

稠油出砂冷采数学模型研究

潘一,肖立志

中国石油大学(北京)地球物理与信息工程学院,北京 102249

摘要 随着世界经济快速发展和对石油需求的不断增长,具有巨大勘探潜力和广阔发展前景的重油成为 21 世纪重要的能源资源之一,全球稠油储量目前达到 6 万亿桶。稠油出砂冷采(CHOPS)是重油生产的重要方法之一,该技术可以避免热采时油层出砂、气窜和采油成本高的问题。因此,对稠油出砂冷采技术进行相关研究,具有重要的战略意义。在对 CHOPS 的蚯蚓洞生长和泡沫油流两个主要机制进行比较的基础上,提出了耦合地质力学和流体力学的稠油出砂冷采模型。为了验证模型的可靠性和实用性,使用油田实际数据对模型进行验证,分析了对 CHOPS 技术应用影响较大的几个参数,进一步确定了该技术的应用范围。最后分析了模型的优缺点,提出了模型今后的发展方向,确定了下一步的研究重点。

关键词 稠油油藏;冷采;出砂;模型;模拟

中图分类号 TE345

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.16.007

Modeling Cold Heavy Oil Production with Sand

PAN Yi, XIAO Lizhi

College of Geophysics and Information Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

Abstract Heavy oil is the most important resource to supplement the loss of oil in the 21st century. The International Energy Agency (IEA) estimates that there are 6 trillion barrels of heavy oil worldwide. Currently, the standard heavy oil production is based on steam injection, which faces a great challenge because of the sand production, gas channelling, and high costs. Cold Heavy Oil Production with Sand (CHOPS) has extremely good primary performance, high oil production rates, high primary recovery factors, and low operational costs. In this paper, the mathematical and numerical descriptions are given for the sand production within the context of continuum mechanics and finite elements, with emphasis on the physics of the sand production and its relation to the interaction between hydrodynamics and geomechanics. A mathematical model is proposed based on the erosion mechanics, while the instability associated with the sand production is treated within the framework of the high gradient continuum mixture theory. Numerical results of the proposed model are in good agreement with the oil field data, which shows that the model could be applied to predict the oil production and to provide a guidance to adjust the explore strategy. Moreover, the influencing factors, such as oil viscosity, producing pressure drop and information coefficient on CHOPS performances are discussed, which helps to determine what kind of reservoir is relevant for the application of the CHOPS. At last, the advantages and disadvantages of the model are discussed in detail and the future work of modeling cold production is commented.

Keywords heavy oil reservoir; cold production; sand production; model; simulation

0 引言

据统计,目前世界剩余石油资源 10 万亿桶,70%以上是稠油,巨大的资源量决定了稠油必将是 21 世纪的主要能源^[1]。动用稠油资源是缓解未来原油短缺的重要手段,经济、高效地开发稠油具有重要的现实和战略意义^[2]。中国稠油资源比较

丰富,陆上稠油、沥青资源约占石油资源总量的 20%以上,但是由于使用传统的开采方法,只有 5%的稠油能被开采出来,而采用注入蒸汽的热采方式存在油层出砂、气窜和采油成本高等问题。因此,近年来在加拿大兴起的一种新的稠油开采技术——稠油出砂冷采(Cold Heavy Oil Production with Sand,

收稿日期:2011-04-26;修回日期:2011-05-23

作者简介:潘一,博士研究生,研究方向为油藏模拟,电子信箱:panyi_bj@126.com

CHOPS),引起了研究人员的兴趣。稠油出砂冷采技术实质上是一种非加热一次采油方式,其技术原理是通过地层的大量出砂而在储层内形成高渗透率的通道,利用泡沫油的作用开采稠油油藏,这较好地解决了上面提到的热采中遇到的问题,并能够大大提高采收率^[3-4]。实践结果表明,出砂冷采技术可以降低油气开采成本,并提高油气资源的利用率。总之,稠油的开采是缓解原油短缺的重要手段,出砂冷采是经济、高效开发稠油的主要方法,谁能加快稠油技术的开发速度,谁就会在能源危机不断被提及的今天,在稠油成为接替能源的过程中掌握主动。因此,对稠油出砂冷采技术进行相关的开采工艺研究,具有重要的战略意义;针对稠油开发利用存在投资大、风险高、设施配套不完善等问题,进行稠油出砂冷采技术相关的数值模拟模型研究,具有重要的现实意义^[5-6]。

1 数学模型的建立

出砂与流体力学和地质力学有很紧密的联系。由于出砂涉及从固体到液体的所有物质的响应,因此模拟出砂是一项艰巨的任务。离散元法虽然适用于计算物理现象,但是其对于计算条件要求较高,且不能准确描述颗粒之间的关系以及液相间的相互转化,因此不适用于出砂模拟。而连续力学法在均匀混合介质理论中更适合模拟初始出砂和出砂累积量。

1.1 假设

从机械力学角度出发,出砂过程是一种不稳定的现象,是饱和黏稠液体的孔隙介质在机械形变下所产生的流体通量。虽然孔隙介质是非匀质性的,但它仍适用于混合物连续介质理论。混合物的全部组分包括固体、液化固体和液体,如图1^[7]所示,混合物出现在任何被表征单元体所占据的空间。表征单元体的大小可以是几百或几千个孔隙空间。为了使问题能够简便的用公式表述,做以下假设:岩石骨架能够产生细微形变,而且是各向同性的均匀介质;模型使用非线性弹塑性关系,而不是线性的应力应变关系;应力方向为负,孔隙空间被液体完全充满,孔隙流体压力方向为正;液体不能被压缩,密度 ρ_l 为常数。固体密度 ρ_s 和液化固体密度 ρ_{ls} 相等,并且是常量,即 $\rho_s=\rho_{ls}$;固液之间没有动量转换,液体与液化颗粒具有相同速度,即 $u_l=u_{ls}$;混合液流动符合达西定律。

定义如下连续场变量:孔隙度 $\phi=\frac{dV_p}{dV_t}$, V_p 为孔隙体积, V_t 为总体积;液化砂浓度 $c=\frac{dV_{ls}}{dV_p}$, V_{ls} 为液化砂体积;流体体积

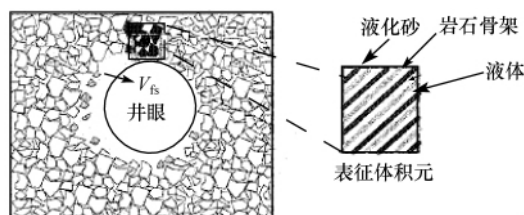


图1 体积元示意图

Fig. 1 The diagram of elementary volume

流速 $v=\frac{dV}{dSdt}$, dV 指混合流体在 dt 时间内,通过单位截面积 dS 的体积。

1.2 出砂冷采数学模型

1.2.1 质量守恒方程

用 u 表示速度,则固相质量守恒方程可以写成

$$\frac{\partial[(1-\phi)\rho_s]}{\partial t} + \nabla \cdot [(1-\phi)\rho_s u_s] = -\dot{m} \quad (1)$$

其中, u_s 为固相边界的绝对速度,等式右边项的负号说明侵蚀作用使骨架丢失固体颗粒, $\dot{m}$ 表示每单位体积固体出砂量,即液化相。

液化相质量守恒方程

$$\frac{\partial(\phi c \rho_{ls})}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi c \rho_{ls} u_{ls}) = \dot{m} \quad (2)$$

其中 u_{ls} 为液化相绝对速度。

液相质量守恒方程

$$\frac{\partial[\phi(1-c)\rho_l]}{\partial t} + \nabla \cdot [\phi(1-c)\rho_l u_l] = 0 \quad (3)$$

其中, u_l 为液相绝对速度。

当流体通过多孔介质时,相对于岩石骨架,混合物体积平均体积流的速度 v_m 为:

$$v_m = \phi(u_l - u_s) \quad (4)$$

因为 $u_l = u_{ls}$,根据式(4)有

$$u_l = u_{ls} = \frac{v_m}{\phi} + u_s \quad (5)$$

对于局部质量守恒方程(1)~(3),利用辅助方程(5)消去液化相速度和液相速度,可以得到以下3个控制方程:

$$-\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot [(1-\phi)u_s] = -\frac{\dot{m}}{\rho_s} \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\phi c)}{\partial t} + \nabla \cdot (c v_m + c \phi u_s) = \frac{\dot{m}}{\rho_{ls}} \quad (7)$$

$$\frac{\partial[(1-c)\phi]}{\partial t} + \nabla \cdot [(1-c)v_m + (1-c)\phi u_s] = 0 \quad (8)$$

由于混合物流体是不可压缩的,可得

$$\nabla \cdot v_m = -\nabla \cdot u_s = -\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} \quad (9)$$

其中, ε_v 为由流体通量净变化率对应的形变导致的骨架体积变化量。由于在压力作用下岩石骨架产生形变,且侵蚀作用使一些骨架颗粒脱离岩石骨架进入液相,导致以上方程中孔隙度是变化的。因此,理想总孔隙度可以分成应力感应孔隙度 ϕ_σ 和侵蚀孔隙度 ϕ_q ,即 $\phi = \phi_\sigma + \phi_q$ 。那么可以得到下式

$$\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} = \frac{\partial \phi_\sigma}{\partial t} \quad (10)$$

在式(6)~式(10)组成的方程组中,包含 $c, \phi, \dot{m}, v_m, u_s, t, \rho_s, \varepsilon_v, \phi_\sigma$ 和 ϕ_q 等多个未知数。因此需要更多的控制方程描述实际的物理问题。

1.2.2 平衡与应力分解

为了能够描述耦合效果,必须把岩石骨架形变与流体间力的相互作用合并到控制方程中。如在没有液体产出情况下,

岩石骨架压缩将导致孔隙压力变大。而孔隙压力的变化又会导致岩石骨架结构不稳定。在准稳态条件下,总应力 σ 范围内,动态动量方程可以用相应的整体静力平衡代替。即

$$\nabla \cdot \sigma + b = 0 \quad (11)$$

其中, b 为计算每单位体积的体积力。为了描述流体力学现象,即形变区对液体的影响,多孔介质内有效应力结构被分为两部分,骨架有效应力 σ' 和饱和孔隙流体压力 p ,则有

$$\sigma = \sigma' - \lambda p \quad (12)$$

其中, λ 为骨架压实系数。同时假定压缩方向为负,流体压力为正方向^[8-9],进而得到压缩系数 λ 的公式

$$\lambda = 1 - \frac{c_g}{c_s} \quad (13)$$

其中, c_g 为颗粒压缩性, c_s 为骨架压缩性。如果 $c_g \gg c_s$,则 $\lambda = 1$ 。这有助于进一步理解骨架有效应力 σ' 的性质,以及总应力 σ 的平均和分解,即

$$\sigma = \bar{\sigma}_s(1 - \phi) - \phi p \quad (14)$$

式中, $\bar{\sigma}_s$ 为平均粒间应力。假设 $\lambda = 1$,由式(12)和式(14)可以得到有效应力与粒间应力的关系,即

$$\sigma' = (1 - \phi)(\bar{\sigma}_s - p) \quad (15)$$

有限元方法是目前比较先进的数值模拟技术。主要未知数如孔隙度 ϕ ,压力 p ,液化固体浓度 c 和孔隙介质移动速度 u_s 等,都可以使用该方法求解。在设置了初始和边界条件的情况下,与时间相关的边界值问题可以通过有限元方法求得数值解,比如使用Newton-Raphson迭代解决非线性问题。

2 模型验证

2.1 油田生产数据

稠油出砂冷采技术对提高采收率起积极作用。某使用CHOPS技术油井数据如下:层胶结疏松,埋藏深度483m,原油黏度30000mPa·s,原油密度0.98g/cm³,有效厚度9.4m,侵蚀系数为12m⁻¹,水平渗透率1.5μm²,垂直渗透率0.15μm²,压实系数0.25,孔隙度34%,含油饱和度65%,生产压差3300kPa。图2和图3为该油田应用典型CHOPS技术油井生产数据统计图。

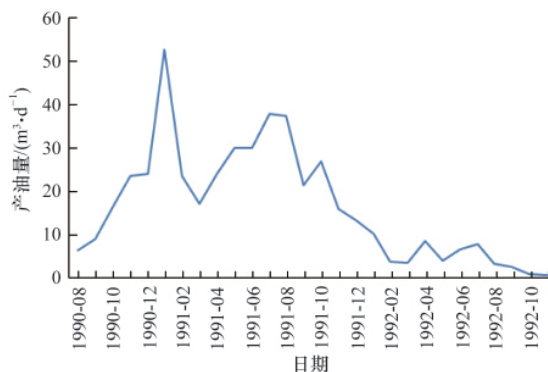


图2 CHOPS油井日平均产油量
Fig. 2 Daily oil production of CHOPS well

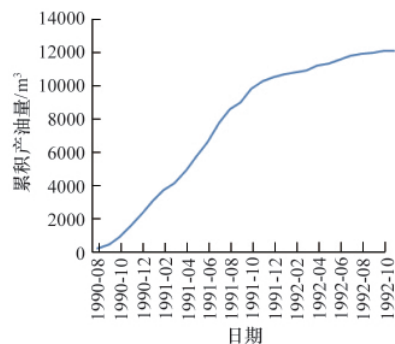


图3 CHOPS油井累计生产数据
Fig. 3 Cumulative fluid production data of CHOPS well

2.2 应用模型历史拟合

数值模拟过程,特别是历史拟合是一项复杂的、消耗人力和机时的繁琐工作,油藏数值模拟的数据很多,出现错误的历史拟合完全取决于生产数据的准确性和历史拟合过程。一旦找到合适的拟合参数,模型就可以用来预测油井生产的趋势,为油田进一步开发提供参考。图4、图5为应用本文模型的拟合结果。

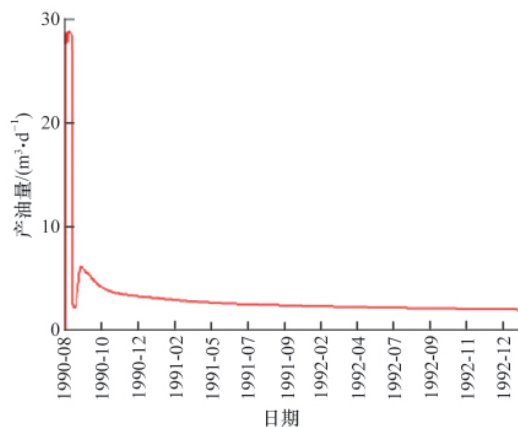


图4 模拟日产量
Fig. 4 Simulated results of daily oil prouction

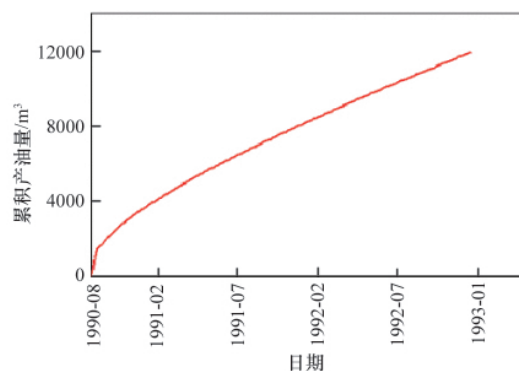


图5 模拟油田生产数据
Fig. 5 Simulated results of oil field prouction

模拟结果与油田生产数据很好地吻合。图4对CHOPS油井日产油量的实例模拟基本再现了油井数据的基本特征。图5对CHOPS油井累积产油量的模拟结果,也能够体现累积产油量增加速率逐渐降低的趋势。这说明模型具有一定的可靠性,可以进一步应用于油井生产的预测,同时可以为油田优化开发方案提供有力的参考依据。

3 影响因素分析

3.1 原油黏度影响

对影响CHOPS技术的一些参数进行分析,采用第2.1节例子中的数据,只改变原油黏度,保持其他条件不变,考查黏度对稠油出砂冷采技术的影响。结果如图6所示。

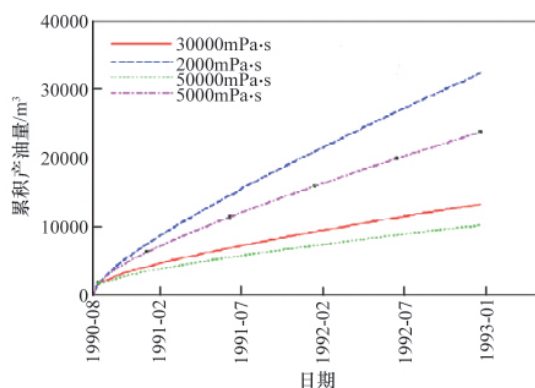


图6 原油黏度对CHOPS油井的影响

Fig. 6 Effect of viscosity on CHOPS well

由图6可以看出,对于稠油出砂冷采,稠油黏度对生产有一定影响。当原油黏度较高时,其流动性变差,产量较低;而另一方面,原油黏度过低,影响其携砂能力,导致渗透率和孔隙度增加缓慢,也会降低产量。

3.2 生产压差影响

保持其他条件不变,只改变生产压差,结果如图7所示。

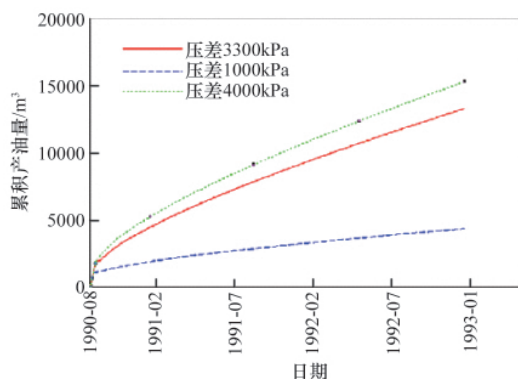


图7 生产压差对CHOPS油井产量的影响

Fig. 7 Effect of pressure on CHOPS well

由图7可以看出,应用CHOPS技术生产时,具有一定的最佳生产压差范围。较低的生产压差会大大降低产量,这可

能是由于较小的压差很难大面积生成蚯蚓洞网络。但压差较大也不一定会得到更高的产量,这可能是由于较大压差使地层坍塌严重,形成孔道阻塞。

4 结论

以砂岩油藏的出砂为对象,提出了出砂是在刚性孔隙介质内发生的流体力学侵蚀过程的思想,并对出砂控制机制重新进行描述:出砂过程是流体力学和地质力学间的严格耦合。在这一基础上提出了在连续介质混合物框架下的地质力学出砂模型。其中,在出砂控制机制中,指出固体骨架的变形是在弹塑性范围内,材料强度退化产生的孔隙度函数。耦合结果证明,孔隙度的改变是由应变和侵蚀造成的。砂粒的产出逐渐增强了储层变形和机械强度的退化,以及侵蚀作用共同造成孔隙度的逐渐增加。孔隙度增大加快了流体通量,进一步削弱岩石骨架强度,这又反过来导致了砂产量的增加。对模型使用现场数据进行了验证,验证结果表明,计算结果与实测结果较为接近,模拟精度较高,该模型能较好的描述稠油出砂冷采过程。因此,研究建立的地质力学和流体力学的耦合稠油出砂冷采模型是可行的。同时,对影响CHOPS技术应用的一些参数进行了分析,进一步确定了CHOPS技术的应用范围。

参考文献 (References)

- [1] Flint L. Bitumen recovery technology: A review of long term R&D opportunities[R/OL]. [2011-02-28]. <http://www.ptac.org/links/dl/BitumenRecoveryTechnology.pdf>.
- [2] 罗玉合, 孙艾茵, 张文彪, 等. 稠油出砂冷采技术研究 [J]. 内蒙古石油化工, 2008(2): 73-75.
Luo Yuhe, Sun Aiyin, Zhang Wenbiao, et al. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2008(2): 73-75.
- [3] 程绍志. 稠油出砂冷采技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998.
Cheng Shaozhi. Cold heavy oil production with sand technology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998.
- [4] Dusseault M. Cold heavy oil production with sand in the Canadian heavy oil industry[R]. Alberta: Alberta Department of Energy, 2004.
- [5] 刘斌, 王海文, 陈实, 等. 稠油出砂冷采技术研究 [J]. 内蒙古石油化工, 2006(10): 73-75.
Liu Bin, Wang Haiwen, Chen Shi, et al. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2006(10): 73-75.
- [6] Dusseault M, Geilikman M B, Spanos T. Mechanisms of massive sand production in heavy oils [C]. The Seventh UNITAR International Conference on Heavy Crude and Tar Sands, Beijing, Oct 27-30, 1998.
- [7] Yuan J Y, Tremblay B, Babchin A. A wormhole network model of cold production in heavy oil [C]. International Thermal Operations/Heavy Oil Symposium, Bakersfield, California, March 17-19, 1999.
- [8] Eugenio O, Julio G, Sergio I. Computation of the stabilization parameter for the finite element solution of advective-diffusive problems [J]. International Journal of Numerical Methods in Fluids, 1997, 25 (12): 1385-1407.
- [9] Hughes T J R, Brooks A. A multidimensional upwind scheme with no crosswind diffusion[J]. Finite Element Methods for Convection Dominated Flows, 1979, 34: 22-31.

(责任编辑 刘志远)