

水合物分解对钻井液侵入影响的一维数值模拟研究

辜幕丹

(武汉工程科技学院,湖北 武汉 430299)

摘要:海洋含水合物地层往往是具有渗透性的多孔介质体,钻井过程中钻井液不可避免地会与它发生能量和物质交换,水基钻井液驱替侵入水合物地层和温差下热传导导致的水合物分解这二者是耦合在一起的,其侵入可描述为一个包含相变的非等温非稳态渗流扩散过程。在综合分析钻井液侵入含水合物地层特性的基础上,结合水合物开采数值模拟以及常规油气藏钻井液侵入模型,建立了一维径向钻井液侵入含水合物地层的侵入模型。利用编程,分析了钻井液侵入水合物地层时地层压力、各相饱和度和温度的分布规律。

关键词:天然气水合物;钻井液侵入;数学模型;数值模拟

中图分类号:P744.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2015)08-0049-06

Analysis on One-dimensional Numerical Simulation of Hydrates Dissociation Effect on Drilling Fluid Intruding into Hydrate-bearing Sediment/GU Mu-dan (Wuhan University of Engineering Science, Wuhan Hubei 430299, China)

Abstract: Marine gas hydrated formation is often porous and permeable. Drilling fluid will inevitably exchange the energy and materials there during the drilling process. The intrusion of water-based drilling fluid into hydrated formation and hydrate decomposition due to heat transfer by temperature difference are coupled together. The intrusion can be described as non-isothermal and unsteady percolating diffusion processes with phase transition. On the basis of comprehensive analysis on the characteristics of drilling fluid intruding natural gas hydrate-bearing formations and according to the numerical simulation of gas hydrate exploitation and conventional oil and gas reservoirs drilling fluid intrusion model, one-dimensional model of drilling fluid radial intruding into natural gas hydrate-bearing formations was established. By using the program, the analysis was made on formation pressure, saturation of each phase and the distribution of temperature while drilling fluid intruding into hydrate-bearing formation.

Key words: natural gas hydrate; drilling fluid intruding; mathematical model; numerical simulation

0 引言

自然界中的天然气水合物大多数分布于大陆边缘和永久冻土带,且蕴含量巨大。Klauda 和 Sandler 认为全球海域的天然气水合物里就储存有 7.4×10^{13} t 甲烷,是全世界常规天然气储量的 3 个数量级大,被誉为 21 世纪的可代替能源。要对赋藏在地下一定深处的天然气水合物进行勘探和开发,钻井是必不可少的^[1]。在钻进天然气水合物地层时,由于钻头切削地层的过程中会产生大量的热能,所以井底温度升高。当温度大于水合物稳定的临界值时水合物分解,结果,气体就进入用来清除岩屑和润滑钻头的钻井液中,与钻井液一起循环,使钻井液密度降低,导致孔(井)底静水压力降低,加速了水合物的分解,并表现为恶性循环,最终导致孔底大量水合物分解,水合物分解会改变地层孔隙度、渗透性、孔隙

压力等参数,特别是在海底水合物地层中,由于该类地层是渗透性较好的多孔介质体,侵入的钻井液将影响测井识别评价^[5]。因此,研究钻井液侵入含水合物地层的特性及规律是今后水合物地层测井响应识别的基础。

1 钻井液侵入含水合物地层过程分析

1.1 钻井液侵入含水合物地层机理

在过压钻井条件下,温度就成为影响水合物稳定的主要因素。若钻井液温度与地层温度相等或低于地层温度,则钻井液在水合物地层的侵入与在常规油气地层中的侵入机理类似(钻井液盐度对水合物稳定性的影响基本可以忽略)。但是海洋水合物稳定区域地层温度较低,导致钻井液温度高于地层原位温度,加之钻具摩擦生热,钻井液建立循环后,

收稿日期:2015-01-03; 修回日期:2015-06-21

作者简介:辜幕丹,女,汉族,1985年生,助理工程师,钻井工程专业,硕士,从事钻井工程的教学和研究工作,湖北省武汉市江夏区武汉工程科技学院, gumudan0308@sina.cn。

地层吸热使水合物分解。水合物分解会改变地层孔隙度、渗透率、孔隙压力等参数,因而反过来又影响钻井液在地层中的侵入。因此,不能将钻井液侵入含水合物地层看成是一个等温过程,这是与钻井液侵入传统油气地层的一个主要区别所在。

综上所述,水合物钻井过程中钻井液侵入地层主要表现为压差下钻井液驱替渗入水合物地层和温差下水合物被加热分解(见图1),二者相互耦合在一起,发生传热传质作用并影响井壁附近地层的力学、孔隙水压力、毛细管压力、水/气/水合物饱和度、地层渗透性、波速以及电阻率等^[2-4]。

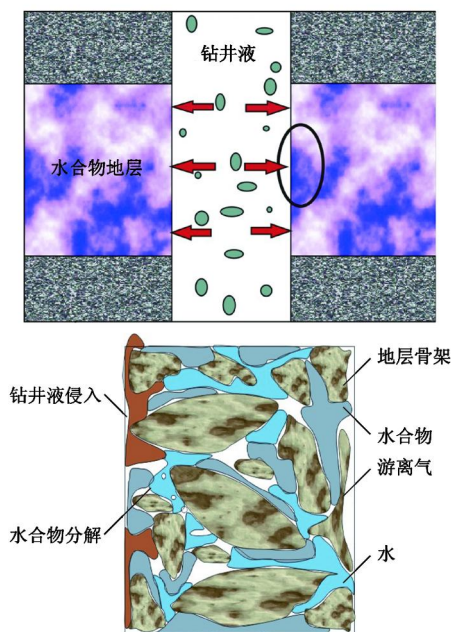


图1 钻井液侵入水合物地层示意图

整个侵入过程是一个耦合相变的非等温非稳态的驱替扩散过程,可以描述为钻井液滤液前缘和水合物分解层移动(Moving hydrate layer during dissociation)问题,其实质是一个动力学和热力学平衡问题,只不过水合物的分解使这个问题变的相当复杂。

2 钻井液侵入天然气水合物数学模型及求解

2.1 假设条件

根据天然气水合物的物理性质以及渗流理论,模型假设如下:(1)模型考虑为海洋水合物,所以为三相两组分,三相即为水、水合物和甲烷气体,两组分为水和甲烷气体,其中要考虑甲烷气体在水中的溶解度;(2)仅考虑水、气两相渗流,并且渗流符合Darcy定律;(3)能量守恒方程中只考虑热传导、水

合物分解所吸收的热量;(4)水合物吸热分解产生气和水,不计液态水和甲烷气体重新在地层中生成水合物的过程;(5)忽略气体滑脱效应,水合物不可压缩,比热、导热系数为常数;(6)假设液相与水合物相的压力相等,考虑液相与气相之间的毛细管力;(7)不计所有组分重力作用的影响。

2.2 质量守恒方程

根据质量守恒原理,首先以水相为例,建立其质量守恒方程。

在地层中取一个三维的微小立方体单元,单元体的长、宽、高分别为 Δx 、 Δy 、 Δz ,假设该单元体是均质的,在 Δt 时间内,流入体积单元体的质量流量是:

$$\left[\rho_w v_{wx} - \frac{\partial(\rho_w v_{wx})}{\partial x} \cdot \frac{\Delta x}{2} \right] \Delta y \Delta z \Delta t + \left[\rho_w v_{wy} - \frac{\partial(\rho_w v_{wy})}{\partial y} \cdot \frac{\Delta y}{2} \right] \Delta x \Delta z \Delta t + \left[\rho_w v_{wz} - \frac{\partial(\rho_w v_{wz})}{\partial z} \cdot \frac{\Delta z}{2} \right] \Delta x \Delta y \Delta t$$

流出单元体的质量流量是:

$$\left[\rho_w v_{wx} + \frac{\partial(\rho_w v_{wx})}{\partial x} \cdot \frac{\Delta x}{2} \right] \Delta y \Delta z \Delta t + \left[\rho_w v_{wy} + \frac{\partial(\rho_w v_{wy})}{\partial y} \cdot \frac{\Delta y}{2} \right] \Delta x \Delta z \Delta t + \left[\rho_w v_{wz} + \frac{\partial(\rho_w v_{wz})}{\partial z} \cdot \frac{\Delta z}{2} \right] \Delta x \Delta y \Delta t$$

体积单元体内由于水合物分解产生的水的质量:

$$m_w \Delta x \Delta y \Delta z \Delta t$$

在 Δt 时间内,水组分在体积单元体内的质量增量为:

$$[\varphi_s \rho_w]_{t+\Delta t} \Delta x \Delta y \Delta z - [\varphi_s \rho_w]_t \Delta x \Delta y \Delta z$$

由质量守恒原理可知:质量不能产生,也不能消灭,即在 Δt 时间内,控制体内水相的累积质量增量应等于在相同时间内在 X, Y, Z 三个方向上通过控制体净流入的水相质量以及天然气水合物由于分解产生水的质量之和。

因此水组分质量守恒方程为:

$$[\varphi_s \rho_w]_{t+\Delta t} \Delta x \Delta y \Delta z - [\varphi_s \rho_w]_t \Delta x \Delta y \Delta z = - \left[\frac{\partial(\rho_w v_{wx})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_w v_{wy})}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_w v_{wz})}{\partial z} \right] \Delta x \Delta y \Delta z \Delta t + m_w \Delta x \Delta y \Delta z \Delta t$$

式中: $\vec{v} = -\frac{k k_{rw}}{\mu_w} \nabla p$,化简得:

$$\frac{\partial}{\partial t} [\varphi_s \rho_w] = \nabla \cdot \left(\frac{k k_{rw}}{\mu_w} \nabla p_w \right) + m_w \quad (1)$$

同理可得气体组分,水合物组分的质量守恒方程,在气体组分质量守恒方程中需考虑甲烷气体的

溶解度,因此各组份的质量守恒方程可写为:

气体组分:

$$\frac{\partial}{\partial t} [\varphi (s_g \rho_g + R_{sw} s_w \rho_w)] = \nabla \left(\frac{k k_{rg} \rho_g}{\mu_g} \nabla p_g \right) + \nabla \left(\frac{R_{sw} k k_{rw} \rho_w}{\mu_w} \nabla p_w \right) + m_g \quad (2)$$

水合物组分:

$$\frac{\partial}{\partial t} [\varphi s_h \rho_h] = -m_h \quad (3)$$

式中: k ——地层绝对渗透率, m^2 ; k_{rl} ——各相相对渗透率, $l = w$ (水), g ; μ_w 、 μ_g ——水和气的粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; φ ——孔隙度; p_g 、 p_w ——水相、气相压力, Pa ; ρ_g 、 ρ_w 、 ρ_h ——甲烷密度, 水的密度, 水合物的密度, kg/m^3 ; s_g 、 s_w 、 s_h ——气相、水相、水合物相饱和度; m_w 、 m_g 、 m_h ——水合物分解产生的水的质量速率、分解产生甲烷气体的质量速率以及分解水合物的质量速率, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$; R_{sw} ——甲烷气体在水中的溶解度。

2.3 能量守恒方程

考虑一维情况,单元体能量守恒关系为:

$$\frac{\partial}{\partial t} [C_{\text{eff}} g T] = \nabla [\lambda_{\text{eff}} \nabla T] - m_h \Delta H_h \quad (4)$$

其中:

$$C_{\text{eff}} = (1 - \varphi) \rho_s C_s + \varphi s_w \rho_w C_w + \varphi s_h \rho_h C_h$$

$$\lambda_{\text{eff}} = (1 - \varphi) \lambda_s + \varphi s_w \lambda_w + \varphi s_g \lambda_g + \varphi s_h \lambda_h$$

式中: ΔH_h ——单位质量水合物分解所需热量, J/g ; C_s 、 C_w 、 C_g 、 C_h ——岩石骨架、水、甲烷气体、水合物的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; λ_s 、 λ_w 、 λ_g 、 λ_h ——岩石骨架、水、甲烷气体、水合物的热导率, $\text{W}/(\text{mg} \cdot \text{K})$ 。

2.4 水合物分解动力学方程

下面是甲烷水合物生成和分解的化学方程式^[5]:



式中: n ——水合物指数; ΔH ——分解热, J/mol 。

钻井液侵入天然气水合物的采用 Kamath^[6-7]的水合物热分解动力学方程:

$$m_g = K_d A_s M_g [T - T_{\text{eq}}(P)] \quad (5)$$

$$A_s = \varphi s_h A_{\text{HS}}$$

$$A_{\text{HS}} = 3.00 \times 10^3 \text{ cm}^{-1}$$

式中: K_d ——水合物恒压加热分解常数, $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s})$; A_s ——单位体积内水合物所占的总表面积, m^2 ; T_{eq} ——水合物在孔隙平均压力 P 下的相平衡温度。

同时,由水合物的分子式,得:

$$m_h = -m_g \frac{W_m + N_h W_w}{W_m} \quad (6)$$

$$m_w = m_g \frac{N_h W_w}{W_m} \quad (7)$$

式中, N_h ——水合指数,取值为 6; W_m 、 W_w ——甲烷和水的摩尔质量。

2.5 辅助方程

毛细管压力方程:

$$P_c(S_w) = P_g - P_w$$

相对渗透率的假设只含水饱和度的函数^[8],如图 2 所示。

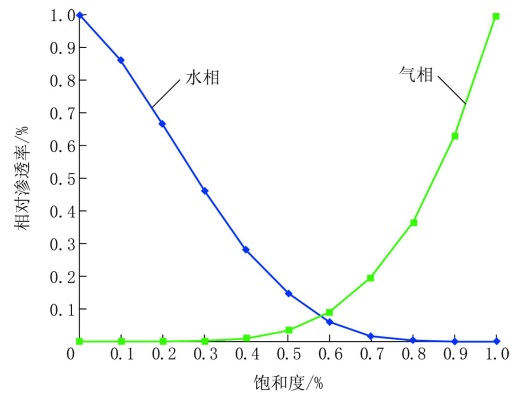


图 2 相对渗透率与含水饱和度的关系

$$k_{rg} = k_{rg}(S_w, S_h)$$

$$k_{rw} = k_{rw}(S_g, S_h)$$

水合物相平衡方程^[8]:

$$\frac{1}{T_{\text{eq}}} = 3.83 \times 10^{-3} - 4.09 \times 10^{-4} \log_{10} P + 8.64 \times 10^{-5} (\log_{10} P)^2$$

2.6 模型求解

在数学模型求解时,采用 IMPES 方法首先求解质量守恒方程,解出压力,然后根据相平衡判断水合物是否分解,再解出各相饱和度的分布,最后通过隐式求解能量方程得到温度场的分布。图 3 为水合物分解计算流程。

3 实例分析

墨西哥湾西北陆坡在路易斯安娜和德克萨斯州海岸线西南 180 km 处,其所在位置为 $26.8^\circ \sim 82.5^\circ \text{N}$, $88.2^\circ \sim 95^\circ \text{W}$,它是全球天然气水合物发育的典型地区之一,至今,墨西哥湾海底已有 50 多处取得了天然气水合物样品, I、II 和 H 型水合物均有发育。水合物分布于水深 440 ~ 2400 m 的海底,一般产于海底 2 m 以深的沉积层,仅有个别区域直接

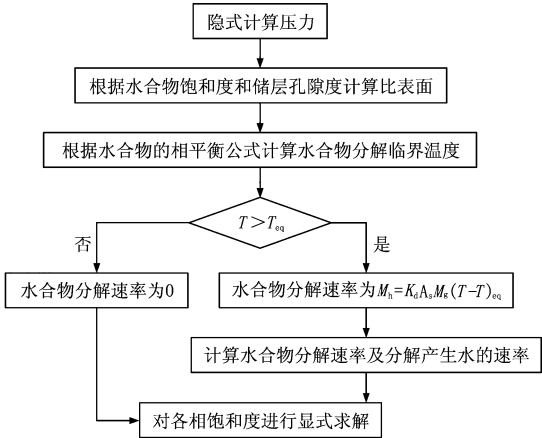


图 3 水合物分解计算流程

出露于海底。在墨西哥湾工作程度最高的 7 个构造控制的水合物发育地区中,MC852/853 区水合物经济潜力最大,其基本特征为:水深 1080 ~ 1120 m,面积 1.94 km²;埋藏深度 0 ~ 780 m;水合物含量 (vol%) > 30%。

根据钻井液井底压力计算公式,在钻井过程中,钻井液流动情况下,井孔中的压力是大气压力 P_{atm} + 静水压力 P_w + 钻井液在环状空间中流动的阻力 P_f ,其中 $P_{atm}=0.101325$ MPa。以 MC852/853 区为例,取其平均水度 1100 m,埋藏深度 300 m,选择钻井液侵入水合物地层的初始压力值:(1) 不含抑制剂的钻井液,选用海水泥浆,其密度为 1.025 g/cm³,不考虑流动阻力公式计算为 14.2 MPa;(2) 含有抑制剂的钻井液,选用饱和盐水泥浆,其密度为 1.33 g/cm³,不考虑流动阻力公式计算为 18.35 MPa,但在实际的过程中饱和盐水的分解能力有限,通常会加入其它一些抑制性的泥浆。

建立一个一维径向不均匀网格,钻井液侵入含水合物层范围是从井壁开始,沿径向方向 3 m,水合物层厚度为 10 m,井眼半径 0.106 m。见图 4。

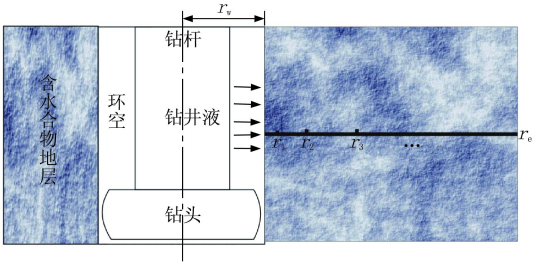


图 4 钻井液侵入含水合物地层的物理模型

假设储层外边界封闭,储层与外界没有物质交换,具体参数见表 1。

表 1 模型参数

参数名称	数值	参数名称	数值
初始压力/MPa	12	水的密度/(kg·m ⁻³)	1000
初始温度/K	281.15	水合物密度/(kg·m ⁻³)	910
水合物饱和度	0.5	甲烷密度/(kg·m ⁻³)	0.72
含水饱和度	0.4	岩石导热系数/[W·(m·k) ⁻¹]	1.5
含气饱和度	0.1	水导热系数/[W·(m·k) ⁻¹]	0.6
反应速率常数 K_d /[mol·(m ² ·Pa·s) ⁻¹]	3.6×10^4	水合物导热系数/[W·(m·k) ⁻¹]	0.4
地层绝对渗透率/m ²	2.96×10^{-13}	甲烷导热系数/[W·(m·k) ⁻¹]	0.5
水合物体积系数	1	岩石比热/[J·(kg·k) ⁻¹]	800
孔隙度	0.4	水比热/[J·(kg·k) ⁻¹]	4200
岩石压缩系数/Pa ⁻¹	4.45×10^{-10}	水合物比热/[J·(kg·k) ⁻¹]	3000
岩石骨架密度/(kg·m ⁻³)	2650	甲烷比热/[J·(kg·k) ⁻¹]	2070

钻井液的压力为 15 MPa,温度为 289.15 K 时,钻井液侵入水合物地层各参数变化如下。

3.1 孔隙水压力

水合物未分解时孔隙水压力变化见图 5。

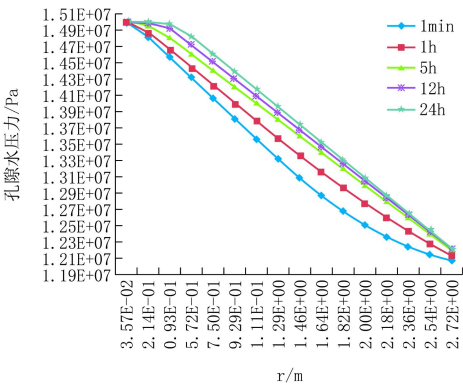


图 5 289.15 K、15 MPa 下水合物未分解时孔隙水压力图

水合物分解时孔隙水压力变化见图 6。

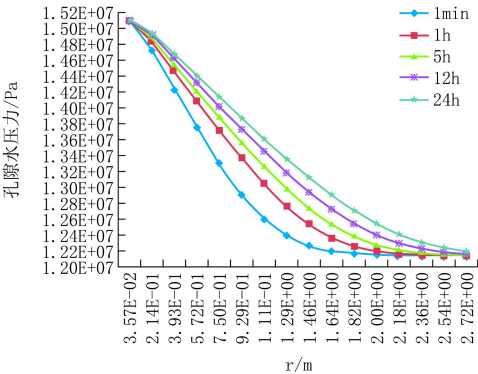


图 6 289.15 K、15 MPa 下水合物分解时孔隙水压力图

由图 5、图 6 可看出,水合物分解时孔隙水压力变化比未分解时要缓慢,水合物分解时井壁附近孔隙水压力保持不变;随着时间的推移,钻井液侵入水

合物地层,孔隙水压力影响范围逐渐增大。

3.2 含水饱和度

水合物未分解时含水饱和度变化见图 7。

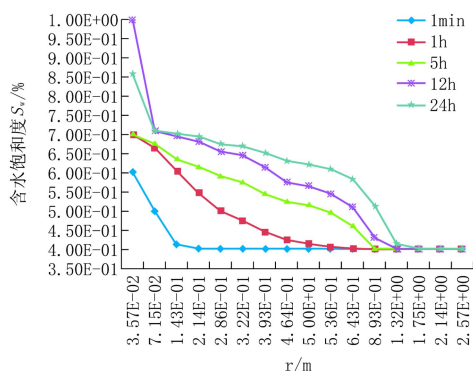


图 7 289.15 K、15 MPa 下水合物未分解时含水饱和度变化图

水合物分解时含水饱和度变化见图 8。

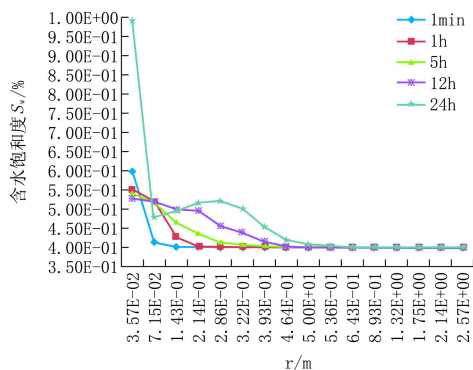


图 8 289.15 K、15 MPa 下水合物分解时含水饱和度变化图

由图 7、图 8 可看出,水合物分解时含水饱和度的值小于水合物未分解时,并且水合物分解时含水饱和度影响范围没有未分解时大,说明水合物的分解影响钻井液的侵入。

3.3 温度

水合物未分解时温度变化见图 9。

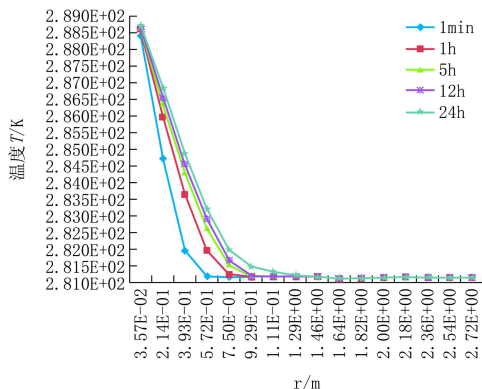


图 9 289.15 K、15 MPa 下水合物未分解时温度变化

水合物分解时温度变化见图 10。

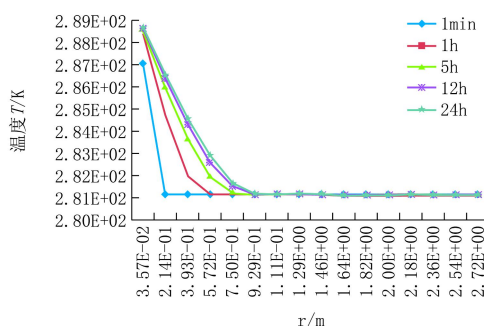


图 10 289.15 K、15 MPa 下水合物分解时温度变化

由图 9、图 10 可看出,水合物分解和未分解时,温度变化不大,随着时间的推移,温度逐渐向四周传递。

3.4 含气饱和度

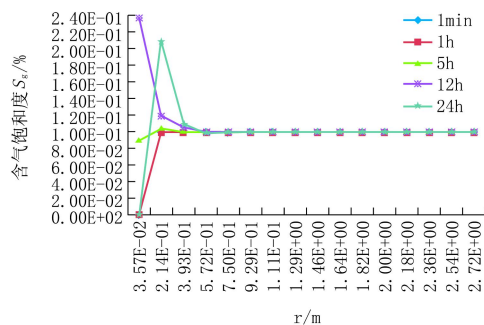


图 11 289.15 K、15 MPa 下水合物分解时含气饱和度变化图

由图 11 可以看出,随着钻井液侵入水合物地层,水合物逐渐分解,气体饱和度增加,右端气体饱和度为 0 时,代表水合物没有分解。

3.5 水合物饱和度

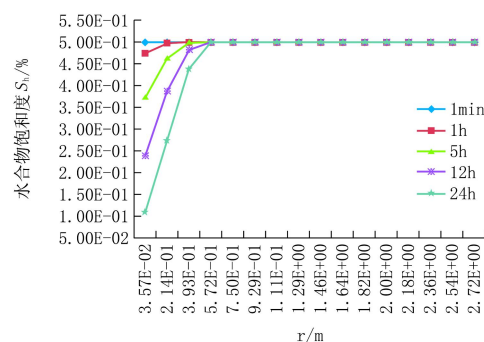


图 12 289.15 K、15 MPa 下水合物分解时水合物饱和度变化图

由图 12 可以看出,随着钻井液侵入水合物地层,水合物逐渐分解。

4 结论与建议

(1) 综合分析钻井液侵入含水合物地层的特性,结合水合物开采数值模拟以及常规油气藏钻井液侵入模型,建立了一维径向钻井液侵入含水合物地层的侵入模型。

(2) 在数学模型求解时,采用 IMPES 方法首先求解质量守恒方程,解出压力,然后根据相平衡判断水合物是否分解,再解出气相。水相以及水合物相的饱和度分布,最后同样采用 IMPES 方法得到地层温度场的分布。

(3) 利用编程,分析了钻井液侵入水合物地层时地层压力、各相饱和度和温度分布规律。计算结果表明:水合物分解和未分解时地层参数有较大变化,水合物分解影响钻井液的侵入。

(4) 在含水合物地层钻进时采用的水基钻井液通常会加入盐作为抑制剂,同时实际水合物藏中也会含有盐组分,即钻井液的侵入会影响地层矿化度,在以后研究对测井影响时需考虑盐组分,完善模型。

(5) 本文将侵入模型简化为一维径向模型,没有三维模型全面,建议以后工作可利用三维模型求解方程。

武汉:中国地质大学出版社,2002.

- [2] 宁伏龙. 天然气水合物地层井壁稳定性研究[D]. 湖北武汉: 中国地质大学(武汉), 2005.
- [3] Fulong Ning, Guosheng Jiang, Ling Zhang, et. Analysis on Characteristics of Drilling Fluids Invading Into Gas Hydrate-Bearing Formation[J]. 中国科技论文在线. <http://www.paper.edu.cn>.
- [4] Ning, Fulong; Wu, Nengyou; Jiang, Guosheng; et. The effect of gas hydrates dissociation and drilling fluids invasion upon borehole stability in oceanic gas hydrates-bearing sediment[J]. American Geophysical Union, Fall Meeting 2009, 2009/12/14. see also: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2009AGUFMOS31A1207N>.
- [5] 涂运中, 宁伏龙, 蒋国盛, 等. 钻井液侵入含天然气水合物地层的机理与特征分析[J]. 地质科技情报, 2010, 29(3): 110 - 113.
- [6] Kamath V A, Holder G D, Angert P F. Three Phase Interfacial Heat Transfer During the Dissociation of Propane Hydrates[J]. Chem. Eng. Sci., 1984, 39(10): 1435 - 1442.
- [7] Kamath V A, Holder G D. Dissociation Heat Transfer Characteristics Methane Hydrates[J]. AIChE J., 1987, 33(2): 347 - 350.
- [8] Gerard C. Nihous. An analysis of gas hydrate dissociation in the presence of thermodynamic inhibitors. Chemical Engineering Science(2009).
- [9] Milkov A V, Sassen R. Preliminary assessment of resources and economic potential of individual gas hydrate accumulations in the Gulf of Mexico continental slope[J]. Mar. Petrol. Geol., 2003, 20: 111 - 128.
- [10] 蒋国盛, 施建国, 宁伏龙, 等. 海底天然气水合物钻井液性能[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2009, 36(S1): 235 - 239.

参考文献:

- [1] 蒋国盛, 王达, 汤凤林, 等. 天然气水合勘探与开发[M]. 湖北

(上接第 48 页)

5 结语

朱溪矿区 ZK5407 孔深孔螺杆定向钻进工艺应用研究的成功,掌握螺杆钻定向钻探原理是基础,设备器具配套和冲洗液达标(泵量和泵压 2 个指标必须同时满足螺杆钻工作需要)是前提,确定施工方案和纠斜钻进各回次目标是关键,准确定向是难点,正确操作以完成预定的造斜强度和造斜进尺是重点,及时多点连续精确测斜是保证。

毫无疑问,朱溪矿区 ZK5407 孔深孔螺杆定向钻进还存在诸如施工设计方案欠优选、配套仪器性能不稳定、反扭转角预估不准确、造斜强度选择非最优、纠斜效率待提高、纠斜对钻孔后续钻进影响不清楚等种种问题,还需不断学习—实践—总结—再学习—再实践。

参考文献:

- [1] 朱永宜. 地质勘查与科学钻探螺杆钻深部定向钻探技术[C]. 中国地质调查局定向钻探技术培训交流会材料, 2011.
- [2] 刘志强. 定向钻进轨迹控制技术[C]. 中国地质调查局定向钻探技术培训交流会材料, 2011.
- [3] 张文英. 连续造斜器定向孔施工技术与工艺[C]. 中国地质调查局定向钻探技术培训交流会材料, 2011.
- [4] 尹永清. 螺杆钻具的应用现状[C]. 中国地质调查局定向钻探技术培训交流会材料, 2011.
- [5] 王达, 何远信, 等. 地质钻探手册[M]. 湖南长沙: 中南大学出版社, 2014.
- [6] 王天放, 战启帅, 段建利, 等. 深部找矿定向钻探技术研究与应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2012, 39(S2).
- [7] 江天寿. 金刚石定向钻探技术[J]. 探矿工程, 1985, (6).
- [8] 周铁芳, 阳东升. 螺杆钻定向钻探技术研究与应用[J]. 探矿工程, 1996, (4).
- [9] 刘志强, 童军兵, 谢宏军, 等. 黑龙江金厂矿区定向分支孔施工实践[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41(1).
- [10] 黄忠高, 李志强, 杨启文. 江西省浮梁县朱溪矿区深孔钻探施工技术研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2011, 38(5).