海底天然气水合物开发的前景研究

——基于经济可行性的视角

邢聪聪[1],姚海燕[1],霍素霞[1],朱超祁[2],郭雅楠[1]

(1. 国家海洋局北海环境监测中心 海洋溢油鉴别与损害评估技术国家海洋局重点实验室 青岛 266033;
2. 中国海洋大学 山东省海洋环境地质工程重点实验室 青岛 266100)

摘要:海底天然气水合物的开发利用对于国家能源安全与环境保护具有重要意义。然而,作为一种新型深海能源,海底天然气水合物至今仍未实现商业化生产。除开发技术等因素外,天然气水合物开发投入、产出的成本问题也是制约海底天然气水合物大规模开发的另一关键因素。文章从经济可行性的视角分析海底天然气水合物目前开采成本、未来开采成本的变化以及未来的价格优势,从而对天然气水合物开发的前景进行相关研究。研究结果显示,虽然目前天然气水合物的开采成本要高于常规天然气,但随着今后开采技术的改进,天然气水合物开采的总成本、边际成本和平均成本都会相应降低,当天然气水合物的价格低于常规天然气价格时,天然气水合物的商业化生产便可能实现。

关键词:海底;天然气水合物;开发前景;成本;经济可行性

中图分类号:TE-9;P7 **文献标志码**:A **文章编号**:1005-9857(2018)11-0072-04

Future Prospects of Marine Gas Hydrate: Insights from Economic Potential

XING Congcong[1], YAO Haiyan[1], HUO Suxia[1], ZHU Chaoqi[2], GUO Yanan[1]

(1. North China Sea Environmental Monitoring Center, SOA, Key Laboratory of Marine Spill Oil Identification and Damage Assessment Technology, Qingdao 266033, China; 2. Ocean University of China, Key Laboratory of Marine Geo-environmental Engineering of Shandong Province, Qingdao 266100, China)

Abstract: The exploitation and utilization of gas hydrate is of great significance to the national energy security and environmental protection. However, as a new type of deep-sea energy, marine gas hydrate has not yet been commercialized. In addition to technical problems and the possible significance of hydrate to ocean and its impact on climate and seafloor stability, the cost is another key factor that restricts the commercialized production. In this paper, the economic potential of the gas hydrate was analyzed. The results showed the investment and cost of gas hydrate is more than the traditional oil and gas resources. Conventional gas will become scarce, resulting increasing prices for conventional gas. At the same time, it can be expected that the production cost of gas from hydrate will gradually decrease due to technological development. When the price of the cheapest gas from hydrate matches that of conventional gas, it will be commercially worthwhile to begin pro-

收稿日期:2018-04-12;**修订日期**:2018-09-14

基金项目:国家自然科学基金重大专项(41427803).

作者简介:邢聪聪,助理工程师,硕士研究生,研究方向为海洋经济

通信作者:朱超祁,博士研究生,研究方向为水合物研究

ducing methane from gas hydrate.

Key words: Seabed, Gas hydrate, Future prospects, Cost, Economic potential

0　引言

在深海能源中，天然气水合物由于储量大，燃烧值高等优点，被各国视为未来石油、天然气等传统能源的战略性可替代能源。并且天然气水合物燃烧后几乎不产生残渣，环境污染比煤、石油、天然气都要小得多。鉴于各国对国家能源安全的多样化需求和环境保护的日益关注，在未来的一段时间内，天然气水合物将成为越来越重要的能源。

然而，作为一种新型深海能源，海底天然气水合物尚未实现商业化开采。制约海底天然气水合物商业化开采的因素，除了开采技术要求高、开采过程对环境造成破坏以及可能引发地质灾害等因素外，天然气开采的高成本问题也影响着天然气水合物的商业化开采与大规模开发。

海底天然气水合物是保障我国能源安全的重要能源。在合理价格下，能源的充足供给可以增强经济和政治的稳固基础；进一步，可靠的能源供给也对工业化国家的安全至关重要[1]。一个国家能源安全的保证需要该国家能直接控制自身的能源来源，但世界上只有极少的一部分国家（挪威、巴西等）能处在这一优势之中。对绝大多数国家而言，克服供应链不足的关键因素在于开发本土可以直接控制的可替代能源。很多国家，尤其是沿海国家可以通过探索深海能源来达到这一目标。

在关于天然气开发的已有研究中，多数学者从天然气水合物开采造成海洋环境影响与温室效应[2]、天然气水合物开采引发地质灾害[3-4]、天然气水合物开采与监测技术支撑[5-6]等方面对海底天然气水合物开采进行了相关分析，而从经济可行性的视角探究天然气水合物开采前景的研究较少。

本研究通过分析海底天然气水合物目前开采成本、未来开采成本的变化以及未来的价格优势，从经济可行性的视角对海底天然气水合物开发的前景进行相关研究，以期对我国海底天然气水合物开采提供借鉴与指导。

1　天然气水合物的开发进程

21 世纪以来，加拿大 Malik Field 试采、美国 Ignik Sikumi 试采与日本 Nankai Trough 试采这 3 个天然气水合物生产测试项目依次开展[7]。其中，日本 Nankai Trough 天然气水合物试采是世界上首次海底天然气水合物生产试采试验，但最终因出砂严重与抽水泵故障而被迫封井，日本南海海槽水合物生产测试由此宣告失败。

2017 年 5 月 18 日，中国在南海神狐海域首次天然气水合物试采成功，经过连续试采 60 天，累计产气超过 30 万 m^3 后，天然气水合物试采工程第一口井完成关井。此次成功开采，表明我国在天然气水合物勘探、开发、利用等技术环节上均处于世界领先地位，不仅对我国能源结构优化意义重大，还可为其他国家提供借鉴。然而，投入、产出的成本问题依然是制约我国南海等地区天然气水合物商业开采的关键因素之一。对全球而言，未来天然气水合物的开采将受到开采成本、开采技术、海洋环境与全球变化、地质灾害等一系列难以精确预测的因素的影响。

2　天然气水合物的经济可行性分析

2.1　天然气水合物的开采成本

天然气水合物的开采在经济上的限制主要来源于天然气水合物开采的高成本。开采天然气水合物的高昂费用来源于燃气管道、燃气运输、海工装备等。由于开采技术、开采方法、海底地质特征等因素的不同，每个国家开采天然气水合物的成本不尽相同。结合 MacDonald[8]、Max 等[9]的数据分析，以美国阿拉斯加北坡天然气水合物试采生产为例，将常规天然气和天然气水合物的开采成本进行了对比（表 1）。

表 1　天然气水合物和常规天然气的成本与产量比较

成本要素	天然气水合物		常规天然气
	热激发开采成本	降压开采成本	
初始投资成本（M$）	5 084	3 320	3 150
年均成本（M$）	3 200	2 510	2 000
单位成本（$/Mcf）	3.6	2.28	1.82

注：M$ 百万美元、Mcf 千立方英尺.

表 1 显示，以美国阿拉斯加北坡常规天然气和天然气水合物的开采为例，无论从投资成本、年均成本，还是生产的单位成本来看，目前天然气水合物的开采成本要远高于常规天然气的开采成本。因此，目前对天然气水合物开展规模化开采的可能性几乎不存在。

2.2 天然气水合物开采成本的变化趋势

2.2.1 基本假设

本研究对天然气水合物开采成本的基本假定如下。

开采天然气水合物需要使用的固定安装设备(L)、劳动力、燃料投入等(K)进行开采。天然气水合物开采中投入的固定设备安装(L)为固定要素，开采过程中通过劳动力、燃料等要素投入量的调整来实现天然气水合物的不同开采量，且固定安装设备的价格 W、劳动力、燃料等的价格 r 是给定的。在天然气水合物投入开采后要素的数量增加，但假设燃料、劳动力等的价格不变，都始终为 r。

2.2.2 天然气水合物开采的成本函数构建

在已有基本假设的基础上，构建天然气化合物开采的成本函数如式(1)所示：

$$TC(Q)=W\times\overline{L}+r\times K(Q) \quad (1)$$

该函数(1)中，$W*\overline{L}$ 部分为固定成本，用 TFC 表示，$r\times K(Q)$为总可变成本，用 TVC 表示，总可变成本随着天然气水合物开采量(Q)的增加而增加，其函数形式如式(2)所示：

$$\mathrm{TVC}=\mathrm{TVC}(Q) \quad (2)$$

总可变成本和总固定成本之和构成天然气水合物开采的总成本，用 TC 表示。

在定义了天然气水合物开采成本函数的基础上，根据本研究分析的需要，进而定义天然气水合物开采的平均总成本 AC，天然气水合物开采的边际成本 MC。

天然气水合物开采的平均总成本 AC 是指在天然气水合物开采中每开采一单位天然气水合物所消耗的全部成本，等于平均固定成本 AFC(Q)和平均可变成本 AVC(Q)之和，定义公式如式(3)所示：

$$\mathrm{AC}(Q)=\frac{\mathrm{TC}(Q)}{Q}=\mathrm{AFC}(Q)+\mathrm{AVC}(Q) \quad (3)$$

天然气水合物开采的边际成本 MC 是指在天然气水合物开采过程中增加一单位开采量时所增加的总成本，定义如式(4)所示：

$$MC(Q)=\frac{\Delta TC(Q)}{\Delta Q}=\lim_{\Delta Q\to 0}\frac{\Delta TC(Q)}{\Delta Q}=\frac{dTC}{dQ} \quad (4)$$

2.2.3 天然气水合物开采成本随时间的变化分析

本节将分析今后天然气水合物钻井技术改进和生产能力提高后，天然气水合物开采各类成本的变化情况。

图 1 中用虚线表示的 TC、TFC、MC、AC 分别表示天然气水合物开采的总成本、总固定成本、边际成本和平均成本曲线，用实线表示的 TC*、TFC*、MC*、AC* 分别表示随着时间的变化，天然气水合物开采技术逐步成熟后天然气水合物开采的总成本、总固定成本、边际成本和平均成本的曲线。其中横轴为天然气水合物的开采量，纵轴为天然气水合物开采的成本。

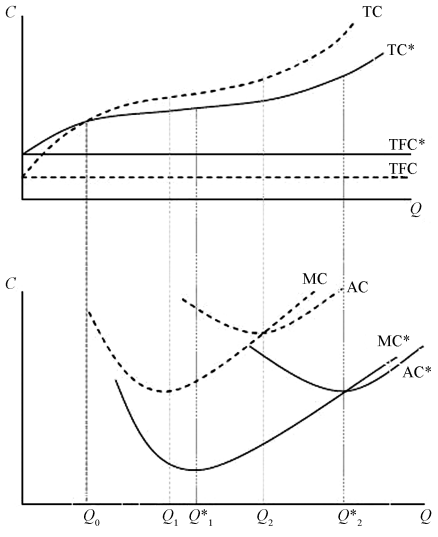

图 1 天然气水合物开采的生产成本

相对于目前的天然气水合物开采，由于开采技术的改进和逐步成熟，今后天然气水合物的开采规模会逐渐增大，投入的开采固定设备等会增加，因此总固定成本增加，即 TFC* 曲线上升至 TFC 曲线的上方。由于天然气水合物投入的固定成本较高，天然气水合物开采的平均成本在较小开采量水平(图 1 中表示开采量小于 Q_0)时会较高，但今后开采技术的推进会带来单位开采量下天然气水合物开采成本的降低，在逐渐增加开采量后平均生产总成

本会降低，且会大大低于目前开采的平均总成本，即图 1 中的 AC^* 曲线在 AC 曲线下方。同理可得，技术的成熟会降低单位开采量增加带来的总成本的增加量，使今后天然气水合物开采的边际成本低于目前开采的边际成本，即图 1 中的 MC^* 曲线在 MC 曲线的下方。由边际成本曲线和总成本曲线的关系，可以得到今后天然气水合物开采总成本曲线的斜率要小于目前天然气水合物开采的总成本曲线的斜率，TC^* 曲线要比 TC 曲线平缓。

因此，随着时间的推移，天然气水合物开采技术将逐步改进并日渐成熟，天然气水合物开采的总成本、边际成本和平均成本都会相应降低。目前开采天然气水合物的高费用问题将得到缓解。

2.3　天然气水合物与常规天然气的未来价格比较

前文中对比了天然气水合物和常规天然气目前的成本，目前天然气水合物的高成本会导致天然气水合物这一能源的价格要高于常规天然气。图 2 显示了天然气水合物价格和常规天然气价格随着时间推移的变化情况。

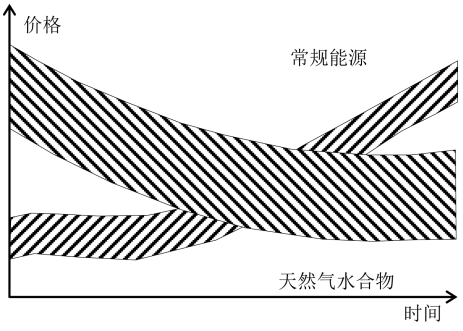

图 2　天然气水合物与常规能源的价格变化趋势

随着对常规天然气需求的持续增加，常规天然气的供应将变得越来越稀缺，由此会带来常规天然气价格的上涨。与此同时，而随着天然气水合物开采技术的改进，天然气水合物开采的总成本、边际成本和平均成本都会相应降低，由此会带来天然气水合物价格的降低。当天然气水合物的价格低于常规天然气价格时，天然气水合物的商业化生产便可能实现。

3　结语

尽管目前天然气水合开采的成本较高，但维护国家能源安全是一个国家能源发展的恒久目标。在维系国家能源供给充足以及保护生态环境的动力支撑和天然气水合物高费用压力下，目前天然气水合物的开采主要由国家的政府部门主导。

另一方面，公司以及企业主要受价格和利润的驱动，由于天然气水合物开采的成本较高，企业的商业开发行为在较长的一段时间内不会出现。今后国家出于能源安全和生态保护方面的考虑而寻求以天然气水合物作为石油天然气替代能源的政府驱动要超过天然气水合物价格的驱动，且随着天然气水合物开采技术的不断成熟以及由此带来的开采成本和价格的降低，国家将继续加大天然气水合物的开发和开采。随着天然气水合物开采成本的降低和价格的降低，在天然气水合物的价格低于常规天然气价格时，天然气水合物的商业化开发便随之实现。

参考文献

[1]　薄玉宝.南海深水油气开发海洋工程方案选择策略探讨[J].中国造船，2015(2)：179－184.

[2]　BOSWELL R，COLLETT T S.Current perspectives on gas hydrate resources[J].Energy & Environmental Science，2011，4(4)：1206－1215.

[3]　JIA Y，ZHU C，LIU L，et al.Marine Geohazards：Review and Future Perspective[J].Acta Geologica Sinica－English Edition.2016，90(4)：1455－1470.

[4]　朱超祁，张民生，刘晓磊，等.海底天然气水合物开采导致的地质灾害及其监测技术[J].灾害学，2017，32(3)：51－56.

[5]　尹聪，兰丽茜，王芳.海洋天然气水合物勘探方法综述[J].海洋开发与管理，2015，32(1)：27－29.

[6]　ZHU C，JIA Y.In-situ Observations of Engineering Geological Environment during Hydrate Production Tests in Deepwater [J].Acta Geologica Sinica－English Edition.2017，91(Z1)：193－194.

[7]　严杰，曾繁彩，陈宏文.日韩海洋天然气水合物勘探研究进展及对我国的启示[J].海洋开发与管理，2015，32(11)：20－27.

[8]　MACDONALD G J.Role of methane clathrates in past and future climates[J].Climatic Change，1990，16(3)：247－281.

[9]　MAX M D.Hydrate resource，methane fuel，and a gas-based economy[C]//Natural Gas Hydrate：In Oceanic and Permafrost Environments.Springer Netherlands，2003：361－370.