注蒸汽开采冻土区天然气水合物数值计算与野外应用

李 宽[1], 张永勤[1], 孙友宏[2], 郭 威[2], 李 冰[2]
(1. 中国地质科学院勘探技术研究所,河北 廊坊 065000; 2. 吉林大学建设工程学院,吉林 长春 130026)

摘 要:试开采研究是天然气水合物从理论研究走向商业化开采的必经之路。提出的注蒸汽开采是一种综合开采方法,是在降压开采的基础上,往孔内注入热蒸汽对水合物目标开采层进行激振往复式热激发。注蒸汽开采能够避免"自保护效应",促进水合物进一步分解,理论上能够扩大开采范围、提高产气量。利用 FLUENT 数值模拟软件对蒸汽加热水合物层动态过程进行数值计算,通过模拟计算结果对比分析,在满足开采要求的前提下确定最佳的注蒸汽功率为 20 kW,注热时长为 38 h。在青海木里盆地天然气水合物试采项目中,注蒸汽开采进行了 5.2 h 开采试验,产气量为 3.25 m^3。

关键词:天然气水合物;试开采;注蒸汽开采;数值计算;野外应用
中图分类号:P634 **文献标识码**:A **文章编号**:1672 - 7428(2014)05 - 0014 - 03

Numerical Calculation of Steam Mining for Natural Gas Hydrate Exploitation in Permafrost Region and the Field Application/*LI Kuan*[1], *ZHANG Yong-qin*[1], *SUN You-hong*[2], *GUO Wei*[2], *LI Bing*[2] (1. The Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China; 2. Construction Engineering College of Jilin University, Changchun Jilin 130026, China)

Abstract: The trial mining of gas hydrate is the only way which must be passed from the theoretical research to commercial exploitation. The steam mining is a combine mining method. Based on the pressure relief mining, hot steam is injected to the hole for thermal excitation in the gas hydrate target layer, which can avoid "self-preservation effect", promote further decomposition of the hydrate and expand mining area theoretically. Numerical calculation was done on the dynamic process of steam heating hydrate layer by FLUENT software. Through the comparative analysis on the simulation results, it was decided that the best steam power was 20kW and the heat injection time was 38 hours in order to meet the requirements of the premise mining. In the natural gas hydrate production project in Muli basin of Qinghai, the steam mining lasted for 5.2 hours with the gas production of 3.25m^3.

Key words: gas hydrate; pre-production; steam mining; numerical calculation; field application

天然气水合物具有分布埋藏浅、范围广、储量大、能量密度高等突出特点[1],而试开采研究是天然气水合物从"永无休止的政府研发类项目"走向商业开采的必经之路[2]。与海域环境相比,冻土区的天然气水合物赋存于较低的温压条件下,在开采工艺与施工作业方面都更易于进行试开采研究[3]。

1 天然气水合物开采研究现状

天然气水合物开采的基本思路是人为打破水合物赋存的相平衡条件促使水合物分解(如图 1),然后将分解的天然气运至地表[4]。天然气水合物开采方法主要有加热法、降压法、化学试剂注入法、CO_2 置换法、固体开采法、综合开采法等[5]。

在试采实践研究方面,俄罗斯麦索亚哈气田天然气水合物开采工程采用的是降压法和化学试剂法

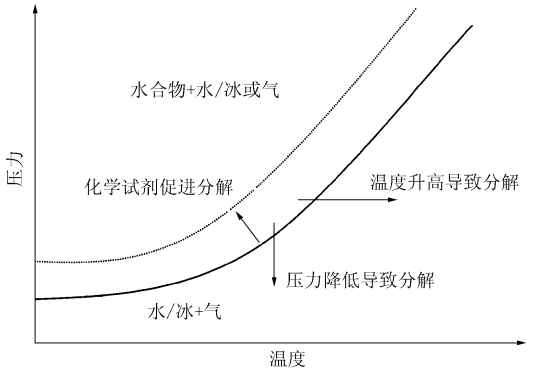

图 1 天然气水合物温压平衡曲线

联合开采,经理论计算,从天然气水合物中共开采出 69 亿 m^3 天然气[6];2003 年美国阿拉斯加北坡天然气水合物试采项目,是将 MDT(模块式地层动态测试器)下至目标开采层进行降压开采[7];2002 ~

收稿日期:2013 - 12 - 25
基金项目:中国地质调查局地质大调查项目"陆域天然气水合物试采技术与工程"(GZHL20110326)资助
作者简介:李宽(1987 -),男(汉族),山东兖州人,中国地质科学院勘探技术研究所助理工程师,地质工程专业,硕士,主要从事天然气水合物钻采技术研究,河北省廊坊市金光道 77 号,likuan0611@163.com。

2008 年,加拿大马更些地区天然气水合物试采项目中,分别采取了降压法和加热法对水合物进行了试生产试验[8];2011 年我国首次在青海木里盆地开展了水合物试开采研究(本论文研究内容应用项目),采用的是降压法和加热法联合开采;2013 年日本首次从近海地层蕴藏的天然气水合物中分离出甲烷气体。

2　注蒸汽开采方案

根据木里盆地天然气水合物赋存特征,并参考相平衡曲线,采用单一的加热法开采能量利用率较低,很难将热量直接作用于拟开采层,经济性较差;降压法开采是最经济的开采方法,但是单一的降压开采过程中由于水合物分解的“自保护作用”,会阻止水合物进一步分解;同时,水合物相变吸热容易在裂隙中出现结冰现象,堵塞天然气逸出通道。

本文在降压法开采的基础上提出了注蒸汽开采,开采原理如图 2 所示。首先,勘探先导孔确定水合物的层位,并在目标层下入花管保证分解的天然气逸出;然后,孔底的潜水泵将孔内水位控制在目标开采层以下实现降压开采;同时,地表产生的高温高压热蒸汽通过双壁钻杆输送至目标层位,对拟开采层进行激振往复式热激发。注蒸汽开采具有降压法开采经济、有效的特点,同时可以防止水合物分解的“自保护效应”,促进了水合物的进一步分解。注蒸汽开采从理论上可以增大开采范围,延长稳产时间,保证开采的连续性和稳定性。

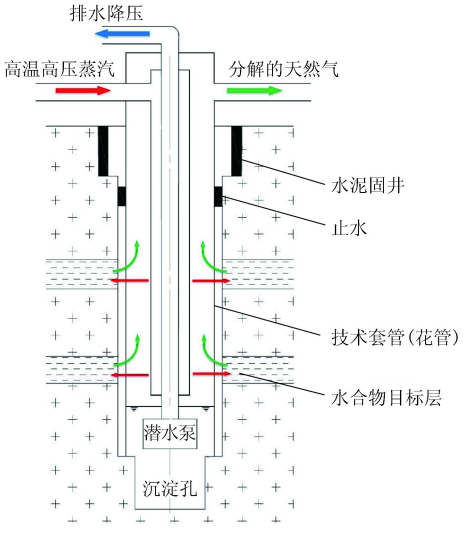

图 2　注蒸汽开采原理

3　数值计算

3.1　基本假设与计算参数

利用 FLUENT 软件对蒸汽对水合物层加热数值模型进行计算时需做如下假设:(1)流动过程中蒸汽的温度、压力等不变,不考虑蒸汽的相变影响,对应的蒸汽的热物性参数为定值;(2)水合物赋存地层为各向同性,热物理参数通过水合物和岩石的组分比值确定;(3)不考虑水合物分解对地层热物性参数的变化。

模拟计算所需要的主要计算参数为:蒸汽入口温度 180 ℃,蒸汽出口压力 0 MPa,蒸汽密度 5.145 kg/m^3,蒸汽比热容 4.417 kJ/(kg·℃),蒸汽导热系数 1.54 W/(m·℃),拟加热长度 2.0 m,地层初始温度 0 ℃,开采层密度 2476 kg/m^3,开采层比热容 1.125 kJ/(kg·℃),开采层导热系数 0.41 W/(m·℃)。

3.2　数值计算结果

加热模型共进行了 4 组数值计算,图 3(a)、(b)、(c)、(d)分别为 5、10、20 和 50 kW 的蒸汽注热 45 h 后的温度云图;设定拟开采温度为 10 ℃,从温度云图可得到 4 种功率条件下的开采半径如表 1 所示。

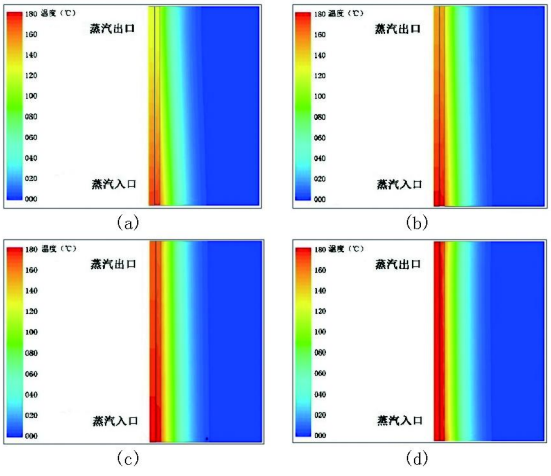

图 3　不同注热条件下的温度云图

表 1　不同注热条件下的开采半径

注蒸汽功率/kW	蒸汽入口温度/℃	入口开采半径/m	蒸汽出口温度/℃	出口开采半径/m
5	180	0.50	119	0.42
10	180	0.51	141	0.45
20	180	0.52	160	0.47
50	180	0.53	163	0.48

3.3　计算结果分析

通过模拟计算结果分析可知,蒸汽温度是影响热传递的主要因素,蒸汽流速越快,进出口温差越小,开采半径也越接近。与 5、10 kW 相比,20 kW 时蒸汽进出口温差小,进出口截面处开采半径基本相同,满足开采需求;50 kW 时可增大开采半径,但提高不明显,能量利用率较低,最终选择最佳注蒸汽功

率为 20 kW。根据蒸汽出口截面处地层温度的变化,在满足拟开采温度 10 ℃、拟开采半径 0.5 m 的前提下,当注蒸汽功率为 20 kW 时,所需注热时长为 38 h。

4 注蒸汽开采野外应用

在青海祁连冻土区天然气水合物试开采项目中,首先进行降压法开采,降压开采共进行 75 h,采气量为 82.6 m^3;之后进行降压法与太阳能加热/电磁加热联合开采;当上述开采方法产气量较少时,开始进行注蒸汽开采。

注蒸汽开采分为注热和采气两个阶段,在注热阶段,天然气出口关闭,为“闷井”阶段;当孔内压力上升至一定值时,停止注热,机抽法将天然气抽至地表,同时孔内压力的降低促进了水合物进一步分解。

4.1 注热阶段

注热阶段共持续 4.5 h,蒸汽发生器连续工作,脉冲式往孔内注入高温高压蒸汽对水合物层进行热激发,图 4 和图 5 为注热阶段孔底温度和压力变化曲线。

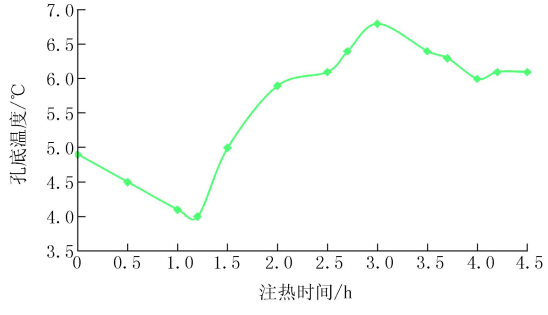

图 4 注热阶段孔底温度变化曲线

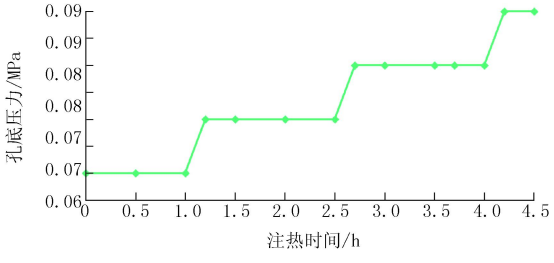

图 5 注热阶段孔底压力变化曲线

从温度和压力曲线可以看出:随着蒸汽的注入,前 1.2 h 温度略微降低,因为水合物相变为吸热过程,这一段时期称为“分解诱导期”。注热 1.2 h 后孔底温度缓慢升高,沿径向地层中的水合物缓慢分解,孔底压力随之缓慢升高,为“分解加速期”。由此可知,注蒸汽开采能够使水合物进一步分解。

4.2 采气阶段

开采阶段共持续 0.7 h,累积流量为 3.28 m^3,同时在采气阶段成功进行了点火试验。图 6 为采气阶段孔底压力变化曲线,从图 6 可以看出,随着蒸汽的抽出,孔底压力总体上呈下降的趋势,但是下降比较缓慢,这是因为随着天然气的排出,孔底压力的降低促进了水合物的进一步分解。

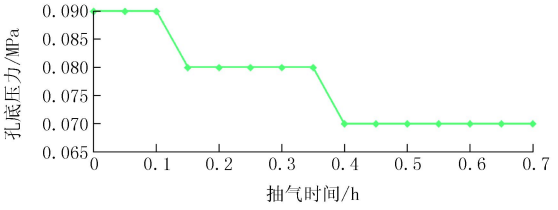

图 6 采气阶段孔底压力变化曲线

5 结论

(1)在降压法开采的基础上提出了注蒸汽开采,从理论上注蒸汽开采能够促进水合物进一步分解,扩大开采范围,提高采气量。

(2)通过数值模拟计算优选出最佳注蒸汽功率为 20 kW,在满足开采要求的条件下,需连续注热 38 h。

(3)注蒸汽开采在青海木里天然气水合物项目中共进行了 5.2 h 开采试验,采气量为 3.25 m^3。

(4)野外应用证实注蒸汽开采能够促进水合物进一步分解。

参考文献:

[1] Collett T S. Gas Production from Class 1 Hydrate Accumulations [A]. Taylor C, Qwan J. Recent Advances in the Study of Gas Hydrates [C]. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2004. 75 - 88.

[2] 祝有海. 加拿大马更些冻土区天然气水合物试生产进展与展望[J]. 地球科学进展,2006,21(5):513 - 520.

[3] 宋永臣,阮徐可,梁海峰,等. 天然气水合物热开采技术研究进展[J]. 过程工程学报,2009,9(5):1035 - 1040.

[4] 赖枫鹏,李治平. 天然气水合物勘探开发技术研究进展[J]. 中外能源,2007,12(5):28 - 31.

[5] 吴传芝,赵克斌,等. 天然气水合物开采研究现状[J]. 地质科技情报,2008,27(1):47 - 52.

[6] 李芳芳,刘晓栋. 天然气水合物开采新技术及其工业化开采的制约因素[J]. 特种油所藏,2010,17(3):1 - 4.

[7] 陈志豪,吴能友. 国际多年冻土区天然气水合物勘探开发现状与启示[J]. 海洋地质动态,2010,26(11):36 - 44.

[8] Dallimore S R, Collett T S. Summary and implication of the Mallik2002 gas hydrate production research well program [A] M Dallimore S R, Collett T S, eds . Scientific Results from the Mallik 2002 Gas Hydrate Production Research ell Program, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada [C]. Geological Survey of Canada, Bulletin 585, 2005: 1 - 36.