

Comparison and Prospect of Natural Gas Hydrate Exploitation Technology

Tong Jia, Xinyan Wang, Yijie Shang

Department of Roommate Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao Hebei
Email: 2373758530@qq.com

Received: Aug. 26th, 2019; accepted: Sep. 10th, 2019; published: Sep. 17th, 2019

Abstract

Natural gas hydrate is a new type of clean energy, and has huge reserves in the seabed permafrost. It is of great significance to alleviate the energy crisis facing mankind and comply with the trend of world green development. Therefore, the formation and exploitation mechanism of natural gas hydrate have attracted worldwide attention. Up to now, only Mesoyaha gas field in Russia has been commercially exploited for gas hydrate, which indicates that the exploitation technology of gas hydrate still needs further development. In this paper, the advantages and disadvantages of several successful small-scale trial production methods are introduced and compared.

Keywords

Natural Gas Hydrate, Mining Technology, Comparison of Mining Methods

天然气水合物开采技术对比与展望

贾童, 王鑫炎, 商一杰

燕山大学石油工程系, 河北 秦皇岛
Email: 2373758530@qq.com

收稿日期: 2019年8月26日; 录用日期: 2019年9月10日; 发布日期: 2019年9月17日

摘要

天然气水合物是一种新型清洁能源,且在海底冻土层储量巨大,对于缓解人类面临的能源危机以及顺应世界绿色发展潮流有重要意义,因此其形成和开采机理受世界广泛关注。截止到现在天然气水合物实现商采仅有俄罗斯麦索亚哈气田,这说明天然气水合物的开采技术仍需进一步发展。本文介绍了目前小规模试采成功的几种方法的优缺点及对比,以及对未来技术的发展做出展望。

关键词

天然气水合物, 开采技术, 开采方法对比

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

天然气水合物(Natural Gas Hydrate/Gas Hydrate), 有机化合物, 化学式 $\text{CH}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ 。即可燃冰, 是分布于深海沉积物或陆域的永久冻土中, 由天然气与水在高压低温条件下形成的类冰状的结晶物质。因其外观像冰一样而且遇火即可燃烧, 所以又被称作“可燃冰”(Combustible ice)或者“固体瓦斯”和“气冰”其实是一个固态块状物。天然气水合物在自然界广泛分布在大陆永久冻土、岛屿的斜坡地带、活动和被动大陆边缘的隆起处、极地大陆架以及海洋和一些内陆湖的深水环境。其资源密度高, 全球分布广泛, 具有极高的资源价值, 因而成为油气工业界长期研究热点。

天然气水合物的显著特点是分布广、储量大、高密度、高热值。 1 m^3 天然气水合物可以分解产生 164 m^3 甲烷气体, 因此天然气水合物被认为是一种很有前景的清洁能源[1] [2]。据估计, 大约 27%的陆地(大部分分布在永冻层)和 90%的海域都含有天然气水合物[3]。据潜在气体联合会(PGC, 1981)估计, 永久冻土区天然气水合物资源量为 $1.4 \times 10^{13} \sim 3.4 \times 10^{16} \text{ m}^3$, 包括海洋天然气水合物在内的资源总量为 $7.6 \times 10^{18} \text{ m}^3$ 。但是, 大多数人认为储存在汽水合物中的碳至少有 $1 \times 10^{13} \text{ t}$, 约是当前已探明的所有化石燃料(包括煤、石油和天然气)中碳含量总和的 2 倍, 天然气水合物中有机碳含量占全球有机碳的 53.3% [4]。2018 年 10 月 18 日, 在天津举行的 2018 (第二十届)中国国际矿业大会上, 《中国矿产资源报告 2018》正式发布。据报告显示, 初步预测, 中国海域天然气水合物资源量约 800 亿吨油当量。

本文详细介绍了目前正在发展的几种天然气水合物开采方法以及它们之间的对比。

2. 开采技术与方法

2.1. 水合物的热激法开采

热力开采法又称热激法, 是研究最多、最深入的天然气水合物开采技术。其利用钻探技术在天然气水合物稳定层中安装管道。对含天然气水合物的地层进行加热。提高局部储层温度, 从而促成天然气水合物分解, 再用管道收集析出的天然气。热激发开采法按照发热形式可以分为两种: ①热量从表层进入水合物储层, 例如注蒸汽/热水/热盐水等; ②热量在井下水合物储层内直接产生提供, 例如井下燃烧、电磁制热、微波导热[5]。

2.2. 第一类热激方式

第一类热激方式传达能量的形式为通过媒介输送, 热能以液体或气体为载体传到天然气水合物层。天然气水合物形成的条件是低温高压, 热量的输送增加了井周围部分天然气水合物的温度, 天然气水合物失去维持稳定的条件, 因而分解。但是液体或气体输送的过程总会有热量的散失, 所以此方法存在较大能量损失, 导致能量利用率变低。但是在已有的输送热量的媒介中, 通过实验大家发现循环注入热盐水的开采效果能量效率相对较高; 而且多井注入生产比单井生产有利[6]。影响第一类热激方式开采的主

要因素是热能的传递效率和可加热范围。第一类热激发法作业基本过程就是在打井固井完成后向井内注入热水或蒸汽，使井口天然气水合物分解，再用导管将析出的天然气收集于贮藏器内或采取常规天然气输气管道的方式将其输送到车载贮藏器。示意图如图 1。

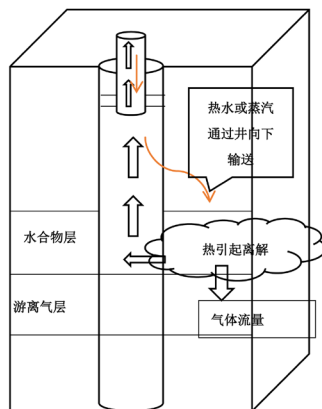


Figure 1. Schematic diagram of thermal excitation mining
图 1. 热激发开采法示意图

2.3. 第二类热激方式

第二类热激方式中井下燃烧方法多用于冻土层水合物燃烧，本质上是其分解气的燃烧，燃烧热量一部分传递至水合物内部加热分解水合物，另一部分加热汽化水份和向周围空间散热，分解水层及石英砂层限制了分解气释放和热量向水合物内部传递，下层水合物分解缓慢，导致水合物不能燃尽而自行熄灭。井下原位直接燃烧加热开采冻土区，不会造成整个水合物藏燃烧失控[7]。

井下电磁加热技术就是在垂直(或水平)井中沿井的延伸方向在紧邻水合物带的上下(或水合物层内)放入不同的电极，再通以交变电流使其生热直接对储层加热[8]。

微波是一种特殊形式的能量。微波对物质的介电热效应是通过离子迁移和极性分子的旋转使分子运动来实现的。天然气水合物是一种极性分子，对微波有一定的吸收作用。微波加热效率一般在微波段 $10^2 \sim 10^4$ MHz 之间最大。微波加热法对水合物有加热、造缝、非热效应三大作用因此微波加热是体型加热，而且加热均匀，造缝作用使得水合物内部出现小裂纹有助于水合物的分解[9]。影响微波开采的主要因素是微波源功率和微波频率以及微波穿透深度。第二种热激方式开采模型中为了有效利用热能，一般都将加热装置安装在井底，而微波可以通过波导将微波导入井底。

2.4. 降压法开采

降压法是通过泵吸作用降低气体水合物储层的压力，使其低于水合物在该区域温度条件下相平衡压力，从而使水合物从固体分解相变产生甲烷气体的过程。降压法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。也可以通过采取矿层中流体的方法来降低水合物矿层的层压。如果天然气水合物气藏与常规天然气藏相邻，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。随着游离气体的不断减少，天然气水合物与气之间的平衡不断受到破坏，使得气水合物层开始融化并产出气体不断补充到游离气气库中，直到天然气水合物开采完为止。降压法可以开采两种类型的天然气水合物矿藏：一种是水合物底层和盖层都是非渗透层[10]；另一种是水合物盖层是非渗透层，二水合物层下面蕴藏着大量的游离天然气，由于其对水合物开采层地质结构有特殊的要求，使得降压法成功开采变得困难[11]。影响降压法开采天然气水合物的因素主要是外部的温压条件是否适宜。降压法有两

种作业方式，第一种是采用低密度泥浆钻井达到减压目的，而当天然气水合物层下方存在游离气或其他流体时通过泵出天然气水合物下方的游离气或其他流体来降低天然气水合物层的压力。示意图如图 2。

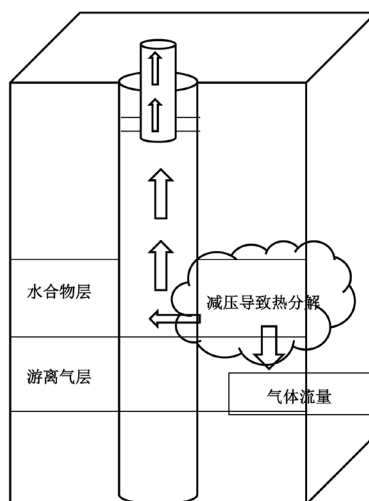


Figure 2. Schematic diagram of pressure relief mining method
图 2. 减压开采法示意图

2.5. 化学抑制剂法

添加化学抑制剂(包括盐水、甲醇、乙醇、乙二醇、丙三醇等), 导致部分天然气水合物的分解。因为化学反应是双向进行的, 天然气和水反应生成天然气水合物的同时, 天然气水合物也在分解成天然气和水, 而反应最终会到达平衡, 即两个方向反应速率相同, 看起来就像是稳定不再发生反映的状态, 实质上是天然气水合物的生成速率和分解速率相等。不同的条件下(压力温度浓度和有无催化剂)化学反应会达到不同的平衡状态。而天然气水合物在未开采时的状态就是在深海条件下的平衡状态, 这个时候添加化学抑制剂, 会使天然气水合物稳定存在的条件被改变, 当前环境条件无法保持天然气水合物合成和分解的速率相同, 需要反应向分解的方向进行来达到新的平衡状态, 也就促使了天然气水合物的分解。影响化学抑制剂开采的主要因素是反应速率以及化学抑制剂昂贵的价格对应用的约束。示意图如图 3。

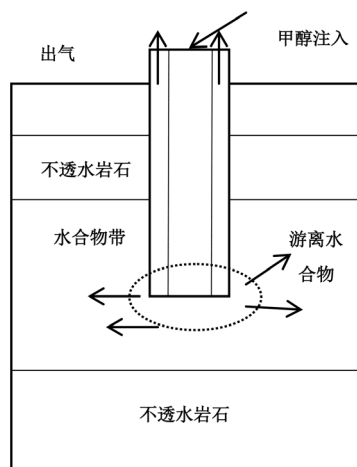


Figure 3. Schematic diagram of chemical reagent injection mining method
图 3. 化学试剂注入开采法示意图

2.6. 二氧化碳置换法

这种方法首先由日本研究者提出，方法依据的仍然是天然气水合物稳定带的压力条件。在一定的温度条件下，天然气水合物保持稳定需要的压力比 CO_2 水合物更高。因此在某一特定的压力范围内，天然气水合物会分解，而 CO_2 水合物则易于形成并保持稳定。如果此时向天然气水合物藏内注入 CO_2 气体， CO_2 气体就可能与天然气水合物分解出的水生成 CO_2 水合物， CO_2 水分子通过空间结构上的改变达到一种能量最低状态的平衡，比天然气水合物存在的状态能量要低，因此会有多余的能量以热的形式释放出来，促成周围的 CH_4 水合物笼状体又进一步的分解，就完成了置换反应过程[12]。影响二氧化碳开采天然气水合物的主要因素是反应速率和水合物所储存的稳压环境和多孔介质特性。示意图如图 4。

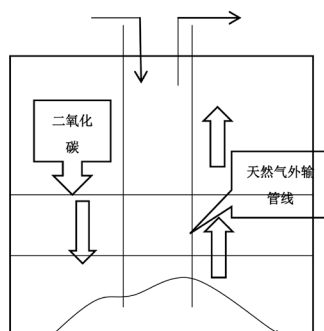


Figure 4. Schematic diagram of carbon dioxide displacement mining method
图 4. 二氧化碳置换开采法示意图

2.7. 固体开采法

固体开采法是在海底把天然气水合物利用采矿机以固体形式采出，然后应用海底集矿总系统对浅层水合物进行初步分离，再利用水利提升系统将水合物提升到海平面。水合物在提升过程中，温度和压力均发生变化，水合物会不断分解，所以开采过程中用到了固液气三相混输技术。采出的天然气水合物固体经粉碎机磨碎后送往分离器，然后使用水泵将海水引入分离器，利用海水温度(一般为二十度左右)对天然气水合物加热使其充分分解[13]。影响固体开采法的主要因素就是对三相流动过程的精准把握与控制。示意图如图 5。

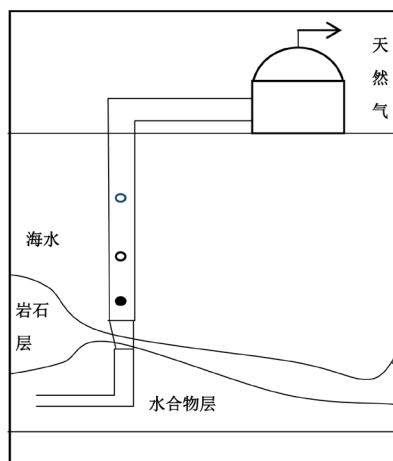


Figure 5. Sketch of solid mining method
图 5. 固体开采法示意图

3. 各种开采方式优缺点对比

3.1. 热激发法优缺点

这种开采方式比降压法和化学试剂法具有热量直接、作用效果迅速、水合物分解效果明显等优点；另外可以控制加热位置，使储层在技术所能达到的情况下就满足给热需求，而且具有环境影响小、适用于多种不同储藏特性等优点。可实现循环注热，且作用方式较快。

热开采技术的主要缺陷是会造成大量热损失，热效率低，而且只能进行局部加热。只有在厚度大于 15 m 的水合物气层热效率较高。采用水力压裂工艺可改善水的注入率，但由于连通效应，又要产生较低的传质效率。

电磁加热法加热迅速、易于控制但需要大量的能量来源且设备复杂，且有研究表明，井下电磁加热开采水合物的采收率可达 70% [14]。

微波加热技术作用具有速度快、设备简单灵活性高、不对储层造成任何污染等优点，是电磁加热技术中最有效的方法。但是微波加热技术开采水合物仍处于起步阶段，大功率微波装置的研制，提高微波穿透深度等技术还需要进一步研究。

热激发法适用范围广泛，成本对其的约束主要体现在热能传递效率上，而这依赖于技术的进步而非水合物储藏的环境。

3.2. 降压法优缺点

降压法与热激发法相比最大的特点是不需要像热激发那样昂贵的连续激发，它只要通过调节天然气的提取速度就可以控制储层压力，进而控制水合物分解的效果，且降压开采水合物无热量消耗和损失，可行性较高。但是这种方法的开采过程中需要间歇性地为地层提供能量，而且需要配备人工举升设备及产出水收集与处理设备。降压法经济而且简便易行，但是单一使用减压法开采天然气水合物的速度很慢且由于实际天然气水合物藏中水合物分解将导致其周围砂岩温度大幅降低。如果上下盖层向储集层的热流量无法及时补充储集层的热损失，即会出现解出的水结冰堵塞气层，降压开采也会中断。该法一般不适用于储层原始温度接近或低于 0℃ 的水合物气藏。只有当天然气水合物处于稳压平衡边界时，此法才具有经济可行性，也就是降压法更适宜开采处在温压环境平衡边界的水合物，因为持续反应后反应速率会越来越低，因此更适合初期阶段开采。

3.3. 气体置换法优缺点

首先二氧化碳置换反应进行缓慢，而且置换率不高。其次，一定的压力条件下 CH_4 水合物的分解温度比液态 CO_2 形成的水合物温度高，如果 CO_2 不能转化为水合物，而是以液态形式储存起来，那么海底水合物就会失去稳定性。因此，对于 CO_2 置换法开采水合物的储层温度和压力条件，多孔介质的特性必须经过严格的选择。

3.4. 固体开采法优缺点

克服了海底分解水合物效率低、无法持续进行的缺点，并充分利用了海平面海水温度的能量。固体水合物的采出和提升需要消耗大量能量，且提升水合物的过程涉及复杂的三相流动。

4. 技术展望

从各项技术对比来看，本文认为二氧化碳置换法，微波法加热法，降压法更有发展前景。这类方法技术设备覆盖开采地区范围广，支持大面积开采。在经过技术发展，例如提高二氧化碳置换法的置

换效率和置换速率, 大功率微博装置的研制。而降压法和热激法或化学抑制剂法的综合应用是目前比较可行的方法。未来天然气水合物开采方式的发展趋势应该是综合应用多种原理和可行的开采方法联合开采。

5. 结论

1) 天然气水合物资源储量规模巨大。据估计, 全球深度小于 2000 m 的岩石圈浅部所含的天然气水合物量中的甲烷, 是全球已知所有常规矿物燃料(煤、石油、天然气)总和的两倍。

2) 作为一种极具潜力的未来清洁能源, 天然气水合物研究尤其是开采研究对于未来能源具有重要的战略意义, 因此, 天然气水合物开采研究获得了空前重视。麦索亚哈气田天然气水合物藏是截至目前进行天然气水合物商业性开采的唯一特例, 是因为该天然气水合物藏只需要较小压降就可打破压力平衡, 具有经济可行性, 这是它的特殊性质。而其他试采成功的地区远没有它的经济可行性。经济成本是制约商采的一大因素[15]。

3) 当前开采技术中热采法注热水热效率低, 且只能实现局部加热, 但反应快。电磁法微波法加热范围广, 有望大规模开采, 但产生能量的设备复杂, 目前的设备不够先进。降压法作业量巨大, 且花费高, 反应较注热开采慢, 但可实现大规模开采。二氧化碳置换法对环境的影响小, 但是置换效率和速率目前都不高。固体提升法采出耗能大。

4) 虽然目前还没有实现大规模商采, 但是在全球能源短缺的压力以及天然气水合物能源诱人的前景吸引下, 世界各国都在加紧试验和研究, 天然气水合物资源有望成为 21 世纪的主要能源。

致 谢

向编辑部及审稿专家致谢。

基金项目

燕山大学大学生创新项目, 编号 CXXL2018446。

参考文献

- [1] Max, M.D. and Lowvire, A. (1996) Oceanic Methane Hydrates: A Frontier Gas Resource. *Journal of Petroleum Geology*, **19**, 45-56. <https://doi.org/10.1111/j.1747-5457.1996.tb00512.x>
- [2] Sloan, E.D. (1988) Clathrate Hydrates of Natural Gases. 2nd Edition, Marcel Dekker Inc., New York.
- [3] Burshears, M., O'Breien, T.J. and Malone, D. (1986) A Multi-Phase, Multi-Dimensional, Variable Composition Simulation of Gas Production from a Conventional Gas Reservoir in Contact with Hydrates. *SPE Unconventional Gas Technology Symposium*, Louisville, 18-21 May 1986, 449-453. <https://doi.org/10.2118/15246-MS>
- [4] Venolden, K.A. (1998) A Primer on the Geological Occurrence of Gas Hydrate. *Geological Society London Special Publications*, **137**, 9-30. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1998.137.01.02>
- [5] 宋永臣, 阮徐可, 等. 天然气水合物热开采技术研究进展[J]. 过程工程报, 2009, 9(5): 1036-1040.
- [6] 孙晨曦, 李明阳. 天然气水合物开采技术综述[J]. 自然科学, 2017, 5(2): 211-217.
- [7] 陈相如. 井下原位燃烧法开采冻土区天然气水合物基础研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- [8] 李登伟, 张烈辉, 等. 天然气水合物的储层保护技术探讨[J]. 海洋石油, 2006, 26(1): 43-46.
- [9] 李登伟, 张烈辉, 等. 微波开采天然气水合物气藏技术[J]. 特种油气藏, 2005, 12(6): 1-2.
- [10] Ginsburg, G.D. and Soloviev, K.A. (1995) Submarine Gas Hydrate Estimation: Theoretical and Empirical Approaches. *Proceedings of Offshore Technology Conference*, Houston, Vol. 1, 513-518. <https://doi.org/10.4043/7693-MS>
- [11] 吴时国, 姚伯初. 天然气水合物赋存的地质构造分析与资源评价[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [12] 颜克凤, 等. 二氧化碳置换开采天然气水合物研究[J]. 当代化工, 2012, 32(8): 42-49.

-
- [13] 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]. 特种油气藏, 2010, 17(3): 1-3.
- [14] Islam, M.R. (1994) A New Recovery Technique for Gas Production from Alaska Gas Hydrates. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **11**, 267-281. [https://doi.org/10.1016/0920-4105\(94\)90046-9](https://doi.org/10.1016/0920-4105(94)90046-9)
- [15] 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.