摩擦力，N； Δp ——水蒸汽的压降，MPa； dQ_s ——水蒸汽单位时间内向油层传递的热量，W； W ——单位时间内摩擦力做的功，W； i_s ——水蒸汽的质量流速，kg/s； i_h ——油层的质量吸汽量，kg/s； Q ——水蒸汽的体积流量，m³/s； h_m ——水蒸汽的焓 kJ/kg； dl ——微元段的长度，m； h_s ——水蒸汽中蒸汽的焓 kJ/kg； h_w ——水蒸汽中热水的焓，kJ/kg； x ——水蒸汽中蒸汽的质量百分比，也即干度； p_s ——饱和水蒸汽体系的压力，MPa； t_s ——饱和水蒸汽体系的温度，℃； t_o ——油藏初始温度，℃； ρ_g ——水蒸汽中蒸汽的密度，是压力和温度的函数，kg/m³； ρ_l ——水蒸汽中热水的密度，是压力和温度的函数，kg/m³； f ——水蒸汽和管壁的摩擦系数，无因次； D ——油管的直径，m； ϵ ——管壁的绝对粗糙度，m； μ_g ——水蒸汽中蒸汽的黏度，mPa·s； μ_l ——水蒸汽中热水的黏度，mPa·s； E_1 ——入口体积含液率(无滑脱持液率)，无因次； \bar{p} ——平均注汽压力，MPa； Δp_{ij} ——注汽压力差，MPa； p_R ——注汽前原始油层压力，MPa； q ——油层日吸汽量，m³/d； J_L ——采液指数，m³/(d·MPa)； I_s ——油层吸汽指数，无因次； K_h ——油层水平渗透率，D； K_v ——油层垂向渗透率，D； K_{ro} ——油的相对渗透率，无因次； K_{rw} ——水的相对渗透率，无因次； μ_o ——原油黏度，mPa·s； μ_w ——地层水黏度，mPa·s； B_o ——原油体积系数，无因次； B_w ——地层水体积系数，无因次； β ——单位换算系数，无因次，取值为 86.4； A_o ——水平段控制面积，m²； r ——水平段加热半径。

m ; r_w ——水平井筒半径, m; S ——水平井筒表皮因子, 无因次;
 τ_{cd1} ——水平井布置于油层中部时, 蒸汽到达油层顶、底边界的临界时间, s; d ——油层厚度的一半, m; dA ——垂直水平段加热截面积的变化量, m^2 ; dB ——顶、底界面的散热截面积变化量, m^2 ;
 dB_1 , dB_2 ——蒸汽先、后到达边界散热截面积变化量, m^2 ; α ——顶、底边界层的散热系数, W/m^2 ; λ ——顶底边界层的导热系数, $kJ/(h \cdot m \cdot ^\circ C)$; t ——蒸汽的加热时间, s; τ ——蒸汽运移时间, s;
 τ_{cd1} ——第一临界时间(蒸汽最先到达一个界面的时间), s;
 τ_{cd2} ——第二临界时间(蒸汽到达另一个界面的时间), s; H_o ——单位时间内注入水平微元段流体可利用的热量, kW/s ; h_{rw} ——油藏温度下热水的焓, kJ/kg ; h_{sw} ——蒸汽温度下热水的焓, kJ/kg ;
 h_o ——单位质量流体可利用的热量, kJ/kg ; l_v ——单位质量蒸汽的汽化潜热, kJ/kg ; M_R ——油层热容量, $kJ/(m^3 \cdot ^\circ C)$ 。下标:
 i ——第 i 微元段; j ——第 j 微元段

参考文献:

- [1] Marx J W, Langenheim R H. Reservoir heating by hot fluid injection[J]. Trans. AIME, 1959, 216: 312-315.
- [2] Willman B T. Laboratory studies of oil recovery by steam injection[J]. Trans. AIME, 1961, 222: 684-690.
- [3] 刘想平, 张兆顺, 刘翔鹏, 等. 水平井筒内渗流耦合的流动压降计算模型[J]. 西南石油学院学报, 2000, 22(2): 36-40. (LIU Xiang ping, ZHANG Zhao shun, LIU Xiang peng et al. A model to calculate pressure drops of horizontal wellbore variable mass flow coupled with flow in a reservoir[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2000, 22(2): 36-40.)
- [4] 陈月明. 注蒸汽热力采油[M]. 东营: 石油大学出版社, 1996. 64-83. (CHEN Yue ming. Steam injection and thermal production[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 1996. 64-83.)
- [5] 杨德伟, 黄善波, 马东岚, 等. 注蒸汽井筒两相流模型的选择[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1999, 23(2): 44-46. (YANG De wei, HUANG Shan bo, MA Dong lan, et al. Selection of models for two phase flow in the steam injection well[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 1999, 23(2): 44-46.)
- [6] 左向军, 时庚戌, 吴成林. 注蒸汽开发边底水活跃特稠油油藏的措施[J]. 石油勘探与开发, 1996, 23(1): 59-62. (ZUO Xiang jun, SHI Geng xu, WU Cheng lin. Developing viscous oil reservoirs with active edge bottom waters by draining edge water and injecting steam[J]. Petroleum Exploration and Development, 1996, 23(1): 59-62.)
- [7] 刘尚奇, 许心伟, 张锐. 稠油油藏水平井热采应用研究[J]. 石油勘探与开发, 1996, 23(2): 65-69. (LIU Shang qi, XU Xin wei, ZHANG Rui. A simulation study on the application of horizontal wells in heavy oil reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 1996, 23(2): 65-69.)
- [8] 万仁溥, 吴奇, 张琪, 等. 采油技术手册(修订本). 第八分册. 稠油热采工程技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996. 27-76. (WAN Ren pu, WU Qi, ZHANG Qi, et al. Petroleum production engineering handbook [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996. 27-76.)
- [9] 袁恩熙, 许震芳, 王汝元. 工程流体力学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1982. 87-163. (YUAN En xi, XU Zhen fang, WANG Ru yuan. Engineering fluid mechanics [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1982. 87-163.)
- [10] 石国新, 陈振琦, 马鸿. 凤城浅层超稠油油藏水平井注蒸汽开发试验效果分析[J]. 石油勘探与开发, 1997, 24(5): 89-91. (SHI Guo xin, CHEN Zhen qi, MA Hong. Analysis of effects of pilot steamfloods with horizontal wells in shallow ultra viscous oil reservoir, Fengcheng Area [J]. Petroleum Exploration and Development, 1997, 24(5): 89-91.)
- [11] 侯健, 陈月明. 一种改进的蒸汽吞吐产能预测模型[J]. 石油勘探与开发, 1997, 24(3): 53-56. (HOU Jian, CHEN Yue ming. An improved steam soak predictive model[J]. Petroleum Exploration and Development, 1997, 24(3): 53-56.)
- [12] Williams R L, Ramey H J, Brown S C, et al. An engineering economic model for thermal recovery method[A]. SPE 8906, 1980.
- [13] Beggs H D, Brill J P. A study of two phase flow in inclined pipes [J]. JPT, 1973, (5): 607-617.
- [14] 刘尚奇, 包连纯, 马德胜. 辽河油田超稠油油藏开采方式研究[J]. 石油勘探与开发, 1999, 26(4): 80-81. (LIU Shang qi, BAO Lian chun, MA De sheng. The study for the development method of a super heavy reservoir in Liaohe Oil Field [J]. Petroleum Exploration and Development, 1999, 26(4): 80-81.)
- [15] 杨龙, 沈德煌, 王晓冬, 等. 温度对稠油相对渗透率及残余油饱和度的影响[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(2): 97-99. (YANG Long, SHEN De huang, WANG Xiao dong, et al. The effect of temperature on the relative permeability and residual oil saturation [J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(2): 97-99.)

第一作者简介: 倪学锋(1978), 男, 山东威海人, 中国石油大学(北京)博士研究生, 现主要从事稠油热采与数值模拟研究工作。地址: 北京市昌平区, 中国石油大学(北京)油藏数值模拟组, 邮政编码: 102249; 电话: 010 88078570。E-mail: nixuefeng@sinochem.com

收稿日期: 2004-07-19 修回日期: 2005-07-08

(编辑 郭海莉 绘图 李秀贤)

Calculating models for heating area of horizontal wellbore in steam stimulation

NI Xue feng, CHENG Lin song (China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: During the steam stimulation with horizontal wells in heavy oil reservoirs, the heating area of a horizontal wellbore is very important to the productivity evaluation and performance forecast. The steam pressure, temperature and quality are not even along the horizontal wellbore for the horizontal wellbore in the reservoir is much longer than vertical well. Based on the variable mass flow theory, the distributing models of the steam pressure, temperature and quality in the horizontal wellbore are presented by use of the momentum theorem and energy conservation theorem. The calculating models of heating areas along horizontal wellbores are derived according to the fact that horizontal wellbores are different from vertical wellbores in terms of the heating process and mechanism. The heating area in the horizontal wellbore is calculated with the presented models by the geologic parameters of Block Leng 42 in Liaohe Oilfield. The results show that the steam pressure, temperature, quality and heating area are not even along the horizontal wellbore and that the concepts of the first and second critical time reflects the flow performance of steam in the reservoir.

Key words: horizontal wellbore; steam stimulation; pressure distribution; temperature distribution; quality distribution; heating model