

考虑蒸汽热损失的稠油热采 Blasingame 产量递减曲线*

贾永禄¹ 秦 明^{*,1} 聂仁仕¹ 贾金伟² 周兴燕³ 周贤宗¹ 汪洋松¹ 唐成瑞⁴

- (1. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室/西南石油大学, 成都 610500;
2. 中国石油新疆油田分公司勘探开发研究院, 克拉玛依 834000;
3. 中国石油新疆油田分公司采气一厂, 克拉玛依 834000;
4. 西南油气田公司川西北气矿双流采气作业区, 成都 610213)

摘 要:以往 Blasingame 产量递减典型曲线都未考虑热损失对曲线的影响,而在稠油热采过程中蒸汽热损失难以避免,忽略蒸汽热损失明显不符合实际情况。针对稠油热采,建立考虑蒸汽热损失的产量递减分析理论模型。利用拉普拉斯变换、特征函数等现代数学方法对模型进行求解,得到拉普拉斯空间中的井底压力表达式,然后求得定井底压力条件下的产量变化解式。利用数值反演,绘制了考虑热损失的定压生产不稳定流动产量曲线和 Blasingame 产量递减典型曲线。通过分析蒸汽冷凝系数对不稳定流动产量曲线和 Blasingame 产量递减典型曲线的影响发现,蒸汽热损失对稠油产量影响很大,蒸汽热损失越大,产量越小,在实际生产过程中不能忽略蒸汽热损失的影响,否则会产生较大的误差。热油带半径、流度比以及储容比对 Blasingame 产量递减曲线早期阶段也会产生较大的影响,Blasingame 产量递减曲线随各参数的变化而变化。

关键词:稠油;两区复合油藏;热损失;产量递减;Blasingame 典型曲线

中图分类号:TE33 文献标识码:A doi:10.16507/j.issn.1006-6055.2016.02.006

Blasingame Decline-curve Analysis for Heavy-oil Thermal Recovery with Steam-heat Loss*

JIA Yonglu¹ QIN Ming^{*,1} NIE Renshi¹ JIA Jinwei² ZHOU Xingyan³
ZHOU Xianzong¹ WANG Yangsong¹ TANG Chengrui⁴

- (1. State Key Laboratory of Oil-Gas Reservoir Geology & Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500; 2. Research Institute of Exploration and Development, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay 834000; 3. No. 1 Gas Production Plant, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay 834000; 4. Petrochina Southwest Oil & Gas Field Company Northwest Sichuan Gas field Zone Shuangliu Gas Production District, Chengdu 610213)

Abstract: The former Blasingame decline-curve analysis in current literatures neglected the effect of heat loss in heavy-oil thermal recovery (inevitable in field), which is not in accordance with reality. A theoretical model of decline analysis for thermal recovery of heavy oil, accounting for the steam-heat loss, is established. Based on this analytical model, the expression of bottom-hole pressure in Laplace space can be solved with using modern mathematical methods such as Laplace transformation, characteristics, etc., followed by solving the yield expression with fixed bottom-hole pressure. Numerical inversion could allow one plotting production curve of unstable flow at fixed bottom-hole pressure and Blasingame yield decline curve, both of which consider heat loss. After analysing the influence of steam-condensation coefficient on both aforementioned curves, it is shown that steam-heat loss has a significant effect on heavy-oil production, and the larger the steam-heat loss, the lower the oil yield. Therefore, the effect of steam-heat loss on oil production can't be ignored in field development, otherwise, this will lead great error between analytical and actual production. Some other factors, for instance radius for warm oil zone, mobility ratio, and storability, also impose an important impact on the earlier Blasingame decline curve, causing the Blasingame decline curve to change with varying parameters.

Key words: heavy-oil; two region compound reservoir; heat losses; production decline; Blasingame typical curve

2015-08-24 收稿, 2015-10-08 接受, 2016-04-25 网络发表

* 国家自然科学基金青年科学基金(51304164), 四川省科技厅基础研究项目(2015JY0132), 高等学校博士学科点专项科研基金新教师类资助课题(20135121120001)资助

** 通讯作者, E-mail: 474659184@qq.com; Tel: 18349225167

1 引言

获取地层参数的方法主要是试井方法,但是应用试井方法就需要关井测试井底压力,这势必会影

响油井的产量。采用图版拟合法分析日常生产动态数据,即通过产量递减分析方法,可以解决这一问题^[1]。产量递减分析方法主要有以 Arps 方法为代表的经验法、以 Fetkovich 方法为代表的经典分析法、以 Blasingame 方法为代表的现代双对数曲线拟合法等。相对于 Arps 和 Fetkovich 方法假设以定井底流压生产,Blasingame 方法考虑了变井底流压生产情况,通过引入规整化产量和物质平衡时间建立了典型递减曲线图版^[2],利用图版拟合的方法可以计算渗透率 K 、表皮系数 S 、井控半径 r_e 及原始地质储量等参数。

1987 年,Stanislav 等^[3]建立了考虑热损失的稠油热采两区复合油藏有效井径的数学模型,并绘制了试井分析样板曲线。1991 年,Blasingame^[4]绘制了各种压力条件下的 Blasingame 产量递减曲线。2010 年,赵海洋等^[5]针对近井地带与远井地带性质不同的油藏,建立了内区双重、外区均质的复合油藏数学模型并求解,绘制了产量、产量积分和产量积分导数双对数样板曲线,对每个流动阶段的渗流机理和曲线特征进行了分析。2011 年,罗建新等^[6]建立了考虑表皮效应和井筒储集效应的两区线性复合油藏渗流模型,编程绘制了两区线性复合油藏的无因次产能典型曲线,并分析多种参数对曲线形态的影响。2013 年,孙贺东^[2]建立了两区径向复合模型,绘制了 Blasingame 方法典型曲线,分析了 Blasingame 方法典型曲线的特征。2015 年,姚长江^[7]建立了两区复合气藏产量模型,绘制了相应的 Blasingame 产量递减曲线,并介绍了 Blasingame 产量曲线的拟合方法。通过调研发现,目前有关 Blasingame 方法典型曲线的研究都没有考虑蒸汽热损失的影响,而在稠油热采过程中蒸汽热损失是不可避免的,所以在稠油热采过程中考虑蒸汽热损失更加符合实际,忽略蒸汽热损失的影响会产生较大的误差。

针对以上问题,本文绘制了考虑蒸汽热损失的 Blasingame 产量递减典型曲线,建立了考虑蒸汽热损失的两区复合模型,利用现代数学方法对模型进行求解,并结合 Duhamel 褶积定理,以及 Laplace 空间中定产压力解与定压产量解的关系,求得定井底压力条件下的产量变化解式。然后利用数值反演,编程绘制了考虑蒸汽热损失的 Blasingame 产量递减典型曲线,并分析了相关参数对 Blasingame 产量递减典型曲线的影响。

2 渗流模型

在热力采油过程中,当蒸汽注入地层后,随着蒸汽在油藏中的不断扩散,会在注入井周围形成不同的温度区。在距注入井较近的区域内,由于流体的温度相对较高,所以流体的流动性很强。随着远离注入井,由于热损失的作用,温度逐渐降低,相应的流体流度也逐渐减小。因此,对于注蒸汽开采的稠油油藏,不能用均质油藏模型来代表实际油藏,必须采用复合油藏。两区复合油藏物理模型如图 1 所示,模型由两个以注入井为圆心的同心圆组成,内部圆环为热油带,外部圆环为冷油带。热油带和冷油带的流体及油藏性质存在差异,但在每个区的内部温度与油藏性质是均匀的^[8]。

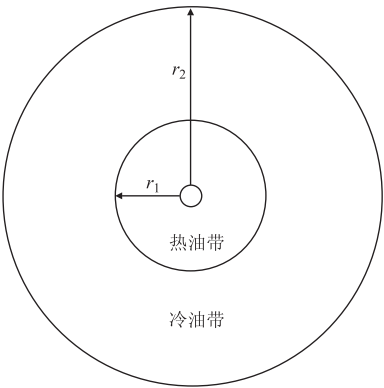


图 1 两区复合油藏模型

2.1 物理模型假设^[9]

- 1) 油层无倾角;
- 2) 流体流动呈层流;
- 3) 两区之间不存在附加压力降;
- 4) 忽略重力作用和毛管力作用。

2.2 数学模型的建立及求解

在热油带内,蒸汽、水和油三相的压缩系数恒定,蒸汽满足气体状态方程。结合物质平衡方程和达西定律,可得蒸汽、水和油三相的压力数学模型。

$$\begin{cases} \frac{S_s C_s \varphi}{3.6 \lambda_s} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\rho_w}{\rho_s} \frac{G}{\lambda_s} + \frac{\varphi}{3.6 \lambda_s} \frac{\partial S_s}{\partial t}, & \text{蒸汽} \end{cases} \quad (1)$$
$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \right) = \begin{cases} \frac{S_w C_w \varphi}{3.6 \lambda_w} \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{G}{\lambda_w} + \frac{\varphi}{3.6 \lambda_w} \frac{\partial S_w}{\partial t}, & \text{水} \end{cases} \quad (2)$$
$$\begin{cases} \frac{S_o C_o \varphi}{3.6 \lambda_o} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\varphi}{3.6 \lambda_o} \frac{\partial S_o}{\partial t}, & \text{油} \end{cases} \quad (3)$$

合并三式可得

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \right) = \frac{C_i \phi}{3.6 \lambda_i} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{(F_p - 1) G}{3.6 \lambda_i} \quad (4)$$

$$G = \frac{2k_h(T_s - T_i)}{\sqrt{24\pi\beta t L_v \rho_w h}}$$

式中, r 为油藏半径, m; p 为地层压力, MPa; S_s 、 S_w 、 S_o 分别是蒸汽相、水相、油相的饱和度, 小数; C_s 、 C_w 、 C_o 、 C_t 分别是蒸汽相、水相、油相以及三相综合压缩系数, MPa⁻¹; ϕ 为孔隙度, 小数; λ_s 、 λ_w 、 λ_o 、 λ_t 分别是蒸汽相、水相、油相以及三相综合流度, μm²/mPa · s; ρ_w 、 ρ_s 分别是水相、蒸汽相的密度, kg/m³; G 为蒸汽冷凝速度, m³/(h · m³); F_ρ 为密度比, 小数; k_h 为热传导率, kJ/(m · d · °C); h 为油层厚度, m; T_s 为蒸汽温度, °C; T_i 为原始地层温度, °C; β 为岩石的热扩散系数, m²/d; L_v 为汽化潜热, kJ/kg。

将有因次数学模型转化为无因次数学模型, 无因次定义为:

无因次压力

$$\begin{cases} p_{D1} = \frac{k_1 h}{1.842 \times 10^{-3} q B \mu_1} (p_i - p_1) \\ p_{D2} = \frac{k_2 h}{1.842 \times 10^{-3} q B \mu_2} (p_i - p_2) ; \\ p_{Dw} = \frac{k_1 h}{1.842 \times 10^{-3} q B \mu_1} (p_i - p_w) \end{cases}$$

无因次时间 $t_D = \frac{3.6 \times 10^{-3} k_1 t}{\varphi_1 C_{t1} \mu_1 r_w^2}$;

无因次半径 $r_D = \frac{r}{r_w}$;

无因次流量 $q_D = q \sqrt{\frac{16.0328 \times \rho_w \varphi_1 C_{t1}}{k_1 r_w^2}}$;

导压系数比 $\omega = \frac{\left(\frac{k_1}{\varphi_1 \mu_1 C_{t1}}\right)}{\left(\frac{k_2}{\varphi_2 \mu_2 C_{t2}}\right)}$;

流度比 $M = \frac{\left(\frac{k_1}{\mu_1}\right)}{\left(\frac{k_2}{\mu_2}\right)}$;

无因次水蒸汽汽化潜热 $H_D = \frac{C_p \Delta T}{0.551 \times \Delta H}$;

蒸汽冷凝常数 $\kappa = 4\pi(\gamma_w - 1) \sqrt{\gamma_r} \frac{H_D}{\sqrt{p_r q_D}}$ 。

式中, p_i 为原始地层压力, MPa; p_1 为热油带压力, MPa; p_2 为冷油带压力, MPa; q 为井底流量, m³/d; k_1 为热油带渗透率, μm²; k_2 为冷油带渗透率, μm²; μ_1

为热油带流体黏度, mPa · s; μ_2 为冷油带流体黏度, mPa · s; B 为流体体积系数, 小数; t 为时间, d; r_w 为井半径, m; C_{t1} 为热油带地层弹性压缩系数, MPa⁻¹; C_{t2} 为冷油带地层弹性压缩系数, MPa⁻¹; ΔH 为水的汽化潜热, kJ/Kg。

无因次化后, 基于 t_D 的 Laplace 变换后模型的渗流方程、内边界条件、封闭边界和两区交界面处条件依次为

$$\begin{cases} \frac{d^2 \bar{p}_{D1}}{dr_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{d \bar{p}_{D1}}{dr_D} = z \bar{p}_{D1} - \kappa \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{z}}, & \text{热油带} \\ \frac{d^2 \bar{p}_{D2}}{dr_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{d \bar{p}_{D2}}{dr_D} = \omega z \bar{p}_{D2}, & \text{冷油带} \end{cases} \tag{5}$$

$$\left. \frac{\partial \bar{p}_{D1}}{\partial r_D} \right|_{r_D=1} = -\frac{1}{z} \tag{6}$$

$$\left. \frac{\partial \bar{p}_{D2}}{\partial r_D} \right|_{r_D=R_{De}} = 0 \tag{7}$$

$$\begin{cases} \bar{p}_{D1}|_{r_D=R_{D1}} = \bar{p}_{D2}|_{r_D=R_{D1}} \\ \left. \frac{d \bar{p}_{D2}}{dr_D} \right|_{r_D=R_{D1}} = M \left. \frac{d \bar{p}_{D1}}{dr_D} \right|_{r_D=R_{D1}} \end{cases} \tag{8}$$

令 $\delta_1 = z$ 、 $\delta_2 = \eta z$, 联立式(5) ~ (8), 可得

$$\bar{p}_{wD} = \frac{\Delta_A I_0(\sqrt{\delta_1}) + \Delta_B K_0(\sqrt{\delta_2})}{\Delta} \tag{9}$$

其中, I_0 、 K_0 是 Bessel 函数, z 是拉什变量,

$$\begin{aligned} \Delta &= (a_{33} a_{44} - a_{34})(a_{11} a_{22} - a_{12}) + (a_{24} - a_{23} a_{44})(a_{11} a_{32} - a_{12}) \\ \Delta_A &= d_1 [a_{22}(a_{33} a_{44} - a_{34}) + a_{32}(a_{24} - a_{23} a_{44})] \\ &\quad + d_3 [a_{12}(a_{23} a_{44} - a_{24} a_{43})] \\ \Delta_B &= d_1 [(a_{34} - a_{33} a_{44}) - (a_{24} - a_{23} a_{44})] - d_3 (a_{23} a_{44} - a_{24}) \\ a_{11} &= 1, a_{12} = -\frac{K_1 \sqrt{\delta_1}}{I_1 \sqrt{\delta_1}}, a_{13} = 0, a_{14} = 0, d_1 = \\ &\quad -\frac{1}{z \sqrt{\delta_1} I_1 \sqrt{\delta_1}}, a_{21} = 1, a_{22} = -\frac{K_1(\sqrt{\delta_1} R_{D1})}{I_1(\sqrt{\delta_1} R_{D1})}, a_{23} = \\ &\quad -\frac{\sqrt{\frac{\delta_2}{\delta_1}} I_1(\sqrt{\delta_2} R_{D1})}{M I_1(\sqrt{\delta_1} R_{D1})}, a_{24} = -\frac{\sqrt{\frac{\delta_2}{\delta_1}} K_1(\sqrt{\delta_2} R_{D1})}{M I_1(\sqrt{\delta_1} R_{D1})}, d_2 = \\ &\quad 0, a_{31} = 1, a_{32} = \frac{K_0(\sqrt{\delta_1} R_{D1})}{I_0(\sqrt{\delta_1} R_{D1})}, a_{33} = -\frac{I_0(\sqrt{\delta_2} R_{D1})}{I_0(\sqrt{\delta_1} R_{D1})}, \\ a_{34} &= -\frac{K_0(\sqrt{\delta_2} R_{D1})}{I_0(\sqrt{\delta_1} R_{D1})}, d_3 = -\frac{\kappa \sqrt{\pi}}{z^{\frac{3}{2}} I_0(\sqrt{\delta_1} R_{D1})}, a_{41} = 0, \end{aligned}$$

$$a_{42} = 0, a_{43} = 1, a_{44} = -\frac{K_1(\sqrt{\delta_2}R_{De})}{I_1(\sqrt{\delta_2}R_{De})}, d_4 = 0$$

3 产量递减分析曲线的绘制

3.1 定压生产下的不稳定流动曲线

根据 Duhamel 褶积定理,在 Laplace 空间中定产压力解与定压产量解存在以下关系:

$$\bar{q}_D(z) = \frac{1}{z^2 \bar{p}_{uD}(z)} \tag{10}$$

将式(9)带入式(10)可得 Laplace 空间下的定压产量解

$$\bar{q}_D(z) = \frac{\Delta}{z^2 (\Delta_A I_o(\sqrt{\delta_1}) + \Delta_B K_o(\sqrt{\delta_2}))} \tag{11}$$

利用式(11)可求得定井底压力条件下的产量变化,然后再利用数值反演即可得到产量递减曲线^[10],如图 2 所示。在考虑蒸汽热损失的情况中,当蒸汽冷凝系数为 0 时,所绘曲线和常规两区模型(即不考虑蒸汽冷凝系数情况)所绘曲线完全重合,如图 2 中实线所示。随着生产时间的推移,油井产量呈明显下降的趋势,当压力波传递到封闭边界以后,由于没有边界能量的补给,产量迅速下降,产量递减曲线形态与均质油藏曲线^[2]形态类似。由所绘图版可以看出蒸汽冷凝系数对产液量有明显的影响,随着蒸汽冷凝系数 κ 的增大,产量曲线明显向下移动,产量下降。这是由于蒸汽冷凝系数越大,热量散失越快,导致稠油温度升高幅度越小,稠油黏度降低幅度减小,所以产量下降^[11]。

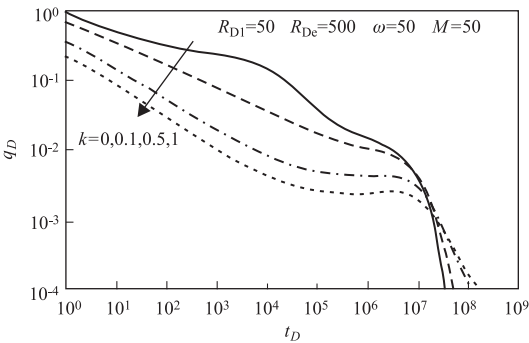


图2 定压生产下的不稳定流动曲线

3.2 Blasingame 方法典型曲线绘制

在 Blasingame 图版中,需要绘制 3 个产量函数与物质平衡时间的曲线,即规整化产量曲线、规整化产量积分曲线和规整化产量积分导数曲线。为了绘制 Blasingame 方法典型曲线,定义新的无因次时间 $t_{Dd} = t_D \alpha$,则式(5)化为

$$\begin{cases} \frac{d^2 \bar{p}_{D1}}{dr_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{d \bar{p}_{D1}}{dr_D} = z \alpha \bar{p}_{D1} - \kappa \sqrt{\alpha} \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{z}} & \text{,热油带} \\ \frac{d^2 \bar{p}_{D2}}{dr_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{d \bar{p}_{D2}}{dr_D} = \omega z \alpha \bar{p}_{D2} & \text{,冷油带} \end{cases} \tag{12}$$

式(12)的解与式(5)的解相同,即

$$\bar{p}_{1D} = \frac{\Delta_A I_o(\sqrt{\delta_1}) + \Delta_B K_o(\sqrt{\delta_2})}{\Delta} = \bar{p}_{uD} \tag{13}$$

其中, $\delta_1 = \alpha z, \delta_2 = \alpha z \omega$ 。

无因次规整化产量为

$$q_{Dd} = \frac{\beta}{L^{-1}[\bar{p}_{uD}]} \tag{14}$$

其中,

$$\begin{aligned} \beta &= \ln R_{D1} - \frac{R_{D1}^2}{2R_{De}^2} - \\ &1 - \frac{R_{D1}^2}{2R_{De}^2} - \omega \left(2 - \frac{R_{D1}^2}{2R_{D2}^2} - \frac{3R_{De}^2}{2R_{D1}^2} + \frac{2R_{De}^2}{R_{D1}^2} \ln \frac{R_{De}}{R_{D1}} \right) \\ &\frac{2 \left[1 + \frac{\omega}{M} \left(\frac{R_{De}^2}{R_{D1}^2} - 1 \right) \right]}{2} \\ \alpha &= \frac{2}{\left[R_{D1}^2 + \frac{\omega}{M} (R_{De}^2 - R_{D1}^2) \right] \beta} \end{aligned}$$

无因次规整化产量积分及其导数分别为

$$q_{Ddi} = \frac{N_{pDd}}{t_{Dd}} = \frac{1}{t_{Dd}} \int_0^{t_{Dd}} q_{Dd}(\tau) d\tau \tag{15}$$

$$\begin{aligned} q_{Ddid} &= -\frac{dq_{Ddi}}{d(\ln t_{Dd})} = -t_{Dd} \frac{dq_{Ddi}}{dt_{Dd}} \\ &= -t_{Dd} \frac{d(N_{pDd}/t_{Dd})}{dt_{Dd}} \end{aligned} \tag{16}$$

根据式(14)~(16),并利用数值反演可做出考虑热损失的稠油热采两区复合 Blasingame 方法典型曲线图版,如图 3~6 所示。

蒸汽冷凝系数 κ 对 Blasingame 典型曲线的影响如图 3 所示。随着蒸汽冷凝系数 κ 的增加,规整化产量曲线几乎没有变化,但是在早期和中期,产量积分曲线及产量积分导数曲线明显上移。从图中可以看出,蒸汽冷凝系数对 Blasingame 典型曲线有较大的影响,在计算产量过程中必须考虑蒸汽热损失的影响。

除蒸汽冷凝系数外,此类型油藏的 Blasingame 典型曲线特征主要取决于热油带半径、流度比和储容比,如图 4~6 所示。可以看出在考虑蒸汽热损失时,热油带半径、流度比对 Blasingame 典型曲线的影响趋势与这些参数对常规两区模型的影响趋势类

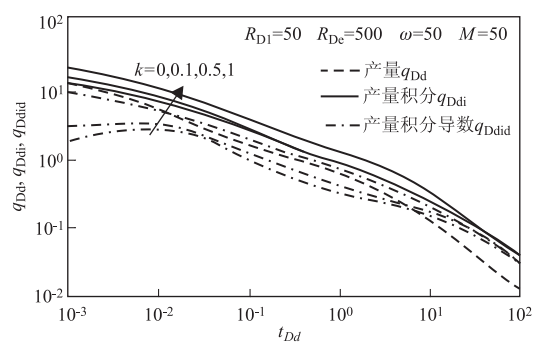


图 3 蒸汽冷凝系数对 Blasingame 典型曲线的影响

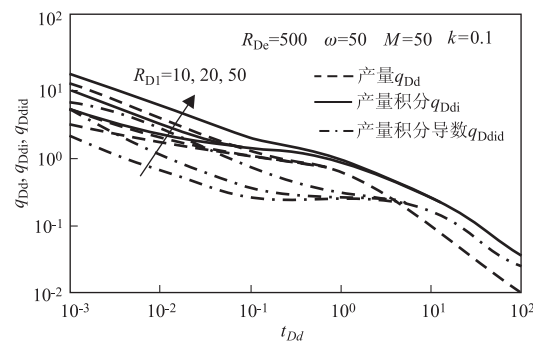


图 4 热油带半径对 Blasingame 典型曲线的影响

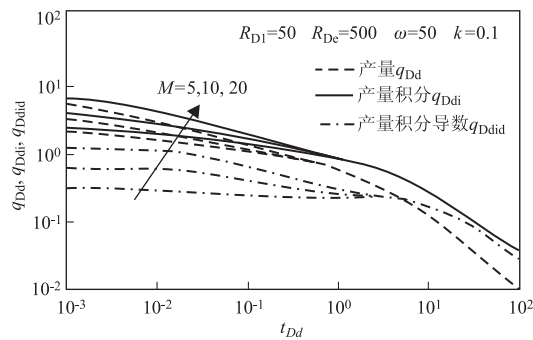


图 5 流度比对 Blasingame 典型曲线的影响

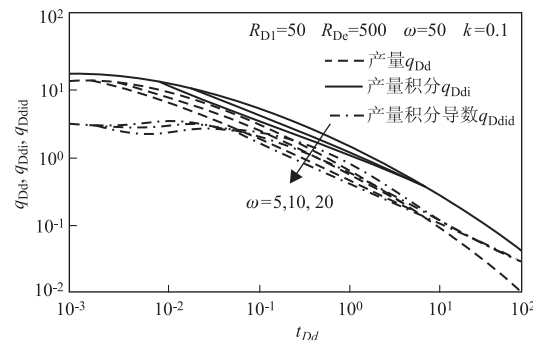


图 6 储容比对 Blasingame 典型曲线的影响

似,在早期和中期,随着热油带半径的增大,曲线向上移动,随着流度比的增大,曲线向上移动,如图 4、5 所示。

曲线随储容比的变化比较复杂,流动初期,曲线随储容比的变化不明显;流动中期,随储容比的增大,曲线越向下移动;流动后期,储容比对流动曲线的影响又很不明显,如图 6 所示。

4 结论

针对稠油热采,建立了考虑蒸汽热损失的产量递减分析模型,得到了考虑蒸汽热损失的定压生产不稳定流动产量曲线和 Blasingame 产量递减曲线,通过对所绘曲线的分析得到以下结论:

- 1)蒸汽热损失对定压生产不稳定流动产量曲线和 Blasingame 产量递减曲线有明显的影 响,蒸汽热损失越大,产量越小。但是蒸汽热损失难以避免,所以在注蒸汽开采稠油中应提高蒸汽的温度和干度,弥补蒸汽损失的热量,提高稠油产量;
- 2)热油区半径和流度比越大,产量越大,在注蒸汽开采稠油过程中应扩大热油区半径和增大流度比。在注蒸汽开采稠油中,提高蒸汽的注入压力可以扩大热油区半径,增大蒸汽温度可以增大流度比;
- 3)蒸汽冷凝系数、热油区半径以及流度比都影响 Blasingame 产量递减曲线的早期阶段,储容比会对 Blasingame 产量递减曲线的中期阶段产生影响,

产量递减曲线的后期阶段主要受边界条件的影响,边界条件不变的情况下曲线后期没有变化。

参考文献

[1] 刘晓华,邹春梅,姜艳东,等. 现代产量递减分析基本原理与应用 [J]. 天然气工业,2010,30(5):50-54.

[2] 孙贺东,油气井现代产量递减分析方法及应用 [M]. 北京:石油工业出版社,2013.

[3] STANISLAV J F, EASWARAN C V, KOKAL S L. Interpretation of thermal well falloff testing [J]. SPE Formation Evaluation, 1989, 4 (2):181-186.

[4] BLASINGAME T A, MCCRAY T L, LEE W J. Decline curve analysis for variable pressure drop/variable flowrate systems [C]//SPE Gas Technology Symposium. Society of Petroleum Engineers, 1991.

[5] 赵海洋,贾永禄,王东权. 双重-均质复合油藏产量递减模型研究 [J]. 新疆石油地质,2010(1):63-65.

[6] 罗建新,张烈辉,赖南君,等. 两区线性复合油藏产能典型理论曲线分析 [J]. 深圳大学学报:理工版,2011,28(5):384-388.

[7] 姚长江. 复合气藏 Blasingame 产量递减曲线分析方法研究与应用 [J]. 中外能源,2015,20(7):55-58.

[8] 刘永良,贾永禄,霍进,等. 考虑热损失的稠油热采两区复合试井模型 [J]. 油气井测试,2004,13(5):6-8.

[9] 贾永禄. 外边界定压试井分析有效井径模型及其样板曲线 [J]. 西南石油大学学报(自然科学版),1993,15(4):51-57.

[10] 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.

[11] 刘永良,贾永禄,康毅力,等. 考虑热损失的稠油热采三区复合油藏试井模型 [J]. 大庆石油地质与开发,2008,27(1):78-82.