文章编号:1673-5005(2006)03-0146-05

综述

天然气水合物开采方法及数值模拟研究评述

李淑霞,陈月明,杜庆军

(中国石油大学 石油工程学院,山东 东营 257061)

摘要:天然气水合物是21世纪的一种新型洁净能源,资源量大,分布广,其勘探开发技术已得到各国的重视。综合介绍了天然气水合物的概况及其分布,分析了目前提出的降压法、加热法、添加化学剂法等各种开采方式,介绍并对比了有关水合物藏开采计算的各种数学模型。研究认为TOUGH2通用数值模拟软件中加入的EDSHYDR模块是目前水合物藏开采计算的最佳模型。

关键词:天然气水合物;开采方式;数值模拟;研究进展

中图分类号:TE 762 **文献标识码**:A

Commentary of production method and numerical simulation of natural gas hydrates

LI Shu-xia, CHEN Yue-ming, DU Qing-jun

(*College of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Dongying* 257061, *Shandong Province, China*)

Abstract: Natural gas hydrate, which is widely distributed with huge reserves, is a kind of nonpolluting and high quality energy resource for the future. How to exploit and develop this new energy is becoming a main concern among many governments. The types and distribution of natural gas hydrates were introduced, and the methods proposed for natural gas hydrates production, including depressurization, thermal method, inhibitor injection and other methods, were analyzed. The mathematical models for the simulation of natural gas hydrates production were described and compared, among which the EOSHYDR module in the TOUGH2 model is the best model at present.

Key words: natural gas hydrate; production method; numerical simulation; research advance

1 概 述

天然气水合物是一种新型洁净能源,其蕴藏量约为现有地球化石燃料(石油、天然气和煤)含碳量总和的2倍[1],对缓解人类面临的能源枯竭危机具有举足轻重的作用。形成天然气水合物的基本条件包括[1]:(1)低温,一般温度低于10 ℃;(2)高压,压力大于10 MPa;(3)具备天然气来源;(4)有利的储集空间。地球上的天然气水合物蕴藏量十分丰富,大约27%的陆地(大部分分布在冻结岩层)和90%的海域都含有天然气水合物,陆地上的天然气水合物存在于200~2 000 m深处,海底沉积物中的天然气水合物埋深为500~800 m。

自然界中天然气水合物多呈白色、淡黄色、琥珀色、暗褐色的亚等轴状、层状、小针状结晶体或分散状[2-3]。从所取得的岩心样品来看,天然气水合物可以以多种方式存在:(1)占据大的岩石粒间孔隙;(2)以球粒状散布于细粒岩石中;(3)以固体形式填充在裂缝中;(4)大块固态水合物伴随少量沉积物。

2 天然气水合物的开采方法

从20世纪60年代苏联发现麦索雅哈气田至今,各国的研究者相继开展了对天然气水合物的调查研究和评价工作,在天然气水合物的基础研究方面取得了较大的进展,如天然气水合物形成和分解的热力学和动力学的实验研究、产出条件、分布规律、形成机理、勘探技术及环境影响等。但是,还没有一种可以用来开采天然气水合物的具体而有效的方法。实际投入开采尚有争议的是苏联的麦索雅哈气田,用降压和注入抑制剂的方法生产了19 a[4]。

收稿日期:2005-09-20

基金项目:国家"863"计划资助项目(2004AA616140)和国家自然科学基金资助项目(50404003)

作者简介:李淑霞(1970-),女(汉族),河南偃师人,副教授,博士研究生,从事油藏数值模拟及天然气水合物开采机理研究。

万方数据

2001 年 10 月到 2002 年 3 月,在加拿大的 Mallik 气藏钻了一口生产试验井和两口观察井,成功地进行了为期 79 d 的降压开采和加热开采试验[5-6]。目前提出的天然气水合物的开采方法基本上还是概念性的,这方面的研究尚处于试验阶段。

天然气水合物的开发思路基本上都是首先考虑如何使蕴藏在沉积物中的天然气水合物分解,然后再将天然气采至地面[7-8]。一般来说,人为地打破天然气水合物稳定存在的温度压力条件,造成其分解,是目前开发天然气水合物中甲烷资源的主要方法。

2.1 加热法

将蒸汽、热水、热盐水或其他热流体从地面泵入天然气水合物储层,也可采用开采稠油时使用的火驱法或利用钻柱加热器。总之,只要能促使温度上升使水合物分解的方法都可称为加热法。加热开采技术的不足主要是会造成大量的热损失,效率很低,特别是在永久冻土区[2,9-10]。

加拿大东北部的 Mallik 气藏,位于永冻层下 600 m,从 890～1 106 m 的地层中,至少有 10 个水合物层段,总厚度超过 110 m,水合物饱和度超过 80%。2002 年 2 月,对一个 13 m 厚的层段进行了为期 5 d 的加热开采试验,最大产气速度为 1 500 m^3/d[6]。

近年来,在用加热法开采稠油时,为了提高加热效率,采用井下装置加热技术,井下电磁加热方法就是其中之一,实践证明电磁加热法是一种比常规开采技术更为有效的方法。这种方法就是在垂直(或水平)井中沿井的延伸方向在紧邻天然气水合物带的上下层内(或天然气水合物层内)放入不同的电极,再通以交变电流直接对储层进行加热。电磁热还很好地降低了流体的粘度,促进了气体的流动。Islam 进行的模拟计算结果表明,利用该方法分解水合物是可行的[11]。

2.2 降压法

降压法是通过降低压力打破天然气水合物稳定存在的条件,促使其分解。一般是通过降低水合物层之下的游离气聚集层的压力,从而使与游离气接触的水合物变得不稳定而分解。实际上,开采水合物层之下的游离气是降低储层压力的一种有效方法。另外,通过调节天然气的提取速度可以达到控制储层压力的目的,进而达到控制水合物分解的效果。降压法最大的特点是不需要昂贵的连续激发,因而有可能成为今后大规模开采天然气水合物的有效方法之一[2,9-10]。

研究者认为,当水合物层下面存在自由气藏时,降压开采是最有效的方法[6]。苏联麦索雅哈气田的开采实践[8]即证明了这一点。

2.3 添加化学剂法

某些化学剂,如盐水、甲醇、乙醇、乙二醇、丙三醇等可以改变水合物形成的相平衡条件,降低水合物稳定的温度。当将上述化学剂从井孔泵入后,就会引起天然气水合物的分解。添加化学剂法较加热法作用缓慢,但确有降低初始能源输入的优点,其最大缺点是费用太高[2,9-10]。

在苏联麦索雅哈气田的开采过程中,当出现堵塞时,注入甲醇和氯化钙可成功地解除堵塞,疏通管道。初步的经济评估结果表明,从水合物藏产出同样多的气,加热法比降压法成本要高得多,而注入化学剂法是这 3 种方法中费用最高的[6]。

2.4 其他方法

除了以上常见的开发方法,一种新的天然气水合物开发方法是在深海使天然气水合物颗粒化,或将天然气水合物装入一种可膨胀的软式气袋(其内部保持天然气水合物稳定所需要的温度压力条件)中,再用潜水艇把天然气水合物拖到大陆架附近的浅水地区,在那里,天然气水合物能够缓慢地分解,产生燃料和水[7]。最近,日本学者用试验证实了将空气中的 CO_2 分离与天然气水合物开发相结合的可能性[4,12]。

从以上各方法的使用来看,单单采用某一种方法来开采天然气水合物是不经济的,只有将不同方法的优点相结合才能达到对天然气水合物的经济有效的开采。目前认为将降压法与加热法相结合是一种较好的方法[12],即用加热法分解天然气水合物,而用降压法提取游离气体。从技术角度看,开采天然气水合物已具有可行性,但真正实用的、经济合理的开采方法仍需大量的研究和探讨。

3 天然气水合物开采的数值模拟计算

天然气水合物资源巨大,目前各国都在加速对其实用开采方案的研究,数值模拟是对开采方案进行评价的一种重要手段。即使在目前对水合物藏的开采动态认识还不是很清楚的情况下,数值模拟也可以为水合物藏开采方案的确定提供重要依据。特别是认识开发过程中各因素的敏感性,对水合物藏的产气量进行初步估计等都具有重要意义。

万方数据

3.1 模型简介

国外研制的天然气水合物开采模拟计算的数学模型大都考虑降压或加热开采,从简单的能量平衡模型、一维单相解析模型到复杂的三维三相数值模型。国内也研制了有关天然气水合物形成和分解的动力学计算模型,但有关天然气水合物藏开采的计算模型还未见报道。

(1)Holder 等[13]研制的三维单相气体模拟器。该模拟器可以模拟与常规气藏相邻的水合物层中的气体产出。首先应开采常规气藏,随着生产过程中气藏压力的降低,气藏与水合物藏界面处的压力降低,从而使水合物分解。模型中考虑气相的质量守恒和能量守恒,但没有考虑水合物分解时水的产出。计算结果表明,每分解 1 mol 的甲烷,需 41.868～83.736 kJ 的热量(相当于甲烷燃烧产生热量的 10%),但如果对水合物藏加热,热损失较大。

(2)Mcguire[14]提出的两个热力模型和一个降压模型。两个热力模型为解析模型,包括前缘驱替模型和裂缝流动模型,分别代表水合物层上部和下部的气体生产,模拟研究了孔隙度、渗透率、储层厚度、注入温度及裂缝尺寸的影响。降压模型为模拟水力裂缝井的一维孔隙流动模型,计算结果表明,降压生产时的产气量是裂缝尺寸、油藏厚度、渗透率以及井底流压的函数。Mcguire 的热力模型和降压模型见图 1～图 3。

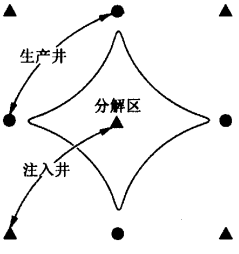


图 1 前缘驱替热力模型

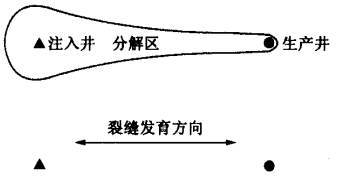


图 2 裂缝流动热力模型

(3)Burshears 等[15]研制的三维气、水两相模拟器。该模拟器用来模拟与常规气藏相邻的水合物的分解,但它没有考虑水合物分解的动力学过程。水合物的分解主要受水合物与气体界面处压力降的影响。模型中假设圆形地层中心一口井,产气量一定,水合物分解的压力温度条件瞬时平衡。模拟结果表明,水合物分解过程中不需要额外的外来热量,而且水合物分解过程中产出的水不是特别多,不会对气体流动产生严重影响。

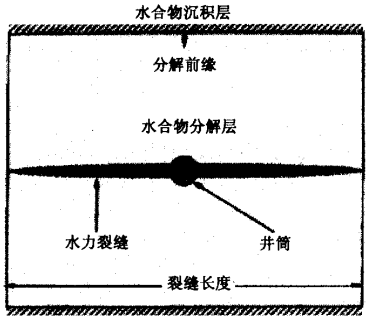


图 3 水力裂缝降压模型

(4)Selim 等[16]建立的热力解析模型。该模型由分解相和未分解相的连续性方程、达西方程和能量守恒方程组成,并假设水合物分解的水是静止不动的,分解出的气量仅与温度有关。求出水合物分解前缘的移动速度与时间 $t^{-1/2}$ 与成正比;水合物的分解速度与孔隙介质的孔隙度有关,而与渗透率无关;产出能量与注入能量的比为 6.2～11.4。该模型中没有考虑多相多维、热量传递及水合物分解动力学等,假设条件太多。

(5)Yousif 等[17]研制的一维、三相(气、水、水合物)有限差分数值模拟器。该模拟器用来模拟 Berea 岩心在实验室的降压生产过程,主要计算产气量与水合物分解前缘的位置,数值模拟计算结果与实验室试验结果吻合较好。

(6)Shell 公司[18]研制的三维、三相(气、水、水合物)、四组分(甲烷、重气体、水、焓)热力有限差分模型。模型中不包含水的固相,因为模拟的是海底的而不是极地环境的水合物。用室内相平衡软件包来计算各组分的热力学性质,考虑水合物的相特征、能量守恒及储层压实作用,模拟了水合物顶气藏的衰竭和水合物层的开采。结果表明,由于气与水合物界面的冷却作用,水合物顶气藏内压力衰竭引起的水合物顶的分解将有相当程度的下降。该模型可模拟水合物藏的降压和加热开采。

(7) Lawrence Berkeley 国家实验室[19-20]在 TOUGH2 通用数值模拟软件中加入了 EDSHYDR 模块形成的新模型。TOUGH2 是一个多组分、多相的热能模拟软件,EDSHYDR 模块通过求解物质和能量守恒方程,可以模拟各种复杂地层情况下天然

万方数据

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。EDSHYDR 模块考虑了水合物形成和分解的平衡和动力学模型,而且考虑了气相中的 Klinkenberg 效应和分子扩散。模型中考虑 4 相(气、液、冰、水合物)、9 组分(水合物、水、天然甲烷、水合物中分离出来的甲烷、第二种天然碳氢组分、从水合物中分解出来的第二种碳氢组分、盐、水溶性抑制剂和拟组分热焓),各组分存在于各相中,其热物理性质可低到 -110 ℃。该模型可描述水合物分解的所有机理,包括降压、注热、加入抑制剂和刺激剂的效应。用该模型对 4 个甲烷水合物藏进行开发模拟,结果表明,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;热力开采能产生大量的甲烷气,如果再加上降压和添加抑制剂,效果会更好。G.J.Moridis 等[21]用该模型对不含自由气的水合物藏中水合物的开发方式及敏感因素进行了评价。结果表明,注热温度、注热速度、初始水合物饱和度及初始水合物藏的温度对水合物的产出有较大影响,而岩石和水合物的比热、地层渗透率等对水合物产量影响不大。

3.2 模型评价对比

上述模型可以分为降压模型和加热模型两大类,这些模型都重点模拟水合物的分解、运移和产出。对于矿场实用的计算模型,应当考虑以下 6 个基本因素:①流体在孔隙介质中的流动,②流体向周围岩层的热量传递,③水合物分解动力学,④气水两相流动,⑤三维油藏形态,⑥矿场多井系统。根据上述模型中是否考虑了这些主要因素对模型进行评价,结果见表 1。

表 1　水合物模型评价

	模型	考虑因素					
		①	②	③	④	⑤	⑥
降压模型	Holder 模型 1	√	√			√	√
	Mcguire 模型 2a		√				√
	Burshears 模型 3	√	√		√	√	√
	Yousif 模型 5	√		√	√		
热力模型	Mcguire 模型 2b		√				√
	Selim 模型 4						√
	Swinkels 模型 6*	√	√		√	√	√
	Moridis 模型 7*	√	√	√	√	√	√

注:√表示模型中考虑该因素;* 表示模型综合考虑降压开采和热力开采。

由表 1 可以看出,模型 6 和模型 7 考虑因素较全面,实用性较强。

4 结束语

目前提出的天然气水合物藏的开采方式主要有加热法、降压法、添加化学剂法和其他新型方法,但基本都是概念性的。天然气水合物藏开采的数值计算模型可以分为降压模型和加热模型两大类。Lawrence Berkeley 国家实验室在 TOUGH2 通用数值模拟软件中加入的 EDSHYDR 模块是目前水合物藏开采计算的最佳模型。随着天然气水合物勘探开发研究的不断深入,我国也应加速水合物藏开采计算的数值模型研究。

参考文献:

[1] 赵生才.天然气水合物研究现状及我国对策[J].地球科学进展,2002,17(3):461-464.
ZHAO Sheng-cai. Status and strategy of research on natural gas hydrate[J]. Advances in Earth Sciences, 2002, 17(3):461-464.

[2] 史斗,郑军卫.世界天然气水合物研究开发现状和前景[J].地球科学进展,1999,14(4):330-338.
SHI Dou, ZHENG Jun-wei. The status and prospects of research and exploitation of natural gas hydrate in the world[J]. Advances in Earth Sciences, 1999, 14(4): 330-338.

[3] 赵省民.天然气水合物研究的新进展[J].海洋地质与第四纪地质,1999,19(4):39-46.
ZHAO Sheng-min. A new advance of gas hydrate research[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1999,19(4):39-46.

[4] 樊栓狮,陈勇.水合物的研究现状与发展趋势[J].中国科学院院刊,2001,2:106-110.
FAN Shuan-shi, CHEN Yong. Major science and technology issues in energy utilization with natural gas hydrates[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2001,2:106-110.

[5] 龚建明. Mallik 天然气水合物国际研讨会综述[J].海洋地质动态,2004,20(2):28-31.
GONG Jian-ming. Summary of the international symposium on Mallik natural gas hydrate[J]. Marine Geology Letters, 2004,20(2):28-31.

[6] DARVISH M P. Gas production from hydrate reservoirs and its modeling[R]. SPE 86827,2004.

[7] 周怀阳,彭晓彤,叶瑛.天然气水合物勘探开发技术研究进展[J].地质与勘探,2002,38(1):70-73.
ZHOU Huai-yang, PENG Xiao-tong, YE Ying. Development technology of prospecting and exploitation for gas hydrate[J]. Geology and Prospecting, 2002, 38(1): 70-73.

[8] 史斗,孙成权,朱岳年.国外天然气水合物研究进展[M].兰州:兰州大学出版社,1992:1-16.

[9] 蒋国盛,王达,汤凤林,等.天然气水合物的勘探与开发[M].武汉:中国地质大学出版社,2002:138-143.

[10] 方银霞,金翔龙,黎明碧.天然气水合物的勘探与开发

万方数据

技术[J]. 中国海洋平台,2002,17(2):11-15.
FANG Yin-xia, JIN Xiang-long, LI Ming-bi. The exploration and development of gas hydrate[J]. China Offshore Platform,2002,17(2):11-15.

[11] ISLAM M R. A new recovery technique for gas production from Alaskan gas hydrates[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 1994,11: 267-281.

[12] 王达,庞馨萍,李常茂.关于天然气水合物开发问题的思考[J].探矿工程,2000(4):1-3.
WANG Da, PANG Xin-ping, LI Chang-mao. Reflect on development of natural gas hydrate[J]. Exploration Engineering, 2000(4):1-3.

[13] HOLDER G D, ANGERT P K. Simulation of gas production from a reservoir containing both gas hydrates and free natural gas[R]. SPE 11105,1982.

[14] MCGUIRE P L. Recovery of gas from hydrate deposits using conventional technology[R]. SPE/DOE 10832, 1982.

[15] BURSHEARS M, OBRIEN 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]. SPE 15246, 1986.

[16] SELIM M S, SLOAN E D. Hydrate dissociation in sediment[R]. SPE 16859,1990.

[17] YOUSIF M H, ABASS H H, SELLM M S, et al. Experimental and theoretical investigation of methane-gas-hydrate dissociation in porous media[R]. SPE 18320, 1991.

[18] SWINKELS Wim J A M, DRENTH Rik J J. Thermal reservoir simulation model of production from naturally occurring gas hydrate accumulations[R]. SPE 56550, 1999.

[19] MORIDIS G J. Numerical studies of gas production from methane hydrates[R]. SPE 75691,2002.

[20] MORIDIS G J. Numerical simulation studies of thermally-induced gas production from hydrate accumulations with no free gas zones at the Mallik site, Mackenzie Delta, Canada [R]. SPE 77861,2002.

[21] MORIDIS G J, COLLETT T S, DALLIMORE S R, et al. Numerical studies of gas production from several CH_4-hydrate zones at the Mallik site, Mackenzie Delta, Canada[R]. LBNL 50257,2002.

(编辑 李志芬)

(上接第 145 页)

情形 1 假若 F 和 G 满足引理 1 中的关系(i),得

$$(n-2)T(r,f)\leqslant 4T(r,g)+S(r,f)+S(r,g),$$

及

$$(n-2)T(r,g)\leqslant 4T(r,f)+S(r,f)+S(r,g),$$

这与 $n\geqslant 7$ 不符。

情形 2 假若 F 和 G 满足引理 1 中的关系(ii)。注意到 f 和 g 为整函数,这是不可能的。

情形 3 假若 F 和 G 满足引理 1 中的关系(iii),由定理 1 知

$$f=\frac{(n+2)(1+h+\cdots+h^n)h}{(n+1)(1+h+\cdots+h^{n+1})},$$

$$g=\frac{(n+2)(1+h+\cdots+h^n)}{(n+1)(1+h+\cdots+h^{n+1})},$$

式中,$n\geqslant 7$ 为正整数;h 为非常数亚纯函数。

再注意到 f 和 g 为整函数,矛盾。于是 $f\equiv g$。

参考文献:

[1] HAYMAN W K. Meromorphic functions[M]. Oxford: Clarendon, 1964.

[2] 仪洪勋, 杨重骏. 亚纯函数唯一性理论[M]. 北京:科学出版社,1995.

[3] FANG M, HONG W. A unicity theorem for entire functions concerning differential polynomials[J]. Indian J Pure Appl Math, 2001,32(9):1343-1348.

[4] LAHIRI I. Weighted sharing and uniqueness of meromorphic functions[J]. Nagoya Math J, 2001,161:193-206.

[5] LAHIRI I. Weighted value sharing and uniqueness of meromorphic functions[J]. Complex Variables, 2001, 46:241-253.

[6] 吕巍然,王珺. 具有三个公共值亚纯函数惟一性问题的注记[J]. 石油大学学报:自然科学版,2004,28(1):119-121.
LÜ Wei-ran, WANG Jun. Remarks on the problem of uniqueness of meromorphic functions sharing three values [J]. Journal of the University of Petroleum, China(Edition of Natural Science), 2004,28(1):119-121.

[7] LÜ Wei-ran, WANG Jun. Meromorphic functions sharing two values[J]. Northeast Math J, 2004,20(1):63-67.

[8] YANG C. On deficiencies of differential polynomials Ⅱ [J]. Math Z, 1972,125:107-112.

[9] 王清河,吕巍然.具有五个公共值的亚纯函数[J].石油大学学报:自然科学版, 2004,28(4):141-143.
WANG Qing-he, LÜ Wei-ran. Uniqueness of meromorphic functions with five shared values[J]. Journal of the University of Petroleum, China(Edition of Natural Science), 2004,28(4):141-143.

(编辑 修荣荣)

万方数据