

引用格式:陈翔宇,李建元,陈宇.考虑储层物性变化的SAGD开发蒸汽腔前缘传热研究[J].油气藏评价与开发,2023,13(3):379-384.

CHEN Xiangyu, LI Jianyuan, CHEN Yu. Heat transfer of steam cavity edge in SAGD process considering reservoir physical property changes[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(3): 379-384.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2023.03.013

# 考虑储层物性变化的SAGD开发蒸汽腔前缘传热研究

陈翔宇<sup>1</sup>,李建元<sup>2</sup>,陈宇<sup>3</sup>

(1.中海油田服务股份有限公司油田化学研究院,河北廊坊065201;2.中国石油青海油田采油四厂,青海茫崖816401;  
3.中海油研究总院有限责任公司,北京100028)

**摘要:**目前,SAGD(蒸汽辅助重力泄油技术)开发蒸汽腔边缘的热传递研究主要考虑蒸汽与储层的热传导作用,对流传热及受温度影响的储层物性变化则很少被关注,然而,实际生产中两者对传热效果和温度场分布的影响不容忽视。通过质量守恒、能量守恒和数学坐标变换,综合考虑热传导与热对流的传热机理及储层物性随温度变化对传热的影响,创新性地建立了蒸汽腔前缘传热半解析模型,差分求解得到蒸汽腔边缘温度分布和受温度影响下的储层物性分布。结果表明:①研究模型更符合实际,相比Butler模型和Dong模型,精度分别提高了34%和11%;②分析储层物性变化情况下对流和传导的相对关系,得出在原油可动区域中对流传热比例是传导传热的3倍以上,热对流起主导作用,但在远离蒸汽腔位置处仍以热传导为主;③通过促进水的流动可以扩大对流传热区域,能够有效提高传热效率,对于减少蒸汽需求和提高原油采收率具有重要的指导意义。

**关键词:**储层物性变化;蒸汽腔;热膨胀;热对流;热传导

中图分类号:TE34

文献标识码:A

## Heat transfer of steam cavity edge in SAGD process considering reservoir physical property changes

CHEN Xiangyu<sup>1</sup>, LI Jianyuan<sup>2</sup>, CHEN Yu<sup>3</sup>

(1. Oilfield Chemistry Research Institute, China Oilfield Services Limited, Langfang, Hebei 065201, China;  
2. No.4 Oil Production Plant of Qinghai Oilfield Company, CNPC, Mangya, Qinghai 816401, China;  
3. CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing 100028, China)

**Abstract:** At present, the researches on the heat transfer of the steam cavity edge in the SAGD production process mainly pay attention to the heat conduction between steam and the reservoir, while little attention has been paid to the convective heat transfer and changes of the reservoir physical properties affected by the temperature. However, the influence of both on the heat transfer effect and temperature field distribution cannot be ignored. By the comprehensive consideration of two heat transfer mechanisms of heat conduction and heat convection, as well as the influence of reservoir physical properties changes on heat transfer, a semi-analytical model is established through the conservation of mass, energy and mathematical coordinate transformation, and the temperature distribution at the edge of the steam chamber and the physical property distribution of the reservoir under the influence of temperature are obtained by differential solution. The results show that: ① the model proposed in this paper is more practical, with an accuracy improvement of 34 % and 11 % compared to the Butler's model and the Dong's models, respectively. ② By analyzing the relative relationship between convection and conduction under the change of reservoir physical properties, it is concluded that the proportion of the conduction heat transfer in the crude oil movable area is more than three times higher than that of the conduction heat transfer, the convection heat transfer accounts for the main proportion in the movable area of crude oil, but at the locations far away from the steam cavity, the conduction and convection work together, and it also gives relevant measures to improve heating efficiency.

**Keywords:** change of reservoir physical properties; steam cavity; thermal expansion; heat convection; heat conduction

收稿日期:2021-11-15。

第一作者简介:陈翔宇(1977—),女,硕士,工程师,主要从事油田增产方面的研究工作。地址:天津市滨海新区海洋高新技术开发区海川路1581号,邮政编码:300459。E-mail:chenxy15@cosl.com.cn

超稠油是一种储量丰富的非常规资源,但其黏度一般可达几万至几十万毫帕·秒,使用常规手段很难进行开采<sup>[1-4]</sup>。在1982年,SAGD(蒸汽辅助重力泄油技术)已成为开采超稠油、稠油和沥青质的有效商业化手段之一。随着SAGD的大规模应用,蒸汽腔的热传递机理及前缘温度的分布研究对提高SAGD的加热效率和油藏采收率有着重要的意义<sup>[5-7]</sup>。

由BUTLER<sup>[8-9]</sup>最初提出并建立蒸汽腔前缘传热模型中没有考虑到热对流的传热作用,因此,一些学者提出了蒸汽腔前缘热传递的新解析模型,他们认为热对流和热传导对于蒸汽腔的传热均有很大的贡献,并通过数值模拟手段证实了这点<sup>[10-18]</sup>。水热增压主要是在高温作用下,由于流体密度大幅度减小引起的流体压力大幅增加,一些实验证明了水在热膨胀作用下的流动<sup>[19]</sup>。同时,储层孔隙度由于升温引起的砂粒膨胀会发生较大变化<sup>[20-22]</sup>,孔隙度的变化不可避免地影响到水的运动,进而影响到热传递效果和温度分布,但储层导热系数由于温度的升高也会有很大程度的降低,会对热传导效果和温度分布造成影响。因此,不考虑储层物性随温度的变化会降低计算传递热量的准确性。

研究综合考虑了热传导、热对流两种传热机理及储层孔隙度和导热系数与温度场的耦合效应,通过质量守恒、能量守恒以及数学坐标变换,创新性地建立了蒸汽腔前缘传热半解析模型,运用差分方法求解进而得到蒸汽腔边缘温度分布和受温度影响下的储层物性分布,并对比了热对流和热传导的作用,为增加原油可动区域和提高加热效率提供了指导。

## 1 蒸汽腔前缘传热模型

### 1.1 模型假设

研究认为在蒸汽未波及的区域中,含水饱和度接近束缚水饱和度,水在热膨胀作用下传递热量。研究中不考虑油相的原因:①在油藏条件下,原油黏度高、流动性很差,只有水可以在很低的压力和含水饱和度下流动,这已经被1987年的现场实验数据所证实;②沿蒸汽腔边缘向下流动的冷凝水和原油对冷油区的热传递作用很低,并且绝大多数热量是通过水传递<sup>[14]</sup>。

在考虑储层物性受温度的影响的情况下,研究水流动对储层热传递的影响,建立蒸汽腔模型(图1)。

假设条件为:

- 1) 蒸汽腔已经达到油藏顶部,并向横向拓展,蒸汽腔边缘的前进速度保持恒定,垂直于蒸汽腔;
- 2) 忽略蒸汽腔边缘到初始温度下的油砂的压力梯度变化;
- 3) 油藏储层的性质是均质的且各向同性的;
- 4) 蒸汽腔内部及边缘的温度保持不变。

建立蒸汽腔边缘传热模型要考虑温度对储层物性的影响,同时,储层物性又影响温度分布和热传递过程,计算方法见图2。

首先,在垂直于蒸汽腔的方向上建立共生水的质量守恒方程:

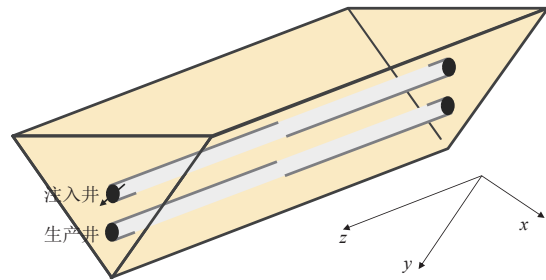
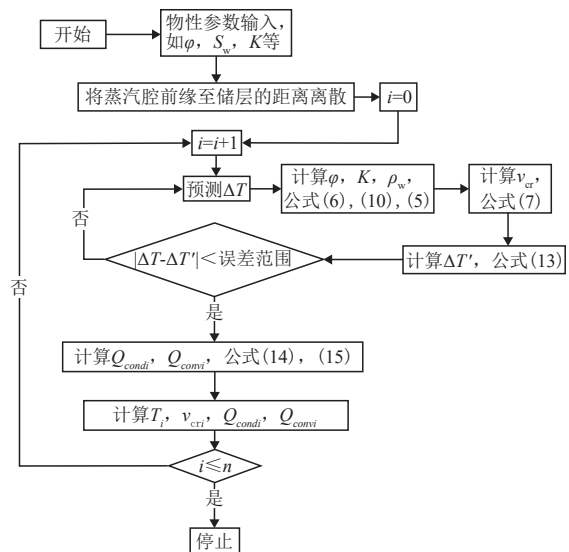


图1 蒸汽腔模型示意图

Fig. 1 Steam cavity of SAGD



注:  $\Delta T'$ 是 $i=i+1$ 迭代中的温度差值;  $|\Delta T-\Delta T'|$ 是半解析模型求解过程中的误差值。

图2 差分离散求解半解析模型流程图

Fig. 2 Flow chart of differential discrete solution of semi-analytical model

$$\frac{\partial(\rho_w v)}{\partial x} = -\frac{\partial(\rho_w \varphi)}{\partial t} \quad (1)$$

式中: $\rho_w$ 为水的密度,单位 $\text{g}/\text{cm}^3$ ; $\varphi$ 为孔隙度; $v$ 为对应于固定位置的水的流速,单位 $\text{m}/\text{s}$ ; $t$ 为时间,单位 $\text{s}$ ; $x$ 为垂直于蒸汽腔方向上的距离,单位 $\text{m}$ 。

然后,考虑到蒸汽腔以恒定速度不断扩大,使用坐标变换将蒸汽腔处理成相对不动的,定义新的变量 $\xi$ 为:

$$\xi = x - \int_0^t U_x = x - U_x t \quad (2)$$

$$v_{cr} = v - U_x \quad (3)$$

式(2)一式(3)中: $v_{cr}$ 为相对于运动的蒸汽腔的水流速,单位 $\text{m}/\text{s}$ ; $U_x$ 为蒸汽腔的扩大速度,单位 $\text{m}/\text{s}$ 。

通过坐标变换和恒等变形,得到:

$$\frac{\partial(\rho_w v)}{\partial \xi} (v_{cr} + U_x) + \rho_w \frac{\partial v_{cr}}{\partial \xi} = U_x \varphi \frac{\partial \rho_w}{\partial \xi} + U_x \rho_w \frac{\partial \varphi}{\partial \xi} \quad (4)$$

水的密度和温度、压力有关,相比于温度,压力的影响很小,因此,认为水的膨胀仅由热效应引起,其密度变化方程为:

$$\rho_w = \rho_R [1 - \beta_w (T - T_R)] \quad (5)$$

式中: $\rho_R$ 为初始温度时水的密度,单位 $\text{g}/\text{cm}^3$ ; $\beta_w$ 为水的热膨胀系数,单位 $1/\text{K}$ ; $T$ 表示储层温度,单位 $\text{K}$ ; $T_R$ 为储层初始温度,单位 $\text{K}$ 。

在高温情况下,储层砂岩受热变形,导致孔隙度降低<sup>[22]</sup>,孔隙度受温度的影响方程为:

$$\varphi = \varphi_0 + 3\beta_r \Delta T (R + \varphi_0 - 1) \quad (6)$$

式中: $\varphi_0$ 为储层原始条件下的孔隙度; $\beta_r$ 为储层的热膨胀系数,单位 $1/\text{K}$ ; $\Delta T$ 为储层温度和储层初始温度的差值,单位 $\text{K}$ ; $R$ 为表示砂岩颗粒膨胀相互之间的约束大小的系数。

将式(6)和式(5)代入式(4),可得:

$$v_{cr} = U_x (1 - \varphi) \left\{ \frac{1}{1 - \beta_w (T - T_R)} \exp \left[ \frac{3\beta_r (R + \varphi_0 - 1) (T - T_R)}{(1 - \varphi)} \right] - 1 \right\} \quad (7)$$

为了描述蒸汽腔前缘的温度分布及传导、对流过程,还需要建立能量守恒方程,在大多数的研究中,能量守恒原理可用下述方程表达:

$$K \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) - \rho_w c_{pw} \left( v_c^x \frac{\partial T}{\partial x} + v_c^y \frac{\partial T}{\partial y} + v_c^z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho_F c_{PF} \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right) \quad (8)$$

式中: $K$ 为储层导热系数,单位 $\text{J}/(\text{m} \cdot \text{K} \cdot \text{s})$ ; $v_c^x, v_c^y, v_c^z$ 分

别为水在 $x, y, z$ 三个方向的流速分量,单位 $\text{m}/\text{s}$ ; $c_{pw}$ 为水的比热容,单位 $\text{J}/(\text{g} \cdot \text{K})$ ; $\rho_F$ 为储层密度,单位 $\text{g}/\text{cm}^3$ ; $c_{PF}$ 为储层比热容,单位 $\text{J}/(\text{g} \cdot \text{K})$ 。

忽略不计沿着水平井方向和蒸汽腔边缘方向的温度梯度<sup>[23-26]</sup>,则三维能量守恒方程可以化简成一维的形式,沿着垂直于蒸汽腔的方向( $x$ 方向),计算方程为:

$$\frac{\partial T}{\partial x} \left[ K(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] - \rho_w c_{pw} \left( v_c^x \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \rho_F c_{PF} \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right) \quad (9)$$

基于研究内容,综合考虑储层的温度变化和储层物性之间的耦合效应发现,沿 $x$ 方向的 $\varphi$ 和 $K$ 也是变化的, $\varphi$ 随温度的变化见式(6),而对于 $K$ ,SOMERTON等<sup>[25]</sup>曾验证了当原始油藏温度变为蒸汽腔边缘温度时,储层导热系数下降了约25%,另外,在考虑储层导热系数变化的情况下,SOMERTON给出了导热系数的计算关系式:

$$K = a + b\varphi + c\sqrt{S_w} + d\sqrt{S_o} - eT \quad (10)$$

式中: $a, b, c, d, e$ 为常数; $S_w$ 表示含水饱和度; $S_o$ 表示含油饱和度。

对应于油藏中沿 $x$ 方向的某一固定位置,在考虑热水和油砂的温度变化情况下,沿 $x$ 方向的一维能量守恒方程为:

$$\frac{\partial T}{\partial x} \left( K \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \varphi S_w c_{pw} \frac{\partial [\rho_w (v_{cr} + U_x) T]}{\partial x} = \varphi S_w c_{pw} \frac{\partial (\rho_w T)}{\partial t} + (1 - \varphi) \rho_F c_{PF} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (11)$$

根据拟稳态准则,从蒸汽腔前缘到冷油区的温度分布不随时间变化,将式(6)、式(7)、式(10)代入到式(11)中进行化简得到:

$$\frac{\partial T}{\partial \xi} \left( K(T) \frac{\partial T}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial T}{\partial \xi} \left[ U_x (1 - \varphi) c_{PF} \rho_F + U_x \varphi \rho_w S_w c_{pw} (v_{cr} + U_x + 1) \right] + \frac{\partial T}{\partial \xi} \left[ U_x \varphi \rho_R \beta_w S_w c_{pw} (\varphi - 1) - 3U_x \varphi \rho_w \beta_r S_w c_{pw} (R + \varphi_0 - 1) \right] T = 0 \quad (12)$$

## 1.2 模型求解

由于微分方程中 $v_{cr}, K, \varphi$ 均是随温度变化的,很难求解出 $T$ 的解析表达式,因此,通过半解析方法求出热传导、热对流和温度的分布,得到差分离散结果如下:

$$\frac{K_i (T_i - T_{i-1}) - K_{i-1} (T_{i-1} - T_{i-2})}{d\xi^2} + \frac{T_i - T_{i-1}}{d\xi} \left[ A_1 (1 - \varphi_i) + A_2 \varphi_i (v_{cr_i} + U_x + 1) \right] + \frac{T_i - T_{i-1}}{d\xi} \left[ A_3 \varphi_i (\varphi_i - 1) - A_4 \varphi_i \right] T_i = 0 \quad (13)$$

式中:  $K_i, K_{i-1}$  为不同时间的储层导热系数, 单位  $J/(m \cdot K \cdot s)$ ;  $T_i, T_{i-1}$  为不同时间的温度, 单位  $K$ ;  $\varphi_i$  为不同时间的孔隙度;  $v_{crit}$  为不同时间的相对于运动的蒸汽腔的水流速, 单位  $m/s$ ;  $A_1, A_2, A_3, A_4$  均为和孔隙度、含水饱和度、储层导热系数相关的系数。

通过上述的差分离散, 得到了沿  $x$  方向的每个  $d\xi$  长度单元体的能量守恒方程, 综合考虑储层物性和温度之间的耦合影响, 热传导、热对流离散方程分别为:

$$Q_{condi} = -K \frac{\partial T}{\partial x} = -K_i \frac{T_i - T_{i-1}}{d\xi} \quad (14)$$

$$Q_{convci} = v_{crit} c_{pw} \rho_w (T_i - T_R) \quad (15)$$

式(14)一式(15)中:  $Q_{condi}$  为  $T_i$  处的热传导流量, 单位  $J/(m^2 \cdot s)$ ;  $Q_{convci}$  为  $T_i$  处的热对流流量, 单位  $J/(m^2 \cdot s)$ 。

## 2 模型验证和分析

### 2.1 模型验证

因为在模型中考虑了储层物性和温度场之间的耦合效应, 因此, 需要对研究模型的结果进行合理分析和验证。研究采用加拿大 UTF 矿场数据对模型进行验证<sup>[27]</sup>, 所用储层物性及流体物性参数如表 1 所示。

将研究的半解析模型同现场数据、Dong 模型、Butler 模型计算结果相对比, 结果如图 3 所示。对比结果说明: Dong 模型中没有考虑储层物性变化和温度场的耦合效应<sup>[28]</sup>; Butler 模型中只考虑了热传导效应; 研究模型综合考虑了热传导、热对流两种传热机理, 以及储层物性随温度变化对传热的影响, 计算结果与现场数据能够更好地拟合, 相比 Butler 模型和 Dong 模型精度分别提高了 34% 和 11%。

通过图 3 可以看出: ①Butler 模型没有考虑热对流效应, 沿垂直于蒸汽腔方向温度下降最快; ②Dong 模型假设了储层导热系数和孔隙度是不变的, 忽略了温度变化对储层物性的影响, 热传递距离最远, 而

在实际储层中, 储层导热系数和孔隙度受温度影响较大, 温度下降要较 Dong 模型设定的快; ③从研究模型和 Butler 模型的温度分布对比可以看出, 水的对流传热对蒸汽腔和储层之间的热传递起到了重要作用, 研究模型受热的可动原油区域厚度为 5.1 m, 比 Butler 模型的 4.2 m 增加了 0.9 m, 比 Dong 模型的 4.7 m 增加了 0.4 m。

### 2.2 储层物性变化分析

分析储层导热系数和孔隙度随温度的变化规律(图 4)可知: 随着与蒸汽腔距离的减小, 储层导热系

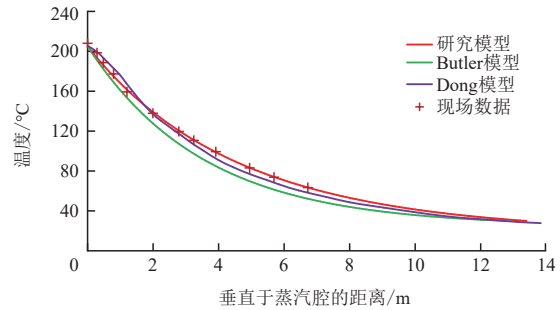


图3 研究模型与现场数据、Dong模型和Butler模型对比  
Fig. 3 Comparison of the model in this paper with in-situ data, Dong model and Butler model

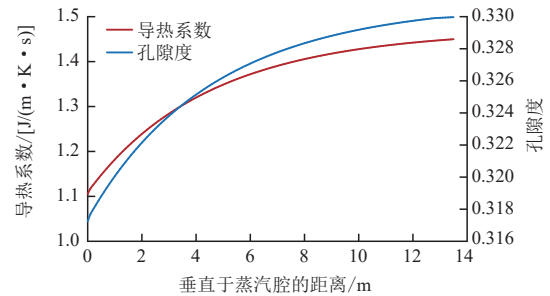


图4 储层导热系数和孔隙度随距离的变化  
Fig. 4 Variation of reservoir thermal conductivity and porosity with distance

表 1 储层物性及流体物性<sup>[26]</sup>  
Table 1 Reservoir physical properties and fluid physical properties<sup>[26]</sup>

孔隙度	含水饱和度	储层初始温度/ $^{\circ}C$	蒸汽腔温度/ $^{\circ}C$	储存导热系数/ $[J/(m \cdot K \cdot s)]$	储层比热容/ $[J/(kg \cdot K)]$	水的比热容/ $[J/(kg \cdot K)]$	储层的热膨胀系数/ $(1/K)$	水的热膨胀系数/ $(1/K)$	蒸汽腔边缘的扩大速度/ $(m/s)$
0.33	0.2	30	205	1.45	4 532.7	830	$8.034 \times 10^{-6}$	$9 \times 10^{-5}$	1.7

数下降速度加快,从初始的  $1.45 \text{ J}/(\text{m}\cdot\text{K}\cdot\text{s})$  下降至  $1.10 \text{ J}/(\text{m}\cdot\text{K}\cdot\text{s})$ ,其中在  $0\sim 6 \text{ m}$  区域由  $1.37 \text{ J}/(\text{m}\cdot\text{K}\cdot\text{s})$  下降至  $1.10 \text{ J}/(\text{m}\cdot\text{K}\cdot\text{s})$ ,降幅占总体的  $77.1\%$ ,表明在蒸汽腔附近热流量在下降,同时使得温度的下降比 Dong 模型(不考虑物性变化的模型)下降得更快;在蒸汽腔边缘,孔隙度由于储层受热膨胀从初始的  $0.330$  下降至  $0.317$ ,下降幅度约  $4\%$ ,其中,在  $0\sim 6 \text{ m}$  区域由  $0.327$  下降至  $0.317$ ,降幅占总体的  $76.9\%$ 。温度对孔隙度影响较大的区域为  $0\sim 6 \text{ m}$ ,与导热系数变化幅度较大区域和原油可流动区域大致相同,说明温度对储层物性、导热系数和孔隙度影响较大的区域为  $0\sim 6 \text{ m}$ 。在原油可流动区域中,孔隙度的降低也会使得原油向底部生产井流动,增大原油采出速度。

### 2.3 热流量分析

通过热对流和热传导沿距离的分布(图5)可以看出:在整个受热区域中对流传热起主导作用,特别是在蒸汽腔边缘处,热对流的传递热量是热传导的3倍多。但是,随着距离增大,温度降低,传导和对流传热量呈下降趋势,主要是由于水流速和温度梯度的降低,热对流流量下降迅速,而热传导下降较慢。

在考虑了储层导热系数和孔隙度随温度变化的情况下,热对流与热传导传热之比逐渐下降,说明在离蒸汽腔较远处,由于水热膨胀引起的对流传热所占比例越来越小,传导传热所占比例越来越大。在原油可动区域,即  $0\sim 5.1 \text{ m}$  区域中,对流传热比例是

传导传热的3倍以上,热对流起主导作用。因此,研究有助于认识对流传热和传导传热在不同温度、不同距离下所占的比例大小,为提高传热效率提供帮助。

在现场SAGD应用中,加热大量蒸汽的费用占总成本的很大一部分。因此,如何有效地提高蒸汽利用率和加热效率是很重要的问题。结合上述分析,由于蒸汽腔边缘处的高温特征,储层导热系数和孔隙度有不同程度的下降,导致热传导比 Dong 模型等认为的还要低。而水的流动有很大的潜力,可以向冷油砂区传递更多的热量。采取措施促进水的流动,使其传递更多的热量,对于减少蒸汽的需求,提高采油速度都有很大的意义。

## 3 结论

1) 考虑热效应和储层物性之间的相互影响,建立了蒸汽腔前缘传热半解析模型,得到了储层导热系数、孔隙度由于温度引起的变化规律,并得出蒸汽腔边缘外实际温度分布和加热效果,再对比不考虑储层物性变化的解析模型,发现研究模型更符合实际和适用于生产预测。

2) 随着与蒸汽腔距离的靠近,储层导热系数和孔隙度下降速度加快,在原油可流动区域中,储层导热系数和孔隙度受温度影响较大,但随着距离增加,两者受温度影响程度降低。

3) 通过分析由水热膨胀引起的热对流和热传导相对关系,得出在原油可动区域中主要以对流传热为主,随着距离增大,对流传热占的比例越来越小,在储层受热区末端,主要以热传导为主,通过促进水的流动可以扩大对流传热区域,提高传热效率。

### 参考文献

- [1] NASR T N, BEAULIEU G, GOLBECK H, et al. Novel expanding solvent-SAGD process "ES-SAGD" [J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2003, 42(1): 13-16.
- [2] JIA X, QU T, CHEN H, et al. Transient convective heat transfer in a steam-assisted gravity drainage (SAGD) process [J]. Fuel, 2019, 247: 315-323.
- [3] YU K Z, ZHAO G. Modeling of heat transfer coupled with fluid flow for temperature transient analysis during SAGD process [C]// Paper SPE-181208-MS presented at the SPE Latin

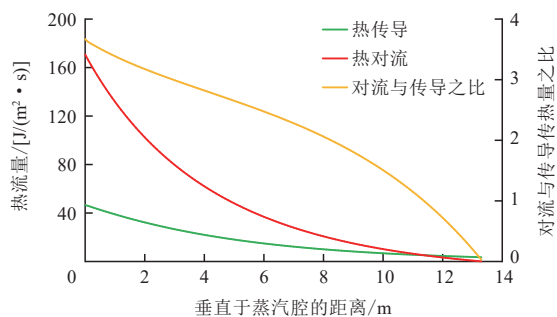


图5 对流和传导热流量随距离的变化

Fig. 5 Convection and conduction heat flow changes with distance

- America and Caribbean Heavy and Extra Heavy Oil Conference, Lima, Peru, October 2016.
- [4] JI D, ZHONG H, DONG M, et al. A model to estimate heat efficiency in SAGD by condensate and initial water flow in oil sands[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2016, 55(51): 13147-13156.
- [5] CHENG L S, HAO G, HUANG S J. A comprehensive mathematical model for estimating oil drainage rate in SAGD process considering wellbore/formation coupling effect[J]. *Heat Mass Transfer*, 2017, 53: 1777-1795.
- [6] ZHANG Z X, LIU H Q, DONG X H, et al. A new mathematical model to understand the convective heat transfer mechanism in steam-assisted gravity drainage process[J]. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 2017, 10(1): 1287.
- [7] MASSOUDI M. Mathematical modeling of fluid flow and heat transfer in petroleum industries and geothermal applications 2020[J]. *Energies*, 2021, 14(16): 1-4.
- [8] BUTLER R M. *Thermal recovery of oil and bitumen*[M]. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1991.
- [9] BUTLER R M. Steam-assisted gravity drainage: concept, development, performance and future[J]. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 1994, 33(2): 44-50.
- [10] 何亮亮.超稠油SAGD蒸汽腔扩展研究[D].成都:西南石油大学, 2018.  
HE Liangliang. Research on steam chamber expansion of SAGD in ultra-heavy oil reservoir[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018.
- [11] PINTO H, WANG X, GATES I D, et al. Insights on heat transfer at the top of steam chambers in SAGD[J]. *Journal of Heat Transfer: Transactions of the ASME*, 2017, 139(4).
- [12] 余洋, 刘尚奇, 刘洋.蒸汽辅助重力泄油开发过程及机理研究综述[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(12): 4744-4751.  
YU Yang, LIU Shangqi, LIU Yang. Review of research on recovery process and mechanism of steam-assisted gravity drainage[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(12): 4744-4751.
- [13] ZHANG Z X, LIU H Q, DONG X H, et al. Unified model of heat transfer in the multiphase flow in steam assisted gravity drainage process[J]. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 2017, 157: 875-883.
- [14] EDMUNDS N, GITTINS S. Effective application of steam assisted gravity drainage of bitumen to Long horizontal well pairs[J]. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 1993, 32(6): 49-55.
- [15] 刘牧心.超稠油SAGD开发蒸汽腔前缘温度分布研究[J]. *科学技术与工程*, 2015, 15(3): 71-74.  
LIU Muxin. Temperature distribution ahead of the steam chamber in SAGD[J]. *Science Technology and Engineering*, 2015, 15(3): 71-74.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 谷宇峰, 张道勇, 鲍志东.利用混合模型CRBM-PSO-XGBoost识别致密砂岩储层岩性[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(5): 1210-1222.  
GU Yufeng, ZHANG Daoyong, BAO Zhidong. Lithology identification in tight sandstone reservoirs using CRBM-PSO-XGBoost[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(5): 1210-1222.
- [19] SHARMA J, GATES I D. Convection at the edge of a steam-assisted-gravity-drainage steam chamber[J]. *SPE Journal*, 2011, 16(3): 503-512.
- [20] IRANI M, GATES I D. Understanding the convection heat-transfer mechanism in steam-assisted-gravity-drainage process [J]. *SPE Journal*, 2013, 18(6): 1202-1215.
- [21] STEPHEN R D. Aquathermal pressuring and geopressure evaluation[J]. *AAPG Bulletin*, 1982, 66(7): 931-939.
- [22] BOWERS G L. Pore pressure estimation from velocity data: Accounting from overpressure mechanisms besides undercompaction [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1994, 31(6): 276.
- [23] BERRYMAN J G. Thermal conductivity of porous media[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(3): 143.
- [24] TRAN D, LONG N, BUCHANAN L, et al. Odelling thermal geomechanical effects on simulation porosity[C]// Paper ARMA-08-087 presented at the 42<sup>nd</sup> U. S. Rock Mechanics Symposium, San Francisco, California, USA, June 2008.
- [25] SOMERTON W H, KEESE J A, CHU S L. Thermal behavior of unconsolidated oil sands[J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1973, 14(5): 513-521.
- [26] AHERNE A L, MAINI B. Fluid movement in the SAGD process: A review of the Dover project[J]. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 2008, 47(1): 31-37.
- [27] BIRRELL G. Heat transfer ahead of a SAGD steam chamber, a study of thermocouple data from phase B of the underground test facility (Dover project)[J]. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 2001, 42(3): 40-47.
- [28] JI D Q, ZHONG H, DONG M Z, et al. Study of heat transfer by thermal expansion of connate water ahead of a steam chamber edge in the steam-assisted-gravity-drainage process[J]. *Fuel*, 2015, 150: 592-601.