

海洋天然气水合物开采方法及产量分析

窦 斌^{1,2}, 蒋国盛¹, 吴 翔¹, 张 凌¹, 宁伏龙¹

(1. 岩土钻掘与防护教育部工程研究中心, 湖北 武汉 430074; 2. 中原油田钻井院, 河南 濮阳 457001)

摘要: 海洋天然气水合物的巨大储量刺激了世界各国能源部门努力研究如何从天然气水合物储层生产天然气。根据水合物形成的条件, 只有当水合物处在其相平衡条件以外, 水合物才能分解。因此, 水合物的开采方法只能为热熔法、抑制剂刺激法、减压法和地面分解法。为了对天然气水合物储层中气体的生产有个定量的评估, 本文以水合物开采井为例, 运用数学方法推导了水合物井中气体的产生量。结果表明, 在天然气水合物储层中, 天然气释放量是井内水合物分解温度、压力及水合物层气体渗透性的敏感函数。该函数可以用于天然气水合物井气体开采量的计算及对水合物储层可开采性评价。

关键词: 天然气水合物; 天然气生产; 水合物分解; 能源; 数学模型

中图分类号: P744.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-5470(2009)03-0082-03

Modeling of natural gas recovery from a hydrate reservoir well

DOU Bin^{1,2}, JIANG Guo-sheng¹, WU Xiang¹, ZHANG Ling¹, NING Fu-long¹

(1. Engineering Research Center of Rock-Soil Drilling & Excavation and Protection, Ministry of Education, Wuhan 430074, China;

2. Drilling Engineering & Technique Institute, Zhongyuan Petroleum Exploration Bureau, Puyang 457001, China)

Abstract: The authors explore the potential of gas hydrates as a source of energy. They discuss the methods for gas production from gas hydrates, which is widely available in permafrost and oceanic sediments. These hydrocarbon deposits have stimulated worldwide efforts to understand gas production from hydrate dissociation in hydrate reservoir wells. According to formation conditions of gas hydrates, the production of gas hydrates can only be done through thermal injection, inhibitor injection, or depressurization. In order to quantitatively assess gas production of natural gas hydrate reservoirs, a gas hydrate exploration well was used as an example to derive the gas volume produced from hydrate reservoir wells by using mathematical methods. The results show that in gas hydrate reservoirs, the gas volume released from reservoir wells is a sensitive function of temperature and pressure of the boreholes and permeability of the gas hydrate. The function can be used to calculate gas volume produced from gas hydrate wells and to evaluate the recoverability of gas hydrate reservoirs.

Key words: gas hydrate; natural gas production; hydrate dissociation; energy source; model

近年来的研究果表明, 天然气水合物中所含的碳元素是目前已经探明储量的所有煤、石油和天然气等常规能源的2倍。天然气水合物被誉为未来的洁净能源, 因此世界很多国家能源部门对水合物的研究越来越重视。而海洋天然气水合物占了水合物储量的绝大多数^[1], 因此本文以海洋天然气水合物

为研究对象。

自然形成的天然气水合物是象冰一样的固体, 在天然气水合物储藏层的温度、压力及化学条件发生改变之前, 其状态不会发生变化, 因此水合物不会发生分解。天然气水合物的稳定区域的边界是其所处温度、压力以及所在地层孔隙中气体和液体所

收稿日期: 2008-07-21; **修订日期:** 2008-08-05。卢冰编辑

基金项目: 国家自然科学基金项目(50504012)和国家自然科学基金项目(50844062), 中国博士后科学基金项目特别资助(2008010274)和中国博士后科学基金项目(20080430124)及教育部国际合作项目(2008052017)联合资助

作者简介: 窦斌, 1973年生, 男, 副教授, 博士, 中原油田博士后。主要从事石油及天然气水合物钻井方面的研究工作。Email: briandou@hotmail.com

形成的合成物的量的函数^[2]。

1 开采的理论基础

最近几年，对水合物的储量及物理化学性质进行研究比较多，但是对水合物开采理论及开采方法的研究比较少。然而，大部分天然气水合物“资源”由于其储量及富集程度不高开采难度非常大。从开采技术方面来说，天然气水合物的开采与其形成互为逆过程，即要开采水合物，可以将天然气水合物以固态型式运输到地面，然后分解成天然气输送给用户。然而，最直接的办法是在水合物开采储层中将水合物分解成气体通过管道直接输送给用户。要从天然气水合物储层开采天然气必须具备以下条件：（1）能够将水合物颗粒暴露在水合物温度压力相平衡条件以外；（2）水合物分解属于吸热反应，而且水合物分解具有自“保护”性^[3]，因此需要有可持续的能量供应；（3）在水合物生产井，能够将分解的气体转移出来，防止气体的大量集结阻止水合物的继续分解。从天然气水合物的相平衡可以看出^[4]，要想满足以上条件，只有以下 3 种途径：（1）升高水合物的环境温度；（2）降低水合物所处的压力；（3）通过化学方法改变相平衡曲线。

2 水合物开采方法

天然气水合物中甲烷气体是重要的温室气体，其温室效应是 CO₂ 的 6 倍，因此，甲烷气体释放到大气中将严重影响大气环境。海底天然气水合物的分解容易引起海底滑坡或者海啸等灾害。所以，要将天然气水合物转化为商业用天然气，实现途径不仅要经济而且要安全。根据水合物的形成原理，用于水合物分解开采的理论方法有以下 3 种^[5]。

2.1 热熔法

该方法原理就是将热量注入水合物沉积层，水合物吸收热量后温度升高引起水合物颗粒的分解。Klamath 认为^[5]，可以从地面将热的液体如水、盐水、蒸汽注入到水合物开采层，或者在水合物开采层燃烧高能量物质以及采用电磁加热等方法。

2.2 抑制剂刺激法

该方法原理是通过注入化学试剂使水合物热动力相平衡发生改变而引起水合物分解。但是，抑制剂刺激法只限于少量开发时采用，因为这与抑制剂成本比较高有关。在某些石油开采井，当出现水合物阻塞现象时，通过注入甲醇和氯化钙溶液可以成功地疏通水合物的阻塞。

2.3 减压法

在该方法中，通过减小液体与水合物的接触面压力，促使水合物处在相平衡稳定区域以外而发生分解。在该方法中，由于没有额外的热量注入到水合物开采层，分解所吸收的热量必须由周围物质提供，但是当水合物分解吸收的热量达到一定程度，水合物周围环境温度降低会抑制水合物的进一步分解。很多研究指出，这种方法在气体全面分解过程中有利于控制开采气体的流量。减压法适合于那些储藏中存在大量自由气体的水合物储层。

2.4 地面分解法

地面分解法^[6]由海底采矿车把海底表面的水合物输送到矿石中继仓，再由矿浆泵逐级将天然气水合物输送到开采平台或者采矿船上的研磨机。水合物在采矿系统的提升过程中，由于温度压力发生变化，部分水合物会发生分解。但是整个系统是密封的，所以分解的天然气也会随着未分解的水合物进入研磨机，水合物矿产在研磨机中被充分研磨，然后进入分解器，当水合物在分解器中完全分解以后，气体、沙石及水的混合物进入大体积容器。气体通过大体积容器的上部管道进入压缩机，然后进入密闭容器或者输送到用户端。分解器可以利用开采船发动机的尾气与海水同时进行加热，使天然气水合物充分分解。由于气体的密度小，随着气、水和砂石分离，气体在容器的上部沿着出口管线排出。

上述开采水合物的方法将会对水合物周围的地层产生影响，因此，在深海海底储层利用以上方法进行水合物开采，应防止水合物的分解与气体的排除导致海底滑坡等重大事故的发生。

3 产气数学模型

水合物开采井如图 1 所示，由于水合物分解成气体，假设在水合物井中包括两部分，一部分为分解的水与气体，另一部分为没有分解的水合物。分界面半径用 r 表示（初始值为水合物开采井的直径 $r=r_0$ ），随着水合物的分界不断增大， r 值不断增大， h 为水合物层的厚度， R 为水合物井储层的等价最大开采半径。当 $r=R$ 时，该水合物井气体开采完成。

从水合物井中开采气体的过程中，如果在时间 t 内释放出的气体量为 n_L 摩尔，单位时间内气体释放量为 $\frac{dn_L}{dt}$ ，气体释放量是水合物分解速度的函数。水合物的分解就是水合物结构的破坏过程，然后气体从水合物网格空隙释放出来。水合物结构的

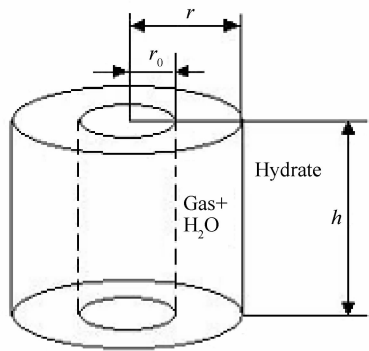


图 1 水合物开采井

Fig. 1 Exploration well of gas hydrate

破坏需要外部的推动力，如果该动力由压力的变化引起，则该过程是压力变化的函数。当水合物所承受的压力降低到水合物相平衡的临界压力，表面的水合物开始发生分解并有气体释放出来，压力的进一步变化会加速水合物的分解。水合物的分解与水合物与已分解气体接触面的表面积 A_s 成正比。水合物大部分是填充在沉积物空隙内的，假设沉积物空隙全部由水合物填充， φ 代表水合物沉积层的空隙率。在水合物相平衡压力以下，不同的压力条件下水合物的分解速度不同，假设平衡压力为 P_{ep} ，分解时的压力为 P_D ，则释放出的气体摩尔量与水合物表面积及分解推动力 $(P_{eq} - P_D)$ 成正比。平衡压力 P_{ep} 是水合物储层温度的函数，当水合物发生分解时，水合物表面的温度将降低，温度的降低将导致平衡压力降低，这将引起水合物相平衡发生变化，从而引起分解速度下降。因此，在周围温度不发生变化时，水合物气体释放量将随着水合物分解而降低。温度对水合物分解压力的影响可以近似用分解动力 $(P_{eq} - P_D)$ 的 n 次函数来表示，即 $(P_{eq} - P_D)^n$ ，当 $n < 1$ 时，分解推动力小于 $(P_{eq} - P_D)$ ，这里 n 是热动力模型参数^[7]。因此，简化后水合物分解量可以用热动力参数表示

$$\frac{dn_L}{dt} = A_s(P_{eq} - P_D)^n \tag{1}$$

上式是水合物分解过程动态平衡方程。

因此，时间 t 内气体的释放量用下式来表示

$$n_L = \pi(r_i^2 - r_0^2)h\varphi\eta S_H B_H \frac{P_s}{RT_s} \tag{2}$$

式中： φ 是水合物层的空隙率， η 为水合物层气体的渗透系数， S_H 是水合物的饱和度，这 3 个参数由钻探取样分析得出。 B_H 为水合物的含气率，即 1m^3 的水合物在标准状况下可以释放出 180m^3 的气体， P_s 与 T_s 是理想气体状态方程中的温度与压力， $R = 8.314\text{J/mol} \cdot \text{K}$ ，为理想气体常数。

当水合物分解半径为 r 时，水合物的分解表面积为

$$A_s = 2\pi rh\varphi S_H \tag{3}$$

r_i 是时间 t 的函数。将式 (2) 和式 (3) 代入式 (1) 积分后，则有

$$n_L = \frac{\pi h \varphi S_H (P_{ep} - P_D)^{2n} R T_s}{\eta B_H P_s} t^2 + 2\pi h \varphi S_H (P_{eq} - P_D)^n t + \frac{\pi h \varphi \eta S_H B_H P_s}{R T_s} (c_1^2 - r_0^2) + c_2 \tag{4}$$

式中， c_1 ， c_2 分别为积分常数，实验得出或设定边界条件导出，当开采时间确定后，即可计算出标准状态下天然气水合物的开采量。

4 结论

天然气水合物的开采是水合物形成的逆过程，因此，水合物的开采理论就是创造条件使水合物发生分解。在进行天然气水合物开采之前要对其可开采性进行全面的评估，即单位时间内的气体开采量、水合物储层可供开采的气体总量、开采气体需要消耗的能源等。除了技术原因及开采理论以外，最重要的是开采天然气水合物要安全、经济高效。研究所得出的数学模型可用于天然气水合物储层单位时间气体释放量、气体释放总量及耗费时间等的量化评估，对水合物开采提供有力的理论支持。

参考文献：

[1] DARVISH M P. Gas Production from Hydrate Reservoirs and Its Modeling[J]. Journal of Petroleum Technology, 2004, 256: 65—71.

[2] WILLIAMS T E, MILLHEIM K. Methane Hydrate Production from Alaskan Permafrost[R] //Gas Hydrate Project Production Testing. North Slope, Alaska Topical Report. Mar 31, 2003.

[3] MASOUDI R, TOHIDI B. Gas Hydrate Production Technology for Natural Gas Hydrate and Transportation and CO₂ Sequestration[C]. The 14th SPE middle Oil & Gas Show and Conference held in Bahrain International Exhibition Centre, Bahrain: 12—15 March, 2005.

[4] SLOAN E D. Clathrate Hydrate of Natural Gases[M]. 2nd ed. New York: Marcel Dekker Inc, 1998: 705.

[5] KAMATH V A. A Perspective on Gas Production from Hydrates[C]. Paper presented at the JNOC's Methane Hydrate Intl. Symposium, Chiba City, Japan. 20—22 October, 1998.

[6] 窦斌, 蒋国盛, 吴翔, 等. 地面分解法开采海底天然气水合物[J]. 天然气工业, 2008, 28 (7): 123—125.

[7] SLOAN Jr E D. Natural gas hydrates[J]. J. Pet. Techno, 1991: 1414—1417.