

# 水合物藏降压开采实验及数值模拟

白玉湖<sup>1</sup> 李清平<sup>1</sup> 赵颖<sup>2</sup> 杜燕<sup>3</sup>

(1. 中海油研究总院, 北京 100027; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100190;  
3. 中国科学院广州能源研究所, 广州 510640)

**摘要** 建立了降压法开采水合物藏数学模型, 考虑了气-水-水合物-冰相多相渗流、水合物相变及分解动力学过程、冰-水相变、热传导、对流传热、渗透率变化等对于水合物分解的影响。三维水合物藏模拟表明: 在开采前期阶段, 可采用降压法, 但随着储层能量消耗, 产气速度下降很快, 需转变开采方式。分析了一些主要参数, 如孔隙度、渗透率、饱和度、压力等对水合物开采的影响。

**关键词** 降压法; 天然气水合物藏; 数值模拟; 参数变化

**中图分类号:** TE312 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2010)02-0295-04

## THE EXPERIMENT AND SIMULATION OF GAS PRODUCTION FROM HYDRATE RESERVOIR BY DEPRESSURIZATION

BAI Yu-Hu<sup>1</sup> LI Qing-Ping<sup>1</sup> ZHAO Ying<sup>2</sup> DU Yan<sup>3</sup>

(1. China National Offshore Oil Corporation, Research Institute, Beijing 100027, China;  
2. Institute of mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;  
3. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Science, Guangzhou 510640, China)

**Abstract** A mathematical model is developed to simulate the hydrate dissociation by depressurization in hydrate-bearing porous medium. The model can be used to analyze the effects of the flow of multiphase fluids, the dissociation process of hydrate, the endothermic process of hydrate dissociation, ice-water phase equilibrium, the convection and conduction on the hydrate dissociation and gas and water production. The numerical results for 3-D hydrate reservoir showed that in the first stage of depressurization gas can be produced effectively from hydrate reservoir. Then, other methods should be considered to replace depressurization due to reservoir energy inefficiency. The effects of such physical variables as porosity, permeability, hydrate saturation, bottom pressure of production well on hydrate dissociation are analyzed.

**Key words** depressurization; gas hydrate reservoir; numerical simulation; physical variable

## 0 引言

天然气水合物是由天然气和水在一定温度和压力条件下, 形成的一种非化学计量型的、似冰状的笼型晶体, 其储量巨大、分布广、清洁, 被认为是一种重要的潜在能源。随着研究的不断深入, 水合物开采模型取得很大进展, 从简单的采用经典 Stefan 方程描述水合物分解过程<sup>[1,2]</sup>到复杂的包含动力学过程的多相渗流模型。Yousif<sup>[3]</sup>等在水合物分解模型中, 引入了 Kim-Bishnoi<sup>[4]</sup>分解动力学模型, 但未考虑温度变化。Moridis<sup>[5]</sup>等建立了水合物开采程序 EOSHYDR2, 能够模拟水合物热行为、非等温气体释放、流体流动行为等。Sun 等<sup>[6]</sup>提出了冰影响的水合物分解模型, 并对一维和二维条件下水合物分解进行模拟。总之, 目前虽然对水合物藏开采进行了

大量的研究工作, 但系统考虑冰影响的模型并不多见。为此, 本文改进了降压法开采数学模型, 并对模型进行实验验证, 分析了基本参数变化对水合物分解影响。

## 1 三维水合物藏开采模型

考虑底层和该层均为非渗透层的水合物藏, 一口生产井钻到水合物层, 通过降压使水合物发生分解。在降压法开采水合物模型中, 考虑三种组分: 水合物、甲烷气和水, 四相: 气相、水相、水合物相、冰相。降压法开采天然气水合物藏涉及到复杂的物理机制, 现阶段模型中引入一些基本假设: (1) 只考虑甲烷气形成的 SI 型水合物, 不考虑盐影响; (2) 冰的成分为纯水; (3) 水相和气相渗流符合达西定律; (4)

收稿日期: 2009-2-23; 修订日期: 2009-12-16

基金项目: 国家 863 计划 (No.2006AA09A209); 国家 973 项目 (No.2009CB219507)

作者简介: 白玉湖 (1976-), 男 (满族), 辽宁鞍山人, 工程师, 博士, 主要从事天然气水合物开采、渗流力学等方面的研究。

不考虑分子扩散及水动力学扩散。则气、水和水合物相控制方程分别为:

$$\frac{\partial(\phi\rho_g s_g)}{\partial t} = \nabla \cdot \left( \frac{\rho_g k_g}{\mu_g} \nabla p_g \right) + \dot{m}_g + q_g \quad (1)$$

$$\frac{\partial[\phi(\rho_w s_w + \rho_I s_I)]}{\partial t} = \nabla \cdot \left( \frac{\rho_w k_w}{\mu_w} \nabla p_w \right) + \dot{m}_w + q_w \quad (2)$$

$$-\dot{m}_h = \frac{\partial(\phi\rho_h s_h)}{\partial t} \quad (3)$$

能量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(C_t T) = \nabla \cdot \left( TC_w \frac{\rho_w k_w}{\mu_w} \nabla p_w \right) + \\ \nabla \cdot \left( TC_{pg} \frac{\rho_g k_g}{\mu_g} \nabla p_g \right) + \nabla \cdot (K_t \nabla T) - \\ \dot{m}_h \Delta H_h + \dot{m}_I \Delta H_I + q_e \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{饱和度方程: } s_w + s_g + s_h + s_I = 1 \quad (5)$$

$$\text{毛管力方程: } p_c = p_w - p_g \quad (6)$$

其中,  $\rho_g$ 、 $\rho_w$ 、 $\rho_h$ 、 $\rho_I$  为气相、水相、水合物和冰相密度;  $\phi$  为孔隙度;  $s_g$ 、 $s_w$ 、 $s_h$ 、 $s_I$  为气相、水相、水合物和冰相的饱和度;  $p_w$ 、 $p_g$  为水相、气相压力;  $k_g$ 、 $k_w$  为气相、水相的渗透率;  $\dot{m}_h$ 、 $\dot{m}_g$ 、 $\dot{m}_w$  为水合物分解速率、水合物分解的产气和产水速率;  $C_w$ 、 $C_{pg}$ 、 $C_t$  为水比热容、气体比定压热容及综合比热容;  $K_t$  考虑水、气、岩石骨架、水合物、冰影响的综合导热系数;  $\Delta H_h$  为水合物分解的相变潜热;  $q_e$  为从储层的底层和盖层所传递的能量;  $q_g$ 、 $q_w$  为气、水源汇项;  $\Delta H_I$  为水结冰时的相变潜热。

### 1.1 水合物分解动力学模型

采用 Kim-Bishnoi 模型描述水合物的合成和分解动力学过程<sup>[4]</sup>:

$$\dot{m}_g = k_d A_s (f_{eq} - f) \quad (7)$$

其中  $A_s$  为比面,  $k_d$  为水合物分解速率常数,  $f$ ,  $f_{eq}$  为当地气体逸度和平衡时气体逸度。

### 1.2 绝对渗透率模型

采用幂率模型估计当地绝对渗透率随水合物分解的变化情况<sup>[7]</sup>,

$$\frac{k}{k_0} = \frac{\phi_e}{\phi_0} \left[ \frac{\phi_e(1-\phi_0)}{\phi_0(1-\phi_e)} \right]^{2\beta} \quad (8)$$

$k$  为当地的绝对渗透率;  $\phi_0$  为整体孔隙度;  $k_0$  为水合物完全分解后的绝对渗透率, 即最大渗透率;  $\phi_e = \phi_0(1 - s_h - s_I)$ ;  $\beta$  为指数。

### 1.3 相对渗透率模型和毛管力模型

采用修改的 Brooks-Corey 模型来描述相对渗透率和毛管力<sup>[8]</sup>:

$$k_{rg} = k_{rg0}(s_g^{e*})^{n_G}, \quad k_{rw} = k_{rw0}(s_w^{e*})^{n_W} \quad (9)$$

$$p_c = p_{ce}(s_w^{e*})^{-n_c} \quad (10)$$

其中,  $k_{rg}^0$ 、 $k_{rw}^0$  为相对渗透率曲线的末端值;  $n_G$ 、 $n_W$  分别为与气相、水相对应的指数;  $p_{ce}$  为进口毛管压力,  $n_c$  表示与孔隙结构相关的指数。由于水合物的特殊性, 对饱和度作了修正, 则:

$$s_g^{e*} = \frac{s_g^e - s_{gr}^e}{1 - s_{wr}^e - s_{gr}^e}, \quad s_w^{e*} = \frac{s_w^e - s_{wr}^e}{1 - s_{wr}^e - s_{gr}^e},$$

$$s_g^e = \frac{s_g}{s_g + s_w}, \quad s_w^e = \frac{s_w}{s_g + s_w}, \quad s_{gr}^e = \frac{s_{gr}}{s_g + s_w},$$

$$s_{wr}^e = \frac{s_{wr}}{s_g + s_w}$$

### 1.4 水合物及水的相平衡模型

水合物相平衡的数学表达式如下所示<sup>[5]</sup>:

$$p_e = \begin{cases} \exp(-43.8921173434628 + \\ 0.776302133739303T - \\ 7.27291427030502 \times 10^{-3}T^2 + \\ 3.85413985900724 \times 10^{-5}T^3 - \\ 1.03669656828834 \times 10^{-7} \times T^4 + \\ 1.09882180475307 \times 10^{-10} \times T^5); & T < 273.15 \text{ K} \\ \exp(-1.9413850446456 \times 10^5 + \\ 3.31018213397926 \times 10^3T - \\ 22.5540264493806T^2 + \\ 0.0767559117787059T^3 - \\ 1.30465829788791 \times 10^{-4}T^4 + \\ 8.8606531668757 \times 10^{-8}T^5) & T \geq 273.15 \text{ K} \end{cases} \quad (11)$$

水-冰(A-I)相平衡为  $T = T_{qp}$ 。因此, 在考虑冰水相变存在时, 水合物藏中可能存在相态组合系统包括: 冰-水合物(I+H)、气-冰(G+I)、气-冰-水合物(G+I+H)、水-水合物(W+H)、水-气(W+G)、水-气-水合物(W+G+H)、水-冰-水合物(W+I+H)、水-冰-气(W+I+G)、水-气-水合物-冰(W+G+H+I)等多种相态组合。

### 1.5 水合物相变吸热模型

水合物分解是一个吸热过程, 每千克水合物分解需要吸收的热量为<sup>[9]</sup>:

$$\Delta H = AT + B \quad (12)$$

$$A = -1050 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}, \quad B = 3527000 \text{ J/kg.}$$

## 2 数值求解方法及实验验证

采用传统方法对水合物系统进行求解会导致很大计算量, 而基本变量转换方法可以很好地处理此

类问题<sup>[6]</sup>。所谓的基本变量就是从离散的控制方程中直接求解出的基本未知量。在降压法开采水合物藏的系统, 压力总被当作基本变量, 饱和度基本变量则根据各相所处相态来确定。基本变量的选取是依据系统内水相和冰相转换而确定。当网格为单一水相时标记为 Pha1, 需要求解方程(1)~(4), 方程(2)中不考虑冰影响; 当网格为冰水混合时标记为 Pha2, 不用求解方程(4), 当网格为冰时标记为 Pha3, 需要求解方程(2)~(4), 方程(2)中不考虑水影响。用有限差分方法对控制方程进行离散, 对流项采用迎风格式, 扩散项采用二阶中心差分格。先显式求解水合物的饱和度, 然后隐式求解气相压力, 再求解相关相饱和度, 最后采用隐式方法求解能量方程, 具体离散形式及求解步骤见文献[10]。

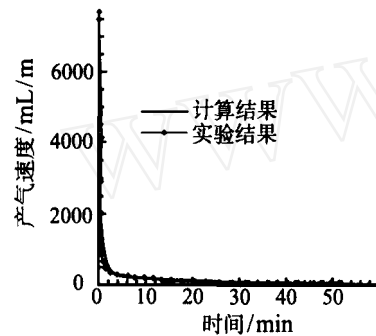


图1 二维产气速度的数值模拟和实验对比

Fig. 1 Comparison of gas rates of numerical and experimental results for 2-D model

在中国科学院广州能源所水合物研究中心进行了二维水合物藏降压开采实验。该实验系统包括供液、供气、天然气水合物生成与开采、环境模拟、回压控制、计量及数据采集处理等七个功能模块, 二维的实验装置及流程详见文献[11]。实验测定二维模型的绝对渗透率 1.97 达西, 孔隙度 0.4, 初始压力 3.5 MPa, 初始温度 1.7°C, 回压阀稳定压力 3.2 MPa, 初始含水、水合物饱和度分别为 0.14、0.234。图1给出二维条件下数值计算产气速度和实验结果比较。可见, 数值计算结果和实验结果具有很好的一致性, 验证了数学模型的可靠性。

### 3 结果讨论

以表1参数为例, 计算了绝对渗透率、孔隙度、井底压力、水合物饱和度等基本参数对三维水合物藏降压法开采产气速度的影响。图2给出了储层最大渗透率变化产气速度的影响情况。可见, 随着渗透率增加, 产气速度增加。在高渗透率条件下, 平稳产气期较短。在渗透率为 0.397  $\mu\text{m}^2$  时, 平稳产气期第 10~80 d, 在渗透率为 0.197  $\mu\text{m}^2$  时, 平稳产气期为

第 10~170 d, 而当渗透率为 0.0397  $\mu\text{m}^2$  时, 在计算的时间内, 产气速度非常平稳。

表1 模型中基本参数取值

Table 1 The values of main physical variables

参数	取值	参数	取值
$c_w$	5.0e-10	$n_G$	1.5
$c_\phi$	8.0e-10	$n_W$	4.0
$K_w/W/(K \cdot m)$	0.56	$\beta$	3.0
$K_g/W/(K \cdot m)$	0.07	$r_g/m$	0.1
$K_r/W/(K \cdot m)$	3	$T_i/K$	280.0
$K_h/W/(K \cdot m)$	0.49	$s_{wi}$	0.2
$K_l/W/(K \cdot m)$	3.4	$\mu_w/Pa \cdot s$	1.0e-3
$C_w/J/(kg \cdot K)$	4211	$p_i/Pa$	6.0e+6
$C_r/J/(kg \cdot K)$	840	$\mu_g/Pa \cdot s$	1.0e-5
$C_h/J/(kg \cdot K)$	1800	$\rho_l/kg/m^3$	900
$C_{Vg}/J/(kg \cdot K)$	2206	$\rho_r/kg/m^3$	2.5e+3
$C_l/J/(kg \cdot K)$	2100	$\rho_w/kg/m^3$	1000

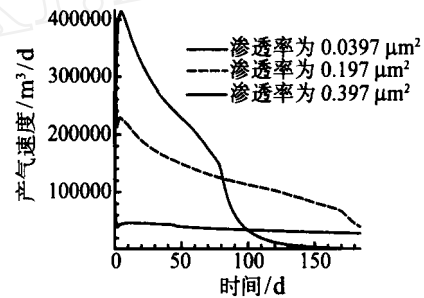


图2 绝对渗透率对产气速度的影响

Fig. 2 The effect of permeability on gas rate

图3给出了孔隙度变化对产气速度的影响。可见, 随着孔隙度的增加, 产气速度有所下降, 但平稳产气期增长。这是因为当孔隙度较小时, 在同样水合物饱和度条件下, 藏中含有水合物总量就少, 骨架含量就相对增加, 藏中本身蕴藏的能量也就增加, 同时, 地层导热能力也就增加(因为水合物的导热能力要低于岩石的导热能力), 这些因素就得低孔隙度条件下水合物能够快速分解, 所以具备较高产气和产水速度。计算中表明, 当孔隙度为 0.2 时, 藏中只有小部分区域结冰, 而且冰最高饱和度为 0.4, 当孔隙度为 0.35 时, 藏中大部分区域都有结冰现象, 并且冰最高饱和度达到 0.6。

图4给出了井底压力变化对产气速度的影响。可见, 随着井底生产压力降低, 产气速度并没有呈现想象中的增大情况, 规律性不明显, 但平稳产气阶段却随着井底压力增加而延长。因此实际生产时, 并非井底压力越低越好, 井底压力过低会导致藏中结冰。当井底压力为 1.0 MPa 时, 藏中大部分区域结冰, 冰相最高饱和度为 0.6, 当井底压力为 2.0 MPa 时, 藏中最高冰相饱和度为 0.38, 而当井底压力为 2.5 MPa 时, 藏中最高冰相压力为 0.16。可见, 随着

生产井底压力的降低, 藏中温度越来越低, 结冰现象越来越重, 水合物分解越来越慢, 因此, 即使是在很低的生产压力条件下, 产气速度却并不一定能够提高。有时反而会因为生产压力太低, 而使得藏中大量结冰, 堵塞孔隙, 严重地降低产气速度。

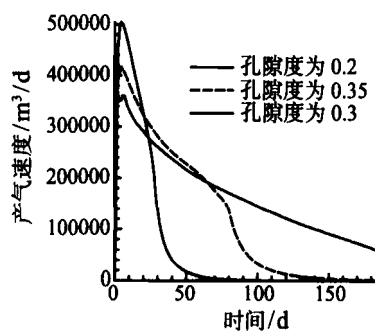


图3 孔隙度变化对产气速度的影响

Fig. 3 The effect of porosity on gas rate

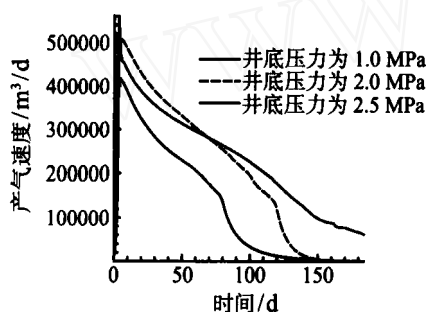


图4 井底压力变化对产气速度的影响

Fig. 4 The effect of bottom pressure on gas rate

图5 给出水合物饱和度变化对产气速度的影响。可见, 随着水合物饱和度增加, 产气速度降低, 平稳产气期却相应地增长。当水合物饱和度为 0.42 时, 藏中未形成冰, 说明藏中能量充足, 能够提供给水合物分解所需能量。当水合物饱和度为 0.62 时, 藏中最高冰相的饱和度为 0.6, 当水合物饱和度为 0.72 时, 藏中大量结冰, 最高冰相饱和度为 0.72。当水

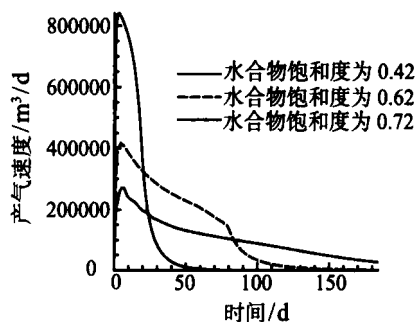


图5 水合物饱和度变化对产气速度的影响

Fig. 5 The effect of hydrate saturation on gas rate

合物饱和度低时, 水合物含量较少, 分解所需要的能量也少, 水合物分解速度较高。同时, 水合物饱和度和低, 相应的地层渗透率就要高, 压力就能够很好地在地层中传播, 从而水合物能够在短时间内在大范围内发生分解, 这更加快了产气速度, 但平稳产气期却缩短。反之亦然。

## 4 结论

建立了三维降压法开采水合物藏的数学模型, 模型中考虑了气-水-水合物-冰相多相渗流、水合物分解动力学过程、水合物相变过程、冰-水相变过程、热传导、对流过程、渗透率变化等对于水合物分解的影响。分析了一些主要参数等对水合物开采的影响。结果表明, 某些情况下, 单一降压法开采会导致水合物藏内结冰严重, 开采能量供给不足。因此, 需要额外提供给水合物分解所需的能量。

## 参考文献

- [1] Makogon Y F. Hydrate of Hydrocarbons [M]. Pennwell Publishing Co. Tulsa, Oklahoma, 1997
- [2] Ji C, Ahmadi G., Smith D H. Constant Rate Natural Gas Production from A Well in A Hydrate Reservoir [J]. Energy Conversion and Management, 2003, 44: 2403-2423
- [3] Yousif M H, Abass H H, Selim M S, et al. Experimental and Theoretical Investigation of Methane-Gas-Hydrate Dissociation in Porous Media [J]. SPE 18320, 1991: 69-76
- [4] Kim H C, Bishnoi P R, Heidemann R A, et al. Kinetics of Methane Hydrate Dissociation [J]. Chemical Engineering Science, 1987, 42(5): 1645-1653
- [5] Moridis G J. Numerical Studies of Gas Production from Methane Hydrates [J]. SPE 87330, 2002: 1-11
- [6] Sun X F, Kishore K M. Kinetic Simulation of Methane Hydrate Formation and Dissociation in Porous Media [J]. Chemical Engineering Science, 2006, 61: 3476-3495
- [7] Civan F C. Scale Effect on Porosity and Permeability: Kinetics, Model and Correlation [J]. AIChE J., 2001, 47(2): 271-287
- [8] Lake L W. Enhanced Oil Recovery [M]. Prentice-Hall Inc. Upper Saddle River, NJ, 1989
- [9] Kamath V. Study of Heat Transfer Characteristics During Dissociation of Gas Hydrate in Porous Media [D]. Pittsburgh: University of Pittsburgh, 1983
- [10] BAI Y H, LI Q P, YU X C, et al. Numerical Study on the Dissociation of Gas Hydrate and its Sensitivity to Physical Parameters [J]. China Ocean Engineering, 2007, 21(4): 625-636
- [11] 杜燕, 何世辉, 黄冲, 等. 多孔介质中水合物生成与分解二维实验研究 [J]. 化工学报, 2008, 59(3): 673-680  
DU Yan, HE Shihui, HUANG Chong, et al. Experimental Studies of Natural Gas Hydrate Formation and Dissociation in Porous Media with the 2D Experimental System [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2008, 59(3): 673-680