

文章编号:1005-8907(2008)03-071-04

直井与水平井组合的蒸汽辅助重力泄油产量预测

郭二鹏 刘尚奇 王晓春 高永荣

(中国石油勘探开发研究院,北京 100083)

摘 要 蒸汽辅助重力泄油(SAGD)是一种利用液体自身重力作为主要驱动力的热采方式。国外的 SAGD 先导实验,大多数是利用双水平井的组合方式进行,注入井和采出井都是水平井,而在辽河油田进行的先导实验,是利用直井作为注入井、水平井作为生产井的组合方式。针对辽河油田先导实验的注采方式,利用保角变换,将水平井转化为像平面上一口环形生产井的一部分;垂直注汽井变成像平面上的原点。对直井与水平井组合的 SAGD 井组,按照直井划定流动单元,分别计算叠加,可以得到水平井的产量,提供了直井和水平井组合的重力泄油产量预测方法。依据辽河油田杜 84 块 SAGD 先导实验区实际生产数据,利用文中提供的方法进行计算,预测的产量结果与油田实际数据非常吻合,证明文中推导的直井与水平井组合的 SAGD 预测方法是可靠的。

关键词 SAGD 直井与水平井组合 产量预测方法 应用对比

中图分类号:TE328

文献标识码:A

Method of production forecast for SAGD with combination of vertical and horizontal wells

Guo Erpeng(Research Institute of Exploration and Development, CNPC, Beijing 100083, China), Liu Shangqi, Wang Xiaochun, et al.

SAGD(Steam-Assisted Gravity Drainage) is a thermal recovery method that produces only through liquid gravity. The pilot tests are mainly based on dual horizontal well abroad, or injector and producer are all horizontal wells. In Liaohe Oilfield, a pilot test with vertical injector and horizontal producer is on this way. According to the actual conditions in Liaohe Oilfield, the injector and producer are transformed through conformal mapping so that it can be analyzed through mathematical approach. With gravity drainage theory, the steam chamber is analyzed and the production of every horizontal section controlled by one vertical injector can be derived. The result is perfectly coinciding to the production data of SAGD pilot test in Block Du84, and this indicates that the prediction method is dependable in the paper.

Key words: SAGD, combination of vertical and horizontal wells, production prediction, application correlation.

蒸汽辅助重力泄油(SAGD)技术是开发超稠油油藏较为有效的技术。这种技术已经在辽河油田曙一区杜 84 块馆陶组油层进行了现场试验,取得了较好的开发效果^[1-3]。

国外油田大部分采取双水平井 SAGD 方式。针对这种布井方式,SAGD 的创始人 Butler 已经给出了产量预测的解析解^[4]。对于辽河油田来说,由于早期大多采取直井蒸汽吞吐开发方式,直井井网比较完善,所以采用直井与水平井组合 SAGD 方式。然而就该油田曙一区杜 84 块馆陶组油层而言^[3],由于其厚度比较大,在蒸汽腔没有扩展到油藏的顶部时井组已经进入稳产阶段,所以 Butler 的双水平井产量预测公式并不适用于直井水平井组合的产量预测。为此,在 Butler 重力泄油理论的基础上,对直井水平井组合的重力泄油过程进行分析,得出了直井水平井的产量预测公式,取得了比较好的预测结果。

1 先导试验区简介

曙一区杜 84 块构造位于辽河盆地西部凹陷西斜坡的中段,位于盘锦市西部 30 km 处,是辽河超稠油生产的主力区块之一。其探明含油面积 1.92 km²,地质储量 2 626 × 10⁴ t。杜 84 块馆陶组油层构造形态单一,馆陶组油层顶面为北西向抬起的单斜构造,倾角 2°~3°。底面亦呈南东倾斜的单斜构造,与下伏地层呈不整合接触。

馆陶组油层埋深浅,顶部埋深 530 ~ 640 m,平均油层厚度 106 m。20 °C 状态下原油密度平均为 1.008

收稿日期:2007-09-26;改回日期:2008-01-22。

作者简介:郭二鹏,男,1983 年生,在读硕士研究生,2005 年毕业于中国石油大学(华东),主要研究方向为热力采油和油藏工程。电话:(010)62098247,E-mail:guoerpeng@petrochina.com.cn。

$g \cdot cm^{-3}$, 50℃时原油黏度为 229 ~ 302 Pa·s, 属超稠油; 油藏原始温度为 28 ~ 32℃, 原始压力为 6.14 MPa。储层砂体为冲击平原相沉积, 岩性疏松, 平均孔隙度为 36.1%, 平均渗透率为 $5\,540 \times 10^{-3} \mu m^2$, 属于高孔、高渗储层。油层内部无纯泥岩隔夹层, 油层与顶、底水直接接触, 尤其是顶水普遍存在, 底水局部发育, 给开发造成较大困难。

SAGD 试验区内有 4 个井组, 采用直井与水平井组合布井方式, 部署水平井 4 口。试验区内直井于 2000 年陆续投产, 水平井 2003 年投产, 2005 年 2 月 24 日陆续转入 SAGD 生产。试验区共有各类井 43 口, 其中直井 39 口, 水平井 4 口。转 SAGD 前累积吞吐 295 轮次, 平均单井吞吐 6.9 轮次, 蒸汽吞吐阶段累积注汽量 $41.06 \times 10^4 m^3$, 累积产油量 $31.21 \times 10^4 t$, 累积产水量 $38.89 \times 10^4 m^3$, 累积油汽比 0.76, 累积回采水率 95%, 累积注采比 1.71, 采出程度 12.53%。

随着吞吐周期的增加, 周期油汽比降低、地层压力下降, 开采效果逐渐变差。为进一步提高原油采收率、增加可采储量, 于 2005 年 2 月开始实施 SAGD 开发。

2 布井方式

辽河油田杜 84 块先导实验区的注入井和采出井的布井方式是在两排直井之间设置一口水平井, 通过两侧的几口直井注汽, 中间的水平井生产^[3]。

直井井距 70 m, 水平井长 350 m。为了保证井底蒸汽干度, 单井注入量不能低于 $100 m^3 \cdot d^{-1}$ 。实际操作中, 采用注汽井轮注方式注汽(注汽井轮换)。这样, 每口直井就都可以控制一段水平井长度。可以研究一个单元, 将其放在坐标系中, 就能得到图 1。

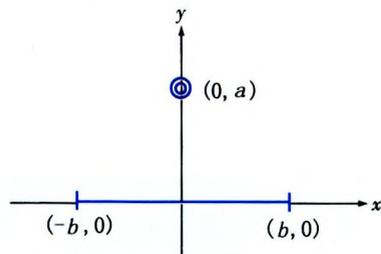


图 1 研究单元示意

3 理论引导

3.1 数学模型的建立与分析

垂直注汽井点坐标为 $(0, a)$, 水平井位于 x 轴上 $(-b, b)$ 区间, 对整个坐标系进行保角变换:

$$\xi = (z - ia)/(z + ia) \quad (1)$$

将 $z = ia$ 代入式(1)中, 可得

$$\xi = 0 \quad (2)$$

即 z 平面上位于 y 轴的垂直注汽井映射到 ξ 平面上为坐标原点。将 $z = x$ 代入式(1)得

$$\xi = \frac{x - ia}{x + ia} = \frac{\sqrt{x^2 + a^2} e^{-i \arctan \frac{a}{x}}}{\sqrt{x^2 + a^2} e^{i \arctan \frac{a}{x}}} = e^{-2i \arctan \frac{a}{x}} \quad (3)$$

这样 z 平面上的 x 轴就转换为 ξ 平面上以坐标原点为圆心的单位圆。位于 x 轴的水平井即为单位圆的一部分。

考虑在环形水平生产井和中心处一口注汽井的生产过程(见图 2), 在吞吐阶段, 由于蒸汽的超覆作用, 直注汽井附近的蒸汽优先纵向向上发育^[4]。

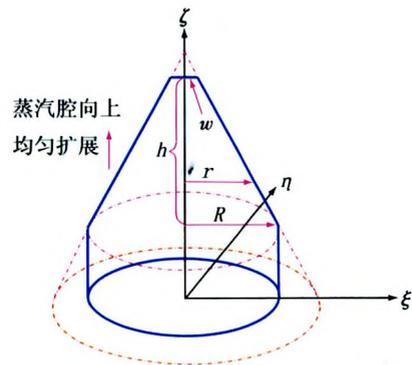


图 2 简化后的蒸汽腔形状示意

由于生产井同时也进行吞吐作业, 生产井附近压力比较低, 因此环形生产井对蒸汽腔也有一定的拖曳作用。因此, 蒸汽腔在靠近底部的区域发育也较好。刚刚进入连通状态时, 近似假设连通后的蒸汽腔的形状为锥形, 在直井处蒸汽腔高度最高。在生产井处为锥形蒸汽腔的底部边缘。形成连通后, 锥形蒸汽腔均匀向上扩展。

图 2 中实线部分是有效区域, 位于该区域内的原油泄流到水平井筒附近, 而底部虚线部分的原油被驱替到水平井的另一侧, 是无效区域。由于蒸汽腔的压力高于生产井的井底流压, 故该部分的原油不会流到井筒中。虚线部分包围的垂直于蒸汽腔底面的实线是虚拟的蒸汽腔边缘, 在相邻的两个蒸汽腔连通后, 该边界并不真实存在。顶部的虚线区域是因为蒸汽腔发育过程中受到周边油藏的冷却, 顶部趋于平缓, 用图中水平实线段近似表示(半径为 w)。这样就可对蒸汽腔壁上的任意一点进行分析(见图 3)^[5]。

假设蒸汽腔里面的压力是均匀分布的, 也就是说由于蒸汽密度和运动引起的压力梯度是可以忽略的。

在任意一点处, 由于蒸汽腔的压力高于油藏压力, 所以原油不会垂直向下泄流, 而只能依附在冷的油藏表面, 沿蒸汽腔壁受重力作用向下泄流。对厚度为 $d\varepsilon$ 的油藏薄片可以根据达西定律给出其泄油速率^[6]:

$$dq = \frac{2\pi r k \rho_o g \sin \theta}{\mu} d\varepsilon \quad (4)$$

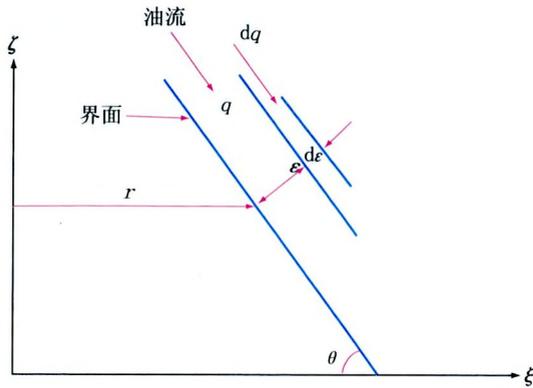


图3 蒸汽腔壁上的任意一点原油的流动示意

3.2 蒸汽腔界面处的热传导过程

蒸汽腔界面向前推进时, 界面前累积的热量保持为恒定值。在这种条件下, 由于界面向前推进, 向前传导的热量就等于界面温度升高的累积热量^[6]。对于图中所示平面来说, 温度为 T , 推进速度为 v , 蒸汽腔壁面前的热量变化值即为

$$Q_v = v\rho C(T - T_R) \quad (5)$$

蒸汽腔向油藏传导的热量为

$$Q_c = -\lambda \frac{dT}{d\varepsilon} \quad (6)$$

令 $\alpha = \lambda/\rho C$, 可得

$$d\varepsilon = -\frac{\alpha}{v} \frac{dT}{T - T_R} \quad (7)$$

将式(7)代入式(4)中

$$dq = \frac{2\pi r k \rho_o g \sin \theta}{\mu} \left(-\frac{\alpha}{v} \cdot \frac{dT}{T - T_R} \right) \quad (8)$$

3.3 蒸汽腔温度下原油黏度对产量的影响

黏度和温度的指数关系可以描述为^[6]

$$\frac{\mu_o}{\mu} = \left(\frac{T - T_R}{T_o - T_R} \right)^m \quad (9)$$

将式(9)代入式(8), 并积分, 得

$$q = - \int_{T_o}^{T_R} \frac{2\pi r k \rho_o g \alpha \sin \theta}{\mu_o v} \left(\frac{T - T_R}{T_o - T_R} \right)^m \frac{dT}{(T - T_R)} = \frac{2\pi r k \rho_o g \alpha \sin \theta}{m \mu_o v} \quad (10)$$

3.4 蒸汽腔的稳态推进

界面的推进速度 v 可以由界面微元的移动情况推出, 由分析可以得知^[7]:

$$v = \left(\frac{\partial r}{\partial t} \right)_y \sin \theta \quad (11)$$

对于蒸汽腔界面上某微元的物质平衡进行分析(见图4), 可以得到物质平衡式为^[8]

$$-\left(\frac{\partial q}{\partial t} \right)_y dy dt = 2\pi r \phi \Delta S_o \left(\frac{\partial r}{\partial t} \right)_y dy dt \quad (12)$$

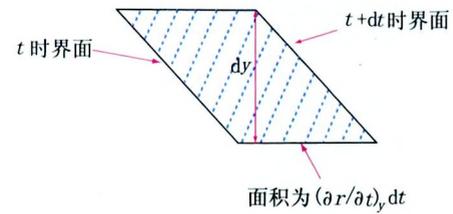


图4 界面薄片物质平衡示意

将式(11)和式(12)代入式(10):

$$q = \frac{4\pi^2 r^2 k g \alpha \phi \Delta S_o}{m \mu_o} \frac{dy}{dq} \quad (13)$$

此处的 y 为蒸汽腔垂直高度。在锥体内, 有关系

$$dy = dr \tan \theta \quad (14)$$

所以, 把式(14)代入式(13)可得:

$$\int_0^q q dq = \frac{4\pi^2 \tan \theta k \rho_o g \alpha \phi \Delta S_o}{m \mu_o} \int_w^R r^2 dr \quad (15)$$

$$\text{即 } q = 2\pi \sqrt{R^2 + w^2} - R w \sqrt{\frac{2k \rho_o g \alpha \phi \Delta S_o h}{3m \mu_o}} \quad (16)$$

这是在 ξ 平面上的圆环水平井产量, 与 z 平面上的无限长水平井对应。

3.5 z 平面水平井产量的反演与近似表达

由于水平井位于 x 轴上一个区间, 每个直井控制的水平段长度为 L_i , 现在假设直井井点位于 L_i 中间某点处, 左侧水平段长度为 L_l , 右侧水平段长度为 L_r , 所以其对应的单位圆上的角度为

$$\psi_i = \psi_l - \psi_r = \left| -2\arctan \frac{a}{-b} + 2\arctan \frac{a}{b} \right| \quad (17)$$

将式(17)代入式(16)并取近似值, 可以预测水平井产量为

$$q = (R - w) \psi_i \sqrt{\frac{2k g \alpha \phi \Delta S_o h}{3m \mu_o}} \quad (18)$$

根据 z 平面和 ξ 平面上的半径关系可以得知^[4]:

$$r_\xi = \left| \frac{d\xi}{dz} \right|_{z=ia} \cdot R_z = \left| \frac{(z + ia) - (z - ia)}{(z + ia)^2} \right|_{z=ia} \cdot R_z = \frac{R_z}{2a} \quad (19)$$

单位圆半径为1,所以 $r_{\text{e}}=1$ 。同时由于蒸汽腔半径为水平井和直井之间的距离,它在变换中只是伸缩一定的倍数,所以,在转换后得出的产量公式中直接代入乘以一个系数 $2a$ 即可得出实际的水平井产量。

考虑多口直井的效果,式(18)可以写为

$$q = 2(a-c) \sum_{i=1}^n \psi_i \sqrt{\frac{2k\rho_o g \alpha \phi \Delta S_o h}{3m\mu_o}} \quad (20)$$

转换为油田实际单位,并将一些常量数值代入:

$$q = 0.04752(a-c) \sum_{i=1}^n \psi_i \sqrt{\frac{k\rho_o \alpha \phi \Delta S_o h}{m\mu_o}} \quad (21)$$

4 实例

利用本文推导的直井与水平井组合SAGD预测公式,对杜84块的试验泄油水平井的泄油速度进行了计算,并与实际数据进行了对比。

代入杜84块SAGD的操作数据为

$$q = 0.04752 \times 24.68 \times (35-5) \times \sqrt{\frac{0.04648 \times 5540 \times 0.4 \times 0.36 \times 0.90 \times 0.50 \times 50}{4.33 \times 14.21}} = 0.001583 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

所以,产量 $Q = 86400 \times q = 136.7 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。

目前,最早转入SAGD的2口水平井平均单井产量为 $120 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ 。考虑到实际生产中受各种因素的影响,产量可能会低于理论预测值。因此,预测公式与实际数据非常吻合,可以用来进行直井与水平井组合SAGD的产量预测,节省计算时间和工作量。

5 结论

用Butler重力泄油理论为基础,在杜84块SAGD先导实验操作条件下,推导出了适合直井与水平井组合的产量预测公式。研究表明,直井和水平井的距离对产量有较大影响。将杜84块先导实验操作数据代入进行验算,所得结果比较精确。

6 符号说明

a 为直井到水平井距离,m; b 为直井控制的宽度之半,m; c 为实际的蒸汽腔顶部平缓区域半径,m; θ 为锥形蒸汽腔的底角; R 为蒸汽腔底部的蒸汽腔半径,m; r 为蒸汽腔任意的半径,m; h 为蒸汽腔连通时的蒸

汽腔高度,即刚进入稳产期时的蒸汽腔测试高度,这也是重力泄油的有效高度,m; w 为转换后的蒸汽腔顶部的平缓区域半径,m; q 为原油的体积流量, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; ε 为界面的垂直距离,m; k 为油藏渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; g 为重力加速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$; μ 为汽腔温度下原油黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; ρ_o 为原油密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; λ 为油藏的热传导速率, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$; ρ_c 为单位物质的体积热容量, $\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{C}^{-1}$; α 为油藏热扩散系数, $\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$; ψ_i 为直井控制水平段对应的角度, $^\circ$; ψ_l 为直井井点左侧的水平段对应角度, $^\circ$; ψ_r 为直井井点右侧的水平段对应角度, $^\circ$; T_R 为油藏原始温度, $^\circ\text{C}$; μ_o 为原油测试黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; T_o 为原油测试黏度对应的温度, $^\circ\text{C}$; m 为黏度指数,由黏温曲线回归得出; v 为蒸汽腔与油藏界面推进速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; t 为时间积分变量,s; ΔS_o 为饱和度变化值,为原始含油饱和度与蒸汽腔内残余油饱和度之差; Q_v 为蒸汽腔面前的热量变化值,J; Q_c 为蒸汽腔向油藏传导的热量,J。

参 考 文 献

- [1] Liu Shangqi, Gao Yongrong, Liu Shuan gmao. Efficient technology following cyclic steam stimulation for thick massive heavy-oil reservoirs [A]. SPE International Oil and Gas Conference and Exhibition in China. SPE 104405, 2006.
- [2] Gao Yongrong, Liu Shangqi, Zhang Yitang. Implementing steam assisted gravity drainage through combination of vertical and horizontal wells in a super-heavy crude reservoir with top-water [A]. SPE Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition, Melbourne Australia. SPE 77798, 2003.
- [3] Yang Liqiang, Zhou Dasheng, Sun Yuhuan. Steam assisted gravity drainage as follow-up to cyclic steam stimulation in a medium deep and extraheavy oil reservoir [A]. SPE International Oil and Gas Conference and Exhibition in China, SPE 104406, 2006.
- [4] 刘尚奇,王晓春. 蒸汽超覆对块状超稠油油藏残余油分布影响研究[J]. 特种油气藏, 2005, 12(1): 29-32.
- [5] Butler R M. 重油和沥青的热力开采工艺[M]. 王秉章,译. 北京:石油工业出版社, 1994: 217-218.
- [6] Butler R M. Horizontal wells for the recovery of oil, gas and bitumen [M]. Calgary, Canada: The Petroleum Society of CIM, 1994: 171-174.
- [7] Butler R M. Steam assisted gravity drainage: concept, development, performance and future[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 1994, 33(2): 44-50.
- [8] Butler R M. Gravity drainage to horizontal wells[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 1992, 31(4): 31-37.

(编辑 刘 丽)