

多种稠油开采技术中的传质传热建模及泄油速率对比研究

梁芳, 王乔*, 张艳

北京建筑大学理学院, 北京

收稿日期: 2024年11月15日; 录用日期: 2024年11月26日; 发布日期: 2024年12月31日

摘要

世界稠油资源丰富, 关于近几十年提出的稠油开采技术, 目前大多文章单独分析各技术的产能, 少有研究通过建模定性分析各技术泄油速率之间的数量关系。本文对三种采油技术分别进行数学建模, 通过数值计算进行求解得到各自的泄油速率, 并将三者进行对比。通过数据分析发现, 溶剂萃取采油的泄油速率最低, 并且泄油速率随时间变化相对不明显。温溶剂萃取采油相比溶剂萃取采油的泄油速率会有明显上升。并且温溶剂萃取采油在温度和溶剂的双重作用下, 只需要较低的温度即可达到与蒸汽辅助重力泄油近似的采油效果。

关键词

稠油开采, 传质传热, 渗流力学, 泄油速率, 多孔介质

A Comparative Study on Mass and Heat Transfer Modeling and Oil Recovery Rates in Various Heavy Oil Extraction Techniques

Fang Liang, Qiao Wang*, Yan Zhang

School of Science, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing

Received: Nov. 15th, 2024; accepted: Nov. 26th, 2024; published: Dec. 31st, 2024

Abstract

The world has abundant heavy oil resources. Most of the studies on heavy oil extraction technologies proposed in recent decades focus on analyzing the production capacity of each technology

*通讯作者。

文章引用: 梁芳, 王乔, 张艳. 多种稠油开采技术中的传质传热建模及泄油速率对比研究[J]. 流体动力学, 2024, 12(4): 97-105. DOI: 10.12677/ijfd.2024.124010

individually, with few studies providing a qualitative analysis of the quantitative relationship between the oil recovery rates of each technology through mathematical modeling. This paper presents mathematical modeling of three oil extraction techniques and solves for their respective oil recovery rates through numerical calculations, followed by a comparison among them. Data analysis reveals that the solvent extraction technique has the lowest oil recovery rate, and the rate shows relatively minimal change over time. The oil recovery rate of warm solvent extraction is significantly higher than that of solvent extraction. Moreover, under the combined influence of temperature and solvent, warm solvent extraction can achieve an oil recovery effect similar to that of Steam Assisted Gravity Drainage (SAGD) at a much lower temperature.

Keywords

Heavy Oil Extraction, Mass and Heat Transfer, Seepage Mechanics, Oil Recovery Rate, Porous Media

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着全球能源需求的不断增长, 轻质油量已经不能满足人类的需求, 因此需要轻质油以外的替代能源。勘探发现, 世界稠油资源丰富, 是一种具有巨大潜力的能源资源, 但与轻质油相比, 稠油粘度高、不易流动, 因此在开采过程中面临挑战[1]。为了满足能源需求并推动低碳绿色发展, 急需开发出更加经济环保的有效开采方法。

关于稠油开采, 近二十多年来做了很多研究。蒸汽辅助重力泄油(SAGD)是稠油开采领域的一项重要技术, 通过向油藏注入热蒸汽, 利用蒸汽携带的热量降粘采油。相对于传统热采技术, SAGD 有较高的采收率, 但存在采出水处理及相关环境问题[2]。为了解决暴露出来的问题, 开发出溶剂萃取采油(VAPEX)技术。VAPEX 通过向油藏注入溶剂, 利用溶剂溶解降低稠油粘度。VAPEX 具有绿色环保、资金投入少等优点, 并且能进行脱沥青原位改质, 但缺点是采收效率低[3]。因此开发出以温溶剂萃取采油(warm VAPEX)为代表的一系列热和溶剂萃取混合开采技术。warm VAPEX 通过向油藏注入热溶剂蒸汽, 利用温度和溶剂溶解双重降粘。相对于 VAPEX, warm VAPEX 提高了采收效率, 并且有更低的溶剂需求[4]。

实际上, 任何采油技术都要经过预测和估计才能投入使用, 而数学模型被认为是对稠油采收方案进行快速初步筛选的有力工具, 并且能解决其他方法无法观测过渡带物理量变化的问题。目前大多文章单独分析各技术的产能[5]-[7], 或者通过实验对比各技术产量[8]-[10], 少有文章通过数学建模定性分析各技术泄油速率之间的数量关系。本文对三种采油技术分别进行数学建模, 研究各自的泄油速率并将三者进行对比。并且在本文建模中, 我们考虑与粘度相关的变扩散率, 以稠油密度为变量而不是粗略近似为常数。

2. 数学建模

图 1 为单侧蒸汽腔或溶剂腔的横截面图。本文不考虑沥青质沉淀, 假定储层各向同性, 过渡带厚度恒定, 腔室与重油之间的界面以恒定速率向沥青中运移, 且整个过程中界面角度固定。本文忽略平行于井的温度和浓度变化, 只关注垂直于边界层的传热和传质。图 2 为过渡区物理模型图, 其中以垂直过渡区边界方向为 x 轴建立坐标系。表 1 概述了储层和流体的性质。

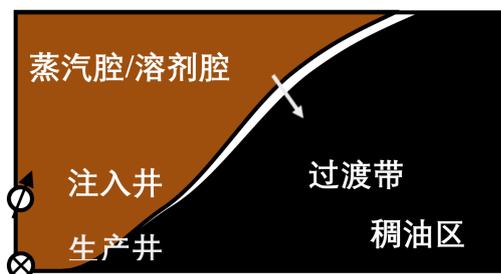


Figure 1. Cross-section of steam or solvent chamber
图 1. 单侧蒸汽腔或溶剂腔的横截面图

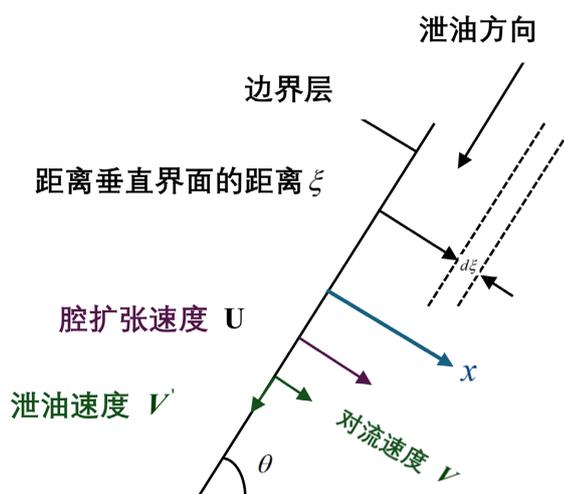


Figure 2. Physical model of the transition zone
图 2. 过渡区物理模型图

Table 1. Reservoir and fluid physical properties
表 1. 储层和流体物理性质

性质	符号	取值	单位
储层			
绝对渗透率	k	6	Darcy
孔隙度	ϕ	30	vol. %
初始温度	T_0	20	°C
井长	W	1	m
岩石比热容	c_{ps}	1200	J/kg·K
倾角	θ	30	degree
岩石密度	ρ_r	2650	kg/m ³
稠油			
导热系数	K_t	1.45	W/(m·K)
稠油比热容	c_{pf}	2786	J/kg·K

续表

溶剂			
注入温度	T_s	50	°C
扩散系数	D	$1.306 \times 10^{-9} \mu^{-0.46}$	m ² /s
腔扩展速度	U	2.58	cm/day
溶剂饱和浓度	c^*	0.3285	m ³ /m ³

在温度或者溶剂的影响下，降粘后的原油逐渐从储层中排出，进而腔室和稠油接触界面持续更新，从而会导致控制方程的边界条件发生变化。为了解决这一问题，将会引入新的变量来代替固定坐标轴：

$$\begin{cases} \xi = x - Ut \\ \tau = t \end{cases} \quad (1)$$

进而得到：

$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial \xi} \cdot \frac{\partial \xi}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial \xi} \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} = \frac{\partial \left(\frac{\partial}{\partial x} \right)}{\partial x} = \frac{\partial \left(\frac{\partial}{\partial \xi} \right)}{\partial x} = \frac{\partial \left(\frac{\partial}{\partial \xi} \right)}{\partial \xi} \cdot \frac{\partial \xi}{\partial x} = \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \xi} \cdot \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \tau} \cdot \frac{\partial \tau}{\partial t} = -U \frac{\partial}{\partial \xi} + \frac{\partial}{\partial \tau} \quad (4)$$

2.1. SAGD 数学建模

$$(1-\phi)\rho_s c_{ps} \left(-U \frac{\partial T}{\partial \xi} + \frac{\partial T}{\partial \tau} \right) + \phi c_{po} \left[\rho_o \left(-U \frac{\partial T}{\partial \xi} + \frac{\partial T}{\partial \tau} \right) + T \left(-U \frac{\partial \rho_o}{\partial \xi} + \frac{\partial \rho_o}{\partial \tau} \right) \right] = K_t \frac{\partial^2 T}{\partial \xi^2} \quad (5)$$

温度的初边值条件如下：

$$T(0, \tau) = 120^\circ\text{C} \quad (6)$$

$$T(L, \tau) = 20^\circ\text{C} \quad (7)$$

$$T(\xi, 0) = 20^\circ\text{C} \quad (8)$$

其中 T 为温度，°C； ϕ 为孔隙度，无量纲； ρ_s 为固体骨架的密度，kg/m³； ρ_o 为稠油密度，kg/m³； c_{ps} 和 c_{po} 分别为为固体骨架和稠油的比热容，J/kg·K； K_t 为总导热系数，W/(m·°C)。

根据达西公式，得到泄油速度 V' 为：

$$V' = \frac{kk_r}{\mu_o} \rho_o g \sin \theta \quad (9)$$

其中 k 为绝对渗透率，达西； k_r 为油相对渗透率，无量纲； μ_o 为稠油粘度，Pa·s； g 为重力加速度，m²/s； θ 为倾角，无量纲；

其中稠油密度和粘度分别为温度的函数[11]：

$$\rho_o = \rho_{15} \left[1 - 0.0603 \left(\frac{T - 20}{100} \right) \right] \quad (10)$$

$$\ln \ln(\mu_o) = -3.6261 \ln(T + 273.15) + 22.8339 \quad (11)$$

沥青饱和度和温度之间的关系采用 Sharma 和 Gates 的假设, 而相对渗透率和沥青饱和度之间的相关性参考 Corey 的相关性[12]:

$$S_o = S_{or} + (S_{oi} - S_{or}) \left(1 - \frac{T - T_r}{T_s - T_r} \right) \quad (12)$$

$$k_{ro} = k_{ro,rw} \left(\frac{S_o - S_{or}}{1 - S_{wc} - S_{or}} \right)^m \quad (13)$$

其中 S_{oi} 和 S_{or} 分别是初始和残余油饱和度, 无量纲; S_{wc} 是原生水饱和度, 无量纲; $k_{ro,rw}$ 是最小含水饱和度下的石油相对渗透率, 无量纲; m 是 Corey 系数, 无量纲。

溶剂腔双侧泄油速率 q 计算公式为:

$$q = 2\phi W \int V d\xi \quad (14)$$

其中 W 为井长。

2.2. VAPEX 数学建模

$$\frac{\partial}{\partial \xi} \left(D \frac{\partial c}{\partial \xi} \right) = -U \frac{\partial c}{\partial \xi} + \frac{\partial c}{\partial \tau} \quad (15)$$

浓度的初边值条件如下:

$$c(0, \tau) = c^* \quad (16)$$

$$c(L, \tau) = 0 \quad (17)$$

$$c(\xi, 0) = 0 \quad (18)$$

其中 c 为溶剂浓度, m^3/m^3 ; D 为扩散系数, m^2/s ; c^* 为溶剂饱和浓度, m^3/m^3 。

根据达西公式, 得到泄油速度 V' 为:

$$V' = \frac{kk_{ro}}{\mu} \rho g \sin \theta \quad (19)$$

利用幂律经验相关性可以估计稠油和丙烷之间的可变扩散系数[13]:

$$D = 1.306 \times 10^{-9} \mu^{-0.46} \quad (20)$$

其中 μ 为稠油和溶剂混合流体的粘度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

稠油和溶剂混合流体的密度 ρ 和粘度 μ 公式为[14]:

$$\rho = \rho_o (1 - c) + \rho_s c \quad (21)$$

$$\mu = \mu_s^{f_s} \mu_o^{f_o} \quad (22)$$

其中溶剂的密度 ρ_s 和粘度 μ_s 为温度的函数[15]:

$$\rho_s = -0.02T^2 - 0.13T + 507.81 \quad (23)$$

$$\log \mu_s = 222.67 \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{133.41} \right) \quad (24)$$

其中：

$$f_s = \frac{c}{\lambda(1-c)+c}, f_o = 1 - f_s \quad (25)$$

$$\lambda = \frac{17.04(\gamma_o - \gamma_s)^{0.5237} \gamma_o^{3.2745} \gamma_s^{1.6316}}{\ln\left(\frac{\mu_o}{\mu_s}\right)} \quad (26)$$

在 VAPEX 技术中， T 恒为储层温度。

石油饱和度和浓度之间的关系采用 Sharma 和 Gates 的假设[16]，而相对渗透率和沥青饱和度之间的相关性参考 Corey 的相关性：

$$S_o = S_{or} + (S_{oi} - S_{or})\left(1 - \frac{c}{c^*}\right) \quad (27)$$

$$k_{ro} = k_{ro,rw} \left(\frac{S_o - S_{or}}{1 - S_{wc} - S_{or}}\right)^n \quad (28)$$

其中 S_{oi} 和 S_{or} 分别是初始和残余油饱和度，无量纲； S_{wc} 是原生水饱和度，无量纲； $k_{ro,rw}$ 是最小含水饱和度下的石油相对渗透率，无量纲； n 是 Corey 系数，无量纲。

溶剂腔双侧泄油速率 q 计算公式为：

$$q = 2\phi W \int V'(1-c) d\xi \quad (29)$$

2.3. warm VAPEX 数学建模

传热方程：

$$(1-\phi)\rho_s c_{ps} \left(-U \frac{\partial T}{\partial \xi} + \frac{\partial T}{\partial \tau}\right) + \phi c_{po} \left[\rho_o \left(-U \frac{\partial T}{\partial \xi} + \frac{\partial T}{\partial \tau}\right) + T \left(-U \frac{\partial \rho_o}{\partial \xi} + \frac{\partial \rho_o}{\partial \tau}\right)\right] = K_t \frac{\partial^2 T}{\partial \xi^2} \quad (30)$$

$$T(0, \tau) = 50^\circ\text{C} \quad (31)$$

$$T(L, \tau) = 20^\circ\text{C} \quad (32)$$

$$T(\xi, 0) = 20^\circ\text{C} \quad (33)$$

其中稠油和溶剂混合流体的密度 ρ_f 为：

$$\rho_f = (1-c)\rho_o + c\rho_s \quad (34)$$

传质方程：

$$\frac{\partial}{\partial \xi} \left(D \frac{\partial c}{\partial \xi} \right) = -U \frac{\partial c}{\partial \xi} + \frac{\partial c}{\partial \tau} \quad (35)$$

$$c(0, \tau) = c^* \quad (36)$$

$$c(L, \tau) = 0 \quad (37)$$

$$c(\xi, 0) = 0 \quad (38)$$

溶剂腔双侧泄油速率 q 计算公式为：

$$q = 2\phi W \int V'(1-c) d\xi \quad (39)$$

3. 结果与讨论

如图 3 所示, 以 warm VAPEX 为例, 利用有限差分进行数值求解, 得到了过渡带温度、浓度、粘度及泄油速度分布图。从分布图可以发现, 浓度穿透深度远远小于温度穿透深度, 其中粘度分布在最开始的短距离内有小波动, 这是因为在开始的短距离内稠油受到温度和粘度双重降粘影响, 但由于传质和传热穿透深度不同, 穿过极窄的传质传热共同区后, 之后粘度只受温度影响, 所以粘度分布的后段分布曲线比较平滑。

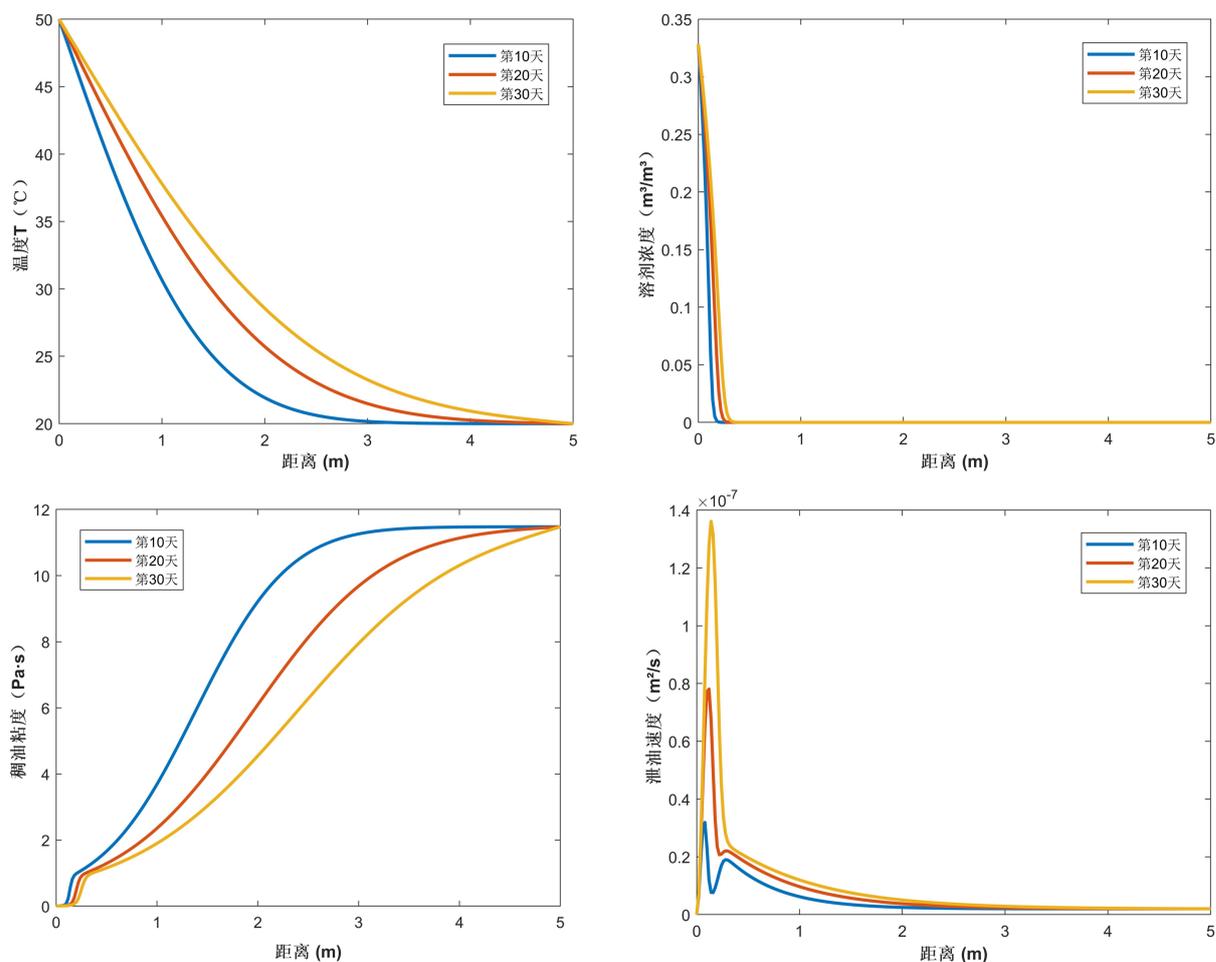


Figure 3. Distribution of physical quantities in the transition zone

图 3. 过渡带物理量分布图

利用同样方法, 分别计算出 SAGD、VAPEX、warm VAPEX 三种技术不同条件下的泄油速率进行对比, 得到图 4。从图中可知, 在 30 天范围内三种技术的泄油速率均会随着时间的增加而增加; 另外可以发现, VAPEX 泄油速率最低, 并且由于传质区极窄, 泄油速率随时间变化相对不明显, 但在此基础上注入 50 摄氏度温溶剂, 泄油速率明显提升; 而同样是 50 摄氏度, 利用温度和溶剂双重降粘的 warm VAPEX 确实比只有温度降粘的 SAGD 泄油速率快; 此外注入 80 摄氏度的温溶剂比注入 120 摄氏度的热蒸汽得到的泄油速率快很多, 说明 warm VAPEX 在温度和溶剂的双重作用下, 只需要较低的温度即可达到与 SAGD 近似的采油效果。综合以上内容发现, warm VAPEX 比 VAPEX 效率高, 比 SAGD 节能环保, 适合实地开采。

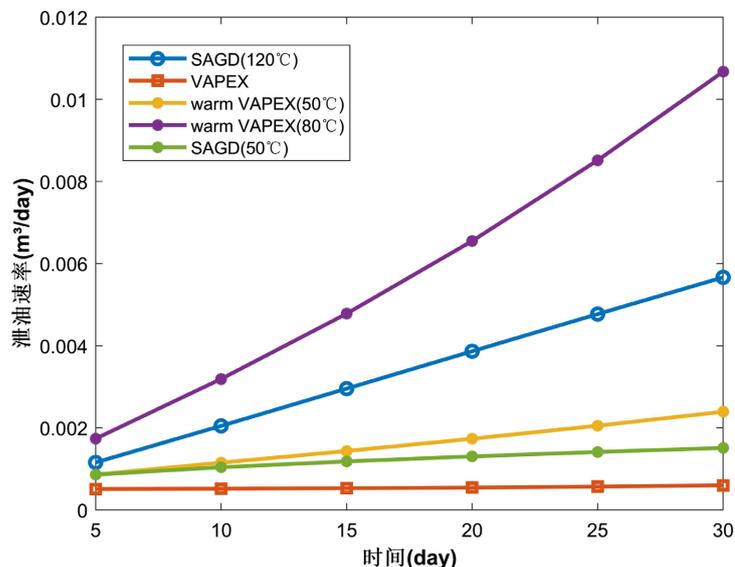


Figure 4. Comparison of drainage rates of different technologies

图 4. 不同技术下泄油速率对比

4. 总结

本文通过对 SAGD、VAPEX、warm VAPEX 三种技术分别建模, 利用数值计算得到三种技术的泄油速率, 并且通过改变 SAGD 和 warm VAPEX 的温度条件, 得到不同条件下三种采油技术的泄油速率大小关系, 进行对比后主要得到以下结论:

(1) VAPEX 泄油速率最低, 并且泄油速率随时间变化相对不明显。

(2) 相比 VAPEX, warm VAPEX 泄油速率明显上升, 第 30 天时, 50°C 条件下 warm VAPEX 的泄油速率近似为 VAPEX 的三倍。

(3) warm VAPEX 在温度和溶剂的双重作用下, 只需要较低的温度即可达到与 SAGD 近似的采油效果。

(4) 第 30 天时, 80°C 条件下 warm VAPEX 的泄油速率近似为 50°C 条件下 warm VAPEX 泄油速率的四倍, 说明温度在 warm VAPEX 中发挥重要作用。

基金项目

中国国家自然科学基金(编号: 21878018、22178022); 北京市教育委员会科学研究计划项目资助(KM202210016001); 北京建筑大学青年教师科研能力提升计划资助(X21030)。

参考文献

- [1] 王学慧, 代玉杰, 赵阳. 稠油提高采收率技术现状及发展趋势[J]. 现代化工, 2024, 44(10): 34-38, 43.
- [2] 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, 65.
- [3] 赵法军, 王广响, 哈斯, 等. 国内外稠油和沥青 VAPEX 技术发展现状与分析[J]. 化工进展, 2012, 31(2): 304-309.
- [4] 李松岩, 程浩, 韩瑞, 等. 稠油油藏热溶剂辅助重力泄油开采机理及参数优化[J]. 特种油气藏, 2024, 31(1): 74-80.
- [5] Jia, X., Qu, T., Chen, H. and Chen, Z. (2019) Transient Convective Heat Transfer in a Steam-Assisted Gravity Drainage (SAGD) Process. *Fuel*, **247**, 315-323. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.03.022>
- [6] Wang, Q., Jia, X. and Chen, Z. (2016) Mathematical Modeling of the Solvent Chamber Evolution in a Vapor Extraction

-
- Heavy Oil Recovery Process. *Fuel*, **186**, 339-349. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.08.066>
- [7] Chai, M., Yang, M. and Chen, Z. (2022) Analytical and Numerical Study of Thermal and Solvent-Based Gravity Drainage for Heavy Oil Recovery. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **208**, Article ID: 109214. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109214>
- [8] Rezaei, N., Mohammadzadeh, O. and Chatzis, I. (2010) Warm VAPEX: A Thermally Improved Vapor Extraction Process for Recovery of Heavy Oil and Bitumen. *Energy & Fuels*, **24**, 5934-5946. <https://doi.org/10.1021/ef100749z>
- [9] James, L.A., Rezaei, N. and Chatzis, I. (2008) VAPEX, Warm VAPEX and Hybrid VAPEX—The State of Enhanced Oil Recovery for in Situ Heavy Oils in Canada. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, **47**, PETSOC-08-04-12-TB. <https://doi.org/10.2118/08-04-12-tb>
- [10] Das, S.K. and Butler, R.M. (1998) Mechanism of the Vapor Extraction Process for Heavy Oil and Bitumen. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **21**, 43-59. [https://doi.org/10.1016/s0920-4105\(98\)00002-3](https://doi.org/10.1016/s0920-4105(98)00002-3)
- [11] Wang, Q. and Chen, Z. (2018) Transient Mass Transfer Ahead of a Hot Solvent Chamber in a Heavy Oil Gravity Drainage Process. *Fuel*, **232**, 165-177. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.05.065>
- [12] Brooks, R.H. and Corey, A.T. (1964) Hydraulic Properties of Porous Media. Hydrology Papers, No. 3, Colorado State University Fort Collins, Colorado.
- [13] Das, S.K. and Butler, R.M. (1996) Diffusion Coefficients of Propane and Butane in Peace River Bitumen. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, **74**, 985-992. <https://doi.org/10.1002/cjce.5450740623>
- [14] Lederer, E.L. (1933) Viscosity of Mixtures with and without Diluents. *Proc World Pet Cong London*, **2**, 526-528.
- [15] Reid, R.C., Prausnitz, J.M. and Poling, B.E. (1987) *The Properties of Gases and Liquids*. McGraw Hill.
- [16] Corey, A.T. (1954) The Interrelation between Gas and Oil Relative Permeabilities. *Prod Monthly*, **19**, 38-41.