

# 天然气水合物分解和开采的机理及数学模型研究综述

张郁<sup>1,2</sup>, 李小森<sup>1,2</sup>, 李刚<sup>1,2</sup>, 陈朝阳<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院广州能源研究所广州天然气水合物中心, 广东广州 510640;

2. 中国科学院可再生能源与天然气水合物重点实验室, 广东广州 510640)

**摘要:** 回顾了25年来国内外水合物开采数值模拟研究的进展, 分析了影响水合物开采过程的主要机理, 即传热、气液流动和水合物分解。将已有的模型分为热力开采、降压开采和综合3种模型, 并对各种模型所具有的特点进行了讨论。综合分析认为, TOUGH Fx/HYDRATE模型充分考虑了多相多组分并借鉴上述3类开采方式, 可模拟开采过程中气液流动和相态变化, 具有较高的应用价值。最后探讨了目前模型的主要问题以及发展方向, 认为水合物矿藏岩石的绝对渗透率、相对渗透率、热传导系数等关键参数的测量及确定是精确模拟水合物开采过程的重要因素。

**关键词:** 天然气水合物; 开采; 数值模拟

**中图分类号:** TE319

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-8527(2010)05-0979-07

## Review: Mathematic Modeling of Natural Gas Hydrate Exploitation

ZHANG Yu<sup>1,2</sup>, LI Xiao-sen<sup>1,2</sup>, LI Gang<sup>1,2</sup>, CHEN Zhao-yang<sup>1,2</sup>

(1. Center for Gas Hydrate Research, Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong 510640, China; 2. Key Laboratory of Renewable Energy and Gas Hydrate, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong 510640, China)

**Abstract:** To carry out the mathematical modeling works of natural gas hydrate (NGH) exploitation, in predicting the dynamic properties of natural gas hydrate reservoir under different production models, is an important part for the development of commercial technologies for gas production from hydrate reservoir. This article reviews the progress of mathematical modeling works for NGH exploitation since last two decades. The models are classified into three sub groups, i. e. thermal model, depressurization model, and comprehensive model. Main factors that control the gas production process are analyzed, that is heat transfer, gas/water flow and hydrate dissociation. Among these models, TOUGH Fx/HYDRATE which accounts for multiphase and three exploitation methods, and can simulate the phase behavior and the flow of gas and water, has a wide range of application. The main limitation of applying the mathematic model in the NGH exploitation area is lack of reliable parameters of sediment bearing hydrate, such as permeability, thermal conductivity.

**Key words:** natural gas hydrate; exploitation; mathematic model

天然气水合物具有分布范围广、储藏规模大、源之一。开发和利用天然气水合物资源已成为各能量密度高等特点, 被认为是21世纪潜在的新能源。我国政府在能源领域的当务之急。

**收稿日期:** 2010-03-09; **改回日期:** 2010-09-09; **责任编辑:** 潘令枝。

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(20773133); 国家自然科学基金—广东联合基金项目(U0733003); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KGCX2-YW-3X6); 中国科学院重大科研装备项目(YZ200717); 国家高技术研究发展计划项目(2006AA09A209); 国家重点基础研究发展规划项目(2009CB219507)。

**作者简介:** 张郁, 男, 助理研究员, 1982年出生, 热能工程专业, 主要从事天然气水合物开采与应用技术方面的研究。

Email: zhangyu1@ms.giec.ac.cn。

**通信作者:** 李小森, 男, 研究员, 博士生导师, 1967年出生, 化学工程专业, 主要从事天然气水合物开采与综合应用研究。

Email: lixs@ms.giec.ac.cn。

借助数学模型预测水合物藏在开采过程中的动态变化特性,如压力变化曲线、产气和产水特性、水合物饱和度的变化等,对实际水合物藏的经济性开采具有重要的意义。自从 Holder 与 Angert 于 1982 年发展了第一个降压开采模型以来<sup>[1]</sup>,学者们已广泛开展了水合物开采的数值模拟研究,发展了一系列的模型。这些模型包括从简单的一维传热模型到考虑水合物开采过程中各种反应机理并能够模拟实际水合物藏开采过程的三维数值模拟器。

本文主要回顾了过去 25 年中水合物开采数值模拟领域的研究进展,并对模型存在的问题以及发展的趋势进行了探悉。

## 1 水合物分解的基本原理

由于水合物以固态形式存在,要使用传统的气井对水合物进行有效地开采,必须使水合物分解为气和水。前人已提出了多种使水合物分解的方法,如注入蒸汽或者热水、注入热盐水、微波法、电磁法、降低水合物地层压力等。根据水合物的热力学平衡原理,可以划分为如下 3 种开采方法,即热力开采、降压开采和注化学剂开采<sup>[2]</sup>。图 1 绘出了水合物在不同开采模式下分解的示意图。

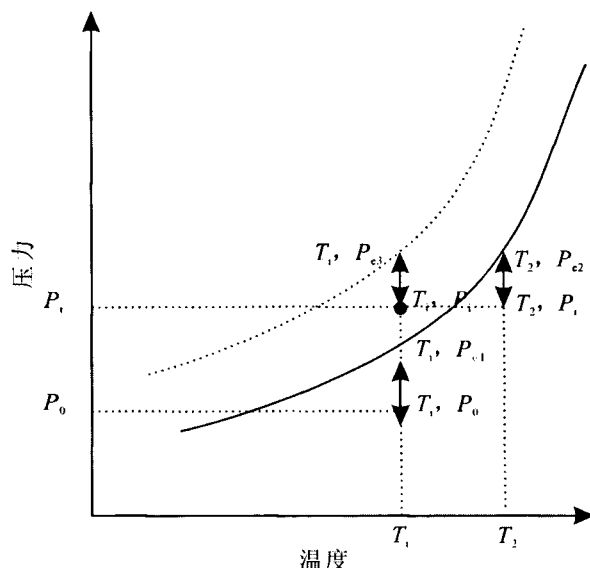


图 1 天然气水合物在不同开采模式下分解的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of hydrate dissociation mechanism under different recovery methods

假定水合物藏初始温压条件为  $P_i$ 、 $T_i$ , 在不同开采模式下, 水合物分解驱动力定义如下:

(1) 降压开采, 降低压力至温度  $T_i$  所对应的平衡压力之下  $P_0$ , 此时分解驱动力为  $P_{ci} - P_0$ 。

(2) 注热开采, 升高温度至压力  $P_i$  所对应的平衡温度之上  $T_2$ , 此时分解驱动力为  $P_{ci} - P_i$ 。

(3) 注入化学剂, 通过注入热力抑制剂, 改变水合物相平衡曲线至虚线所示, 此时分解驱动力为  $P_{ci} - P_i$ 。

水合物在开采过程中, 当通过改变外界条件破坏水合物的相平衡条件时, 水合物开始分解。该过程是一个吸热过程, 需要从外界吸热, 同时分解的水和气体在压差作用下流动。从物理过程来看, 这是一个多孔介质中带有反应的传热、传质过程, 主要包含 3 种机理, 即水合物分解机理、传热机理、分解气液流动机理。为描述该过程而发展的数学模型, 根据繁简不同, 分别考虑了 3 种不同的机理。

## 2 模型回顾

表 1 给出了目前文献中已发展的水合物开采数学模型。根据应用范围, 将其分为 3 大类, 热力模型、降压模型和综合模型。表 1 还包括了各种模型所考虑的因素, 包括传热(对流或传导传热)、流动(气或水流动)、分解动力特性、注入抑制剂、模型的维数以及模型求解的方法(解析或数值求解)。

### 2.1 热力模型

Holder 等<sup>[3]</sup>建立第一个热力法开采水合物数学模型。该模型在没有考虑蒸汽注入水合物地层中热量损失的情况下, 根据能量守恒原理, 推导了模型, 如式(1)所示:

$$\Delta H_s w_s = H_c q_g + \frac{d(m_R H_R)}{dt} \quad (1)$$

其中:  $\Delta H_s$  为注入蒸汽焓变,  $w_s$  为蒸汽注入速度,  $\Delta H_c$  为水合物分解的显热和潜热,  $q_g$  为产气速度,  $H_R$  为水合物地层比焓,  $m_R$  为水合物地层质量,  $t$  为时间。

模型表明注入蒸汽的热量(左边)用于水合物分解和加热水合物分解的水与蒸汽(右边第一项), 以及加热水合物地层(右边第二项)。通过对模型的分析表明, 水合物藏孔隙度、水合物藏热物性、水合物热物性等参数对水合物热力开采的能量效率有着直接的影响。

从模型的角度来说, 这属于一个零维模型, 并没有考虑热力法开采水合物过程中传热、传质、

表 1 天然气水合物开采数学模型比较  
Table 1 Comparison of mathematical modeling of NGH exploitation

| 模型                                         |                                     | 考虑因素 |       |        |     |     |      |
|--------------------------------------------|-------------------------------------|------|-------|--------|-----|-----|------|
|                                            |                                     | 传热   | 流动    | 分解动力特性 | 抑制剂 | 维数  | 求解方法 |
| 热<br>力<br>模<br>型                           | Holder 等 <sup>[3]</sup>             |      |       |        |     | 0   | 解析   |
|                                            | McGuire <sup>[4]</sup>              | 传导   |       |        |     | 1   | 解析   |
|                                            | Selim 与 Sloan <sup>[5]</sup>        | 传导   |       |        |     | 1   | 解析   |
|                                            | Kamath 与 Godbole <sup>[6]</sup>     | 传导   |       |        | √   | 柱坐标 | 解析   |
|                                            | Jamaluddin 等 <sup>[7]</sup>         | 传导   |       | √      |     | 1   | 数值   |
|                                            | Selim 与 Sloan <sup>[8]</sup>        | 对流传导 | 气流动   |        |     | 1   | 解析   |
|                                            | Das 与 Srivastava <sup>[9]</sup>     | 传导   |       |        |     | 柱坐标 | 数值   |
|                                            | Ceyhan 与 Parlaktuna <sup>[10]</sup> | 传导   |       |        |     | 1   | 解析   |
|                                            | 唐良广等 <sup>[11]</sup>                | 传导   |       |        |     | 1   | 解析   |
| Tsimpanogiannis 与 Lichtner <sup>[12]</sup> | 对流传导                                | 气流动  |       |        | 1   | 解析  |      |
| 降<br>压<br>模<br>型                           | Holder 与 Angert <sup>[1]</sup>      | 传导   | 气流动   |        |     | 3   | 数值   |
|                                            | Burshears 等 <sup>[13]</sup>         | 传导   | 气、水流动 |        |     | 3   | 数值   |
|                                            | Yousif 等 <sup>[14]</sup>            |      | 气、水流动 | √      |     | 1   | 数值   |
|                                            | Sung 等 <sup>[15]</sup>              |      | 气、水流动 | √      |     | 3   | 数值   |
|                                            | Goel 等 <sup>[16]</sup>              |      | 气流动   | √      |     | 柱坐标 | 解析   |
|                                            | 喻西崇 等 <sup>[17]</sup>               | 对流传导 | 气流动   |        |     | 柱坐标 | 解析   |
|                                            | Ji 等 <sup>[18]</sup>                | 对流传导 | 气流动   |        |     | 柱坐标 | 解析   |
|                                            | Liu 等 <sup>[19]</sup>               | 对流传导 | 气、水流动 |        |     | 1   | 数值   |
|                                            | Liu 等 <sup>[20]</sup>               | 对流传导 | 气、水流动 |        |     | 柱坐标 | 数值   |
|                                            | Sun 等 <sup>[21]</sup>               | 对流传导 | 气、水流动 | √      |     | 1   | 数值   |
|                                            | Sun 与 Mohanty <sup>[22]</sup>       | 对流传导 | 气、水流动 | √      |     | 3   | 数值   |
|                                            | Nazridoust 与 Ahmadi <sup>[23]</sup> | 对流传导 | 气、水流动 | √      |     | 柱坐标 | 数值   |
|                                            | Bai 等 <sup>[24]</sup>               | 对流传导 | 气、水流动 | √      |     | 3   | 数值   |
|                                            | Bai 等 <sup>[25]</sup>               | 对流传导 | 气、水流动 | √      |     | 3   | 数值   |
|                                            | Song 与 Liang <sup>[26]</sup>        | 对流传导 | 气、水流动 | √      |     | 2   | 数值   |
| 综<br>合<br>模<br>型                           | Swinkels 与 Drenth <sup>[27]</sup>   | 对流传导 | 气、水流动 | √      |     | 3   | 数值   |
|                                            | Masuda 等 <sup>[28]</sup>            | 对流传导 | 气、水流动 | √      |     | 3   | 数值   |
|                                            | Hong 与 Darvish <sup>[29]</sup>      | 对流传导 | 气、水流动 | √      |     | 2   | 数值   |
|                                            | Moridis 与 Collett <sup>[30]</sup>   | 对流传导 | 气、水流动 | √      | √   | 3   | 数值   |

注：√表示模型考虑该种因素。

气液流动等影响。但是这个模型第一次揭示了热力法开采天然气水合物的可行性，为后来的研究工作打下了基础。

随后，Selim 等<sup>[5,11]</sup>的模型假定热力法开采水合物过程中热传导是主要的传热机理，并将水合物分解过程看作一个移动边界问题。即在分解过程中，存在一个移动边界，该边界沿着  $x$  轴方向运动，将整个物理区域分为分解区和水合物区。两个区域内的温度分布满足热传导基本原理，在移动边界上满足能量守恒基本原理。其基本的表达式为：

$$\frac{\partial T_n}{\partial t} = \alpha_n \frac{\partial^2 T_n}{\partial x^2} \quad n = 1, 2 \quad (2)$$

在移动边界上，满足：

$$k_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x_1=X_1} - k_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x_2=X_2} = \Delta H_{\text{Diss}} S_H \frac{dX_1}{dt} \quad (3)$$

其中： $n = 1、2$  分别表示分解区和未分解区的物性， $T$  为温度， $\alpha$  为热扩散系数， $k$  为热传导系数， $\Delta H_{\text{Diss}}$  为水合物分解热， $S_H$  为水合物饱和度。

该类模型被 Kamath 等<sup>[6,9]</sup>发展到柱坐标下，具有如下的形式：

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \frac{\partial T_n}{\partial r} \right] = \frac{1}{\alpha_n} \frac{\partial T_n}{\partial t} \quad (4)$$

在该类模型的基础上，Kamath 等<sup>[6]</sup>发展的模型考虑了注入热盐水对水合物相平衡的影响；Jamaluddin 等<sup>[7]</sup>考虑了水合物分解动力学机理；而

Selim 等<sup>[8]</sup>考虑水合物分解后气体的渗流作用,将模型进一步发展,以用于多孔介质存在的水合物地层。Tsimpanogiannis 等<sup>[12]</sup>在 Selim 等<sup>[8]</sup>的模型基础上,考虑水合物分解过程中沉积物性质,比如渗透率对分解过程的影响,研究表明在较低的渗透率下,水合物的分界速率主要受渗透率的影响。

总的来说,该类模型一般只考虑了水合物分解过程中传热(主要是热传导)的影响,忽略了开采过程中的其他重要机理,但物理概念简单,容易求解,因而得到广泛应用。Ullerich 等<sup>[31]</sup>进行了物理实验,测量了一维纯水合物块的分解速度,并使用 Selim 等<sup>[5]</sup>的模型预测该过程,模型结果与实验数据吻合。唐良广等<sup>[11]</sup>使用模型对热力法开采实际水合物地层的能量效率进行了深入的分析。Kamath 等<sup>[6,10]</sup>发展了循环注蒸汽/热水开采水合物藏模式,利用该模型,考虑注入蒸汽/热水过程中井筒热损失以及通过水合物上下盖层的热损失,对热力开采水合物过程的能量效率进行了综合的分析。

热力开采模型,相对比较简单,考虑的因素较少,通过自相似解法,对参数进行适当简化,一般都能够得到解析解。上述模型绝大多数都通过解析法求解。

## 2.2 降压模型

Holder 等<sup>[1]</sup>第一次提出了模拟单井水合物开采的降压模型,用于模拟水合物层下有自由气层存在的水合物藏开采过程。自由气层的压力分布满足:

$$\nabla \frac{(K(\nabla P))}{(\mu B)} + Q = \frac{d(\varphi/B)}{dt} \quad (5)$$

其中:  $K$  为渗透率,  $\mu$  为气体黏度,  $\varphi$  为孔隙度,  $B$  为气体形成因子,  $Q$  为产气量。

模型结果表明,对于该类型水合物藏,由于水合物分解产生的气体可以占到总气体产量的 20%~30%,因而降压法对该类水合物藏的开采具有实际意义。

严格意义上说,该模型并不属于水合物开采模型,因为公式(5)用于描述自由气层的压力分布,而没有直接描述水合物区的温度、压力分布。

喻西崇等<sup>[17-18]</sup>的模型将水合物地层在降压作用下的开采过程仍当作一个移动边界问题,并假定由水合物分解的水是静止的,只考虑了解析后气体的流动。在柱坐标情况下,模型具有如下形式:

$$\frac{K_n}{2\Phi_n\mu} \left( \frac{\partial^2 P_n^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial P_n^2}{\partial r} \right) = \frac{\partial P_n}{\partial t} \quad (6)$$

其中:  $n = 1, 2$  分别表示分解区和未分解区的特性。

该类模型具有代表性,通过对模型进行参数分析,引进无量纲相似参数,对方程进行相似性变换,将偏微分方程简化为常微分方程,一般可以得到解析解。

Liu 等<sup>[19-20]</sup>同样将开采过程当作一个移动边界问题,但考虑了解析过程中水的流动问题。

Yousif 等<sup>[14-15,21-26]</sup>模型考虑了水合物分解后气、水在多孔介质中的流动,其流动服从达西定律。模型的通用格式为:

$$\text{气体: } \frac{\nabla K \lambda_g \nabla \Phi_g}{B_g} - \frac{q_g}{\rho_{gsc}} = \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\varphi S_g}{B_g} \right) \quad (7)$$

$$\text{水: } \frac{\nabla K \lambda_w \nabla \Phi_w}{B_w} - \frac{q_w}{\rho_{wsc}} = \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\varphi S_w}{B_w} \right) \quad (8)$$

其中:  $g, w$  分别代表气体和水,  $K$  为渗透率,  $\varphi$  为孔隙度,  $B$  为体积系数,  $q$  为产量,  $\Phi$  为流动势,  $\rho_{sc}$  为标况下的密度,  $S$  为饱和度,  $\lambda$  为流度。

根据模型考虑的复杂程度,如气体在水中的溶解度、地层的压缩性、毛细管力等,模型的具体形式有所不同。其中, Nazridoust 等<sup>[23]</sup>的模型是在 FLUENT 软件的基础上利用 USD (Users' Defined Subroutine) 结合水合物分解模型发展起来的。

该类模型较之移动边界的假定,更加真实地反映实际水合物开采过程中的物理情况。在实际水合物开采过程中,不应当存在一个所谓的移动边界,并简单地将水合物地层分为分解区和未分解区。在分解区内还应当有未分解的水合物,以及分解的气、水,通过引入饱和度这个概念,则能解决这个问题。这类模型也是预测实际水合物藏开采动态过程的基础。

在降压开采模式下,水合物分解需要吸热,在没有外界热源的情况下,只能从地层吸热。分解过程的传热模式包括热传导和对流两种传热机理。除 Holder 等<sup>[1,13]</sup>的模型只考虑热传导的影响外,其他模型都综合考虑了两种传热机理,即对流传热和热传导。根据能量守恒的基本原理,考虑传导和对流传热、由于注入和产出气水等导致的热量输入和输出、用于水合物分解的热量、上下地层的散热等,开采过程的能量守恒方程具有如下形式:

$$\frac{\partial}{\partial t} [\varphi(\rho_g S_g H_g + \rho_w S_w H_w + \rho_h S_h H_h) + (1 -$$

$$\varphi \rho_R H_R] = \nabla (\rho_g v_g H_g + \rho_w S_w H_w) + \nabla^2 T + q \quad (9)$$

其中:  $g$ 、 $w$ 、 $H$ 、 $R$  代表气体、水、水合物、岩石;  $\varphi$  为孔隙度,  $\rho$  为密度,  $S$  为饱和度,  $H$  为比焓,  $v$  为速度,  $q$  为其他热量。

左边第一项代表地层热焓变化量; 右边第一项表示对流传热, 第二项代表热传导, 第三项表示地层散热以及产气、产水带走热量。

在地层温度较低的情况下, 水合物分解吸热可能会引起地层中的水结冰, 从而改变水合物分解以及气、水流动的速度, Bai 等<sup>[25]</sup>还研究了在有冰存在下水合物分解的情况。

水合物的分解不是瞬时完成的, 为了更加真实地描述该物理过程, Yousif 等<sup>[14-16, 21-26]</sup>还考虑了分解动力学对开采过程的影响。模型毫不例外都使用了 Kim-Bisnoi<sup>[32]</sup>的模型:

$$\frac{dn_H}{dt} = K_d^0 \exp\left(-\frac{\Delta E}{RT}\right) A_{HS} [f_e(T) - f_g] \quad (10)$$

其中:  $n_H$  为水合物分解量,  $K_d^0$  为水合物反应速度常数,  $\Delta E$  为水合物分解活化能,  $T$  为温度,  $A_{HS}$  为单位水合物的表面积,  $f_e$  为水合物在温度  $T$  下的平衡逸度,  $f_g$  为开采地质条件下天然气气体逸度。

从模型求解方法来说, 由于相对于热力开采模型而发展的降压开采模型要复杂得多, 特别是当流动模型与传热模型或者分解动力学模型进行耦合时, 使用自相似法推导解析解来求解方程组基本不可行, 因而大部分模型都采用数值方法求解。通常的求解方法是从微分方程组中先消去饱和度和项, 得到压力的方程, 并通过有限差分、有限容积等方法对方程离散, 隐式求解得到压力, 然后回代, 并显式求出饱和度, 即隐式压力显式饱和度 (IMPES) 算法。

### 2.3 综合模型

针对此类模型 Swinkels<sup>[27-30]</sup>综合考虑了传热、流动和分解动力学机理, 并将上述方程综合求解。为了算法的收敛, 以及对时间步长的限制, 一般通过全隐式方法求解。综合模型可以同时用于模拟注热和降压两种模式开采水合物。

除了 Hong 等<sup>[29]</sup>发展的模型是二维模型, 不适合于实际水合物藏开采的模拟外, 其他 3 个模型都能够用于现场水合物开采的模拟, 在模型中并且考虑了如井筒模型、地层相渗变化等与实际水合物开采相关子模型。但相对而言, Swinkels 等<sup>[27-28]</sup>的模型都只考虑了气、液、水合物相, 没有考虑分解过程中可能产生的冰相, 而且不能对

注入化学剂开采进行模拟。Moridis 等<sup>[30]</sup>在通用地下水渗流模拟计算软件的基础上 (TOUGHV2.0), 于 1998 年发展了水合物状态方程 (EOSHYDR), 并于 2005 年进一步改进模型, 发展为 TOUGH Fx/HYDRATE。该模型考虑了水合物形成和分解的平衡和动力学模型。模型中考虑 4 相 (气、液、冰、水合物)、9 组分 (水合物、水、天然甲烷、水合物分解出来的甲烷、第二种天然碳氢组分、水合物分解出来的第二种天然碳氢组分、盐、水溶性抑制剂与拟组分热焓), 各组分存在于各相中。该模型可描述水合物分解的所有机理, 包括降压、注热、加入抑制剂; 可以描述非绝热条件下水合物分解和形成过程, 有水合物生成分解的动力学模型和平衡模型可供选择; 能够描述的温度压力范围较广, 能较准确地描述水合物在地层中的变化过程。使用该模型, 对 4 类甲烷水合物藏进行了模拟以及对 Mallik 现场实验数据进行了拟合<sup>[33]</sup>, 结果表明用该模型对从甲烷水合物藏中开采甲烷气在技术上是可行的, 且具有极大的潜力。

在上述各种模型中, 主要可以分为降压模型和加热模型两大类。从表 1 可以看出, Moridis 等<sup>[30]</sup>提出的 TOUGH Fx/HYDRATE 模型考虑因素最为全面, 实用性较强, 是目前水合物开采的最佳模型之一。

## 3 讨论

如上讨论, 水合物开采过程是一个多孔介质中的带反应的传热、传质多相流动过程, 其开采过程存在水合物分解、传热、气水在多孔介质中的流动 3 种机理。为了研究在开采过程中, 究竟哪个机理起决定性因素, 进行了如下分析。定义如下参数:

时间  $t$  内流出多孔介质的最大气体量,

$$\tau_f = \frac{K_{\max} P_g^0 - P_0}{\mu} \frac{t}{L \varphi L} \quad (11)$$

时间  $t$  内最大水合物分解量,

$$\tau_d = K_d^0 \exp\left(-\frac{\Delta E}{RT}\right) A_{HS} [f_e(T) - f_g] \frac{t}{S_{h,\max} \varphi \rho_h} \quad (12)$$

流动与分解时间比,

$$R_\tau = \frac{\tau_f}{\tau_d} \quad (13)$$

考虑一个长度  $L$  为 100 m、孔隙度  $\varphi$  为 0.188、绝对渗透率  $K = 100 \times 10^{-2} \mu\text{m}^2$  的实际水

合物藏, 计算的  $R_r$  远远小于 1 (其他物性参数取一典型水合物藏平均值)。这意味着流体流动速度远远小于水合物分解速度, 也就是水合物分解快慢对水合物开采过程的影响较小, 起决定作用的是气、水的流动性能。Moridis 等<sup>[30]</sup> 使用 TOUGH Fx/HYDRATE 软件的平衡和动力学两种模型对实际水合物藏开采进行模拟, 两种模型给出了相似的结果, 说明在模拟实际水合物开采过程中, 可以不考虑分解动力学机理。

在水合物的真实开采过程中, 由于存在许多不确定因素, 有可能使得当前模型数值模拟的结果并不能很好地预估现实开采, 因此, 非常有必要对一些关键参数进行更加精确地测量和评价。

(1) 流动参数。在有水合物存在下, 多孔介质的流动特性变化规律, 具体表现为含水合物地层的绝对渗透率随水合物饱和度的变化而变化, 水合物藏绝对渗透率与水合物饱和度的关系将对水合物开采有着重要的影响。当水合物饱和度较高, 多孔介质中更多的流动空间被固体水合物占据, 流动性能变差 (降压法对水合物开采可能就不实用)。另外, 在多孔介质多相流动中各相相对渗透率是非常重要的参数, 将决定于各相流体的流动能力。然而, 目前还没有可靠的实验数据和模型能够模拟有水合物存在时多孔介质绝对渗透率的变化以及相对渗透率曲线。未来的工作重点可以放在精确测量各种水合物矿藏岩石的绝对渗透率随多孔介质孔隙度变化关系及其各相相对渗透率曲线上。

(2) 传热参数。目前, 许多模型都证明传热对水合物开采过程的重要性, 但是缺乏水合物多孔介质的热物性参数的数据。对于实际的水合物矿藏岩石, 热传导参数在各个位置变化很大, 随着时间的推移其传热性质也会因为岩石的成分改变而发生变化, 如果不考虑这些因素的影响, 将会限制模型的有效性。因此, 对于不同岩石及不同成分下热传导系数的精确测量, 将对数值模拟的精确性有着很大的影响。

(3) 动力学以及热力学参数。水合物在多孔介质中的分解动力学参数, 广泛使用的是 Kim 等<sup>[32]</sup> 的模型 (式 (10))。该参数是在忽略水合物分解过程中传热、传质的情况下推导的, 在多孔介质中应该有较大的差别。如 Yousif 等<sup>[14]</sup> 认为分解动力学常数在多孔介质中比 Kim 等<sup>[32]</sup> 的值小 4 个数量级。另外一个重要的参数就是水合物在分解过程

中, 表面积 (式 (10) 中  $A_{HS}$ ) 随水合物饱和度的变化规律, 目前还没有模型和实验数据能够描述该参数。

尽管纯水体系中水合物相平衡、多孔介质中相平衡、含醇以及电解质体系水合物相平衡的计算模型已经发展起来, 但是含抑制剂, 特别是含钻井液体等复杂体系的水合物相平衡模型还需要发展。

这些基本的物性参数的缺乏, 极大地影响了模型的应用以及预测能力。对水合物开采模拟的下一步工作将是开展实验研究, 获得更加可靠的物性参数。

## 4 结论与展望

水合物开采数学模型按照应用范围来分, 可以分为热力模型、降压模型和综合模型。所发展的模型, 根据复杂程度不同, 分别考虑水合物开采过程中的 3 个重要机理, 即水合物分解、传热 (对流、热传导) 和气、水流动。

在实际水合物藏开采过程中, 水合物分解动力学对结果影响较小, 决定过程主要是气水流动参数。同时, 传热的作用也不可忽视。根据之前的分析, 笔者认为, Moridis 等<sup>[30]</sup> 的 TOUGH Fx/HYDRATE 模型充分考虑了多相多组分及 3 类开采方式, 已经形成较为完善的数学理论基础, 应用其进行数值模拟将是较好的选择。然而, 目前水合物矿藏岩石的绝对渗透率、相对渗透率、热传导系数等关键参数的测量及模型都有待于进一步提高。在未来的数值模拟工作中, 只有对这些关键参数进行更加深入的研究, 才能提高数值模拟的精度及对水合物开采过程进行更加准确的预测。

## 参考文献:

- [1] Holder G D, Angert P F. Simulation of gas production from a reservoir containing both gas hydrates and free natural gas [R]. New Orleans: Annual Fall Technical Conference and Exhibition, SPE, 1982.
- [2] Sloan E D. Clathrate Hydrates of Natural Gas [M]. New York: Marcel Dekker, 1998: 547 - 555.
- [3] Holder G D, Angert P F, John V T. A thermodynamic evaluation of thermal recovery of gas from hydrates in earth [J]. Journal of Petroleum Technology, 1982, 37(1): 1127 - 1132.
- [4] McGuire P L. Recovery of Gas from Hydrate Deposits Using Conventional Technology: Unconventional Gas Recovery Symposium [M]. Pittsburgh: SPE, 1982: 1 - 50.
- [5] Selim M S, Sloan E D. Modeling of the dissociation of an in-situ

- hydrate [R]. Sakerafi; California Regional Meeting, SPE, 1985; 1-50.
- [6] Kamath V A, Godbole S P. Evaluation of hot-brine stimulation technique for gas production from natural gas hydrates [J]. Journal of Petroleum Technology, 1987, 39: 1379-1388.
- [7] Jamaluddin A K, Kalogerakis N, Bishnoi P R. Modelling of decomposition of synthetic core methane gas hydrate by coupling intrinsic kinetics with heat transfer rates [J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 1989, 67: 948-954.
- [8] Selim M S, Sloan E D. Hydrate dissociation in sediment [J]. SPE Reservoir Engineering, 1990, 35(6): 245-251.
- [9] Das D K, Srivastava V. Calculation of gas hydrate dissociation with finite-element model [J]. Journal of Energy Engineering, 1993, 119(3): 180-200.
- [10] Ceyhan N, Parlaktuna M. Cyclic steam injection model for gas production from a hydrate reservoir [J]. Energy Sources, 2001, 23(5): 437-447.
- [11] 唐良广, 李刚, 何世辉, 等. 热力法开采地层中天然气水合物的热动力评价 [R]. 北京: 中国工程热物理学会第十一届学术会议, 2005.
- [12] Tsimpanogiannis I N, Lichtner P C. Parametric study of methane hydrate dissociation in oceanic sediments driven by thermal stimulation [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2007, 56(1/3): 165-175.
- [13] Burshears M, O'Brien T J, Malone R D. A multi-phase, multi-dimensional, variable composition simulation of gas production from a conventional gas reservoir in contact with hydrates [R]. Lowville: The Unconventional Gas Technology Symposium, SPE, 1986.
- [14] 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 Reservoir Engineering, 1991, 36(1): 69-76.
- [15] Sung W, Huh D, Ryu B, et al. Development and application of gas hydrate reservoir simulator based on depressurizing mechanism [J]. Korean Journal of Chemistry Engineering, 2000, 17(3): 344-350.
- [16] Goel N, Wiggins M, Shah S. Analytical modeling of gas recovery from in situ hydrates dissociation [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2001, 29(2): 115-127.
- [17] 喻西崇, 吴应湘, 安维杰, 等. 开采地层中的天然气水合物的数学模型 [J]. 天然气工业, 2004, 24(1): 63-67.
- [18] Ji C, Ahmadi G, Smith D H. Natural gas production from hydrate decomposition by depressurization [J]. Chemical Engineering Science, 2001, 56(20): 5801-5814.
- [19] Liu Y, Strumendo M, Arastoopour H. Numerical simulation of methane production from a methane hydrate formation [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2008, 47(8): 2817-2828.
- [20] Liu Y, Strumendo M, Arastoopour H. Simulation of methane production from hydrates by depressurization and thermal stimulation [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2009, 48(5): 2451-2464.
- [21] Sun X, Nanchary N, Mohanty K K. 1-D modeling of hydrate depressurization in porous media [J]. Transport in Porous Media, 2005, 58(3): 315-338.
- [22] Sun X F, Mohanty K K. Kinetic simulation of methane hydrate formation and dissociation in porous media [J]. Chemical Engineering Science, 2006, 61: 3476-3495.
- [23] Nazridoust K, Ahmadi G. Computational modeling of methane hydrate dissociation in a sandstone core [J]. Chemical Engineering Science, 2007, 62: 6155-6177.
- [24] Bai Y H, Li Q P, Li X F, et al. The simulation of nature gas production from ocean gas hydrate reservoir by depressurization [J]. Science in China: Ser E, 2008, 51(8): 1272-1282.
- [25] Bai Y H, Li Q P, Li X F, et al. Numerical simulation on gas production from a hydrate reservoir underlain by a free gas zone [J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(5): 865-872.
- [26] Song Y C, Liang H F. 2-D numerical simulation of natural gas hydrate decomposition through depressurization by fully implicit method [J]. China Ocean Engineering, 2009, 23(3): 529-542.
- [27] Swinkels W J A M, Drenth R J. Thermal reservoir simulation model of production from naturally occurring gas hydrate accumulations [R]. Texas: Annual Technical Conference and Exhibition, SPE, 1999.
- [28] Masuda Y, Kurihara M, Ohuchi H, et al. A field simulation study on gas productivity of formations containing gas hydrates [M] // Mori Keio. The 4th International Conference on Gas Hydrates. Yokohama: University Yokohama, 2002.
- [29] Hong H, Darvish M P. A numerical study on gas production from formation containing gas hydrates [M] // CIPC. Canadian International Petroleum Conference. Calgary: Society of the Canadian Institute of Mining, Metallurgy & Petroleum, 2003.
- [30] Moridis G J, Collett T S. Strategies for gas production from hydrate accumulations under various geological and reservoir conditions [R]. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2003.
- [31] Ullerich J W, Selim M S, Sloan E D. Theory and measurement of hydrate dissociation [J]. AIChE, 1987, 33(5): 747-752.
- [32] Kim H C, Bishnoi P R, Heidemann R A, et al. Kinetics of methane hydrate decomposition [J]. Chemical Engineering Science, 1987, 42(7): 1645-1653.
- [33] Moridis G J, Collett T S, Dallimore S R. Numerical studies of gas production scenarios from several CH<sub>4</sub>-hydrate accumulations at the Mallik Site [R]. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2002.