

文章编号:1673-5005(2009)03-0080-05

盐水体系中天然气水合物降压开采数值模拟

陈月明¹, 刘亚平¹, 张新军¹, 李清平², 鲁 轩¹

(1. 中国石油大学 天然气水合物研究中心, 山东 东营 257061; 2. 中海油研究中心, 北京 100027)

摘要:考虑盐浓度的分布,根据质量守恒、能量守恒、天然气水合物的分解动力学等方程建立天然气水合物储层降压开采的数学模型,该模型可描述三相八组分水合物储层开采的多相非等温渗流过程。利用该模型对一维条件下纯水和含盐富水相体系水合物的开采动态进行模拟计算。结果表明:模拟结果与试验结果具有较好的一致性;在盐水体系的水合物藏中,盐影响了水合物的相平衡,加快了水合物的分解,压力传播比纯水体系的快得多,并使得试验和模拟的瞬时产气量波动很大。

关键词:盐水体系;天然气水合物;降压开采;数值模拟

中图分类号:TE 375

文献标识码:A

Numerical simulation of natural gas hydrate production by depressurization in salt-water system

CHEN Yue-ming¹, LIU Ya-ping¹, ZHANG Xin-jun¹, LI Qing-ping², LU-Xuan¹

(1. Research Centre of Natural Gas Hydrate in China University of Petroleum, Dongying 257061, China;

2. CNOOC Research Centre, Beijing 100027, China)

Abstract: Considering the distribution of salt concentration, a mathematical model of production of natural gas hydrate reservoir by depressurization in salt-water system was established according to equations of conservation of mass and energy, kinetics equations of natural gas hydrate decomposition. The process of non isothermal flow in hydrate reservoir with three phases and eight components can be described by this model. The production behaviors of hydrates in pure-water and salt-water system were simulated under one dimension. The results show that the simulated results agree well with experimental results. In salt-water system, the salt affects phases balance of hydrates and accelerates the hydrates decomposition, and the pressure spreads much more quickly than that in pure-water system, which results in a big fluctuation of instantaneous gas production rate both in experiment and simulation.

Key words: salt-water system; natural gas hydrate; depressurization production; numerical simulation

国内外学者在天然气水合物藏开采计算方面进行了大量研究,部分学者把水合物分解看成是一个类似于冰融化的动界面消融的过程,采用经典的 Stefan 方程描述水合物的分解过程。Yousif^[1]建立了一维三相有限差分数值模拟器;李淑霞等^[2,3]考虑质量守恒和能量守恒,模拟了实验室条件下水合物等温降压生产过程;文献[4]~[6]中用常规三维热油藏模拟软件模拟了水合物顶气藏和天然气水合物的开发过程;Monmo^[6],陈月明等^[7]建立了三相多组

分模型,研究注入甲醇条件下水合物的分解;Moridis^[8]在 TOUGH2 多组分、多相的热能模拟软件基础上,建立了 EOSHYDR2 模块,通过求解物质和能量守恒方程,模拟各种复杂地层条件下天然气水合物藏的气体不等温释放、相特征、流体流动和热量变化。在上述数学模型的基础上,笔者结合天然气水合物藏的特点,考虑盐和化学剂的输运方程、天然气水合物的分解动力学方程等,建立天然气水合物储层降压开采的三相八组分数学模型,并对模型计算

收稿日期:2008-12-26

基金项目:国家“863”高新技术研究发展计划项目(2006AA09A209);中国石油化工股份有限公司项目(P06070)

作者简介:陈月明(1937-),男(汉族),浙江建德人,教授,博士生导师,主要从事油气田开发教学和研究工作。

结果与试验结果进行比较。

1 数学模型

在降压开采模型中,考虑气、液、水合物三相,以及游离甲烷、分解甲烷、游离轻烃、分解轻烃、水、盐、化学剂和水合物等八个组分。各组分及其质量分数

见表 1。假设:①储层流体渗流符合达西定律;②考虑盐和化学剂组分在水合物藏中的对流与扩散,其中盐和化学剂扩散遵循 Fick 定律;③忽略气在水中的溶解;④忽略盐和化学剂在岩石表面的吸附损失以及与地层水矿离子的化学反应等损失;⑤考虑热传导和对流的能量守恒方程。

表 1 各相组分及其质量分数
Table 1 Components and its mass fractions in each phase

相	游离甲烷	分解甲烷	游离轻烃	分解轻烃	水	盐	化学剂	水合物
气相	C_n	C_{d1}	C_{d2}	C_{d3}	0	0	0	0
液相	0	0	0	0	C_w	C_s	C_i	0
水合物相	0	0	0	0	0	0	0	1

注:8 种组分从左至右定义为组分 1~8。

1.1 基本数学模型

1.1.1 各组分质量守恒方程

气相中各组分的质量守恒方程为

$$\nabla \cdot \left(\frac{kK_{rg}}{B_g\mu_g} \nabla \Phi_g \right) + \sum_N (Q_{GV,N} + M_{GV,N}) = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\varphi S_G}{B_g} \right),$$
$$N = 1, 2, 3, 4. \tag{1}$$

液相中各组分的质量守恒方程为

$$\nabla \cdot \left(\frac{kK_{rl}}{B_l\mu_l} \nabla \Phi_l \right) + \sum_N (Q_{LV,N} + M_{LV,N}) = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\varphi S_L}{B_l} \right),$$
$$N = 5, 6, 7. \tag{2}$$

水合物组分的质量守恒方程为

$$-M_{HV,h} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\varphi S_H}{B_h} \right). \tag{3}$$

式中, k 为地层绝对渗透率, μm^2 ; φ 为地层孔隙度; K_{ri} 为*l*相的相对渗透率; B_i 为*l*相的体积系数; μ_i 为*l*相的黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; S_i 为*l*相的饱和度; $Q_{N,N}$ 为单位体积单位时间*l*相中注入第*N*组分的地面体积流量, $\text{m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{s})$; $M_{N,N}$ 为单位体积单位时间*l*相中产生第*N*组分的地面体积流量, $\text{m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{s})$; $M_{HV,h}$ 为单位体积单位时间地层分解掉的水合物的体积, $\text{m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{s})$; Φ 为势,Pa;下标*l*=G,L。

1.1.2 能量守恒方程

$$\nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot \left[\left(\rho_g H_g \left(\frac{kK_{rg}}{B_g\mu_g} \right) \nabla p_g + \rho_L H_L \left(\frac{kK_{rl}}{B_l\mu_l} \right) \nabla p_L \right) T \right] + e_s - e_h = H \frac{\partial T}{\partial t}. \tag{4}$$

其中

$$\lambda = \varphi S_G \lambda_G + \varphi S_L \lambda_L + \varphi S_H \lambda_H + (1 - \varphi) \lambda_R,$$
$$H = \varphi \frac{\rho_{scG}}{B_G} S_G H_G + \varphi \frac{\rho_{scL}}{B_L} S_L H_L + \varphi \frac{\rho_{sch}}{B_H} S_H H_H + (1 - \varphi) \frac{\rho_{scR}}{B_R} H_R.$$

式中, λ_l 为*l*相的导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; H_l 为*l*相的比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; e_s 为单位时间单位体积注入或产出的热量, $\text{J}/(\text{m}^3\cdot\text{s})$; e_h 为单位时间单位体积水合物分解吸收的热量, $\text{J}/(\text{m}^3\cdot\text{s})$;*l*=G,L,H,R,R指岩石。

1.1.3 盐或化学剂的输运方程

液相中盐或化学剂存在浓度差,由此引起的扩散可描述为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\varphi S_L D \frac{\partial C}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\varphi S_L D \frac{\partial C}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\varphi S_L D \frac{\partial C}{\partial z} \right] = \frac{\partial}{\partial t} (\varphi S_L C). \tag{5}$$

式中, C 为盐或化学剂的质量浓度, kg/m^3 ; D 为扩散系数, m^2/s 。

1.1.4 饱和度方程

$$S_G + S_L + S_H = 1. \tag{6}$$

1.1.5 质量分数约束方程

气相中: $C_n + C_{d1} + C_{d2} + C_{d3} = 1. \tag{7}$

液相中: $C_w + C_s + C_i = 1. \tag{8}$

1.1.6 毛管压力方程

$$p_{cGL} = p_G - p_L. \tag{9}$$

式中, p_G, p_L 分别为气、液相压力,Pa。

1.1.7 初始条件

$$p(x, y, z, t) |_{t=0} = p_0(x, y, z),$$
$$S_G(x, y, z, t) |_{t=0} = S_{G0}(x, y, z),$$
$$S_L(x, y, z, t) |_{t=0} = S_{L0}(x, y, z),$$
$$S_H(x, y, z, t) |_{t=0} = S_{H0}(x, y, z),$$
$$T(x, y, z, t) |_{t=0} = T_0(x, y, z),$$
$$C_{i,N}(x, y, z, t) |_{t=0} = C_{i,N0}(x, y, z).$$

1.1.8 边界条件

内边界条件为

$$Q_{N,N}(x,y,z,t) = Q_{N,N_0}(t), p_w(x,y,z,t) = p_{w0}(t);$$

$$T(x,y,z,t) = T_0(t), C_{l,N}(x,y,z,t) = C_{l,N_0}(t).$$

外边界条件为

$$p(x,y,z,t) \big|_{(x,y,z) \in \Gamma} = p_e(x,y,z,t) \text{ 或}$$

$$\partial p / \partial n \big|_{(x,y,z) \in \Gamma} = 0;$$

$$T(x,y,z,t) \big|_{(x,y,z) \in \Gamma} = T_0(x,y,z,t) \text{ 或}$$

$$-\lambda \partial T / \partial n \big|_{(x,y,z) \in \Gamma} = q;$$

$$C_{l,N}(x,y,z,t) \big|_{(x,y,z) \in \Gamma} = C_{l,N_0}(x,y,z,t) \text{ 或}$$

$$-D \partial C_{l,N} / \partial n \big|_{(x,y,z) \in \Gamma} = C.$$

1.2 水合物藏的特殊辅助方程

1.2.1 水合物饱和度对储层渗透率的影响

随着水合物的分解,储层渗透率逐渐增大。水合物饱和度与储层渗透率的关系为

$$k_h/k_0 = 2^{(1-S_H)^n} - 1.$$

式中, k_h 为水合物饱和度是 S_H 时的储层渗透率, μm^2 ; k_0 为储层原始渗透率, μm^2 ; n 为经验指数。

1.2.2 相对渗透率的变化

天然气水合物藏的储层是亲水的。根据 Stone 理论,在亲水岩石中,水相渗透率主要与水相饱和度有关,气相渗透率主要与气相饱和度有关。各相相对渗透率和毛管压力可采用修正的 Brooks-Corey 模型^[9]计算,表达式为

$$K_{rG} = K_{rG,0} (S_G^*)^{n_G}, K_{rL} = K_{rL,0} (S_L^*)^{n_L},$$

$$p_c = p_{ce} (S_L^*)^{-n_c}.$$

其中

$$S_G^* = \frac{S_G - S_{Gr}}{1 - S_{Gr} - S_{Gr}^*}, S_L^* = \frac{S_L - S_{Lr}}{1 - S_{Lr} - S_{Gr}^*},$$

$$S_G^* = \frac{S_G}{S_G + S_L}, S_L^* = \frac{S_L}{S_G + S_L},$$

$$S_{Gr}^* = \frac{S_{Gr}}{S_G + S_L}, S_{Lr}^* = \frac{S_{Lr}}{S_G + S_L}, p_{ce} = p_{ce,0} \sqrt{\frac{\varphi_0 k_0}{\varphi_0 k_h}}.$$

式中, S_{Gr} 为临界气相饱和度,小数; S_{Lr} 为束缚水饱和度,小数; $K_{rG,0}$ 为气相相对渗透率端点值,小数; $K_{rL,0}$ 为液相相对渗透率端点值,小数; $p_{ce,0}$ 为岩心测试时的进汞毛管压力,Pa; n_G, n_L, n_c 分别为气相、液相和毛管力指数。

1.2.3 水合物反应热

甲烷水合物的分解是一个吸热相变过程,水合物分解需要吸收的热量^[10]为

$$\Delta H = AT_{eq} + B.$$

式中, ΔH 为甲烷水合物反应热,J/kg; T_{eq} 为相平衡温度,K; A, B 为常数, $A = -1050 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K}), B = 3.527 \text{ MJ}/\text{kg}$ 。

多组分天然气水合物的反应热应通过试验测定。

1.2.4 天然气水合物相平衡曲线

水合物相平衡曲线的数学表达式是指其临界压力和温度的关系曲线,温度不同,表达式亦不同,具体表达式见文献[8]。

1.2.5 天然气水合物分解的动力学方程

降压分解的动力学方程采用 Kim-Bishnoi 模型^[11],即

$$M_G = m_G V_b = K_d A_s (p_e - p) V_b.$$

其中

$$A_s = \sqrt{\frac{[\varphi_0(1-S_H)]^3}{2k_h}}, K_d = K_{0i} \exp\left(-\frac{\Delta E_a}{RT}\right).$$

式中, M_G 为单位时间单元体内水合物分解产生的气体质量,kg/s; m_G 为单位时间单位体积水合物藏分解产生的气体质量,kg/($m^3 \cdot s$); K_d 和 K_{0i} 分别为水合物分解速度常数和固有分解速度常数,kg/($m^2 \cdot \text{Pa} \cdot s$); A_s 为反应比面, m^{-1} ; p_e 为水合物反应的临界压力,Pa; ΔE_a 为反应活化能,J/mol。

2 数值求解方法

应用有限差分法对上述数学模型进行离散求解。采用变量逐次求解的方法,即在一个时间步长之内依次隐式求解压力、显式求解饱和度、隐式求解温度、隐式求解气相组分分数、隐式求解盐或化学剂的浓度分布。具体计算过程为:①根据水合物藏温度、压力、水合物组分、气组分、盐或化学剂浓度等参数计算各岩石、流体、水合物物性参数;②采用 IMPES 方法求解压力和饱和度,计算天然气水合物分解速率(图1,其中 p_{eq} 为相平衡压力),同时求得生产并

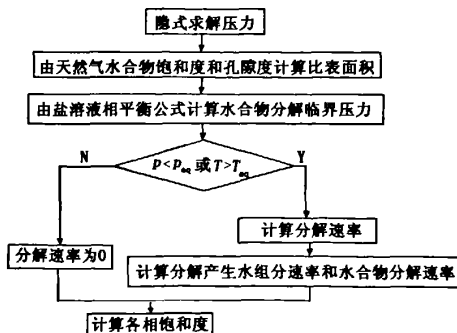


图1 天然气水合物分解流程

Fig.1 Flow diagram of natural gas hydrate decomposition

产量;③隐式方法求解温度;④隐式方法求解气相组分分数;⑤隐式方法求解盐或化学剂的输运方程,求得盐或化学剂在水合物储层中的浓度分布;⑥

判断计算结束的条件,若不到结束时间,则转到步骤①进行下一时刻的计算。

3 模型检验

为了验证模型与计算方法的合理性,将该模型计算结果与 Holder 等^[12] 的计算结果进行了比较。Holder 等建立的地质模型中,生产井位于二维平面网格的中心,储层面积为 1.03 km^2 ,厚度为 30.48 m ,在纵向上储层分为水合物区和天然气区,水合物区在上,天然气区在下,厚度均为 15.24 m 。水合物区孔隙度为 0.15 ,渗透率为 $0.044 \mu\text{m}^2$,储层初始温度和压力分别为 293.43 K 和 20.68 MPa 。

采用 Holder 等建立的地质模型,分别计算了水合物分解气质量分数和生产井区的压力变化。

4 试验数据拟合

根据中国石油大学(华东)天然气水合物研究中心的天然气水合物的试验结果,应用本模型进行模拟计算和拟合。

图2为水合物定压生产瞬时产气速率。开始生产时,产气速率较高,其中大部分为自由气;随着水合物的不断分解,水合物饱和度不断降低,产气速率下降,但产量波动较大,这是因为盐水体系中试验管内生成的水合物饱和度分布不均匀,分解气速率时大时小。

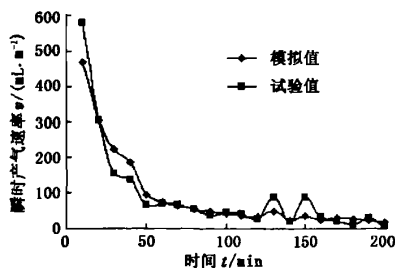


图2 瞬时产气速率对比曲线

Fig.2 Comparison curves of instantaneous gas production rate

图3为天然气水合物的累积产气量曲线。由图3可见,在开采初期,产气量迅速上升,随着水合物的逐渐分解,水合物饱和度逐渐降低,累积产气量变化逐渐变得平缓,产气量也逐渐减小,直至水合物完全分解。

图4为出口端盐质量分数的变化曲线。开始生产时,盐质量分数略有上升,之后随着水合物的分

解,管内含水增加,盐质量分数逐渐降低,水合物分解完成后,盐质量分数趋于定值。

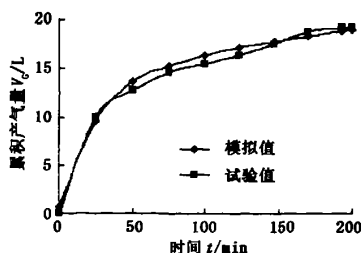


图3 累积产气量对比曲线

Fig.3 Comparison curves of accumulative gas production

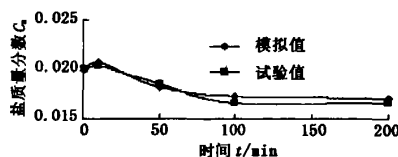


图4 出口端盐质量分数对比曲线

Fig.4 Comparison curves of salinity at delivery end

5 水合物降压开采影响因素

影响天然气水合物降压开采动态的因素很多,采用数值模拟的方法结合室内试验结果讨论水合物饱和度分布和盐浓度对水合物开发生态的影响。

5.1 水合物饱和度对开发生态的影响

在纯水溶液和均一饱和度下,其他试验条件不变,采用数值模拟的方法计算降压开采的产气量和沿程温度分布。平均甲烷水合物饱和度为 0.104 ,含水饱和度为 0.667 ,含气饱和度为 0.229 。

在均一饱和度下,数值模拟计算的瞬时产气量不能反映水合物降压分解的细节变化,也就是说水合物饱和度分布对降压开发生态有直接影响。多数情况下实验室内合成的甲烷水合物在多孔介质中分布是不均匀的,分解速度不均,使得瞬时产气量有较大的波动。

水合物饱和度的不均一性还会影响到开发过程中的压力和温度分布,饱和度不均匀其温度场也是不均匀的。数值模拟结果表明,均一饱和度岩心开采过程中,由出口端到入口端温度有规律地先下降再恢复到环境温度,到温度最低值后逐渐回升,如图5所示。这是恒温环境的导热和水合物分解共同作用的结果。

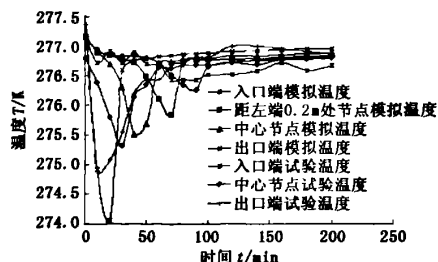
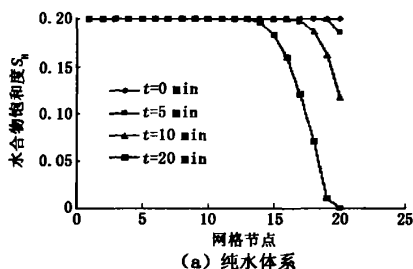


图5 纯水均一饱和度分布岩心节点温度模拟与试验结果对比曲线

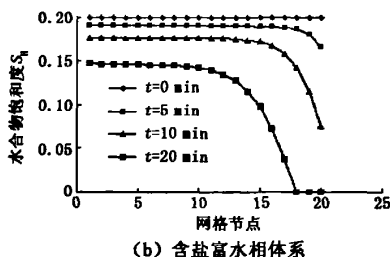
Fig.5 Comparison curves of node temperatures of simulation and experiment of core with homogenization saturation in pure water system

5.2 盐对开发动态的影响

天然气水合物储层中,水溶液中含盐量变化不仅影响水合物的生成,还影响水合物藏开采过程中的储层水合物饱和度分布。地层水中的盐组分主要



(a) 纯水体系



(b) 含盐富水相体系

图6 甲烷水合物藏降压开采过程中水合物饱和度分布

Fig.6 Hydrate saturation distribution during the process of methane hydrate reservoir blowdown

6 结 论

(1) 综合考虑三相八组分的质量守恒方程、能量守恒方程、盐和化学剂的输运方程以及天然气水合物的分解动力学方程等所建立的降压法开采含盐富水相天然气水合物藏的数学模型可以很好地模拟实际水合物的分解情况。

(2) 水合物饱和度分布的不均一性使瞬时产气量有较大波动,也直接影响到压力场和温度场的分布;在盐水体系的水合物藏中,压力传播比纯水体系的快得多,使得试验和模拟的瞬时产气量波动很大。

参考文献:

- [1] YOUSIF M H. Experimental and theoretical investigation of methane gas hydrate dissociation in porous media[R]. SPE 18320, 1991.

通过改变水合物的相平衡来影响水合物藏的生成和开采动态。盐作为水合物的抑制剂,在开采水合物藏的过程中可促进水合物的分解,并抑制其二次生成。

含盐富水相体系的天然气水合物藏的开发过程中,储层水合物饱和度的变化与纯水体系的天然气水合物藏的饱和度变化有很大不同。为便于对比,采用均一饱和度模型模拟盐溶液体系和纯水体系水合物藏开发过程中水合物饱和度的动态变化(图6)。

从图6中可以看出:在纯水体系甲烷水合物藏开发过程中可以明显地看到水合物分解区是从生产井周围逐渐向水合物藏内部推进,压力传播相对较慢,生产也比较稳定;盐水体系的水合物藏中,由于盐对水合物相平衡的影响,使得含盐富水相的水合物藏的分解比纯水体系的快得多,一旦管内压力降低,整个试验管中的甲烷水合物几乎同时分解,瞬时产气量波动较大。

- [2] 李淑霞,陈月明,杜庆军. 天然气水合物开采方法及数值模拟研究评述[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2006, 30(3): 146-150.

LI Shu-xia, CHEN Yue-ming, DU Qing-jun. Commentary of production method and numerical simulation of natural gas hydrates [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2006, 30(3): 146-150.

- [3] 李淑霞,陈月明,郝永卯,等. 多孔介质中天然气水合物降压开采影响因素实验研究[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2007, 31(4): 56-59.

LI Shu-xia, CHEN Yue-ming, HAO Yong-mao, et al. Experimental research on influence factors of natural gas hydrate production by depressurizing in porous media [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2007, 31(4): 56-59.

(下转第94页)

- (Edition of Natural Science), 2007, 30(12):141-145.
- [13] 郭红玲, 黄定轩. 多属性决策中属性权重的无偏好赋权方法[J]. 西南交通大学学报, 2007, 42(4):505-510.
- GUO Hong-ling, HUANG Ding-xuan. Weight integration method without preference on multi-attribute decision-making[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2007, 42(4):505-510.
- [14] 姚升保, 岳超源. 基于综合赋权的风险型多属性决策方法[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(12):2047-2051.
- YAO Sheng-bao, YUE Chao-yuan. Method for multiple attribute decision-making under risk based on synthetic weighting[J]. Systems Engineering and Electronics, 2005, 27(12):2047-2051.

(编辑 李志芬)

(上接第79页)

- [9] 刘建华, 张卫峰, 农小品. 三水导电模型及其在塔北低阻油气层的应用[J]. 国外测井技术, 2000, 15(1):8-13.
- LIU Jian-hua, ZHANG Wei-feng, NONG Xiao-pin. The application of three-water conduction model in the interpretation of low resistivity reservoir of Tabei[J]. World Well Logging Technology, 2000, 15(1):8-13.
- [10] LI Zhou-bo, MO Xiu-wen. Study on the electric property of shaly sand and its interpretation method[J]. Journal of Geoscientific Research in Northeast Asia, 1999, 2(1):110-114.
- [11] 李传亮. 用压汞曲线确定油藏原始含油饱和度的方法研究[J]. 新疆石油地质, 2000, 21(5):418-419.
- LI Chuan-liang. On methodology for using mercury injection curves to determine original oil saturation of reservoir[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2000, 21(5):418-419.

(编辑 修荣荣)

(上接第84页)

- [4] 郝永卯, 陈月明, 李淑霞. 天然气水合物注热开采实验研究[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2007, 31(4):60-63.
- HAO Yong-mao, CHEN Yue-ming, LI Shu-xia. Experimental study on production of natural gas hydrate by thermal stimulation[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2007, 31(4):60-63.
- [5] SWINKELS W J A M, DRENTH R J J. Thermal reservoir simulation model of production from naturally occurring gas hydrate accumulations[R]. SPE 56550, 1999.
- [6] WONMO Sung. Numerical study for production performances of a methane hydrate reservoir stimulated by inhibitor injection[J]. Energy Sources, 2002, 24(6):499-512.
- [7] 陈月明, 张新军, 杜庆军. 天然气水合物渗流特征及其描述[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2007, 31(4):51-55.
- CHEN Yue-ming, ZHANG Xin-jun, DU Qing-jun. Seepage characteristics of natural gas hydrate and its description[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2007, 31(4):51-55.
- [8] MORIDIS G J. Numerical studies of gas production from methane hydrates[R]. SPE 87330, 2002.
- [9] LAKE L W. Enhanced oil recovery[M]. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall Inc, 1989.
- [10] KAMATH V. Study of heat transfer characteristics during dissociation of gas hydrate in porous media[D]. Pittsburgh: University of Pittsburgh, 1983.
- [11] KIM H C, BISHINOI P R, HEIDEMANN R A, et al. Kinetics of methane hydrate dissociation[J]. Chem Eng Sci, 1987, 42(7):1645-1653.
- [12] HOLDER G D. Simulation of gas production from a reservoir containing both gas hydrate and free natural gas[R]. SPE 11105, 1982.

(编辑 李志芬)