

编者按:能源是经济社会发展的重要物质基础,能源安全是国家战略安全保障的基础之一。有限储量的化石燃料的减少,能源需求的不断增长,以及化石燃料燃烧造成的环境污染和温室效应,使 21 世纪的能源面临巨大的挑战,因此世界各国纷纷把可再生能源尤其是生物能源的发展纳入能源的发展战略。生物能源是指利用生物可再生原料及太阳能生产的能源,其开发研究已引起国内外广泛关注,为促进我国生物能源研究的进一步发展,本刊编辑部在谭天伟编委的协助下组织了以下专稿:天然气水合物资源及前景、生物能源的研究现状及展望、生物质液化技术的研究进展、光合菌生物制氢、固定酶法生产生物柴油等。这些文章分别安排在本期“专论与评述”、“技术进展”、“科研与开发”栏目刊出,希望能引起读者的关注。
——本刊编辑部

专论与评述

天然气水合物资源开发现状及前景

樊栓狮 梁德青 陈 勇

(中国科学院广州能源研究所天然气水合物研究中心,广东 广州 510070)

摘要:天然气水合物被认为是 21 世纪的主要清洁能源,也是当今世界科学研究的前沿之一。我国开展天然气水合物研究,对我国宏观能源战略决策、开拓新学科领域和社会可持续发展均有重要理论意义和广阔的应用前景。论述了天然气水合物资源及未来,提出了我国应采取的措施及策略。

关键词:天然气水合物;能源;前景

中图分类号:TE09

文献标识码:C

文章编号:0253-4320(2003)09-0001-05

Development situation and preview of natural gas hydrate resource

FAN Shuan-shi, LIANG De-qing, CHEN Yong

(Research Center of Natural Gas Hydrates, Guangzhou Institute of Energy Conversion,
Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510070, China)

Abstract: Natural gas hydrate which is regarded as a kind of main clean energy for 21st century, is one of the advanced scientific fields in the world. The research on it is of great theoretic significance in China's macro-scopical energy strategic decision-making, exploiting new course of scientific fields and keeping sustainable development and it has also a wide application prospect. A discussion is focused on natural gas hydrate resources and its future, and the measures and policy are proposed for China's research of natural gas hydrate.

Key words: natural gas hydrate; energy; prospect

1 概况

近年来,有关天然气水合物方面的研究已引起各国政府、企业界和学术界的强烈关注,因为它不仅涉及人类生存的资源与环境,而且涉及未来发展的各种新技术。作为一种清洁、优质、高效、低成本和少污染的理想生态能源,天然气水合物将逐渐成为一种重要而清洁的潜在能源。迄今在世界各地(不

包括中国)的海洋及大陆(冻土带)地层中已探明的天然气水合物贮量相当于全球传统化石能源(煤、石油、天然气、油页岩等)贮量的 2 倍左右^[1],总资源量约为 $(1.8 \sim 2.1) \times 10^{16} \text{m}^3$ 。1999 ~ 2000 年日本经钻探证实,在其南海陆坡发现天然气水合物资源,含量巨大。美国在墨西哥湾和东海岸的布莱克海台,西海岸俄勒岗-卡斯凯迪亚水合物脊,经大洋钻探计划(ODP)钻探证实,存在储量巨大的水合物资源。

收稿日期:2003-07-04

作者简介:樊栓狮(1965-),男,博士(后),广州能源研究所首席科学家,博导,研究方向为气体水合物及相关储能应用、空调制冷与热泵节能技术、地热能综合利用、化工分离及相平衡,hydrate@ms.giec.ac.cn。

日本政府计划于 2010 年实现水合物的开发利用;美国政府的 10 年计划中,提出 2015 年实现开发利用目标。目前,美国、日本、加拿大、德国等国家联合在加拿大的马更些三角洲(Mackenzie Delta)进行天然气水合物的开发试验,并取得了重要成果。总之,发达国家正在紧锣密鼓地研究天然气水合物资源的开发和利用,并将其作为未来新能源的开发目标。1999 年以来,中国地质调查局在我国南海北部陆坡开展了针对天然气水合物的高分辨率多道地震和深海地质取样、海底照相等调查工作,圈出天然气水合物地球物理显示标志面积近 2 万 km^2 ,甲烷异常面积约 5 000 km^2 。调查结果表明,我国海域存在丰富的天然气水合物资源,其勘探、开采有利于解决我国未来能源问题,具有重大意义^[2]。随着地球温度受温室效应的影响不断上升,一旦导致地层中的甲烷水合物分解,将会造成恶性循环,严重影响全球的气候条件。但从另一角度看,气体水合物也可对改善环境做出贡献。美国和日本正在研究将工业废气中的二氧化碳富集后,使之在海底(温度 2~4℃)形成水合物^[3]。由于二氧化碳水合物的密度较海水大,因此可达到弃置于海底的目的。

1990 年以来,国际上先后于美国新帕尔茨(1993 年)、法国图卢兹(1996 年)、美国盐湖城(1999 年)和日本横滨(2002 年)召开了 4 届国际水合物学术会议。同时,世界各地也召开了主题鲜明的地区性水合物会议,如:1996 年比利时的 Gent 大学召开了主题为“世界大陆边缘稳定性、气候变化与气体水合物”的国际学术会议;1995、1997 年加拿大、日本组织召开了“第一、二届加拿大-日本联合研究水合物的学术讨论会”;1998 年英国 Keele 大学也成功地主办了“气体水合物:资源? 灾害? 成因?”国际学术研讨会。为了能在开发水合物资源及与之相关的各种新技术的竞争中取得优势,目前美国、加拿大、英国、俄罗斯、法国和挪威等欧美国家和日本均投入了大量人力和物力加强水合物动力学及其新技术的研究,其中美国和加拿大已成立了国家级研究中心。2001 年美国能源部(DOE)支持 4 个国家重点实验室(Brookhaven, Lawrence Berkeley, Lawrence Livermore 和 Oak Ridge)开展天然气水合物研究,力图形成相关技术。许多著名国际期刊都设立了水合物领域专栏,其中一些国际著名刊物,如 Science, Nature, AIChE J 和 J. Am. Chem. Soc 等,近年来所刊登的水合物方面的内容均以水合物结构、热力学、动力学和资源勘察研究为主。

研究和开发天然气水合物资源及其新技术对我国近期和中长期国民经济的发展具有重要意义,也符合我国为优化能源结构,保护生态环境,缓解石油供应不足而提出的“油气并举,上下游并举”的国民经济发展战略。

2 天然气水合物资源与环境

2.1 结构特征

1823 年, Faraday 对气体水合物的组分进行了研究,认为其组成可由 $M \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 表达,其中 M 代表与水分子(主体分子)相组合的外来气体分子(客体分子), n 表示水合物中水分子和外来气体分子数量的比例关系,但是对于 n 的具体数值当时各个学者的结论差别很大,但一致的结论却是 n 必须为整数,而且要符合化学当量关系(stoichiometry)。此外认识到把外来气体分子和水分子联系在一起的是一种比化学键弱得多的分子间相互作用力,即使对于强极性外来分子也没有化学键力存在,这种弱相互作用力为范德华力。

2.2 形成的基本条件

天然气水合物一般在低温高压下形成,主要存在于海底与永久冻土带中。影响天然气水合物稳定带厚度和底界深度的主要因素包括:海平面变化、构造抬升、地温梯度变化、大气或海水温度变化和沉积物加积等,一般认为,漏失油气盆地、板块汇聚边缘流体释放区、陆坡区和底劈发育区等是有利于天然气水合物富集的地区。

2.3 形成过程及机理

天然气是形成天然气水合物的物质基础。国际上的研究表明,天然气水合物的成矿气体主要是微生物气、热解气及其混合气。不同类型的成矿气体具有不同的组分特征。成气作用及其运移富集方式影响天然气水合物的形成机理。例如以微生物气为主的成矿气体往往以“自生自储”方式形成天然气水合物,而以热解气为主的成矿气体则需经运移、富集才能最终形成天然气水合物。同时,由于微生物气的气量相对有限,往往形成分散的小规模的水合物矿藏,若有深部热解气的加入,则可形成大规模的矿床。

Matsumoto R., Waseda 等研究表明,世界上绝大多数天然气水合物均由微生物气组成,只有墨西哥湾、里海、黑海、加拿大 Mallik 等部分地区的水合物为热解气^[4-5]。尽管我国海域已发现不少天然气藏(特别是莺歌海盆地和琼东南盆地),并对其气体类

型做过部分研究,初步成果表明南海北部地区以热解气为主,浅部有部分微生物气的加入,但这些研究主要集中在浅水陆架区,深水陆坡区的研究几乎是空白。

最近,许多学者详细研究水合物产区附近产甲烷的微生物菌的分布特征及其生物地球化学作用,探讨微生物气的成气机理和成气过程,取得了重要进展^[6-9]。国内也对天然气水合物的形成过程及含气量进行了研究,取得了不少进展。

2.4 分布与蕴藏量

目前发现并证实在全球海洋和陆地分布有大量的天然气水合物,主要在海底。已发现全球40多个海域有天然气水合物存在。据初步估测全球天然气水合物的蕴藏资源量为甲烷气 $1 \times 10^{15} \sim 1 \times 10^{17} \text{ m}^3$ (平均 $21 \times 10^{15} \text{ m}^3$),甲烷碳约为10 000 Gt。一些国家逐渐认清了本国的气体水合物资源蕴藏量,加速了勘探开发步伐。美国于1999年6月制定了“美国甲烷水合物多年研究发展项目计划”,旨在为美国2015年进行天然气水合物商业性生产提供必需的科学知识与成果。日本和印度出于资源短缺的压力和对新能源的期望,于1995年分别提出“气体水合物研究发展五年计划”和“国家勘探开发(1995~1999)计划”。德国于2000年3月正式推出未来15年大型地学研究计划,“气体水合物:能源载体和气候因素”研究项目被列入该计划。此外,俄罗斯、加拿大、荷兰、法国、巴西等国在国家或企业公司支持下,气体水合物的研究和开发也都十分活跃。

为了充分了解水合物的形成过程及其资源量进行比较精确的评估,目前国内外利用计算机模拟技术和合成实验开展了相平衡热力学机制的研究,其分析技术和研究内容有了较为实质性的进展^[10-15]。近年来在计算机模拟方面,日本、德国、美国等天然气水合物研究机构,陆续开展了沉积物中天然气水合物的模拟实验工作,国内一些实验室也开展水合物的实验研究,如中国科学院广州能源研究所天然气水合物研究中心樊栓狮研究员的科研团队^[16-20],石油大学(北京)陈光进教授的研究小组等^[21]。

2.5 环境效应

气体水合物仅仅在一种低温和(或者)较高压力状态下才是稳定的,同自然环境条件处于十分敏感的平衡之中。当赋存条件因种种原因(如气候变化、构造活动、地震、火山甚至人为开采等)发生变化时往往能够导致气体水合物的失稳和释放,有可能造

成海洋地质灾害或影响全球气候变化,引发强烈的环境效应。研究表明,天然气水合物因失稳作用发生分解释放的甲烷气以每年0.9%的速率进入大气,甲烷作为一种温室气体其温室效应是 CO_2 的20倍^[3],这可能是加剧全球气候变暖并使海平面上升的重要因素。区域构造环境决定了天然气水合物形成与富集的沉积场所,各种断裂、底辟、泥火山直接制约着气源的强弱和天然气水合物的形成。含天然气水合物层的主要沉积特征为沉积速率大,多富集于各类三角洲与重力流沉积体系,砂泥比相对较为适中和孔隙度较大。

3 目前存在的问题及对未来的影响

在水合物的基础理论上仍存在着许多悬而未决的问题:

(1)由于对多组分天然气形成水合物过程的组成分馏效应及机理不清,对多孔介质中水合物生成的相平衡规律不明,所以,人们还不能充分了解天然介质条件下水合物的形成过程;

(2)缺少对多孔介质中天然气水合物生成/分解过程的热、质传递过程的基本数据;

(3)需要建立综合的计算模型,把温度、压力、多相多组分影响下天然气水合物形成分解过程与富甲烷流体的迁移、沉积压实、有机质向甲烷转化的生物地球化学等过程耦合在一起;

(4)缺乏沉积物中水合物导热系数、声波速率、电导率等物性参数;

(5)关于拟海底反射层(BSR)的成因及其与天然气水合物、游离气的相互关系尚未形成共识,如何区分真假BSR以及如何识别无BSR的天然气水合物目前还没良策;

(6)用地震方法估算天然气水合物的蕴藏量和分布规律处在初步研究阶段,制约人们对水合物资源做出比较合理可靠的评价;

(7)对天然气水合物的物理和化学性质的认识和了解还不深入,尤其是对海底沉积物中水合物形成和分解动力学、物化特性的研究还只是刚刚开始。这些问题的存在,直接影响了对天然气水合物关键科学问题的认识和对我国天然气水合物资源前景的评估,需要进一步研究解决。

对我国的作用及影响主要是:

(1)天然气水合物潜在新能源的开发利用可有效减轻石油需求增长过快给国家经济能源安全和国家经济安全造成的巨大压力。尽早开发利用天然气

水合物资源,对于减轻我国油气资源不足造成的能源安全、国家经济安全的压力有重要的政治意义和战略意义。此外,加速开展我国海域天然气水合物的基础理论研究,有效指导天然气水合物专项调查与评价,在维护我国海域主权权益方面也有重要的战略意义。

(2)加快天然气水合物资源的开发利用有利于改善我们赖以生存的环境。改善能源结构,减少大气污染,保护环境是我国 21 世纪可持续发展战略的重要组成部分。天然气水合物可燃成分主要是甲烷,它不仅储量巨大,而且是一种洁净的能源。因此加速天然气水合物的研究和勘查,早日开发利用,对保护环境,实现可持续发展具有重要的现实意义。

(3)天然气水合物和常规油气田生产密切相关。解决水合物堵塞井筒、油气田地面处理装置和输气管线这一长期困扰油气生产和运输的棘手问题,亦即解决水合物的抑制问题。开发经济、环保的水合物抑制剂(动力学抑制剂)来代替传统抑制剂(主要是热力学抑制剂,耗量大、污染环境),对保障油气资源的开采与输送(尤其是“西气东输”)具有重要意义。另外,水合物法高密度固态储存天然气技术是目前国内外较为关注的应用技术之一,很有可能在未来承担起天然气大规模运输(代替 LNG)和调峰的重任,可提高储存安全性、降低储器制造成本和过程能耗。

(4)利用水合物独特的化学、物理特征可以开发其他高新技术。如水合物法淡化海水、分离低沸点气体混合物等。可见气体水合物给人类带来了许多问题,也给科学技术和人类自身的发展带来了许多机遇。所有基于水合物的技术都有一个共性问题,即如何快速形成水合物。

总之,国内外天然气水合物的研究具有广阔的前景,但人们对海洋天然气水合物认识还相对肤浅,特别是对自然界的天然气水合物形成和各种响应机制有待进一步研究。

4 我国天然气水合物研究应采取的策略

能源特别是油气资源是国民经济的物质基础,是维持我国经济建设可持续发展和国家安全的重要保障。天然气水合物资源巨大,但如何开采和利用天然气水合物,国际上目前还无成功经验。为此,我国的天然气水合物研究宜采取以下策略。

4.1 充分认识天然气水合物作为未来清洁能源的重要性

对世界与我国的主要能源构成情况分析表明,

人类的第四代能源将是常规与非常规天然气,而天然气水合物则是未来一种很有潜力的能源载体。应从全球发展的角度出发,结合我国国情,将天然气水合物研究与开发作为一个综合系统的科学技术工程,积极、稳妥、分层次、分阶段地开展前瞻性基础理论研究和科技发展研究,在此基础上确定中国天然气水合物的资源量和分布,最终实现天然气水合物资源的安全商业性开采,逐步改善我国能源结构。研究与发展新一代优质、洁净、价廉的能源资源,对促进我国经济增长和社会进步,保障国家安全,改善环境质量具有重要意义。

4.2 制定天然气水合物研究的发展战略目标

基于维护国家海洋权益、促进国民经济增长、确保国家能源安全、保障人类生存环境等国家目标考虑,我国应制定天然气水合物研究的发展战略,建立天然气水合物基础理论体系,建立天然气水合物资源评价体系,开发天然气水合物的勘察、识别技术,定量评价天然气水合物在全球碳循环和全球气候变化中的作用,发展商业生产天然气水合物的技术与工艺,发展天然气水合物安全生产的工程技术,建立海底灾害预警与防治技术体系等科学目标,并呼吁尽快制定国家天然气水合物研究与开发计划,同时,我国应积极参加相关的国际合作研究项目,通过合作研究和学术交流,尽快缩短与发达国家在该领域研究的差距。

我国油气地质研究和勘探开发工作涉及若干系统、许多部门和单位,而天然气水合物的勘查是当今世界上地质科技前沿工作,更需要各方面的密切配合。我国可效仿美国、日本等国的做法,成立全国性的天然气水合物研究协调机构,以调配专家、筹集经费、制订计划、分解任务、汇编资料、提供咨询、编制报告。协调机构应组织专业对口的、对天然气水合物已做过初步研究并有一定成绩的单位 and 专家参加项目内的工作。忌讳一哄而上,低水平重复。

4.3 集中力量、选取有限的研究目标,力争在一些研究方向上取得突破

关于我国陆上和海域是否有天然气水合物藏问题,地质学家内部尚有某些不同看法。持某种否定看法的专家还是有一定理论依据的,这种意见或许能使天然气水合物研究者更科学地进行预测,在投资方向上更加理智和准确。过去,国内对可能存在天然气水合物地区的地质研究水平很低,如缺乏青藏高原多年冻土层的厚度和地温梯度资料,缺乏南海等海区的地热及水温资料。这些都影响着对天然

气水合物稳定存在条件的预测研究。所以,只有确定研究区,立项开展工作,才能有所发现,才能做出结论。

近年来,在“863”计划或国家基金委支持的个别项目中开展了如采集技术、物理模拟和数值模拟技术、地震识别技术和资源量估算技术等研究,对我国一些海域天然气水合物的资源量进行了初步预测。如国家海洋局第二研究所在综合分析东海大量的地质资料,如地形、地貌、沉积物分布、有机质分布、热流场、构造特征等地质资料,并通过利用多道地震等对地球物理数据的特殊处理,识别出地震剖面上的BSR基础上,经综合研究取得初步结果,表明我国东海冲绳海槽附近的地质特征具备天然气水合物形成与分布的有利条件,估算天然气水合物资源量含天然气约 $2.4 \times 10^{13} \text{ m}^3$;广州海洋地质调查局在南海西沙海槽地区进行了天然气水合物试调查,测线500 km,发现地震剖面上出现BSR反射波,初步估算南海陆坡和陆隆(面积约 100 km^2)的天然气水合物的资源量可达600亿~700亿t油当量。中国科学院广州能源研究所等有关单位也开展了相关的地质、地球化学以及模拟实验研究。此外,石油大学、大庆石油开发研究院、中国科学院广州能源研究所等单位在天然气水合物的实验室模拟技术和管道中天然气水合物的探测和清除技术研究方面,如实验装置、甲烷等气体水合物的生成条件、热力学及动力学模型、气体混合物分离、静态和动态水合物生成模拟实验、水合物动力学抑制剂的合成等研究已取得重要成果。中国科学院广州能源研究所还在气体水合物作为热交换(蓄冷、蓄热)材料、与全球环境保护相关的技术以及基于水合物性能特点的其他新技术方面,正在积极进行研究。

4.4 加强国际合作,学习先进技术

美国、加拿大、俄罗斯、日本和印度等在勘探天然气水合物方面已有成功的经验和配套的技术,特别是在永冻区和深海钻探方面有许多成熟的技术工艺。因此,加强国际合作,学习先进技术,可使我们少走弯路,事半功倍。

天然气水合物是一种洁净的能源,用它来代替石油可减轻环境污染,具有明显的社会效益。天然气水合物的开发和使用将带来能源结构的重要改变,在能源、交通、环保、电力及其他领域有着广阔的应用前景和市场前景。研究成果可为开发各种基于水合物的新型技术提供理论基础,天然气水合物

新型储运技术可对经济地解决天然气输送技术提供支撑点,对整个“西气东输”也将具有重要意义。

参考文献

- [1] Kvenvolden K A. [J]. US Geological Survey Professional Paper, 1993, 1570:555 - 561.
- [2] 姚伯初. [J]. 热带海洋学报, 2001, 20(2): 20 - 28.
- [3] Saji A, Yoshida H, Sakai M, *et al.* [J]. Energy Convers Manage, 1992, 33(5 - 8): 643 - 649.
- [4] Matsumoto R, Uchida T, Waseda A, *et al.* In Proceedings of ODP[C]. College Station TX: ODP Science results, Texas A&M University, 2002, (Vol 164), 13 - 28.
- [5] Waseda A, Uchida T. In Proceedings of the Fourth International Conference on Gas Hydrates[C]. Yokohama, 2002.
- [6] Paull C K, Ussler W III, Borowski W A. [J]. Ann N Y Acad Sci, 1994, 715:392 - 409.
- [7] Boetius A, Ravenschlag K, Schubert C J, *et al.* [J]. Nature, 2000, 407: 623 - 626.
- [8] Brian D, Lanoil R S, Myron T, *et al.* [J]. American Society for Microbiology, 2001, (11): 5143 - 5153.
- [9] 狄永军, 等. [J]. 地球科学进展, 2003, 18(1): 138 - 142.
- [10] Buffett B A, Zatsepina O Y. [J]. Marine Geology, 2000, 164: 69 - 77.
- [11] Dimo Kashchiev, Abbas Firoozabadi. [J]. Journal of Crystal Growth, 2003, 241: 220 - 230.
- [12] Holder G D, Mokka I P, Warzinski R P. [J]. Chemical Engineering Science, 2001, 56: 6897 - 6903.
- [13] Klauda J B, Sandler Stanley I. [J]. Chemical Engineering Science, 2003, 58: 27 - 41.
- [14] Clarke M A, Raj B P. [J]. Chemical Engineering Science, 2001, 56: 4715 - 4724.
- [15] Koh C A, Westacott R F, Zhang W, *et al.* [J]. Fluid Phase Equilibria, 2002, 194 - 197: 143 - 151.
- [16] Fan S S, Liang D Q, Guo K H. [J]. J Chem Eng Data, 2001, 46(4): 930 - 932.
- [17] Fan S S, Chen G J, Ma Q L, *et al.* [J]. Chemical Engineering Journal, 2000, 78: 173 - 178.
- [18] Liang Deqing, Guo Kaihua, Wang Ruzhu, *et al.* [J]. Fluid Phase Equilibrium, 2001, 187 - 188: 61 - 70.
- [19] Sun Zhigao, Fan Shuanshi, Guo Kaihua, *et al.* [J]. Fluid Phase Equilibria, 2002, 198(2): 293 - 298.
- [20] Sun Zhigao, Fan Shuanshi, Guo Kaihua, *et al.* [J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2002, 47(2): 313 - 315.
- [21] Chen G J, Sun C Y, Guo T M. [J]. Fluid Phase Equilibria, 2003, 204: 101 - 117. ■