

◀油气开发▶

doi:10.11911/syztjs.2019128

高频电磁加热稠油储层温度分布及其影响因素分析

王正旭^{1,2}, 高德利^{1,2}

(1. 石油工程教育部重点实验室(中国石油大学(北京)), 北京 102249; 2. 油气资源与工程国家重点实验室(中国石油大学(北京)), 北京 102249)

摘要: 为了准确分析高频电磁加热过程中影响稠油储层温度分布的因素,以电磁场和传热理论为基础,考虑稠油储层电导率、相对介电常数随频率变化,导热系数、比热容随温度变化的实际情况,建立了描述储层性质动态变化的数学模型,并采用多物理场模拟软件 COMSOL 求解数学模型,采用对比法分析了不同因素对温度分布的影响规律。计算分析发现:电磁波功率的提高有助于增大储层加热深度;较大的电磁波频率可引起波源附近储层温度升高,但温度随深度增大急剧下降;考虑储层性质动态变化时计算出的温度分布,与假设储层性质恒定时的计算结果存在差异;在一定变化范围内,储层温度值随相对介电常数和电导率增大而增大。研究结果表明,储层性质、电磁波功率和频率对储层的温度分布有明显影响,建立的考虑储层性质动态变化的数学模型为高频电磁加热稠油技术的现场应用提供了理论依据。

关键词: 稠油油藏; 高频; 电磁加热; 温度分布; 影响因素

中图分类号: TE357.4

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2020)01-0090-08

Temperature Distribution of Heavy Oil Reservoirs under High Frequency Electromagnetic Heating and an Analysis of Its Influencing Factors

WANG Zhengxu^{1,2}, GAO Deli^{1,2}

(1. MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering (China University of Petroleum (Beijing)), Beijing, 102249, China; 2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering (China University of Petroleum (Beijing)), Beijing, 102249, China)

Abstract: In order to accurately analyze the factors affecting the temperature distribution of heavy oil reservoirs during high frequency electromagnetic heating, a mathematical model with dynamically varied reservoir properties was established based on the theories of electromagnetic field and heat transfer. In this model, frequency dependence of electrical conductivity and the relative permittivity of heavy oil reservoirs were taken into consideration, along with the temperature dependence of thermal conductivity and specific heat. In addition, COMSOL software was employed to develop a mathematical model. Finally, the influencing laws governing temperature variation factors were studied by a contrast method. The calculations reflect a direct correlation between electromagnetic wave power and reservoir heating depth, and they demonstrate that the increase of electromagnetic wave power helps to increase the heating depth of reservoir. Although large electromagnetic wave frequency can lead to high temperature area nearby the wave source, the temperature value decreases sharply with the increase of depth. The results of a temperature calculation considering the dynamic change of reservoir properties differ from those calculated based on the constant reservoir properties. Reservoir temperature increases with the relative permittivity and conductivity within a certain range of variation. The results show that reservoir properties, electromagnetic wave power and frequency have a significant impact on temperature distribution of the reservoir and perhaps are prime influencers. The mathematical model that takes into consideration the dynamic change of reservoir properties provides a theoretical basis for the field application of a high frequency electromagnetic heavy oil heating technology.

Key words: heavy oil reservoir; high frequency; electromagnetic heating; temperature distribution; influencing factors

随着常规油气资源被持续开发、剩余资源日益减少,国民经济发展对油气需求不断增长,以及勘探开发技术不断提高,地质储量丰富的稠油资源将是未来的接替能源之一,具有广阔的开发利用前景。目前采用的稠油蒸汽热采技术存在诸多缺陷:蒸汽在管线及非储层区域热损失大;深层、薄层及裂缝性储层的原油动用难度大^[1-3];地面蒸汽生产设备消耗大量天然气并导致温室气体过度排放,最终

收稿日期: 2019-03-18; 改回日期: 2019-10-15。

作者简介: 王正旭(1987—),男,河北蔚县人,2013年毕业于河北联合大学石油工程专业,2016年获中国石油大学(北京)油气井工程专业硕士学位,在读博士研究生,主要从事油气井力学与控制方面的研究。E-mail: wzyywx@163.com。

基金项目: 国家科技重大专项课题“复杂结构井、丛式井设计与控制新技术”(编号:2017ZX05009-003)、国家自然科学基金创新研究群体项目“复杂油气井钻井与完井基础研究”(编号:51821092)和国家电网公司总部科技项目“再电气化推进技术路线及应用政策研究”(编号:SGFJY00GHJS1800087)联合资助。

导致开采成本过高和环境污染严重^[4-5]。为此, 国内外开展了诸多稠油开采新技术研究^[6-7], 电磁加热法是其中一种有效的稠油开采技术^[8-10]。

1956 年, H. W. Ritchey^[11] 提出了电磁加热法稠油开采技术; 随后, 多位学者对该技术进行了广泛的理论研究^[12-16]。近年来, 因高频电磁加热具有加热快和可以体积加热、内外同时加热的特点, 也符合环保要求^[17-18], 基于高频波段 (大于 100 kHz^[19]) 的电磁加热法得到了高度关注^[20-24]。一些学者利用数值模拟方法分析了高频电磁加热过程中损耗多孔媒质的热传递过程, 比较了电磁加热和其他加热法的加热性能, 并计算了电磁加热用于超稠油开采的温度分布结果^[25-28], 但忽略了电磁加热过程中储层性质一直处于动态变化的情况^[2], 导致计算结果出现偏差, 不能准确反映电磁加热过程。因此, 为了准确计算电磁加热过程中稠油储层的温度分布, 笔者采用喇叭天线来辐射高频电磁波, 建立了考虑稠油储层性质变化的温度分布数学模型, 通过求解该模型来分析稠油储层温度分布的影响因素, 以期高频电磁加热技术的现场应用提供理论依据。

1 电磁加热机理

稠油储层是损耗媒质, 电磁波在其内传播时会产生电磁损耗, 最终电磁能在储层内转化为热能, 实现原油增温降黏的目的。稠油储层内主要含有油、水和岩石 (见图 1), 由于各组分存在性质差异, 它们对电磁波的吸收能力也有所不同。

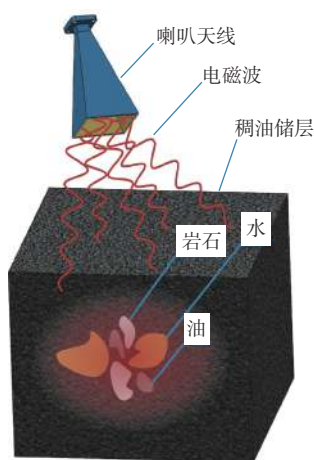


图 1 电磁加热稠油储层示意

Fig.1 Schematic of heavy oil reservoir under electromagnetic heating

一般情况下, 水的吸收能力较强, 这是由于水分子是极性分子, 置于外加电场后, 每个水分子的正负电荷受到外电场力的作用, 形成偶极子; 当外电场按照一定频率发生变化时, 偶极子被反复极化, 分子的剧烈运动引起分子间摩擦并最终产生热能^[19]。因此, 当电磁波穿过储层内部时, 水吸收较多电磁能, 并在储层内部通过热传导作用加热其周围的油和岩石。

2 电磁加热模型

2.1 物理模型

为研究高频电磁加热过程中稠油储层温度分布的影响因素, 建立了三维几何模型, 如图 2 所示。该模型包括喇叭天线、腔体及稠油储层。其中, 喇叭天线的作用是辐射一定频率和功率的电磁波, 腔体将电磁波从喇叭天线传输至稠油储层。图 2 中, 喇叭天线尺寸: $L_a=200.0$ mm, $L_h=54.6$ mm, $W_h=109.0$ mm, $W_a=200.0$ mm, $H_h=50.0$ mm 和 $H_a=300.0$ mm; 腔体尺寸: $L_c=388.0$ mm, $W_c=470.0$ mm, $H_c=200.0$ mm; 稠油储层尺寸: $L_r=388.0$ mm, $W_r=470.0$ mm, $H_r=450.0$ mm。坐标原点位于腔体和储层交界面的中心位置, 喇叭天线及腔体内部充满空气, 并假设其壁面为理想导体, 稠油储层均匀分布且具有各向同性。

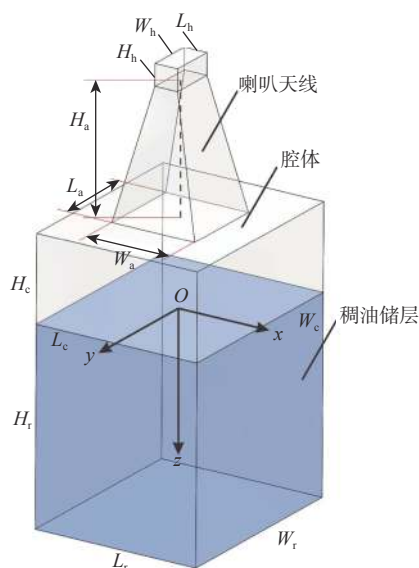


图 2 电磁加热稠油储层三维几何模型

Fig.2 Three-dimensional geometric model of a heavy oil reservoir under electromagnetic heating

2.2 储层性质

高频电磁加热过程中, 储层的性质会发生动态

变化,为此,分别分析了储层电导率、相对介电常数随电磁波频率的变化规律和导热系数、比热容随温度变化的特性。

电磁波频率对储层电导率和相对介电常数的影响规律如图3所示^[29]。

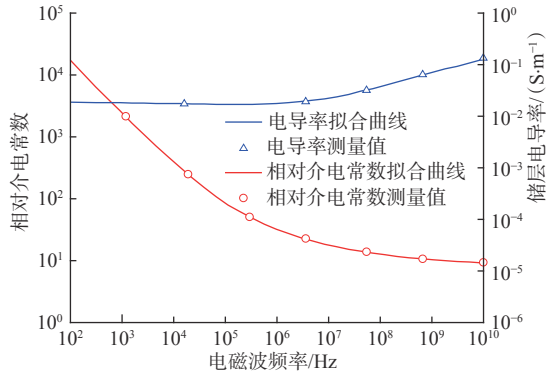


图3 电磁波频率对储层电导率和相对介电常数的影响

Fig.3 Changing laws of electric conductivity and relative permittivity of reservoir with frequency

通过最小二乘拟合法,可以得到储层电导率和相对介电常数关于电磁波频率的函数表达式,其相对误差分别为3.3%和4.2%。

储层电导率的计算公式为:

$$\lg \sigma(f) = -1.420 - 0.24 \lg f + 0.03 \lg^2 f \quad (f > 1.5 \times 10^5 \text{ Hz}) \quad (1)$$

式中: σ 为储层的电导率, S/m; f 为电磁波频率, Hz。

相对介电常数的计算公式为:

$$\lg \varepsilon_r(f) = 6.740 - 1.44 \lg f + 0.09 \lg^2 f \quad (1.4 \times 10^9 \text{ Hz} \leq f \leq 2.0 \times 10^9 \text{ Hz}) \quad (2)$$

式中: ε_r 为储层的相对介电常数。

储层导热系数和比热容与温度的关系可表示为^[2]:

$$k(T) = 1.20 \times 10^{-6} T^2 - 4.48 \times 10^{-4} T + 0.179 \quad (0 \leq T \leq 220^\circ \text{C}) \quad (3)$$

$$c(T) = -0.001 T^2 + 2.186 T + 132.423 \quad (0 \leq T \leq 220^\circ \text{C}) \quad (4)$$

式中: k 为导热系数, W/(m·°C); T 为温度, °C; c 为比热容, J/(kg·°C)。

此外, 储层密度 ρ 为恒定值 1 950 kg/m³, 且初始温度 T_0 设为 25 °C。

2.3 电磁场与电磁热源

电磁波在损耗媒质中传播时, 呈现逐渐衰减的特点(见图4), 其中 $\mathbf{E}$ 和 $\mathbf{H}$ 分别为电场强度和磁场强度, 且电磁波沿 z_1 方向传播^[25]。

因此, 根据损耗媒质中的麦克斯韦方程^[30], 可推

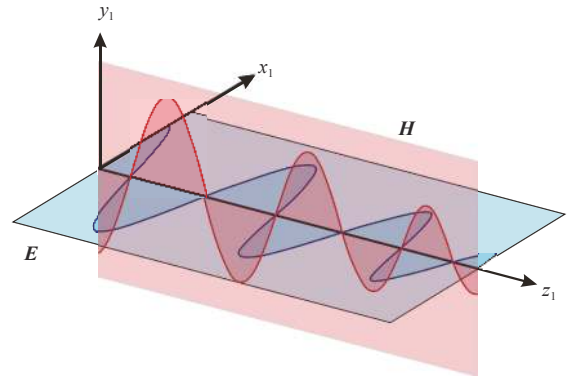


图4 电磁波衰减示意

Fig.4 Schematic of electromagnetic waves attenuation

导出该情况下的齐次亥姆霍兹方程^[31]:

$$\nabla^2 \mathbf{E} + k_c^2 \mathbf{E} = 0 \quad (5)$$

式中: $\mathbf{E}$ 为媒质中电场强度, V/m; k_c 为损耗媒质中的波数, rad/m。

k_c 为复数, 也称为复数波, 其表达式为^[31]:

$$k_c = \omega \sqrt{\mu \varepsilon_c} \quad (6)$$

式中: ω 为角频率, rad/s; μ 为损耗媒质的磁导率, H/m; ε_c 为复介电常数。

其中, 复介电常数和角频率的表达式分别为:

$$\varepsilon_c = \varepsilon - j \frac{\sigma}{\omega} \quad (7)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (8)$$

式中: ε 为损耗媒质的介电常数, F/m; j 为虚数单位; σ 为媒质的电导率, S/m。

根据式(6)和式(8), 可知真空中的波数 k_0 为:

$$k_0 = \omega \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} \quad (9)$$

式中: ε_0 为真空介电常数, F/m; μ_0 为真空磁导率, H/m。

将式(6)~式(9)代入式(5), 得:

$$\mu_r^{-1} \nabla^2 \mathbf{E} + k_0^2 \left(\varepsilon_r - \frac{j\sigma}{2\pi f \varepsilon_0} \right) \mathbf{E} = 0 \quad (10)$$

式中: μ_r 为相对磁导率, 即媒质磁导率 μ 与真空磁导率 μ_0 之比, 由于假定储层是无磁的, $\mu_r = 1.0$; ε_r 为相对介电常数, 即损耗媒质介电常数 ε 与真空介电常数 ε_0 之比。

此外, 对于电磁强度 $\mathbf{E}$, 有如下关系:

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = \nabla (\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E} \quad (11)$$

在无源的麦克斯韦表达式中, $\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$, 再将式(11)代入式(10), 得到电场在储层内传播时的计算表达式:

$$\nabla \times \mu_r^{-1} (\nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2 \left[\varepsilon_r(f) - \frac{j\sigma(f)}{2\pi f \varepsilon_0} \right] \mathbf{E} = 0 \quad (12)$$

式(12)中, 储层的相对介电常数和电导率是关

于电磁波频率的函数。

在储层内, 电磁波单位体积损耗功率的表达式为^[2]:

$$Q = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \{ [\sigma(f) - 2\pi f j \varepsilon_r(f)] \mathbf{E} \cdot \mathbf{E}^* \} \quad (13)$$

式中: Q 为电磁波单位体积的损耗功率, W/m^3 。

$$\rho c(T) \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla \cdot [k(T) \nabla T] + q \quad (14)$$

式中: t 为加热时间, s ; ρ 为储层密度, kg/m^3 ; T 为储层被加热时间 t 后的温度, $^{\circ}\text{C}$; q 为内热源强度, W/m^3 , 表示单位体积单位时间内所吸收的热量。

利用式(12)求得储层内电场, 然后代入式(13), 计算得到的 Q 项等于式(14)中的内热源强度 q ^[32], 即 $Q=q$ 。其中, 储层不同温度下的导热系数和比热容分别利用式(3)和式(4)进行计算。最后, 求解式(14)可得到储层的温度分布。

初始温度设为恒定值, 即:

$$T|_{t=0} = T_0 \quad (15)$$

此外, 稠油储层外表面均是绝热的, 根据傅里叶定律, 该表面上温度梯度为 0, 边界条件表示为:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} \right|_s = 0 \quad (16)$$

式中: s 为储层外表面; $\mathbf{n}$ 为 s 面的法向量。

采用多物理场模拟软件 COMSOL 求解上述数学模型, 为了提高计算精度, 对物理模型交界区域进行了网格加密处理(见图 5)。

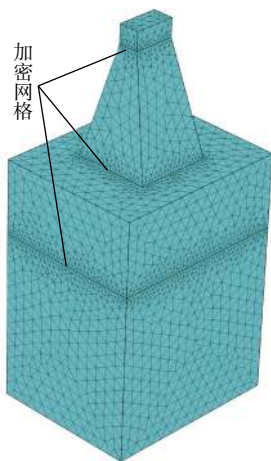


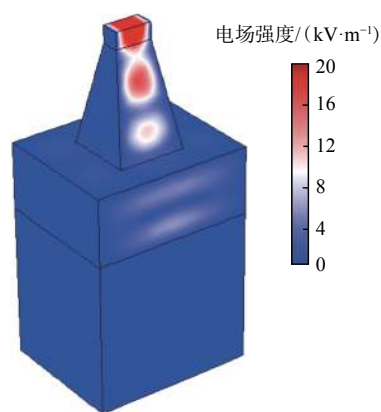
图 5 电磁加热稠油储层物理网格划分

Fig.5 Grid partition of the heavy oil reservoir under electromagnetic heating

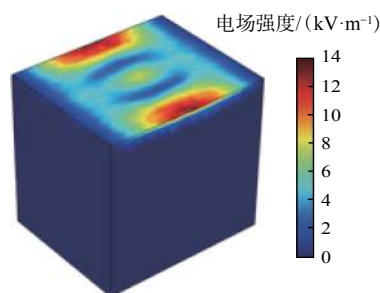
3 电场和温度场分布

电磁波频率为 1.6 GHz、功率为 1.5 kW 时, 稠

油储层加热 6 h 后, 模拟喇叭天线和稠油储层的电场分布, 结果见图 6。从图 6 可知: 电场强度在喇叭天线端口处较大且电磁波沿着 z 轴方向向储层传播; 在电磁波入射的储层面上, 与 y 轴平行的两边附近区域的电场强度较大, 且电场在电磁波入射的储层面内沿 y 轴对称分布。



(a) 喇叭天线电场分布



(b) 稠油储层电场分布

图 6 电场分布模拟结果

Fig.6 Calculation results of electric field distribution

储层温度分布随时间的变化情况如图 7 所示。从图 7 可以看出: 电磁波入射面的储层温度也呈现沿 y 轴对称分布的特点, 这与图 6(b) 所示的电场分布规律类似; 加热初期, 在电磁波入射的储层面内, 平行于 y 轴的两边附近区域的温度较高, 随着加热时间增长, 电磁波入射储层面中心区域的温度逐渐升高, 接近上述两边附近的温度, 且沿加热深度逐步扩大。这是由于在热传导的作用下, 加热时间延长, 导致加热范围逐步扩大。

4 影响因素分析

高频电磁加热过程中, 稠油储层温度分布的影响因素主要包括电磁波功率和频率, 储层的导热系数、比热容、相对介电常数和电导率。

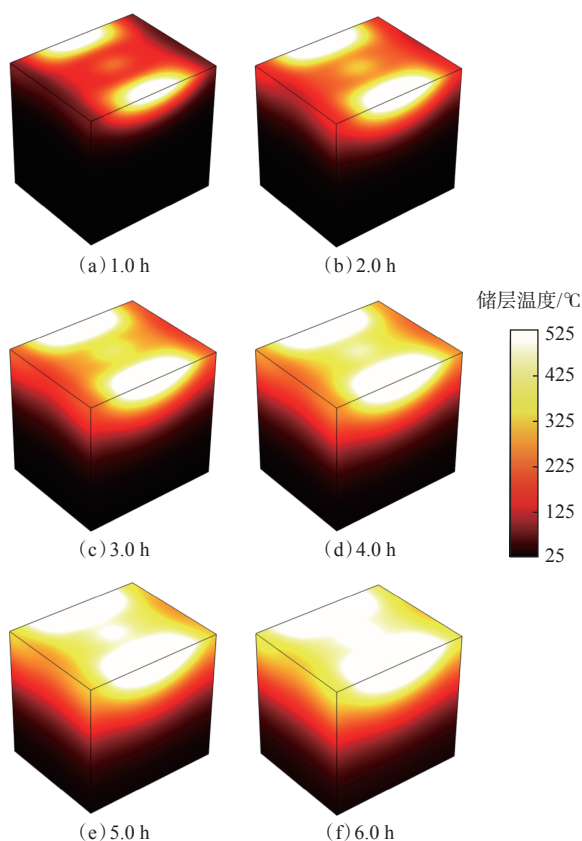


图7 储层温度随时间的变化规律

Fig.7 Changing relationship of reservoir temperature with time

4.1 电磁波功率和频率

在加热时间恒为6 h时,电磁波功率对储层温度分布的影响见图8。从图8可以看出,随着电磁波功率增大,储层加热深度增大,电磁波入射储层面的温度分布也趋于均匀。由此可知,电磁波功率增大,能使更多的电磁能转化为储层内的热能,储层的高温区域增大。

电磁波频率对储层温度分布的影响研究分2种情况进行:1)基于实际情况,考虑频率变化引起储层电导率和相对介电常数的变化,其变化规律符合式(1)和式(2);2)储层电导率和相对介电常数不受频率影响,始终为0.08 S/m和12.5。

根据以上2种情况,一方面分析电磁波频率对储层温度分布的影响规律,另一方面对2种情况下的储层温度分布结果进行比较和分析。电磁波频率分别选取1.4、1.6和1.8 GHz,对应的储层电导率分别为0.080、0.082和0.085 S/m,相对介电常数分别为12.5、12.9和13.2。

在情况2)的条件下,储层沿深度的温度分布受电磁波频率的影响规律如图9所示。

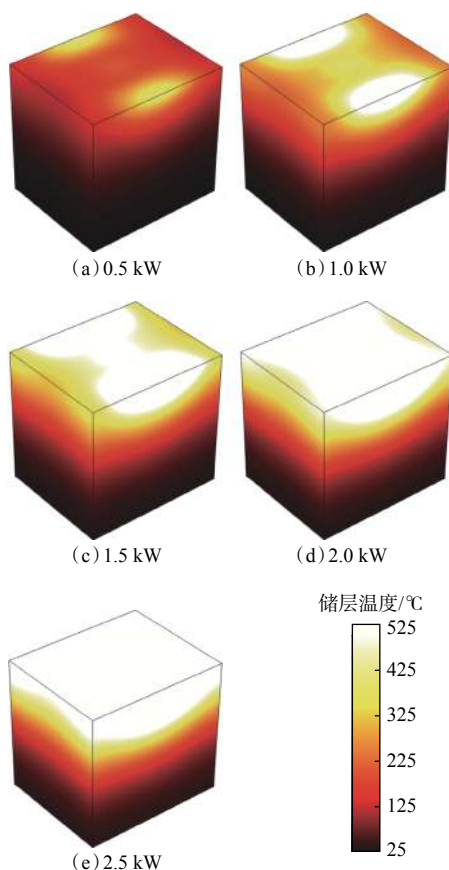


图8 不同电磁波功率下储层温度分布三维图

Fig.8 Three-dimensional map of reservoir temperature distribution under different electromagnetic wave powers

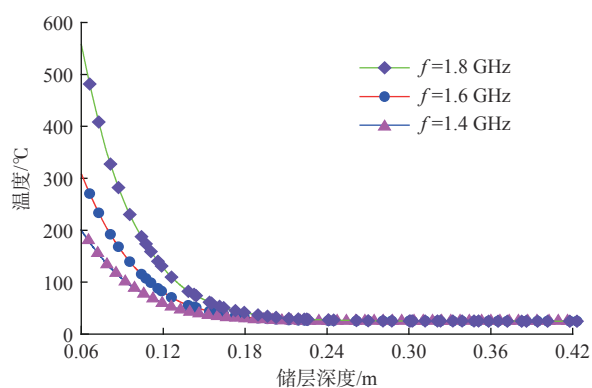


图9 电磁波频率对储层温度分布的影响

Fig.9 The influence of electromagnetic wave frequency on reservoir temperature distribution

从图9可以看出,电磁波频率增大,能够使入射波储层面区域的温度急剧升高,但随着加热深度增加,温度急剧下降。因此,增大电磁波频率,有助于快速升温,但不利于增大加热距离。

通过求解数学模型,分别得到了2种情况下储层温度沿深度的变化情况,见图10(图10中,绿色

曲线表示电磁波频率从 1.4 GHz 变为 1.6 GHz 或者 1.8 GHz、而电导率和相对介电常数恒为 1.4 GHz 时的恒定值(即 0.080 S/m 和 12.5)的计算结果,蓝色曲线表示根据式(1)和式(2)计算该频率下对应电导率和相对介电常数时的结果)。由图 10 可知:在不考虑储层电导率和相对介电常数随电磁波频率变化的情况下,储层温度计算结果偏高,即储层性质不变时的温度计算结果要大于现场实际加热过程中的储层温度。

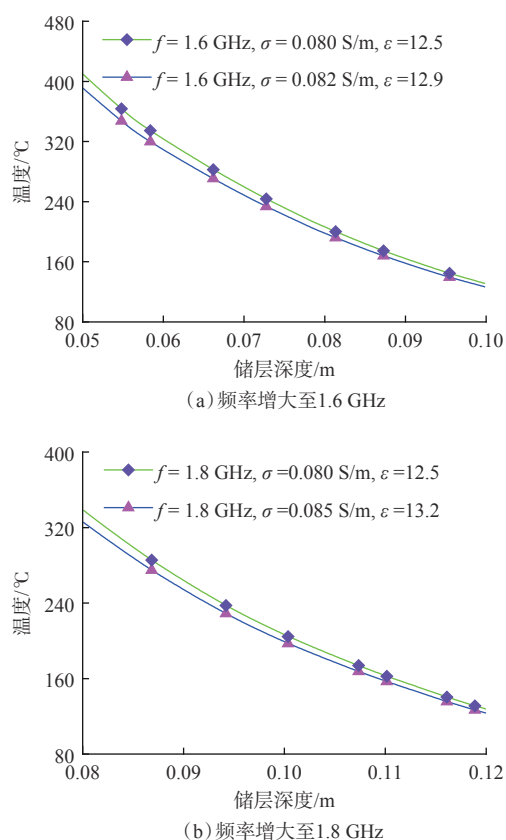


图 10 储层电导率和相对介电常数随电磁波频率变化和恒定时的温度分布对比

Fig.10 A comparison of temperature distributions based on the constant and variable electrical conductivity and relative permittivity of reservoir with temperature

4.2 储层导热系数和比热容

在加热时间恒为 6 h 的条件下,分 2 种情况进行研究:1)基于实际情况,考虑温度变化引起储层导热系数和比热容改变,其变化规律依据式(3)和式(4)计算分析;2)储层导热系数和比热容不受温度影响,其值恒为 $0.2 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ 和 $800 \text{ J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ 。

通过求解数学模型,分别得到了 2 种情况下的储层温度分布情况,如图 11 所示。

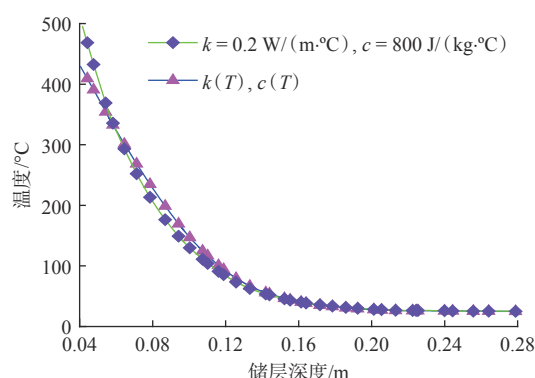


图 11 储层导热系数和比热容随温度变化和恒定时的温度分布对比

Fig.11 A comparison of temperature distributions based on the constant and variable thermal conductivity and specific heat of reservoir with temperature

从图 11 可以看出:情况 1)下的储层温度分布曲线与情况 2)下的储层温度分布曲线存在交点;在该交点横坐标左侧的区域内,情况 2)下的储层温度较高;在该交点横坐标右侧的一段区域内,情况 1)下的储层温度较高。这说明在不考虑储层导热系数和比热容随温度变化的情况下,接近波源储层区域温度的计算结果高于储层实际温度,远离波源一定距离储层区域内温度的计算结果低于储层实际温度;随着储层深度进一步增大,2 条曲线同时下降,并趋于重合。以上温度分布曲线与文献[2]中温度分布曲线基本吻合,验证了以上结果的正确性,同时也验证了数学模型的有效性。

4.3 储层相对介电常数和电导率

研究不同稠油储层的相对介电常数和电导率对温度分布的影响规律时,电磁波频率恒为 1.6 GHz,储层相对介电常数及电导率的取值范围可参考文献[29]。假设储层的相对介电常数分别为 8.5, 12.5 和 16.5,计算不同相对介电常数下的温度分布曲线,结果见图 12。由图 12 可知:不同相对介电常数下的储层温度随深度增大而降低,3 条温度分布曲线随着深度增大逐渐趋于重合;储层相对介电常数从 8.5 增至 16.5 时,储层深度小于 0.15 m 时其温度均升高,表明储层相对介电常数越大,对电磁波加热开采稠油越有利。

假设储层电导率分别为 0.01, 0.08 和 0.15 S/m,计算不同电导率下的温度分布曲线,结果如图 13 所示。从图 13 可以看出:随着电导率增大,沿深度方向的储层温度也明显升高,这与图 12 中的温度分布曲线变化规律相似。以上研究表明,稠油储层相对

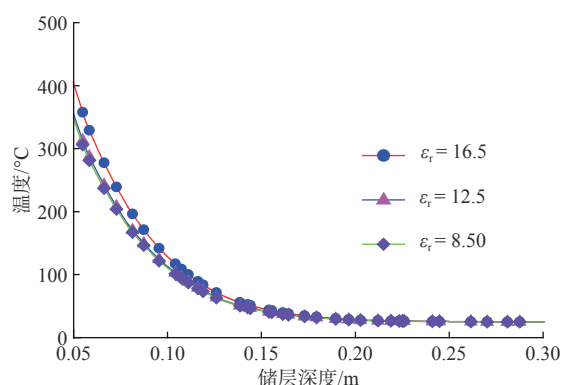


图 12 储层相对介电常数对温度分布的影响

Fig. 12 The influence of reservoir relative permittivity on temperature distribution

介电常数和电导率在一定范围内增大, 可以提高储层温度。

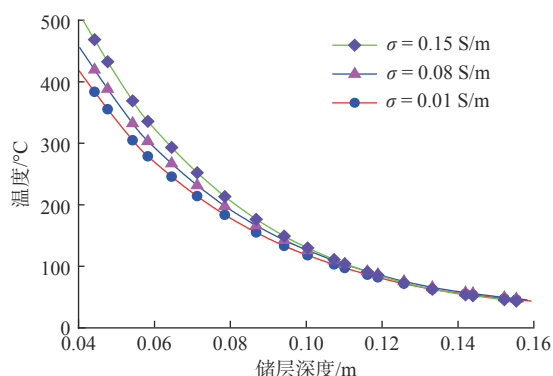


图 13 储层电导率对温度分布的影响

Fig. 13 The influence of reservoir electric conductivity on temperature distribution

5 结论与建议

1) 储层的加热深度随电磁波功率增大而增大; 波源附近储层温度随频率升高而升高; 考虑储层性质随温度或频率变化时的温度计算结果与储层性质恒定时的计算结果不同; 在一定变化范围内, 增大储层相对介电常数和电导率, 可以提高储层温度。

2) 当电磁波频率达到吉赫兹 (GHz) 数量级时, 电磁加热稠油储层的加热距离较短, 难以满足现场远距离加热的需求。

3) 本文也是基于电磁场和传热理论来描述电磁加热稠油储层的过程, 但建立的数学模型考虑了储层性质的动态变化, 利用该模型求得的温度分布结果对于准确预测实际加热过程中的储层温度分布具有一定的指导作用。

4) 井下电磁加热技术是一种多学科结合的新型稠油热采技术, 涉及电磁场和温度场的耦合作用, 建议开展室内实验来确定储层性质随温度和频率的变化规律, 并对理论模型进行验证, 以准确预测电磁加热过程中的储层温度分布。

参考文献

References

- [1] BERA A, BABADAGLI T. Status of electromagnetic heating for enhanced heavy oil/bitumen recovery and future prospects: a review[J]. *Applied Energy*, 2015, 151: 206–226.
- [2] WANG Zhengxu, GAO Deli, FANG Jun. Numerical simulation of RF heating heavy oil reservoir based on the coupling between electromagnetic and temperature field[J]. *Fuel*, 2018, 220: 14–24.
- [3] GHANNADI S, IRANI M, CHALATURNYK R. Overview of performance and analytical modeling techniques for electromagnetic heating and applications to steam-assisted-gravity-drainage process startup[J]. *SPE Journal*, 2016, 21(2): 311–333.
- [4] WISE S, PATTERSON C. Reducing supply cost with EseechTM pronounced easy[R]. SPE 180729, 2016.
- [5] 刘栋梁, 顾继俊. 稠油热采技术现状及发展趋势 [J]. *当代化工*, 2018, 47(7): 1445–1447, 1451.
LIU Dongliang, GU Jijun. Present situation and development trend of heavy oil thermal recovery technology[J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2018, 47(7): 1445–1447, 1451.
- [6] 王玉斗, 关继腾, 王殿生. 电加热开采稠油油藏影响因素研究 [J]. *石油钻探技术*, 2004, 32(6): 53–55.
WANG Yudou, GUAN Jiteng, WANG Diansheng. Study on factors affecting electrical heating technique to enhance heavy oil recovery[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2004, 32(6): 53–55.
- [7] 朱广海, 刘章聪, 熊旭东, 等. 电加热稠油热采井筒温度场数值计算方法 [J]. *石油钻探技术*, 2019, 47(5): 110–115.
ZHU Guanghai, LIU Zhangcong, XIONG Xudong, et al. Numerical calculation method of the wellbore temperature field for electric heating heavy oil thermal recovery[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(5): 110–115.
- [8] ABDULRAHMAN M M, MERIBOUT M. Antenna array design for enhanced oil recovery under oil reservoir constraints with experimental validation[J]. *Energy*, 2014, 66: 868–880.
- [9] 刘晓, 苑塔亮, 王澈, 等. 电磁加热技术开采稠油和沥青油藏的研究进展 [J]. *当代化工*, 2015, 44(12): 2796–2801.
LIU Xiao, YUAN Taliang, WANG Che, et al. Research progress in electromagnetic heating technology for heavy oil and bitumen reservoir recovery[J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2015, 44(12): 2796–2801.
- [10] 杨兆中, 齐双瑜, 李小刚, 等. 电磁加热技术在石化能源中的应用进展 [J]. *世界科技研究与发展*, 2017, 39(2): 159–163.
YANG Zhaozhong, QI Shuangyu, LI Xiaogang, et al. Application of electromagnetic heating technology in petrochemical energy[J]. *World Sci-Tech R&D*, 2017, 39(2): 159–163.
- [11] RITCHEY H W. Radiation heating: US2757738[P]. 1956-08-07.
- [12] 苗青, 张传农, 高新楼, 等. 电磁法改善易凝高粘原油流动性的实验 [J]. *油气储运*, 2013, 32(11): 1167–1170.
MIAO Qing, ZHANG Chuannong, GAO Xinlou, et al. Experiment-

- al study on improving flowability of high viscous and gelled crude oil with electromagnetic method[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2013, 32(11): 1167–1170.
- [13] 冯金德, 蒲春生, 冯金城. 电磁加热解除近井地层凝析油堵塞的数学模型[J]. *天然气工业*, 2005, 25(11): 85–87.
FENG Jinde, PU Chunsheng, FENG Jincheng. Mathematical model to remove condensate blockage by electromagnetic heating[J]. *Natural Gas Industry*, 2005, 25(11): 85–87.
- [14] DAVLETBAEV A, KOVALEVA L, BABADAGLI T. Combining solvent injection, electromagnetic heating, and hydraulic fracturing for multistage heavy oil recovery[J]. *Journal of Electromagnetic Waves & Applications*, 2016, 30(2): 207–224.
- [15] CHEN Jinhong, GEORGI D T, LIU Huihai. Electromagnetic thermal stimulation of shale reservoirs for petroleum production[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2018, 59: 183–192.
- [16] HU Lanxiao, LI Huazhou A, BABADAGLI T, et al. A semianalytical model for simulating combined electromagnetic heating and solvent-assisted gravity drainage[J]. *SPE Journal*, 2018, 23(4): 1248–1270.
- [17] GHANNADI S, IRANI M, CHALATURNYK R. Induction and radio frequency heating strategies for steam-assisted gravity drainage start-up phase[R]. SPE 170037, 2014.
- [18] BOGDANOV I, CAMBON S, PRINET C. Analysis of heavy oil production by radio-frequency heating[R]. SPE 172862, 2014.
- [19] 陈新谋, 刘梧日. 高频介质加热技术[M]. 北京: 科学出版社, 1979: 2–9.
CHEN Xinmou, LIU Wuri. Technology of high-frequency dielectric heating[M]. Beijing: Science Press, 1979: 2–9.
- [20] WANG Zhengxu, GAO Deli, LIU Kui, et al. Study on radio frequency heating pattern of heavy oil reservoir based on multi-antenna configuration[R]. SPE 193774, 2018.
- [21] WILSON A. Radio-frequency heating combined with solvent injection for heavy-oil recovery[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 2017, 69(3): 68–69.
- [22] IRANI M, SAEEDFAR A. Equilibrium analysis of desiccated zone growth during radio-frequency heating[R]. SPE 189771, 2018.
- [23] BERA A, BABADAGLI T. Effect of native and injected nanoparticles on the efficiency of heavy oil recovery by radio frequency electromagnetic heating[J]. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 2017, 153: 244–256.
- [24] BIENTINESI M, PETARCA L, CERUTTI A, et al. A radiofrequency/microwave heating method for thermal heavy oil recovery based on a novel tight-shell conceptual design[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2013, 107: 18–30.
- [25] SADEGHI A, HASSANZADEH H, HARDING T G. Thermal analysis of high frequency electromagnetic heating of lossy porous media[J]. *Chemical Engineering Science*, 2017, 172: 13–22.
- [26] SADEGHI A, HASSANZADEH H, HARDING T G. A comparative study of oil sands preheating using electromagnetic waves, electrical heaters and steam circulation[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 111: 908–916.
- [27] SADEGHI A, HASSANZADEH H, HARDING T G. Modeling of desiccated zone development during electromagnetic heating of oil sands[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, 154: 163–171.
- [28] BERMÚDEZ J M, ACOSTA W, ANDARCIA L, et al. Assisted extra heavy oil sampling by electromagnetic heating[R]. SPE 171073, 2014.
- [29] CHUTE F S, VERMEULEN F E, CERVENAN M R, et al. Electrical properties of Athabasca oil sands[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1979, 16(10): 2009–2021.
- [30] 亚瑟·冯·希佩尔. 电介质与波[M]. 影印版. 西安: 西安交通大学出版社, 2011: 19–28.
von HIPPEL Arthur. Dielectrics and waves[M]. photocopy edition. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2011: 19–28.
- [31] 王园, 杨显清, 赵家升. 电磁场与电磁波基础教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008: 173–174, 183.
WANG Yuan, YANG Xianqing, ZHAO Jiasheng. Elementary course of electromagnetic field and electromagnetic wave[M]. Beijing: High Education Press, 2008: 173–174, 183.
- [32] 章熙民, 朱彤, 安青松, 等. 传热学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014: 18–19.
ZHANG Ximin, ZHU Tong, AN Qingsong, et al. Heat transfer[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014: 18–19.

[编辑 滕春鸣]