

文章编号: 1000-0747(2019)02-0000-08 DOI: 10.11698/PED.2019.02.00

双水平井蒸汽辅助重力泄油蒸汽腔扩展速度 计算模型及其应用

周游^{1,2}, 鹿腾³, 武守亚³, 石兰香^{1,2}, 杜宣^{1,2}, 王峻岭⁴

(1. 提高采收率国家重点实验室, 北京 100083; 2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 3. 中国石油大学(华东), 山东青岛 266555; 4. 中国石油长城钻探工程公司, 北京 100101)

基金项目: 国家科技重大专项“改善 SAGD 开发效果技术研究与应用”(2016ZX05012-002)

摘要: 蒸汽腔发育扩展是蒸汽辅助重力泄油(SAGD)开发成败的重要特征, 蒸汽腔扩展速度是评价蒸汽腔发育扩展情况的关键指标。以 SAGD 技术理论与传热学原理为基础, 提出观察井温度法和蒸汽腔边缘法 2 种计算模型计算蒸汽腔水平扩展速度; 根据新疆风城超稠油 SAGD 典型区块生产监测数据和数值模型计算结果, 明确了不同阶段蒸汽腔发育形态和观察井的温度变化规律; 利用观察井温度数据进行了蒸汽腔扩展速度分析, 并采用不同时间蒸汽腔的扩展速度预测了蒸汽腔边缘泄油带温度分布和 SAGD 产量。研究表明, 观察井测温曲线高温带的温度函数与测深呈线性关系, 该特征段可用于计算泄油界面倾斜角、蒸汽腔扩展边缘和蒸汽腔扩展速度等关键参数, 经实际生产数据验证, 观察井温度法和蒸汽腔边缘法 2 种模型计算蒸汽腔扩展速度结果可靠, 可为 SAGD 的高效开发提供理论支持。图 10 表 3 参 8

关键词: 蒸汽辅助重力泄油; 观察井温度; 蒸汽腔边缘; 蒸汽腔扩展速度; 泄油带; 蒸汽辅助重力泄油产量

中图分类号: TE341 文献标识码: A

Models of steam-assisted gravity drainage (SAGD) steam chamber development velocity in double horizontal wells and its application

ZHOU You^{1,2}, LU Teng³, WU Shouya³, SHI Lanxiang^{1,2}, DU Xuan^{1,2}, WANG Junling⁴

(1. State Key Laboratory of Enhanced Oil Recovery, Beijing 100083, China; 2. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China; 3. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266555, China; 4. CNPC Great Wall Drilling Company, Beijing 100101, China)

Abstract: The development of steam chamber can be used to evaluate steam-assisted gravity drainage (SAGD) performance. The velocity of steam chamber expanding is the key parameter for evaluating the development of steam chamber. Based on SAGD technology theory and heat transfer theory, two calculation model methods- observation well temperature method and steam chamber edge method for estimating the horizontal expanding velocity of steam chamber were presented. Through analyzing the monitoring data and numerical simulation results of a typical super heavy oil block developed by SAGD in Fengcheng oilfield in the Xinjiang, NW China, the development patterns of steam chamber and temperature variation law in the observation well at different stages are determined. The observed temperature data was used to calculate steam chamber expanding velocity. The calculated chamber velocity at different time was applied to predict the temperature distribution of oil drainage zone at the edge of steam chamber and SAGD oil rate. The results indicate that temperature function of high temperature zone in the observation well temperature curve has a linear relationship with measuring depth. The characteristic section can be used to calculate key parameters such as the angle of the drainage interface, expanding edge and velocity of steam chamber. The field production data verify that the results of the two proposed methods of steam chamber growth are reliable and practical, which can provide theoretical support for the efficient development of SAGD.

Key words: steam-assisted gravity drainage; observation well temperature; steam chamber edge; steam chamber expanding velocity; oil drainage zone; SAGD oil rate

引用: 周游, 鹿腾, 武守亚, 等. 双水平井蒸汽辅助重力泄油蒸汽腔扩展速度计算模型及其应用[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(2): 1-8.

ZHOU You, LU Teng, WU Shouya, et al. Models of steam-assisted gravity drainage (SAGD) steam chamber development velocity in double horizontal wells and its application [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(2): 1-8.

0 引言

自 2001 年加拿大首个商业化蒸汽辅助重力泄油 (SAGD) 项目 Foster Creek 运行以来, 先后有 30 多个 SAGD 商业化项目在加拿大不同地区实施^[1-4]。2005 年始, 国内辽河与新疆油田 SAGD 试验先后取得成功, 并快速进入到商业化应用阶段, 目前已形成一套成熟的工业化开采技术体系。SAGD 技术是以蒸汽作为加热介质, 依靠原油的重力作用进行开发的稠油热采技术^[5-7]。在 SAGD 开采稠油油藏过程中, 从上部水平井中注入蒸汽经扩展形成蒸汽腔, 在蒸汽腔边界上蒸汽冷凝释放汽化潜热, 将热量传递给周围的稠油和地层, 冷凝水和热原油在泄油带上受重力作用向下流动至下部生产井并产出, 蒸汽腔边界周围原油不断被泄流产出, 蒸汽腔边界得以向外扩展^[8-14]。蒸汽腔的形状及扩展速度等关键参数的研究, 对预测 SAGD 蒸汽腔边界、评价开发效果和指导生产均具有重要意义。

目前研究蒸汽腔扩展主要有数值模拟法、微四维地震法和观察井分析法。热采数值模拟方法受限于计算模型的网格数量, SAGD 几十万节点的 FlexWell 数值模型计算往往耗时较大。四维地震虽垂向解释精度一般较低, 但蒸汽腔平面扩展形态解释相对较为准确, 因每次监测间隔超过 1 年, 限制了该方法的推广应用。通过观察井内置热电偶可实时反映蒸汽腔的扩展情况, 成为现场人员判断蒸汽腔发育情况的主要信息来源, 国内外 Mazdairani 等^[15]、范杰等^[16]、陈雄等^[17]基于热传导理论建立了 SAGD 蒸汽腔前缘温度模型, 但计算所需的蒸汽腔扩展速度参数未给出合适的计算方法。本文利用观察井温度监测曲线, 基于 SAGD 技术理论与传热学原理, 提出 2 种蒸汽腔水平扩展速度计算模型, 并建立计算方法: 观察井温度法和蒸汽腔边缘法, 实现蒸汽腔泄油带温度分布和 SAGD 产量的预测。

1 蒸汽腔扩展速度

1.1 基本假设

SAGD 蒸汽腔扩展可划分为蒸汽腔上升阶段 (泄油初期)、蒸汽腔横向扩展阶段 (泄油高峰期)、蒸汽腔下降阶段 (蒸汽腔扩展到油藏侧边界或井组控制边界, 泄油末期) 3 个阶段^[4,8-11] (见图 1)。

在蒸汽腔沿油层顶部向外横向扩展阶段, 为便于研究蒸汽腔扩展速度, 做以下假设: ①汽腔已达油藏顶层, 向两侧扩展; ②考虑蒸汽腔前缘法线方向的一维扩展过程; ③传热方向仅为垂直于蒸汽腔外缘的方

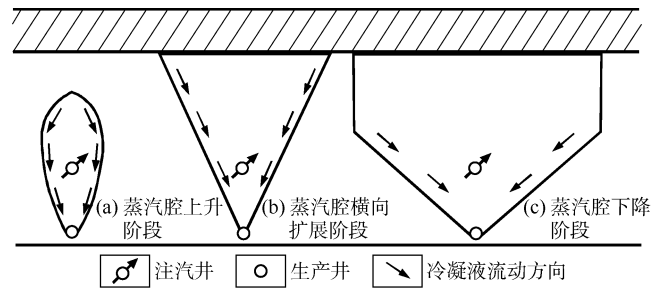


图 1 蒸汽腔扩展示意图

向, 即一维传热过程; ④蒸汽与冷油之间以平板前缘和恒定速度推进; ⑤只考虑垂直于蒸汽腔外缘方向的热传导, 不考虑热对流; ⑥在一定时刻系统处于准稳态过程, 即蒸汽腔沿边缘法线方向以固定速度推进; ⑦忽略稠油流动过程中的热损失; ⑧导热系数、油层热容不随温度变化。基于该假设条件, 蒸汽腔前缘可简化为如图 2 所示, 据简化蒸汽腔扩展原理图, 可求得蒸汽腔前缘泄油带的温度分布。

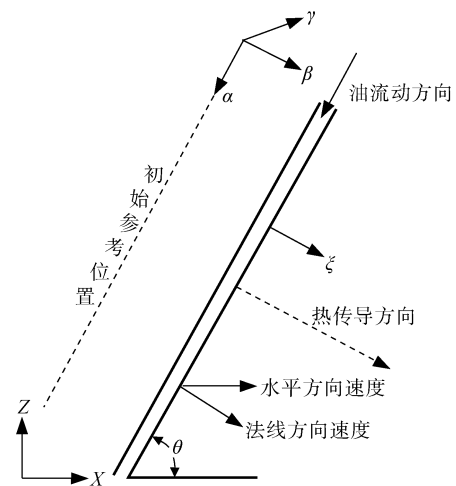


图 2 蒸汽腔扩展原理图

1.2 蒸汽腔边缘温度分布函数

SAGD 蒸汽腔前缘界面传热过程为拟稳态过程, 基本热传导微分方程可表示为^[13]:

$$\left[\frac{\partial}{\partial \alpha} \left(K \frac{\partial T}{\partial \alpha} \right) + \frac{\partial}{\partial \beta} \left(K \frac{\partial T}{\partial \beta} \right) + \frac{\partial}{\partial \gamma} \left(K \frac{\partial T}{\partial \gamma} \right) \right] = \rho C \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) \quad (1)$$

α 表示蒸汽腔界面切线方向, β 表示蒸汽腔界面法线方向, γ 为平行水平井轴方向。因为在 α 方向与 γ 方向温度为定值, (1) 式可简化为:

$$K \frac{\partial^2 T}{\partial \beta^2} = \rho C \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) \quad (2)$$

为简化求解过程, 引入变量 ξ (表观距离), 按假

设条件，某段时间蒸汽腔扩展速度 U_ξ 为定值，即：

$$\xi = \beta - \int_0^t U_\xi dt = \beta - U_\xi t \quad (3)$$

(2) 式中的偏微分由 代替得：

$$\frac{\partial^2 T}{\partial \beta^2} = \frac{\partial^2 T}{\partial \xi^2} \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -U_\xi \frac{\partial T}{\partial \xi} \quad (5)$$

将(4)与(5)式代入(2)式可得：

$$K \frac{\partial^2 T}{\partial \xi^2} + U_\xi \rho C \left(\frac{\partial T}{\partial \xi} \right) = 0 \quad (6)$$

由(6)式以及边界条件：

$$\begin{cases} T(\infty) = T_r \\ T(0) = T_s \end{cases} \quad (7)$$

可以求解出蒸汽腔边缘温度分布函数：

$$\xi = \frac{K}{U_\xi \rho C} \ln \frac{T_s - T_r}{T - T_r} \quad (8)$$

1.3 蒸汽腔扩展速度

由(8)式可知，在已知观察井位置、蒸汽腔温度、油藏温度条件下，可反求蒸汽腔扩展速度。在同一监测井下，可分别测得高温段两处不同深度下的温度，如图3所示。

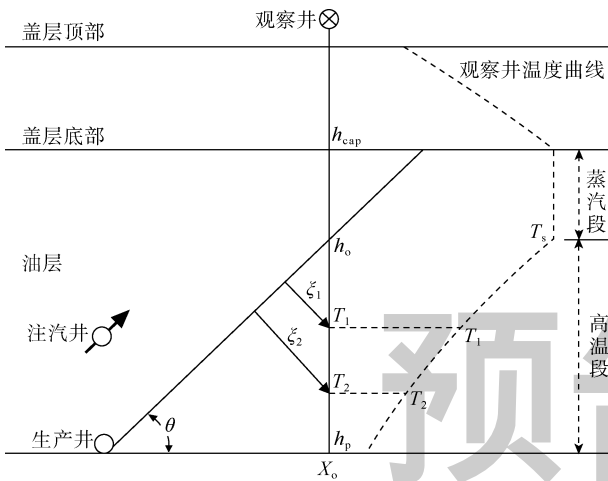


图3 观察井温度监测示意图

在同一时刻 2 个深度处距泄油界面距离与温度的关系为：

$$\begin{cases} \xi_1 = \frac{K}{U_\xi \rho C} \ln \frac{T_s - T_r}{T_1 - T_r} \\ \xi_2 = \frac{K}{U_\xi \rho C} \ln \frac{T_s - T_r}{T_2 - T_r} \end{cases} \quad (9)$$

其中 ξ 可表示为深度的函数：

$$\begin{cases} \xi_1 = (h_1 - h_o) \cos \theta \\ \xi_2 = (h_2 - h_o) \cos \theta \end{cases} \quad (10)$$

将 ξ_2 减去 ξ_1 ，并综合(9)式、(10)式化简得：

$$(h_2 - h_1) \cos \theta = \frac{K}{U_\xi \rho C} \ln \frac{T_1 - T_r}{T_2 - T_r} \quad (11)$$

将(11)式改写为：

$$U_\xi = \frac{K}{\rho C (h_2 - h_1) \cos \theta} \ln \frac{T_1 - T_r}{T_2 - T_r} \quad (12)$$

在测得油层位置及温度的条件下，根据(12)式即可求得相应时刻蒸汽腔的扩展速度。

油藏热容量与岩石和流体热容量有关，油藏热容量可由下式求得^[18]：

$$M = \rho C = (1 - \phi)(\rho C)_r + \phi [S_o(\rho C)_o + S_w(\rho C)_w] \quad (13)$$

将(13)式代入(12)式可得观察井温度法预测的蒸汽腔水平扩展速度：

$$U_{x1} = \frac{U_\xi}{\sin \theta} = \frac{K}{M (h_2 - h_1) \sin \theta \cos \theta} \ln \frac{T_1 - T_r}{T_2 - T_r} \quad (14)$$

2 蒸汽腔扩展规律与扩展速度求解

2.1 典型观察井蒸汽腔温度变化规律

为了研究典型观察井的温度变化规律，验证蒸汽腔计算模型可靠性，本文以新疆油田风城超稠油双水平井 SAGD 开发区块 A 井对(基本参数见表1)为例，建立 SAGD 地质模型。为了精细表征蒸汽腔扩展情况，网格尺寸设计为 0.5 m×0.5 m×0.5 m，网格节点数为 20×201×30；考虑到沿水平井方向蒸汽腔均匀扩展，为了降低计算网格总数，水平段长度设计为 10 m，注汽水平井与生产水平井垂向井距设计为 5 m；利用 CMG-STARS 建立该井组双水平井 SAGD 数值模型。

表1 SAGD 开发区块 A 井对基本参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
孔隙度	32%	油藏厚度	15 m
渗透率	$2000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$	盖层厚度	10 m
含油饱和度	75%	底层厚度	5 m
顶部埋深	200 m	水平段长度	400 m
初始温度	20 °C	井距	100 m
油藏压力	2 MPa	双水平井垂向距离	5 m
原油黏度(50 °C)	$2 \times 10^4 \text{ mPa}\cdot\text{s}$	汽腔操作压力	2 MPa

不同时间蒸汽腔扩展情况剖面见图4，蒸汽腔展现出3个典型的扩展阶段：蒸汽腔上升阶段、蒸汽腔横向扩展阶段和下降阶段。理论模型条件下，SAGD 启动后1年蒸汽腔上升到油藏顶部，第2—第4年为蒸汽

腔横向扩展阶段，蒸汽腔最终扩展到油藏设定的边界位置（SAGD 井对之间的交界处）。

蒸汽腔上升阶段倾斜的泄油界面不明显，蒸汽腔横向扩展阶段泄油界面与理论中的泄油界面逐渐近似（见图 4）。泄油界面温度区间取决于油藏蒸汽腔的操作温度，也取决于加热后原油在重力作用条件下的流

动能力，即与油藏渗透率（垂向与水平方向）及高温条件下的原油黏度、比重相关。通常泄油温度区间在 120~260 °C，图中显示出泄油界面内的不同温度等值线近似平行关系，生产水平井附近温度等值线比油藏顶部温度等值线稀疏，注采井间热流体长时间向附近油层热传递导致了这一现象。

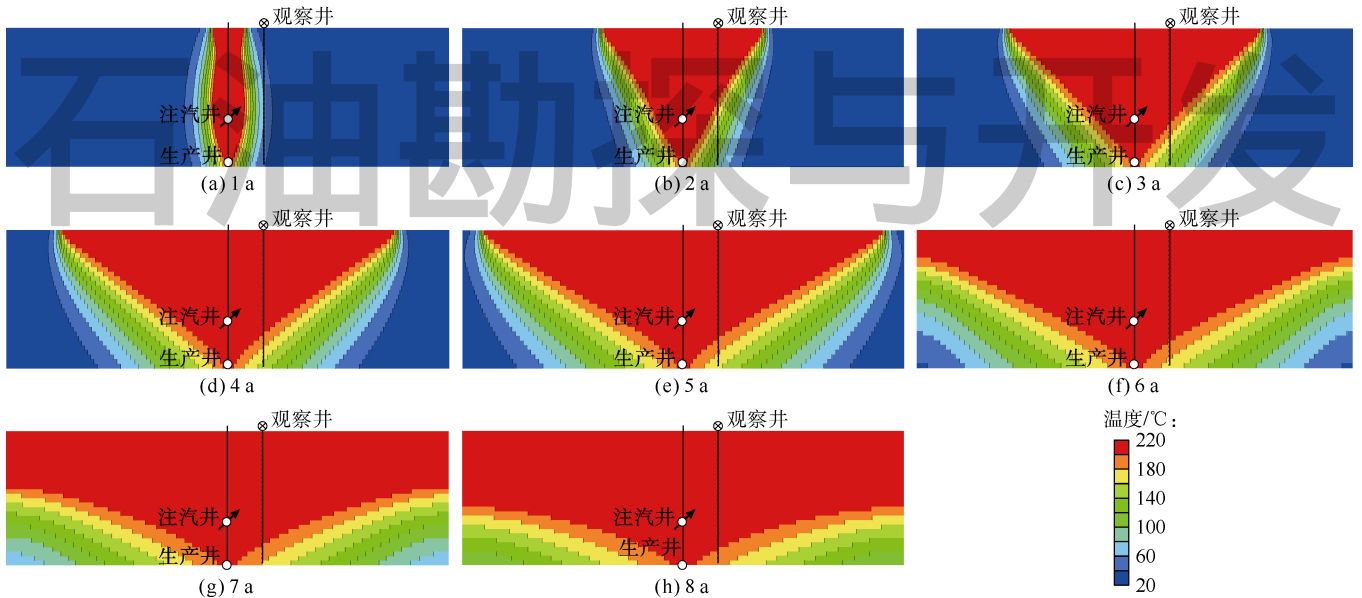


图 4 典型 SAGD 井对蒸汽腔扩展剖面图

为了分析观察井监测温度变化规律，距 SAGD 井对 8 m 处设有 1 口观察井，图 5 为不同生产时间观察井的温度变化曲线，一个典型的蒸汽腔温度曲线存在明显的蒸汽段，在蒸汽段下方存在一个高温段，其温度曲线在 80~210 °C。SAGD 井对连通后转入生产阶段，第 1 年蒸汽腔处于横向扩展阶段，由于观察井距蒸汽腔较近，已见到高温段温度反应；随着蒸汽腔顶部前缘逐渐向两侧扩展，第 2 年观察井顶部受蒸汽热传导影响，温度上升到 210 °C，此时蒸汽腔前缘逐渐

展现出直线的泄油界面，且此界面经过生产水平井与水平面形成泄油界面倾斜角 (θ)，其形态与 Butler 经典理论假设近似；在整个蒸汽腔扩展阶段与蒸汽腔下降阶段， θ 逐渐减少，第 2—第 6 年观察井的蒸汽腔逐渐下降。

图 6 为新疆重 32 井区 A 井对 2015—2017 年的观察井温度监测曲线，其温度变化规律与典型井对数值模拟温度变化规律极为相似，下面进一步利用现场温度监测曲线的直线段求取蒸汽腔的扩展速度和前缘位置。

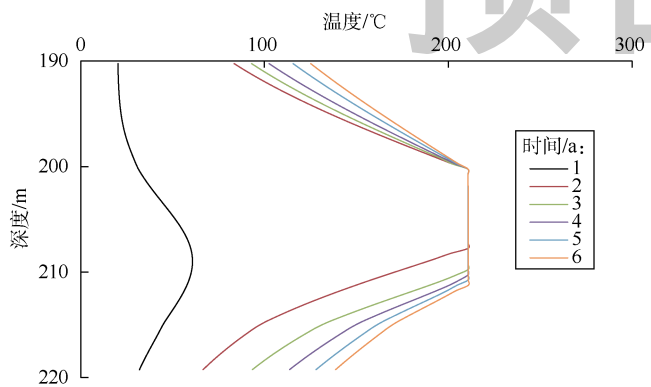


图 5 不同时间观察井温度变化曲线

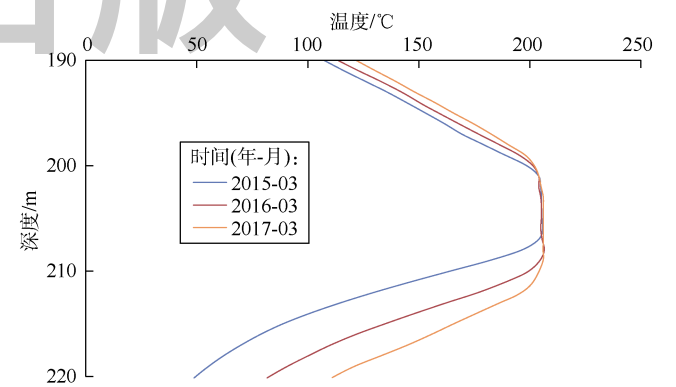


图 6 新疆重 32 井区 A 井对观察井温度监测曲线

2.2 蒸汽腔扩展速度求解所需的关键参数

2.2.1 油藏岩石导热系数与热容量

蒸汽腔扩展速度求解之前，需要知道带流体的岩石导热系数和热容量，新疆超稠油油藏岩石与流体物性见表2。该油藏孔隙度为32%，含油饱和度为75%，油藏导热系数为 $1.73 \times 10^5 \text{ J}/(\text{m} \cdot \text{d} \cdot \text{K})$ ，将数据带入(13)式可求得油藏热容量为 $1.93 \times 10^6 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ 。

表2 超稠油油藏热物性参数

参数名称	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	比热容/($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
砂岩	1 800	960
超稠油	980	1 770
水	1 000	4 200

2.2.2 泄油界面倾斜角与蒸汽腔前缘位置求解

蒸汽腔前缘泄油带温度为 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 时，泄油界面上由热对流剧烈的纯蒸汽带转化为以热传导为主的高含油饱和度带，且热流体流动相对稳定，可选该温度为泄油带温度。由于热电偶测温点纵向上精度为 1 m ，一般需要通过参数拟合获得 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 的准确位置。当观察井温度曲线温度值达到蒸汽腔温度时，表明蒸汽腔前缘已经通过观察井，可利用公式推算蒸汽腔相关参数。

为了准确求解观察井与泄油界面的交点深度(h_0)，将(8)式中的对数项定义为温度函数：

$$\psi = \ln \frac{T_1 - T_r}{T_2 - T_r} \quad (15)$$

由图3可知，泄油界面倾斜角计算公式可表示为：

$$\theta = \arctan \left(\frac{h_p - h_0}{X_0} \right) \quad (16)$$

同理，蒸汽腔水平方向位移计算公式可表示为：

$$s = \frac{h_p - h_{\text{cap}}}{\tan \theta} \quad (17)$$

分别计算出2个时间段内的蒸汽腔边缘位置后，蒸汽腔边缘法蒸汽腔扩展速度计算公式可表达为：

$$U_{x2} = \frac{s_2 - s_1}{t_2 - t_1} \quad (18)$$

以2015年的实测数据为例，观察井高温带温度函数与测深呈线性关系(见图7)，取 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 所对应的温度函数值计算观察井与蒸汽腔前缘交点的测深为 207.2 m ；观察井距SAGD井组距离为 8.0 m ，生产水平井垂向位置所对应的观察井测深为 215 m ，采用(16)式求得泄油界面倾斜角为 44.27° ，将该值代入(14)式求得观察井温度法预测的蒸汽腔水平扩展速度为 $2.04 \times 10^{-2} \text{ m/d}$ 。由生产井位置、蒸汽腔边缘泄油界面倾

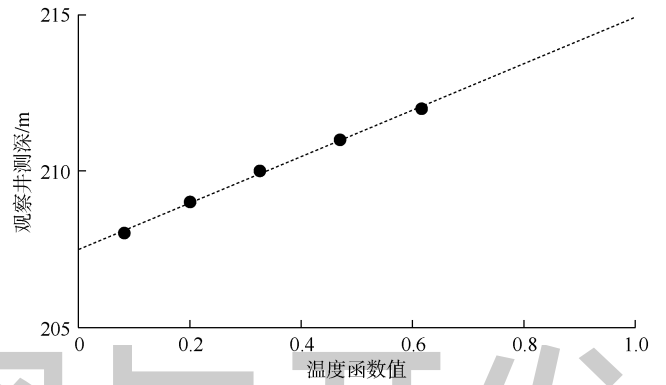


图7 观察井温度函数曲线(2015年)

斜角和生产井深度即可求得蒸汽腔在油藏顶部的扩展位置，进而采用(17)式计算得生产2年后蒸汽腔水平方向位移为 15.4 m 。

2.3 两种蒸汽腔水平扩展速度对比

对比不同时间下蒸汽扩展位置及扩展速度可知，SAGD技术实施初期扩展速度较快，随着生产时间的延长，蒸汽腔水平扩展速度呈现下降趋势(见图8)。观察井温度法((14)式)计算2016年蒸汽腔水平扩展速度为 $2.04 \times 10^{-2} \text{ m/d}$ ，蒸汽腔边缘法((18)式)计算的平均值为 $2.00 \times 10^{-2} \text{ m/d}$ ，两者十分接近，吻合程度较高。实际生产过程中操作压力受现场调控影响波动较大，高压条件下蒸汽腔扩展速度更快。整体看，观察井温度法计算的扩展速度与蒸汽腔边缘法的计算值有所差异，主要是由于观察井温度法计算值为瞬时值，反应的是某个温度监测时间点的速度；而蒸汽腔边缘法计算值是两个相邻时间段内的平均值，这个值与温度监测的频率有关，两个扩展速度值可以通过比较相互验证。

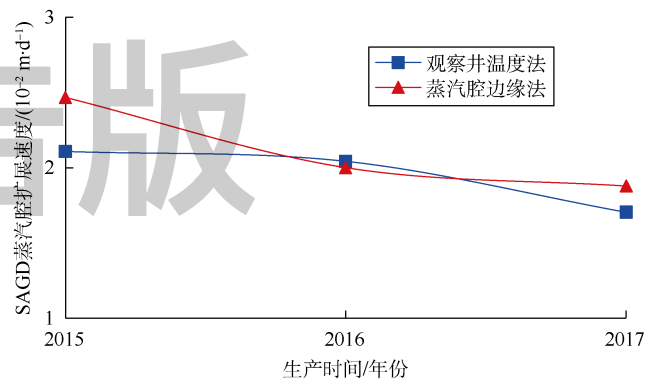


图8 SAGD蒸汽腔扩展速度计算对比图

3 应用实例

3.1 泄油带温度分布计算

当蒸汽腔未扩展到观察井所处位置时，可通过泄

油带温度分布推测蒸汽腔扩展阶段蒸汽腔前缘位置，也可用于预测泄油带的宽度。将计算得到的 A 井对的蒸汽腔扩展速度及相关参数代入 (8) 式，可求得不同时间泄油带温度分布 (见图 9)，随着生产时间的延长，蒸汽腔扩展速度下降，蒸汽腔泄油带逐渐变宽。定量刻画蒸汽腔前缘的扩展动态，可为不同生产阶段实施有效生产策略提供科学依据。

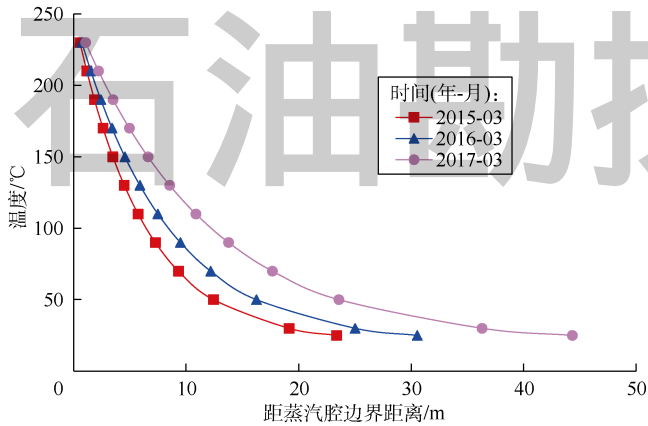


图 9 泄油带温度分布图

3.2 蒸汽腔边缘位置预测

当蒸汽腔边缘通过观察井时，可相对精确地计算蒸汽腔边缘的位置，图 10 显示了不同时间 SAGD 蒸汽腔的前缘位置。2017 年 3 月蒸汽腔预测边缘沿着 X 方向水平移动至 29.36 m，此时蒸汽腔移动速度平均为 1.7×10^{-2} m/d，预测至 2017 年 6 月蒸汽腔将沿 X 方向水平移动至 30.89 m；2017 年 6 月四维地震数据监测蒸汽腔边缘显示为 31.00 m，预测结果与实际生产数据十分吻合。目前，国内外在 SAGD 中后期尝试通过钻直

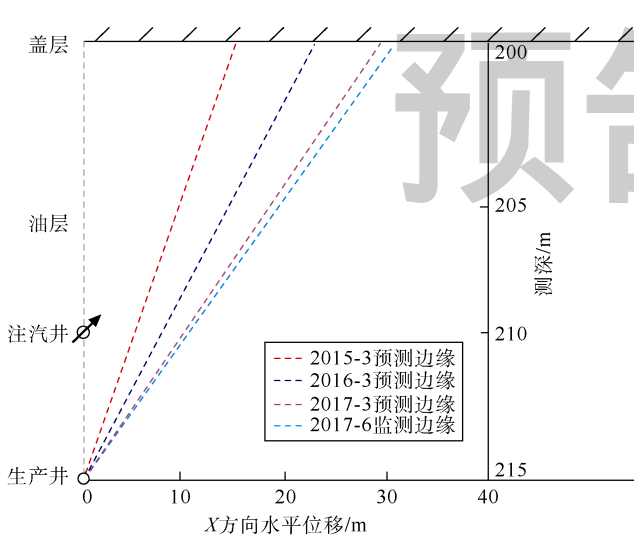


图 10 不同时间蒸汽腔边缘分布

井或加密水平井提高油藏的采收率，而 SAGD 通常采用高温高压生产方式，这给后续的安全钻井带来了相当大的不确定性，本文提出的蒸汽腔边缘预测方法给出了确定的蒸汽腔扩展形态，有助于作业方提前制定预案降低风险。

3.3 基于蒸汽腔扩展速度的 SAGD 产量计算

Butler^[2]高峰稳产期传统公式中产量为定值，这种简化方式忽略了不同时间因操作制度不同导致的蒸汽腔扩展速度变化，如果将求出的蒸汽腔水平扩展速度 (U_{ξ}) 直接代入非传统的 Butler 产量公式：

$$q = \frac{2K_o g \lambda L \sin \theta}{m v_s U_{\xi}} \quad (19)$$

并将公式 (14) 代入公式 (19) 可简化得：

$$q = \frac{2K_o g \lambda L}{m v_s U_{x1}} \quad (20)$$

根据不同时间段的蒸汽腔扩展速度，便可求得不同时间的 SAGD 产量，该计算结果可及时反映地下产量的变化。

为了便于该方法的推广应用，采用 A 井对不同时间节点的实际产量对 (20) 式进行拟合，基础参数见表 3。代入 (20) 式求得 2015 年 4 月的产量为 $48.07 \text{ m}^3/\text{d}$ ，实际产量为 $47.00 \text{ m}^3/\text{d}$ ，整体符合率较高 (见图 11)。

表 3 超稠油 SAGD 产量公式参数取值表

参数名称	参数值	参数名称	参数值
黏温常数	4.2	油相有效渗透率	$0.4 \mu\text{m}^2$
重力加速度	9.81 m/s^2	水平段长度	400 m
热扩散系数	$8.97 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{d}$	水平段动用长度	350 m
运动黏度	$5.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$	蒸汽腔水平扩展速度	$2.1 \times 10^{-2} \text{ m/d}$

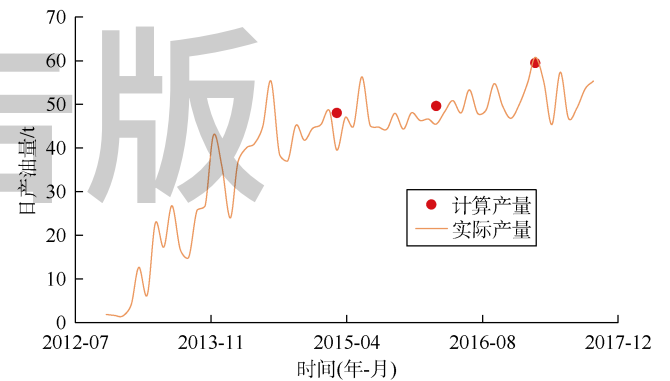


图 11 A 井对计算产量与实际产量对比

需要指出的是，受油藏的非均质性及操作因素影响，SAGD 蒸汽腔发育平面及纵向都是非常不均匀的，蒸汽腔扩展速度计算模型及其应用，只适用于观察井

温度曲线有高温反应的 SAGD 井对，其结果反映了临近 SAGD 水平段的蒸汽腔扩展情况。

4 结论

SAGD 数值模拟表明蒸汽腔横向扩展阶段存在一个倾斜的泄油界面，且观察井测温曲线高温带的温度函数与测深呈线性关系，这为进一步预测汽腔前缘、泄油界面倾斜角、蒸汽腔扩展边缘等关键参数奠定了基础。

SAGD 开发不同阶段，蒸汽腔扩展速度不同，早期扩展速度较快，随着生产时间的延长，SAGD 蒸汽腔的扩展速度呈下降趋势；采用观察井温度法和蒸汽腔边缘法计算模型预测 SAGD 蒸汽腔扩展速度，与实际生产监测结果具有良好的一致性。

SAGD 蒸汽腔扩展速度计算公式可用于预测双水平井 SAGD 不同时间的蒸汽腔泄油带温度分布、蒸汽腔前缘和 SAGD 产量。

通过新疆风城油田 SAGD 实际生产数据的验证，观察井温度法和蒸汽腔边缘法 2 种模型计算蒸汽腔扩展速度结果可靠，可为不同 SAGD 阶段生产操作提供理论依据。

符号注释：

C ——饱和流体砂岩比热容， $J/(kg \cdot K)$ ； g ——重力加速度， m/s^2 ； h_0 ——观察井与蒸汽腔前缘交点的测深， m ； h_1 ， h_2 ——观察井高温带的某两点测深， m ； h_{cap} ——顶部盖层深度， m ； h_p ——生产水平井垂向位置对应观察井的测深， m ； K ——饱和流体油藏岩石的导热系数， $W/(m \cdot K)$ ； K_0 ——油相有效渗透率， $10^{12} \mu m^2$ ； L ——水平段有效动用长度， m ； m ——黏温常数，无因次； M ——饱和流体岩石体积热容， $J/(m^3 \cdot K)$ ； q ——SAGD 产油量， m^3/s ； s ——蒸汽腔水平位移， m ； s_1 ， s_2 ——时间为 t_1 ， t_2 时的蒸汽腔边缘， m ； S_o ， S_w ——含油、含水饱和度， $\%$ ； t ——蒸汽腔扩展的时间， s ； t_1 ， t_2 ——蒸汽腔监测的时间点， s ； T ——温度， K ； T_1 ， T_2 ——高温段温度点， K ； T_r ——油藏原始温度， K ； T_s ——蒸汽腔温度， K ； U_{x1} ——观察井温度法求得的蒸汽腔水平扩展速度， m/s ； U_{x2} ——蒸汽腔边缘法求得的蒸汽腔扩展速度， m/s ； U_ξ ——蒸汽腔边缘沿 ξ 方向上的扩展速度， m/s ； v_s ——原油高温条件下运动黏度， m^2/s ； X ——水平坐标轴， m ； X_0 ——观察井距 SAGD 井组距离， m ； Z ——垂向坐标轴， m ； α ——蒸汽腔界面切线方向坐标轴， m ； β ——蒸汽腔界面法线方向坐标轴， m ； γ ——平行水平井轴方向坐标轴， m ； θ ——泄油界面倾斜角， $(^\circ)$ ； ξ ——表观距离坐标轴， m ； ξ_1 ， ξ_2 ——距泄油界面的距离， m ； λ ——热扩散系数， m^2/d ； ρ ——饱和流体砂岩密度， kg/m^3 ； $(\rho C)_r$ ， $(\rho C)_o$ ， $(\rho C)_w$ ——

岩石、油、水的热容量， $J/(m^3 \cdot K)$ ； ϕ ——孔隙度， $\%$ ； ψ ——温度函数，无因次。

参考文献：

- [1] ASHRAFI O, NAVARRI P, HUGHES R, et al. Heat recovery optimization in a steam-assisted gravity drainage (SAGD) plant[J]. Energy, 2016, 111: 981-990.
- [2] BUTLER R M. A new approach to the modelling of steam-assisted gravity drainage[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 1985, 24(3): 42-51.
- [3] WEI S, CHENG L, HUANG W, et al. Prediction for steam chamber development and production performance in SAGD process[J]. Journal of Natural Gas Science & Engineering, 2014, 19(7): 303-310.
- [4] 思娜, 安雷, 邓辉, 等. SAGD 重油、油砂开采技术的创新进展及思考[J]. 石油钻采工艺, 2016, 38(1): 98-104.
- [5] SI Na, AN Lei, DENG Hui, et al. Innovation progress and thinking of SAGD technology in heavy oil and oil sand[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2016, 38(1): 98-104.
- [6] 孙新革, 何万军, 胡筱波, 等. 超稠油双水平井蒸汽辅助重力泄油不同开采阶段参数优化[J]. 新疆石油地质, 2012, 33(6): 697-699.
- [7] SUN Xinge, HE Wanjun, HU Xiaobo, et al. Parameters optimization of different production stages by dual-horizontal well SAGD process for super-heavy oil reservoir[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2012, 33(6): 697-699.
- [8] 柳潇雄, 蒋有伟, 吴永彬, 等. 双水平井蒸汽辅助重力泄油恒温电预热数学模型与指标预测[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(5): 839-846.
- [9] LIU Xiaoxiong, JIANG Youwei, WU Yongbin, et al. A mathematical model and the indicator prediction in constant temperature electric heating of dual-horizontal-well SAGD start-up[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(5): 839-846.
- [10] 梁光跃, 刘尚奇, 沈平平, 等. 油砂蒸汽辅助重力泄油汽液界面智能调控模型优选[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(2): 275-280.
- [11] LIANG Guangyue, LIU Shangqi, SHEN Pingping, et al. A new optimization method for steam-liquid level intelligent control model in oil sands steam-assisted gravity drainage (SAGD) process[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(2): 275-280.
- [12] 武毅, 张丽萍, 李晓漫, 等. 超稠油 SAGD 开发蒸汽腔形成及扩展规律研究[J]. 特种油气藏, 2007, 14(6): 40-43.
- [13] WU Yi, ZHANG Liping, LI Xiaoman, et al. Study of steam chamber growth and expansion in SAGD for ultra heavy oil[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2007, 14(6): 40-43.
- [14] 李秀杰, 刘昊, 罗健, 等. 非均质油藏双水平井 SAGD 三维物理模拟[J]. 石油学报, 2014, 35(3): 536-542.
- [15] LI Xiuluan, LIU Hao, LUO Jian, et al. 3D physical simulation on dual horizontal well SAGD in heterogeneous reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(3): 536-542.
- [16] 马德胜, 郭嘉, 咎成, 等. 蒸汽辅助重力泄油改善汽腔发育均匀性物理模拟[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(2): 188-193.
- [17] MA Desheng, GUO Jia, ZAN Cheng, et al. Physical simulation of improving the uniformity of steam chamber growth in the steam assisted gravity drainage[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(2): 188-193.

- [11] 田杰, 刘慧卿, 庞占喜, 等. 高压环境双水平井 SAGD 三维物理模拟实验[J]. 石油学报, 2017, 38(4): 453-460.
TIAN Jie, LIU Huiqing, PANG Zhanxi, et al. Experiment of 3D physical simulation on dual-horizontal well SAGD under high pressure condition[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(4): 453-460.
- [12] 李兆敏, 鹿腾, 陶磊, 等. 超稠油水平井 CO₂与降黏剂辅助蒸汽吞吐技术[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(5): 600-605.
LI Zhaomin, LU Teng, TAO Lei, et al. CO₂ and viscosity breaker assisted steam huff and puff technology for horizontal wells in a super-heavy oil reservoir[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(5): 600-605.
- [13] 黄世军, 熊浩, 马奎前, 等. 考虑沿程非均匀吸汽下 SAGD 产能预测模型[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2017, 41(4): 107-115.
HUANG Shijun, XIONG Hao, MA Kuiqian, et al. A mathematical model for productivity prediction of SAGD process considering non-uniform steam distribution[J]. Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition), 2017, 41(4): 107-115.
- [14] 杨立强, 陈月明, 王宏远, 等. 超稠油直井-水平井组合蒸汽辅助重力泄油物理和数值模拟[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2007, 31(4): 64-69.
YANG liqiang, CHEN yueming, WANG Hongyuan, et al. Physical and numerical simulation of steam assisted gravity with vertical and horizontal well combination in extra heavy oil reservoir[J]. Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition), 2007, 31(4): 64-69.
- [15] MAZDAIRANI, MARYA C. Discussion on the effects of temperature on thermal properties in the steam-assisted-gravity-drainage (SAGD) process. Part 1: Thermal conductivity[R]. SPE 170064-MS, 2014.
- [16] 范杰, 李相方. 蒸汽辅助重力泄油蒸汽腔前缘传热模型研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(3): 42-47.
FAN Jie, LI Xiangfang. The research of heat transfer on the front of steam chamber for steam assisted gravity drainage[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(3): 42-47.
- [17] 陈雄, 贾永禄, 桑林翔, 等. 一种确定蒸汽重力采油(SAGD)蒸汽腔前缘发育速度及范围的新方法[J]. 油气藏评价与开发, 2016, 6(1): 36-39.
CHEN Xiong, JIA Yonglu, SANG Linxiang, et al. A new method of calculating velocity and scope of steam chamber for SAGD[J]. Reservoir Evaluation and Development. 2016, 6(1): 36-39.
- [18] 陈月明. 注蒸汽热力采油[M]. 山东东营: 中国石油大学出版社, 1996: 21-22.
CHEN Yueming. Thermal recovery on steam injection[M]. Dongying, Shandong: China University of Petroleum Press, 1996: 21-22.

第一作者简介: 周游 (1984-), 男, 江苏常州人, 中国石油勘探开发研究院高级工程师, 现为中国石油勘探开发研究院在读博士研究生, 主要从事稠油热采开发基础理论和应用技术研究。地址: 北京市海淀区学院路 20 号, 中国石油勘探开发研究院热力采油研究所, 邮政编码: 100083。E-mail: zyou615@petrochina.com.cn

收稿日期: 2018-05-21 修回日期: 2018-11-20

(编辑 唐俊伟)

预告版