

热力法开采天然气水合物的数学模拟^{*}

唐良广 李 刚 冯自平 樊栓狮

(中国科学院广州能源研究所天然气水合物研究中心)

唐良广等.热力法开采天然气水合物的数学模拟.天然气工业,2006,26(10):105-107.

摘 要 将天然气水合物在热力作用下的分解过程看作一个移动界面问题,即热力开采过程中整个水合物藏可分为分解区和水合物区。通过适当简化,建立了分解区和水合物区的传热模型,并严格推导了模型的解析解。使用模型分别模拟注入蒸气和热水条件下开采天然气水合物的两个实例,得到分解区和水合物区温度场随时间变化的规律。在此基础上,分析了水合物热力开采过程中热量的有效利用率,即用于水合物分解的热量与输入的总热量的比值。模型计算结果表明,在相同条件下,注入热水比注入蒸气将能获得更高的热量有效利用率。在给定的条件下,注入蒸气和热水开采过程的热量的有效利用率分别为 0.349 和 0.465。另一个方面,该比值与水合物地层的物性参数(如水合物的饱和度、分解区域的热传导系数等)有很大的关系,地层水合物饱和度越高,分解区的热传导系数越小,则热量的有效利用率越高。

主题词 天然气 水合物 开发 热力学 数学模型

天然气水合物广泛地存在于冻土地带和海洋底层,其含量相当于全球已知矿物含量的 2 倍^[1],被认为是 21 世纪潜在的新能源之一。从水合物藏中开采天然气气体的可行性以及经济性评价已经成为一个热点课题,有效的开采方法是热力开采、降压开采和注化学剂开采^[2]。Holder 第一次从热力学的角度论证了热力开采技术的可行性^[3];McGuire^[4]认为热力开采法是最具有吸引力的天然气水合物开采方法;喻西崇等^[5]将水合物在热力作用下的分解过程看作一个移动边界问题;Selim^[6]建立了在热力作用下的一维水合物分解模型,并在此基础上推了解析解。然而,该模型只考虑了水合物区的传热规律,而没考虑已分解区的传热问题。Morris^[7]发展了一水合物藏三维通用模型,但是模型过于复杂,只能通过数值解法求得温度场的分布。在水合物注热开采过程中,一个同时考虑分解区和水合物区的传热规律并推了解析解的数学方法对定量理解热力法开采水合物过程中的传热过程、热力开采热效率评价等等有着重要的作用。笔者将水合物在热力作用下的分解过程看作一个移动边界问题,建立了水合物热力开采过程中分解区和水合物区的温度分布的一维

数学模型,并严格推导其解析解。在此基础上,对注入蒸气和热水两种热力开采方法进行了比较。

一、数学模型

考虑水合物层温度为 T_2 , 并且占据无限大的区域,即 $0 < x < \infty$ 。在时间 $\tau = 0$ 时,由于注入热量,水合物边界温度升高到 T_1 ($T_1 > T_2$),并且一直维持该温度。这时候水合物分解开始。这是一个典型的移动边界传热问题,在分解过程中,存在一个移动边界,它沿着 x 轴方向运动,将整个物理区域分为分解区和水合物区(图 1)。

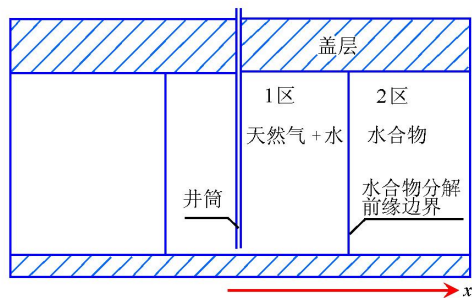


图 1 天然气水合物分解示意图

在某个时刻 τ , $x < X(\tau)$ 的区域为分解区,其物

^{*} 本文受到中国科学院广州能源研究所所长基金(编号:0507041001)资助。

作者简介:唐良广,1975 年生,副研究员;2000 年毕业于华中科技大学,获热能工程硕士学位,2004 年毕业于澳大利亚 Newcastle 大学,获化学工程博士学位;现主要从事天然气水合物开采方面的基础研究。地址:(510640)广东省广州市天河区五山能源路。电话:(020)87057396。E-mail: tanglg@ms.giec.ac.cn

性为 ρ 、 α 、 k_1 、 c_1 。在模型中,忽略该区域的对流流动,并假定该区的物性参数保持为常数。如果 t_1 是分解区的温度,则它满足下列表达式:

$$\frac{\partial t_1}{\partial \tau} = \alpha \frac{\partial^2 t_1}{\partial x^2} \quad (1)$$

$$t_1 = T_1 \mid_{x_1=0} \quad (2)$$

$x > X(\tau)$ 的区域为水合物区,其物性为 ρ 、 α 、 k_2 、 c_2 ,如果 t_2 是水合物区的温度,它满足下列表达式:

$$\frac{\partial t_2}{\partial \tau} = \alpha \frac{\partial^2 t_2}{\partial x^2} \quad (3)$$

$$t_2 = T_2 \mid_{x_2 \rightarrow \infty} \quad (4)$$

式中: α 为分解区或者水合物区的热扩散系数, $\alpha = k/(\rho c)$, m^2/s ; ρ 为分解区或者水合物区的密度, kg/m^3 ; k 为分解区或者水合物区的热传导系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; c 为分解区或者水合物区的比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

此外,在分界面处,由于处于水合物正在分解过程中,则温度应当等于在压力 p 下水合物的平衡温度,即

$$t_1 = t_2 = T_p \mid_{x_1 = X_1(\tau), x_2 = X_2(\tau)} \quad (5)$$

如果忽略水合物和分解的水的密度差,则有:

$$X_1(\tau) = X_2(\tau) \quad (6)$$

水合物分解过程中,在移动边界上应当满足能量守恒,即

$$k_1 \frac{\partial t_1}{\partial x} \Big|_{x_1 = X_1} - k_2 \frac{\partial t_2}{\partial x} \Big|_{x_2 = X_2} = \Delta H_D S_H \frac{dX_1}{d\tau} \quad (7)$$

式中: ΔH_D 为水合物的分解热, J/kg ; S_H 为水合物的饱和度。

式(1)~(7)构成了水合物地层在热力作用下分解过程的一维微分方程以及边界条件和初始条件。

二、模型求解

第一个求解具有移动边界的热传导过程的学者是 Goodman^[8]。在这里采用了相似的方法,得到水合物地层在分解区中温度表达式:

$$\frac{t_1 - T_p}{T_1 - T_p} = 1 - \frac{\text{erfc}(x/2\sqrt{\alpha\tau})}{\text{erfc}(K/2\sqrt{\alpha})} \quad (8)$$

式中: K 值是 T_1 、 T_2 和 T_p 以及地层热物性的函数。

水合物地层在水合物区中温度表达式为:

$$\frac{t_2 - T_p}{T_2 - T_p} = 1 - \frac{\text{erfc}(x/2\sqrt{\alpha\tau})}{\text{erfc}(K/2\sqrt{\alpha})} \quad (9)$$

K 值由下式给出:

$$\frac{(T_p - T_1)k_1 e^{-K^2/(4\alpha_1)}}{\sqrt{\pi\alpha} \text{erfc}(K/2\sqrt{\alpha})} + \frac{(T_2 - T_p)k_2 e^{-K^2/(4\alpha_2)}}{\sqrt{\pi\alpha} \text{erfc}(K/2\sqrt{\alpha})}$$

$$= \frac{\Delta H_D S_H \rho K}{2} \quad (10)$$

三、结果与讨论

笔者对模拟注入蒸气和注入热水开采天然气水合物的两个实例进行了计算。二者的初始条件如表 1 所示。

表 1 计算实例初始条件表

	T_1 (K)	T_2 (K)	p (MPa)
实例 1	563.5	275	7.5
实例 2	450	280	10

这两种条件分别类似于文献中提出的模拟注入蒸气和注入热水开采天然气水合物中的初始条件^[7]。

模型中使用的参数的值如下:分解区的热扩散系数(α)为 $2.89 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$;水合物区的热扩散系数(α)为 $6.97 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$;分解区的热传导系数(k_1)为 $5.57 \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;水合物区的热传导系数(k_2)为 $2.73 \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;分解区的密度(ρ)为 $2500 \text{kg}/\text{m}^3$;水合物饱和度(S_H)为 0.3 ;水合物分解热 $\Delta H_D = ZRT^2 \frac{d(\ln p)}{dT}$ (J/kg);水合物分解温度 $T_p = \frac{153608}{37.05 - \ln p} - 459.7$ (K)。其中水合物分解热通过 Clausius-Clapeyron 公式简化获得,而水合物在压力 p 下的分解温度(T_p)由甲烷的相平衡数据关联获得。

两个计算实例中的温度场分布与时间的变化关系由式(8)、(9)得到,结果如图 2 所示。

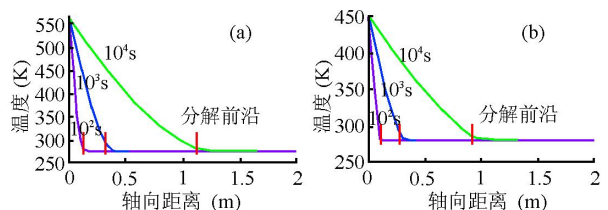


图 2 水合物地层温度场温度随时间变化示意图

从图 2 可以看出,温度分布明显分为两个区域:在分解区,温度随着轴向距离的增加迅速降低;在水合物区,则存在一个非常小的温度梯度,大部分水合物区温度都保持初始温度。这主要是相对于分解区而言,水合物区的热扩散系数非常小,热量不容易通过移动边界传导走。随着时间的增加,水合物分解

前沿沿 x 轴向移动。

进入水合物地层单位面积上的热流量可以由下式计算得出：

$$Q_m = -k_l \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = k_l (T_1 - T_p) \frac{1}{\operatorname{erf}(K/2\sqrt{\alpha}) \sqrt{\pi\alpha} \sqrt{\tau}} \quad (11)$$

在不考虑上下盖层的热量损失的情况下,进入水合物层的热量一部分用于升高分解区的温度,另一部分用于分解水合物,还有一部分则通过移动边界传导给未分解的水合物区域。其中有效热量(即用于单位面积水合物分解的热量)由下式计算出：

$$Q_d = S_H Q_b \rho \frac{dx_1}{dt} = \frac{S_H Q_b \rho K}{2} \frac{1}{\sqrt{\tau}} \quad (12)$$

图3给出了计算实例1、2中进入水合物层的热流量与用于水合物分解的热量随时间的变化关系。从图中可以看出,随着时间的增加,在保持入口温度为恒温的边界条件下,输入的热量将逐步减少,这是由于随着时间的增加,地层的温度已经升高,所以需要较少的热量来维持定温的边界条件。同时气体的产量(水合物的分解量)也逐步减少。这就意味着,为了维持稳定的产气率,必须输入更多的热量。

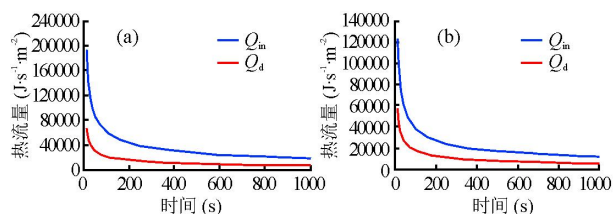


图3 输入水合物地层的热量以及用于水合物分解的热量随时间的变化关系图

这里,定义热量的有效利用率(即用于水合物分解的热量与进入水合物地层的热量的比例) η 为：

$$\eta = \frac{Q_d}{Q_m} = \frac{S_H Q_b \rho}{2k_l (T_1 - T_p)} \operatorname{erf}(K/2\sqrt{\alpha}) \sqrt{\pi\alpha} \quad (13)$$

可以看出, η 与时间无关,而主要取决于水合物的饱和度、边界温度以及分解区域的热物性参数。水合物饱和度越高,热量的有效利用率越高。分解区的热传导系数越小以及初始温度越低,则热量的有效利用率越高。对两个实例的计算值表明,实例1和实例2的有效热比率分别为0.349和0.465。实例1中的有效热比率较实例2小,这是因为输入的蒸气温度越高用于加热地层的热量就越多。从这个角度来说,使用热水而不是蒸气来进行开采可以获

得更高的热效率。当然,由于热水单位体积提供的热量较蒸气少,为了保持相同的产气率,需要注入更多的热水。在实际开采中,可能会出现早期见水以及水窜等现象。因而对开采的综合评价还需要考虑更加复杂的因素。

四、结 论

基于如下假设,笔者提出了一个水合物在热力学作用下分解的数学模型,并推导了其精确的解析解：①一维半无限大平板；②表面维持常温；③分解时没有考虑沉积物对物性的影响；④没有考虑传质过程。利用该模型确定了分解区域与水合物区域的温度场。对注入蒸气和热水开采天然气水合物两种情况进行了比较,结果表明：热量的有效利用率主要决定于水合物的饱和度、边界温度以及分解区域的热物性参数。从能量利用的角度来说,注入热水较注入蒸气有较高的效率。

参 考 文 献

- [1] LEE S Y, HOLDER G D. Methane Hydrates potential as a future energy source [J]. Fuel Processing Technology, 2001, 71, 181-186.
- [2] SLOAN E D. Clathrate. Hydrates of natural gas [M]. 2nd ed. New York: Marcel Dekker, 1998.
- [3] HOLDER G D, ANGERT P F, JOHN V T. A thermal dynamic 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 [C]// Unconventional Gas Recovery Symposium. Pittsburgh, 1982.
- [5] 喻西崇, 吴应湘. 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.
- [6] SELIM M S, SLOAN E D. Modeling of the dissociation of an In-situ hydrate [J]. SPE 13597, 1985.
- [7] MORIDIS J S, COLLETT T S. Numerical studies of gas production from class 2 and class 3 hydrate accumulations at the mallik site. Mackenzie Delta, Canada [J]. Journal of Petroleum Technology, 2004, 175-183.
- [8] CARSLAW H S, JAEGER J C. Conduction of heat in solid [M]. 2nd ed. London: Clarendon Press, 1959.

(修改回稿日期 2006-05-22 编辑 韩晓渝)