

Status and Prospect of Subsea Natural Gas Hydrate Exploitation Technology

Xin Wang^{1#}, Yihuai Hu¹, Yong Chang¹, Juanjuan Tang²

1. Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China

2. Shanghai Ship Design & Research Institute 201203, China

#Email: xin_wang2014@163.com

Abstract

Natural gas hydrate has bright resource potential and broad development prospect for its giant reserves and wide distributions on the Earth. In 2013, Japan carried out the world's first experiment of subsea natural gas hydrate exploitation in Nankai Trough and produced the natural gas, which proved the feasibility of subsea natural gas hydrate exploitation. The paper first compared the traditional methods (depressurization method, thermal excitation method, etc.) with those new methods (CO₂ replacement method, solid mining method, etc.), all of which are applicable into the exploitation of subsea natural gas hydrate. Then, this paper analyzed Japan's subsea natural gas hydrate experimental production in Nankai Trough. Finally, it made some future prospects of subsea natural gas hydrate exploitation technology and put forward some suggestions to future research emphasis.

Keywords: subsea; natural gas hydrate; exploitation technology; experimental production

海底天然气水合物开采技术研究现状及展望

王欣¹, 胡以怀¹, 常勇¹, 唐娟娟²

1.上海海事大学, 上海 201306

2.上海船舶研究设计院, 上海 201203

摘要: 地球上天然气水合物储量巨大, 分布广泛, 资源潜力和开发前景非常广阔。2013年, 日本在南海海槽进行了天然气水合物开采试验, 并首次在海底水合物中开采出天然气, 证明了海底天然气水合物开采技术的可行性。本文对可能应用于海底天然气水合物开采的传统方法(降压开采法、热激发开采法等)以及新型方法(CO₂置换开采法、固体开采法等)进行了对比分析, 并对日本在南海海槽海底天然气水合物的实验性开采进行了分析。最后对海底天然气水合物开采技术前景进行了展望, 并对今后的研究重点提出了一些建议。

关键词: 海底; 天然气水合物; 开采技术; 试开采

引言

天然气水合物也叫“可燃冰”, 是由水分子和烃类分子在低温、高压条件下形成的类冰状笼形化合物, 主要的烃类成分为 CH₄, 同时含少量的 C₂H₆、C₃H₈ 和 C₄H₁₀^[1-3]。全球天然气水合物总储量相当于已探明传统化石能源总量的 2 倍左右^[4]。因此, 天然气水合物有望成为继页岩气、致密气、煤层气、油砂等之后的储量最为巨大的接替能源^[5]。

1 海底天然气水合物的全球分布

天然气水合物主要蕴藏在海底沉积物和陆地永久冻土带中^[1,2]。据统计, 分布在海底的水合物面积占地球海洋总面积的 1/4, 约为 4000×10⁴ km², 主要富集在 200~600m 深的海底^[6]。海底天然气水合物分布区主要为西太平洋海域的白令海、日本海、鄂霍茨克海; 东太平洋海域的中美海槽、秘鲁海槽; 大西洋海域的

墨西哥湾、加勒比海、南美东海岸外陆缘；印度洋的阿曼海湾、北极的巴伦支海与波弗特海，南极的罗斯海与威德尔海及大陆内的里海和黑海等^[4,7]。我国南海北部陆坡、东海陆坡、台湾东北与东南海域、冲绳海槽以及东沙与南沙海槽等区域都发现了天然气水合物存在的地球物理和地球化学证据，先后于 2007、2013、2015 年三次成功在南海海域钻取到天然气水合物的岩心样品，并计划于 2017 年开展海底天然气水合物开采试验^[4,8]。

2 海底天然气水合物储层及其开采机理

图 1 为全球天然气水合物资源金字塔，从图中可以看出，海底天然气水合物较冻土带天然气水合物开发难度大，但是由于大部分水合物资源都分布在海底，因此，海底天然气水合物资源将是水合物资源开发利用的最终目标。

自然形成的海底天然气水合物形态大致分为：海底表层呈块状的天然气水合物、海底渗透性低的泥质层中呈块状的天然气水合物，以及存于海底的渗透性好的砂质层孔隙中的天然气水合物。目前海底天然气水合物开采技术领先的美国和日本，开采计划均以砂质层中的天然气水合物为主要开采对象^[9]。

从图 2 海底水合物存在相图可知海底天然气水合物的开采有三种途径：(1)升高水合物的环境温度；(2)降低水合物所处的压力；(3)通过化学方法左移相平衡曲线。分别对应热激发开采法、降压开采法、注化学试剂开采法等三种传统开采方法，另外有 CO₂ 置换开采法、固体开采法以及不同开采方法的联合等新型开采方法^[10]。

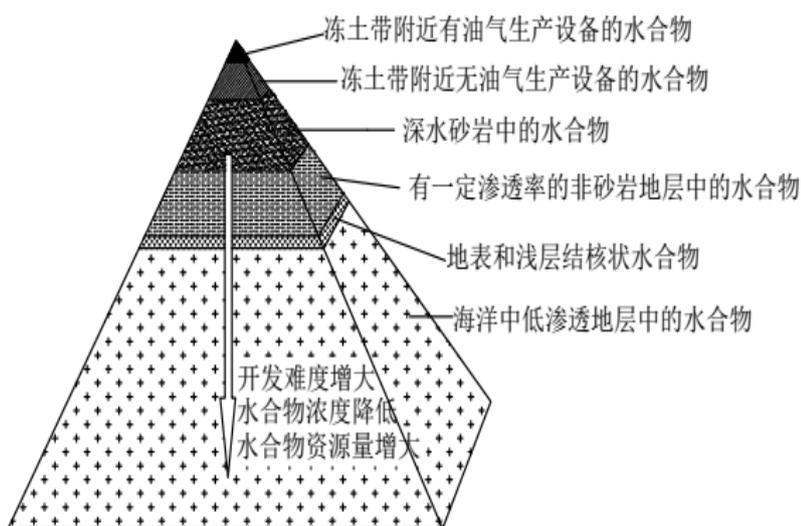


图 1 全球天然气水合物资源金字塔

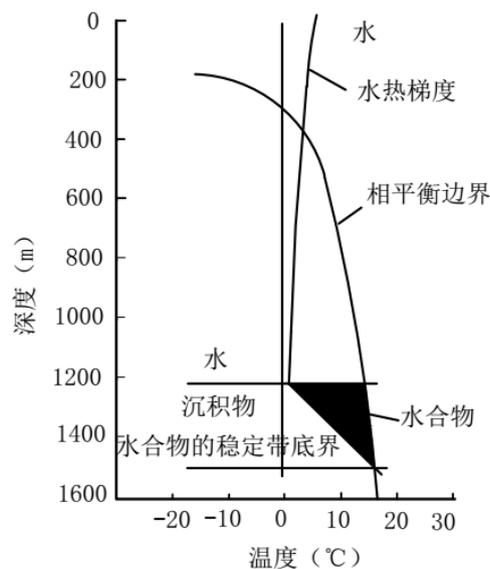


图 2 海底水合物存在相图

3 海底天然气水合物的开采方法

3.1 降压开采法

降压开采法是通过使水合物层压力降低到水合物在该区域温度条件对应的相平衡压力以下，造成水合物分解成天然气和水的方法。降压开采法原理图，如图 3 所示。降压法适用于开采水合物底层和盖层都是非渗透层的水合物矿藏或水合物盖层是非渗透层、有大量下伏游离气的水合物矿藏^[3,11]。

上下都有非渗透层的水合物层，初期开采时降压面积较小，开采速度较低，随着开采活动的进行，降压面积会不断增加，开采速度也会随之提高。有大量下伏游离气的水合物层的开采原理图如图 4 所示，使生产井钻穿水合物层，随着水合物层的下伏游离气被不断开采，储层压力下降，造成与游离气层接触面的水合物逐渐分解，达到对水合物层开采的目的^[12]。

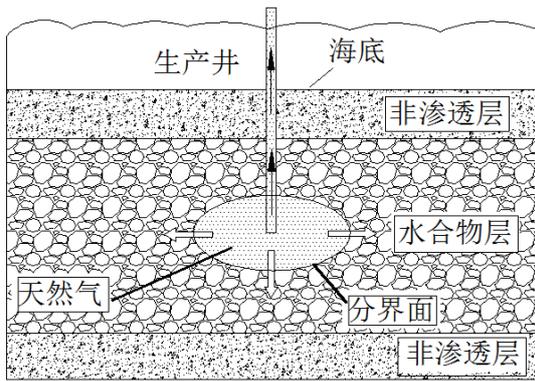


图3 降压开采法原理图

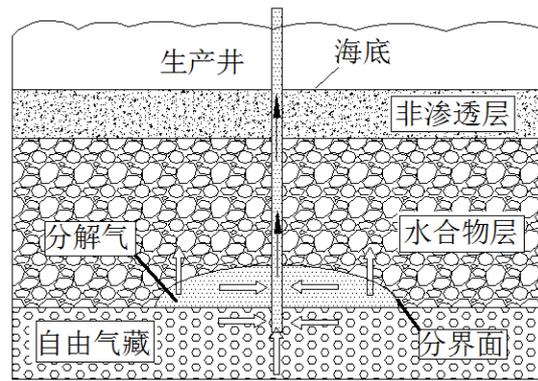


图4 降压法开采有下伏游离气的水合物原理图

由于天然气水合物的分解相变是一个吸热过程，伴随着水合物分解，储层温度不断降低，生产井附近的储层渗透路径形成的冰堵会抑制水合物的进一步分解。因此，需要精确控制开采速度和开采压力，间隙的向储层输入热量，这就需要其他开采技术的辅助，增加了开采技术的难度^[13]。

实际开采中，在俄罗斯 Messoyakha 天然气水合物气田、加拿大 Mackenzie 三角洲天然气水合物气田“Mallik 2007”项目和日本南海海槽开展的开采工作已经证实了降压开采法的可行性，其中 Messoyakha 气田是目前为止唯一进行商业开采的气田。降压法相对于其它开采方法具有技术简单、较高的能量产出比且不需要连续激发的特点，因而被认为是最经济的开采方法，将来可能成为天然气水合物商业化开采的重要方法^[15]。

3.2 热激发开采法

热激发开采法是对天然气水合物层进行直接加热，使天然气水合物层的温度高于在该压力下的平衡温度，从而促使天然气水合物分解的开采方法。热激发开采法原理图，如图5所示。

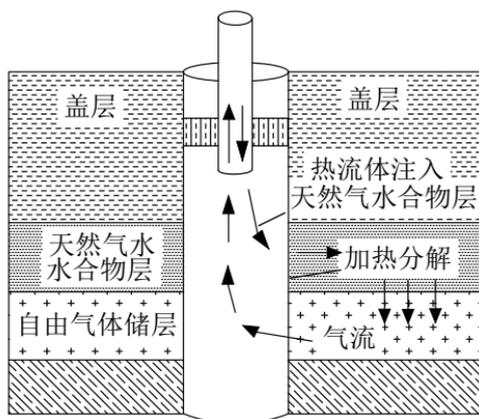


图5 热激发开采法原理图

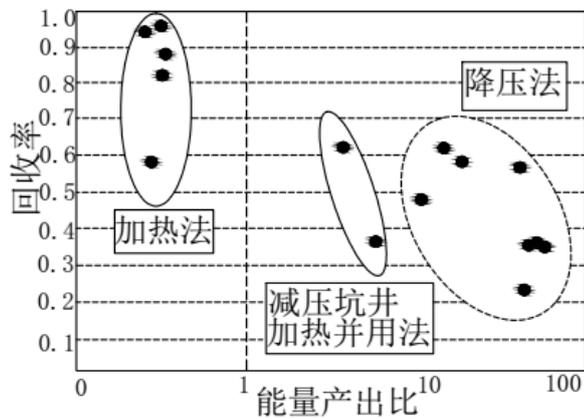


图6 不同生产方法的能量产出比和回收率^[9]

该方法可实现对水合物层的连续开采，并且作用速度快，适用于渗透率较高的水合物层或下方存在一个空间供热水注入的水合物层。另外可以通过控制加热位置，满足储层所需给热。热激发开采法主要的途径为注热水、注热盐水、注热蒸汽、电加热、太阳能加热、电磁加热、微波加热及利用地热加热等^[15]，不同热激发开采方式的优缺点如表1所示。

对于开采海底天然气水合物，注热盐水法有其独特的优势：第一，在海洋环境下，容易获得较热盐水；第二，在给定的压力条件下，盐水可以降低水合物的相平衡温度，降低程度的大小依靠盐度。由于分解温度较低，热盐水注入的热损失较注热水和热蒸汽要少。

如图6所示，使用温水作热媒的热激发开采法尽管回收率高，但由于必须提供温水和温水压入的能量，

所以能量产出比低。具有热量损失很大，效率较低，经济性差的缺点。

实际开采中，加拿大 Mackenzie 三角洲天然气水合物气田“Mallik 2007”项目采用了热激发开采法，通过热水循环系统向开采井中注入热水收集水合物分解出来的气体^[17]。

表 1 不同热激发开采方式的优缺点^[16]

方法	优点	缺点
热流体	简单，可循环利用	热量损失大，效率低
电加热	作用快，可控性强	设备复杂，电力需求量大
微波加热	可控性强，微波传导	电力需求量大，缺少大功率磁控管
太阳能加热	清洁，高效，无污染	受气候影响较大

3.3 化学试剂注入开采法

化学试剂注入开采法是向储层中注入化学试剂，通过提高水合物分解压力和降低分解温度，打破水合物的相平衡，从而达到水合物分解的目的，常见的有甲醇、乙二醇、乙醇、丙三醇、盐水、氯化钙等试剂^[18]。化学试剂注入开采法原理图，如图 7 所示。

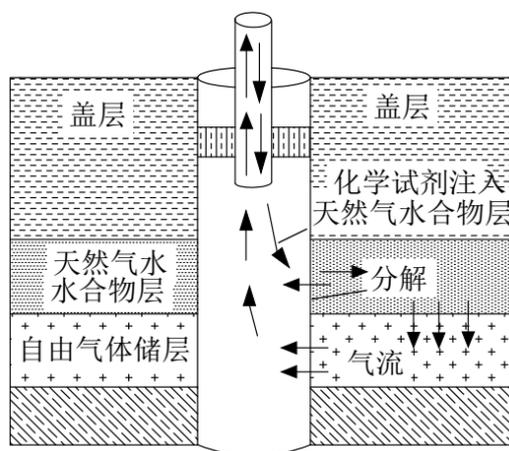


图 7 化学试剂注入开采法原理图

该方法原理简单，使用方便，能够降低水合物初始输入的能量，提高开采初期的开采量^[19]。化学试剂的浓度、种类、注入量都会影响到水合物分解的速率。有学者提出将化学试剂注入法与注热法联合，在降压法开采初期应用，在生产井底形成一个较大的天然气“囊”，增大不稳定水合物的面积，提高产气速度。

化学试剂注入法的缺点注入的化学试剂成本较高，对天然气水合物储层作用迟缓，并且对环境有较大的污染。所以，目前对化学试剂注入法的研究相对较少。

实际开采中，Messo yakha 气田在开采的初期向井底注入了甲醇，使其产量增加了 4 倍，但是由于其费用太高，不适于商业应用，后来采用降压法进行开采。美国阿拉斯加北部永冻层所做的水合物开采实验中，化学试剂注入开采法成功移动了相边界，气体收集效果明显^[20]。

3.4 CO₂ 置换开采法

CO₂ 置换开采法是在一定的压力和温度范围内向水合物层中注入 CO₂ 气体，来置换出水合物笼中的 CH₄，达到开采的目的，开采速度受温度、压力、CO₂ 注入形态、水合物饱和度等因素的影响。CO₂ 气体能够置换开采天然气水合物，主要是因为相同的温度和压力条件下，CO₂ 水合物比 CH₄ 水合物更稳定^[3]。CO₂ 置换开采法的原理图，如图 8 所示。

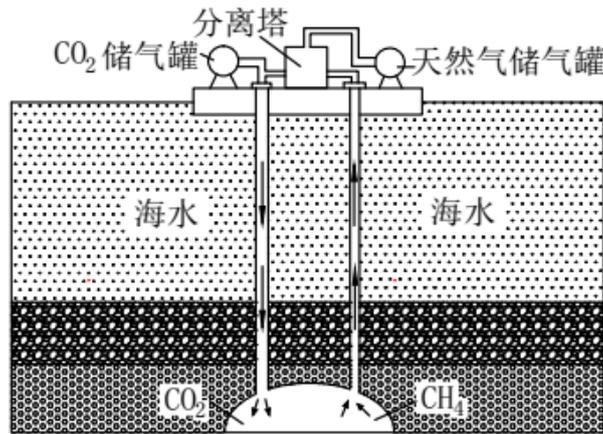


图 8 CO₂ 置换开采法原理图

CO₂ 置换开采法的优点在于在 CO₂ 置换天然气的同时释放大量的热，为水合物的分解提供所需热量，使反应能够持续进行。同时，用 CO₂ 置换 CH₄，使得原来地层的孔隙被 CO₂ 的水合物填充，原水合物区的地层结构保持稳定，并且为 CO₂ 的封存提供了途径，具有安全经济环保的特点^[21]。

然而，较低置换效率仍是阻碍 CO₂ 置换开采天然气水合物实现工业应用的重要原因之一。最近有研究者将 CO₂ 与 N₂ 的混合物或电厂烟气作为置换气体，进行模拟开采实验。与纯 CO₂ 置换 CH₄ 水合物相比，CO₂-N₂ 混合气体的置换效率大大更高，达到了 85%^[22,23]。

2012 年，在美国阿斯加北部斜坡天然气田开展的置换和降压联合开采试验中，向水合物层注入 CO₂-N₂ 混合气体，结果显示 CO₂ 和 N₂ 都进入到了水合物笼中^[24]。

CO₂ 的主要来源为燃煤电厂烟气，如果可以直接利用电厂烟气置换天然气水合物，就可省去 CO₂ 分离的成本，因此无论是 CO₂ 置换开采法还是烟气置换开采法都有很大的研究前景。

3.5 固体开采法

固体开采法是通过专用设备直接挖掘水合物层并粉碎成小颗粒，然后将小颗粒输送到分解仓与温度较高的海水充分混合分解，再通过管道收集分解气，并将分解产生的沉积物回填到开采区。其中具有代表性的方法有窦斌等^[25]提出的地表分解法和张旭辉等^[26]提出的机械—热开采法。

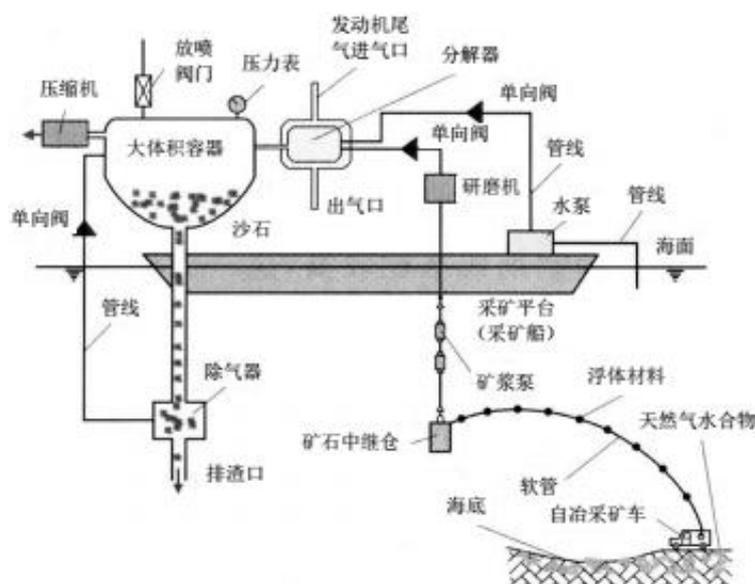


图 9 地表分解法开采天然气水合物系统结构图

海底天然气水合物大部分分布在海底浅层部位，没有良好的圈闭，因此传统开采方法不适于开采海底表层天然气水合物，窦斌等提出的地表分解法对海底表层天然气水合物的开采提供了新的思路。该方法的系统结构如图 9 所示，采矿车在海底把天然气水合物以固体的形式采出，进行初步分离，然后利用矿浆泵将初步分离的水合物提升至海面采矿船，经研磨机充分研磨后进入不断注入较热海水的分解仓进行分解，天然气由气体收集管道收集，沉积物经排渣口回填海底。

张旭辉等提出的机械—热开采法根据分解仓室所处的位置不同设计了三种开采流程图，如图 10 所示。基本流程:地下挖掘→粉碎→传送→混合\分解\分离\回填→颗粒流输送→气体做功(注海水)→气体输送与收集。

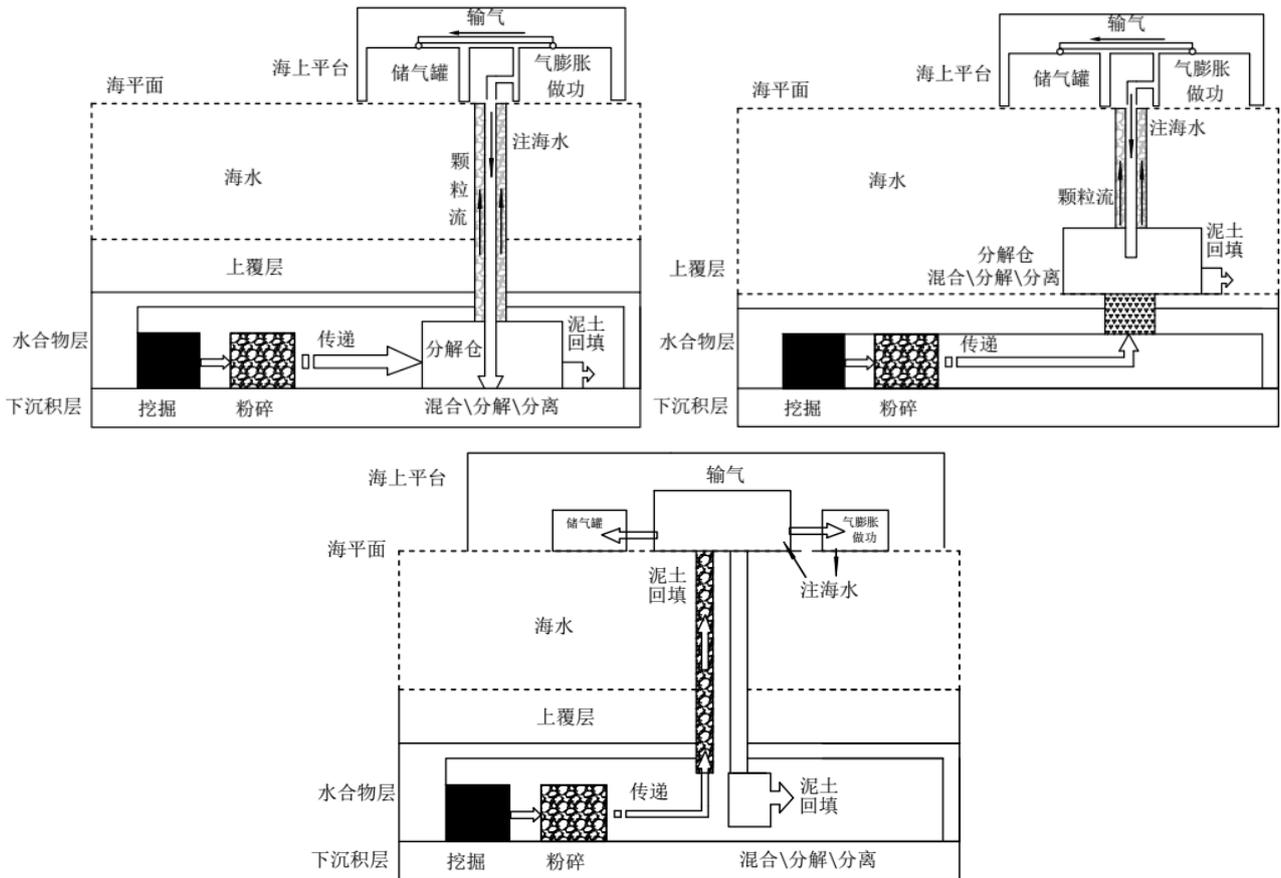


图 10 机械热开采流程图

(a). 分解仓在水合物层; (b). 分解仓在海床上; (c). 分解仓在海洋平台上

图 10 (a) 中，分解仓设计在水合物层中，这样可以缩短沉积物输送距离，便于沉积物的回填，但是技术难点在于如何将大型的分解仓安放到水合物层中；图 10 (b) 中，分解仓设计在海床上，这种方法可以有效解决将分解仓放入水合物层的技术难点，但随着开采进行，会带来分解仓的稳定性问题；图 10 (c) 中，分解仓设计在开采船或海洋平台上，这种方法便于人员操作监管，且容易向分解仓注入海水，但是需解决沉积物水力运输和回填问题。

固体开采法的突出特点是海水的热量和气体的膨胀作用可以得到充分利用，沉积物颗粒与海水对流传热，分解速度较快，并且能够对开采速度进行有效控制，保证所需开采量和海底地层安全。因此，固体开采水合物更适合于开采储量大、分布集中且传统开采方法效率不高的水合物储层。

3.6 综合开采方法

通过大量研究，基于上述开采方法，日本学者提出了适用于深水海域的天然气水合物开采方案。这种

开采方案兼顾了水合物的裂解、生成、开采经济性，并且还提出了消除开采对海底环境影响的对策。图 11 给出了海底地层水合物开采示意图，首先通过海洋钻探平台下入 3 口隔水管柱，穿过海底地层到达水合物层分别用来向海底注入较热海水、向海底注入 CO_2 和收集天然气。当水合物层下存在游离气时，随着游离气的开采，储层压力不断下降，接触面的水合物会逐渐分解。同时，通过隔水管柱向水合物层连续注入较热海水，使水合物分解。开采后，通过隔水管柱向分解产生的残留水中注入 CO_2 和天然气燃烧产生的废气，对 CO_2 以水合物的方式封存，并稳固海底地层结构^[27]。

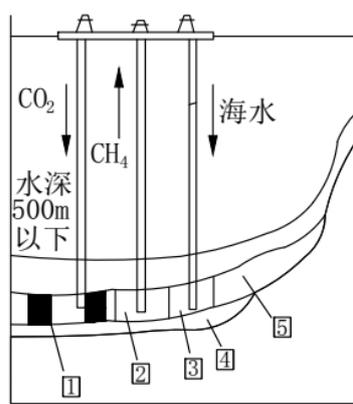


图 11 海底地层天然气水合物开采示意图

1- CO_2 水合物；2-分离气和水；3-海水等裂解催化剂；4-游离气层；5-天然气水合物

传统开采方法和新型开采方法的优缺点对比如表二所示。

表二 海底天然气水合物开采技术比较

开采方法	优点	缺点
降压开采法	技术简单，成本低，无需连续激发	起效慢，效率低
热激发开采法	可实现循环制热，起效快	热利用率低，成本高
化学试剂注入开采法	技术简单，初期输入能量低	化学试剂用量大，后期成本高
置换开采法	安全经济环保	开采效率较低
固体开采法	不受分解范围限制，效率高	初投资较高，技术复杂

4 海底天然气水合物藏试开采

2004 年，日本在 Kumano basin、Second Atsumi knoll 和 Offshore Tokai 三个海域的 16 个站位共钻井 32 口，开采深度从 720 米到 2033 米，用于测井、钻井取样和地质数据测量。这次勘探不仅重新估算了南海海槽的水合物储量并完成了试开采的技术积累。

2013 年 3 月 12 日，日本经济省利用“地球号”探查船在日本爱知县以南 70 公里海域对海底天然气水合物进行了实验性开采。后于 3 月 18 日宣布停止实验，并对开采点进行了封井处理。停止实验主要出于两方面原因：（1）抽水减压泵临时出现故障，同时井内出砂增多，无法正常产气；（2）天气预报试验海域将有极端恶劣天气。本次试验通过深海钻探设备在水深 1006 米处海底钻探 330 米，开采砂层型（深层型）天然气水合物。在为期 6 天的开采时间里，共提取出 12 万立方米的天然气。本次开采通过将水合物层中的游离水分抽出的方法降低储层压力，然后成功提出了天然气。这是全球范围内首次从海底天然气水合物层中开采出天然气，对天然气水合物研究具有重大意义。

2013 年之后，日本经济省又启动了对日本周边海域“表层型”水合物埋藏量的调查，并于 2014 年 12 月 25 日在上越海域、秋田县、山形县海域共计 3 处成功采样。

目前日本学者正在积极进行海底天然气水合物的开采技术、经济效益和环境影响评价的研究，按日本

政府提出的“甲烷水合物开发计划”(MH21 Methane Hydrate R&D)规划的时间,最快于2018年前确定海底天然气水合物的商业开采方案^[28]。

5 问题与展望

5.1 目前海底天然气水合物还没有进行商业规模化开采,其中最主要的原因是开采成本问题。据美国能源部资料显示,目前,天然气水合物开采成本平均高达200 \$/m³,相当于每立方米天然气的开采成本在1\$以上,远高于页岩气的开采成本。由于海底天然气水合物的开采难度更大,开采成本要更高。日本的实验性开采,日均产气约为2万 m³,远远没有达到商业开采的要求。因此降低开采成本,提高产量是推进海底天然气水合物商业化开采必须解决的难点。

5.2 虽然已经成功试采海底天然气水合物,但是开采所带来的海洋环境风险还很难把握。目前试开采的为致密、成岩的海底天然气水合物储层,试采时间短,回避了长期开采以及对海底“表层型”天然气水合物开采所面临的潜在地质风险^[29]。因此对天然气泄露和地层变形的监测,将是未来水合物开采一个重要的研究方向。

5.3 单一开采方法各有优点,但是很难避免天然气水合物开采过程中遇到的问题,联合开采技术综合了各项技术的优点,将会成为未来研究的重点。目前已证实的天然气水合物大多是位于海底的表层型水合物,没有坚固封闭的储层盖,同时水合物层下也缺乏下伏游离气,传统方法很难适用,因此针对浅层型天然气水合物的开采方法和开采设备研发同样需要得到重视。

5.4 海底天然气水合物开采技术的研究中,在引进陆地永冻层水合物开采技术的同时,还应多借鉴其他海底矿藏的开采技术。像有关学者提出的海底天然气水合物绞吸式开采方法^[30]就是结合了绞吸式挖泥船的工作原理和大洋多金属结核开采技术。通过借鉴其他相对成熟的海底矿藏开采技术,能够迅速完成海底天然气水合物开采技术的积累。

REFERENCES

- [1] Z-H Chen, N-Y Wu. The Current Status of Permafrost Gas Hydrate Exploration and Exploitation in the World and Its Implications. Marine Geology Letters, 2010,11:36-44.
- [2] X-Y Fang, M-B Lin, X-L Jin, et al. Character Analysis of the Marine Gas Hydrate Stability Zone [J]. Marine geology & Quaternary Geology, 2001, 01:103-106.
- [3] Suzhen Yan. Study of Replacement of Natural Gas Hydrate with CO₂ and Flue Gas[D]. South China University of Technology, 2015.
- [4] H-Y Zhang, W-J Qiao, T-X Zhong, et al. Status and Forecast of World's Natural Gas Hydrate Exploration & Development[J]. Sino-Global Energy, 2008, 06:19-25.
- [5] Q Fu, S-W Zhou, Q-P Li. Natural Gas Hydrate Exploration and Production Technology Research Status and Development Strategy[J]. Engineering Sciences, 2015, 09:123-132.
- [6] G-S Jiang, D Wang, F-L Tang, et al. Natural Gas Hydrate Exploration & Development[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2002.
- [7] N-Y Wu, J-Q Liang, H-B Wang, et al. State of Marine Gas Hydrate Reservoir Forming System Research[J]. Geoscience, 2008, 03:356-362.
- [8] J Huang. Our Country Will Exploit Subsea Natural Gas Hydrate Next Year [N]. Nanfang Daily, 2016-04-28A17.
- [9] C-X Luo. Japan's Methane Hydrate Development Today and Advances[J]. Sino-Global Energy, 2013,12:30-37.
- [10] Grover T. Natural gas hydrates-issues for gas production and issues for gas production and geotechnical stability [D]. Texas: Texas A&M University, 2008
- [11] Guo Shi, Chu Bo. Analysis of Gas Hydrate Geological Structure and Resource Evaluation[M]. science press, 2008.

- [12] G Xiao, Y-H Bai, J Dong. A Comprehensive Review of Natural Gas Hydrates.[M]. Beijing: Higher Education Press,2012.
- [13] H-Z Zhang, Y-Q He, N-D Sun, et al. Natural Gas Hydrate Production Technology and Outlook of Its Prospect[J]. Oil Forum, 2013,06:15-19
- [14] G Xiao, Y-H Bai. Natural Gas Hydrate—Flammable Ice[M].Wuhan: Wuhan University Press,2012.
- [15] F-L Ning, S-G Jiang, F-L Tang, et al. Utilizing Geothermal Energy to Exploit Marine Gas Hydrate. Natural Gas Industry, 2006,26(12):136-138.
- [16] Sakamoto Y, Komai T, Kawamura T. Laboratory-scale Experiment of Methane Hydrate Dissociation by Hot-water Injection and Numerical Analysis for Permeability Estimation in Reservoir: Part1—Numerical Study for Estimation of Permeability in Methane Hydrate Reservoir [J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2007, 17(1): 47–56.
- [17] X-W Luan, K-B Zhao, D-S Sun, et al. Gas hydrates Production--in Case of Mallik Test Well.[J]. Progress in Geophysics, 2007,22(4):1295-1304
- [18] D-L Li, S-S Fan. Natural Gas Production from Hydrate[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering. 2003,S1:108-112.
- [19] C-Z Wu, K-B Zhao, C-Q Sun, et al. Current Research in Natural Gas Hydrate Production[J]. Geological Science and Technology Information, 2008, 01:47-52.
- [20] J-Z Zhao, D-Z Shi. Study on Exploiting method of Natural Gas Hydrates[J]. Mining Research and Development, 2007, 03:32-34.
- [21] J Chen, Y-H Wang, X-M Lang, et al. Energy-efficient Methods for Production Methane from Natural Gas Hydrates [J]. Journal of Energy Chemistry, 2015, 05:552-558.
- [22] Koh D, Kang H, Kim D, et al. Recovery of Methane from Gas Hydrates Intercalated within Natural Sediments Using CO₂ and a CO₂/N₂ Gas Mixture[J]. ChemSusChem, 2012,5(8):1443-1448
- [23] Park Y, Kim D, Lee J, et al. Sequestering Carbon Dioxide into Complex Structures of Naturally Occurring Gas Hydrates.[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2006,103 (34):12690-12694
- [24] Schoderbek D, Farrel H, Hester K, et al. ConocoPhillips Gas Hydrate Production Test Final Technical Report[J]. United States Department of Energy, 2013
- [25] B Dou, G-S Jiang, X Wu, et al. Exploitation of Natural Gas Hydrate by Ground Decomposition Method[J]. Natural Gas Industry, 2008,07:123-125.
- [26] X-H Zhang, X-B Lu, L-L Liu. Advances in Natural Gas Hydrate Recovery Methods[J]. Progress in Geophysics, 2014,02: 858-869.
- [27] D Wang, X-P Pang, C-M Li. Reflections on the Exploitation of Natural Gas Hydrate[J]. Exploration Engineering, 2000,04:1-3.
- [28] Y Wang, X-S Li. Research Progress of Natural Gas Hydrate Production Technology[J]. Advances in New and Renewable Energy, 2013,01:69-79.
- [29] S-W Zhou, W Chen, Q-P Li. The Green Solid Fluidization Development Principle of Natural Gas Hydrate Stored in Shallow Layers of Deep Water[J]. China Offshore Oil and Gas, 2014,05:1-7.
- [30] H-L Xu, L-C Lin, W-R Wu, et al. Cutter Suction Exploitation Marine Gas Hydrate[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2011,03:48-52.

【作者简介】



¹ 王欣 (1992-), 男, 汉族, 硕士研究生, 海底可燃冰开采,
Email: xin_wang2014@163.com

² 胡以怀 (1964-), 男, 汉族, 博士研究生导师, 教授, 船舶动力装置系统、新能源应用, Email: yhhu@shmtu.edu.cn

³ 常勇 (1980-), 男, 汉族, 硕士研究生导师, 轮机控制与信息技术 Email: ychang@shmtu.edu.cn