



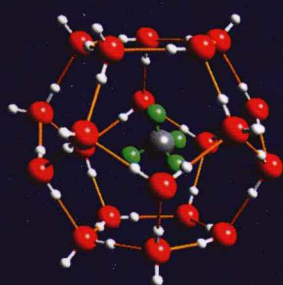
中国石油勘探开发研究院出版物

天然气水合物

——能源资源潜力及相关地质风险

[美] T. 科利特 A. 约翰逊 C. 纳普 R. 博斯韦尔 编
邹才能 胡素云 陶士振 等译

NATURAL GAS HYDRATES
— ENERGY RESOURCE
POTENTIAL AND
ASSOCIATED GEOLOGIC
HAZARDS (AAPG Memoir 89)



GAS HYDRATE

天然气水合物 (Natural Gas Hydrate) 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。因其外观象冰一样而且遇火可燃烧,所以又被称作“可燃冰”或者“固体瓦斯”和“气冰”。

石油工业出版社

天然气水合物

——能源资源潜力及相关地质风险

邹才能 胡素云 陶士振 杨 智
李登华 吴松涛 胡俊文 林森虎 等 译
翟秀芬 高晓辉 范建玮 庞正炼

石油工业出版社

内 容 提 要

本书收录了 39 篇关于天然气水合物勘探的研究论文。内容包括天然气水合物勘探技术及研究领域的回顾,各地区海洋及陆地天然气水合物研究成果的总结,天然气水合物的实验室和模拟研究成果。

本书可供从事天然气勘探的科技人员使用,也可作为油气资源勘探的领导决策人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

天然气水合物:能源资源潜力及相关地质风险/[美]科利特著;邹才能等译.
北京:石油工业出版社,2012. 10

书名原文:Natural Gas Hydrates:Energy Resource Potential and Associated
Geologic Hazards

ISBN 978 - 7 - 5021 - 8903 - 7

I. 天…

II. ①科…②邹…

III. 天然气水合物 - 文集

IV. P618.13 - 53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 002869 号

Translation from the English language edition: “Natural Gas Hydrates – Energy
Resource Potential and Associated Geological Hazards” by T. Collett, A. Johnson,
C. Knapp, and R. Boswell (editors)

Copyright © 2009

By the American Association of Petroleum Geologists

All Rights Reserved

本书经 AAPG 授权翻译出版,中文版权归石油工业出版社所有,侵权必究。

著作权合同登记号图字:01 - 2012 - 9187

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:www. petropub. com. cn

编辑部:(010)64523539 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2012 年 10 月第 1 版 2012 年 10 月第 1 次印刷

787 × 1092 毫米 开本:1/16 印张:27. 25

字数:692 千字

定价:160. 00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

版权© 2009

美国石油地质学家协会 版权所有

ISBN 13:918 - 0 - 89181 - 370 - 5

美国石油地质学家协会授予权限为本刊物的单影印本仅个人使用。对其他项目的影印本以任何形式出版(硬拷贝,数字/电子扫描或其他编成计算机可读格式/或其他传播形式)为个人或公司使用者,将由版权结算中心收取适当费用并提供授权。地址:马萨诸塞州 01923,丹佛斯镇,红木车道 222 号。网址:<http://www.copyright.com>。对于版权结算中心授权之外发生的其他情况,请致信 permission@aapg.org。

美国石油地质学家协会(AAPG)编辑:格雷琴 M. 吉利斯

美国石油地质学家协会地球科学部主任:詹姆斯 B. 布兰肯西普

封面:燃烧的合成(人造)甲烷水合物,照片由美国能源部提供。

本书原著可从以下出版机构获得:

美国石油地质学家协会书店

邮政信箱 979

美国俄克拉荷马州塔尔萨市 74101 - 0979

电话:1 - 918 - 584 - 2555 or 1 - 800 - 364

- AAPG(仅限美国)

电子邮件:bookstore@aapg.org

网址:www.aapg.org

加拿大石油地质家协会

600,640 - 8th Avenue S. W.

加拿大阿尔伯塔省卡尔加里市 T2P 1G7

S. W. 第八大街,600,640

电话:1 - 403 - 264 - 5610

传真:1 - 403 - 264 - 5898

电子邮件:reception@cspg.org

网址:www.cspg.org

地质学会出版社

英国巴斯市 BA13JN 布莱斯米尔巷

布莱斯米尔企业中心,第七单元

电话: +44 - 1225 - 445046

传真: +44 - 1225 - 442836

电子邮件:sales@geolsoc.org.uk

网址:www.geolsoc.org.uk

东西联营私人出版有限公司

印度新德里市 110 - 002,

锡尔河 Gaaj, Ansari 路, G - 1/16

电话: +91 - 11 - 23279113

传真: +91 - 11 - 23260538

电子邮件:affiliate@vsnl.com

致谢(一)

美国石油地质学家协会(以下简称 AAPG)希望对《天然气水合物——能源资源潜力及相关地质风险》慷慨资助的以下部门表示感谢:美国能源部国家能源技术实验室、AAPG 基金会和 AAPG 能源矿产分会。

他们的资助应用于出版物的生产成本,从而直接减少了书籍的购买价格,使广大的读者群收益。

致谢(二)

本专题报告的编辑们首先要感谢 2004 年 9 月在加拿大哥伦比亚省温哥华市举行的、关于“天然气水合物:能源资源潜力及相关地质风险”的海德伯格学术研讨会(Hedberg Research Conference),AAPG 赞助的此研讨会是本专题汇编工作的开端。这次会议的成功举办在很大程度上归功于 AAPG 教育部门的戴比·布恩斯特拉(Debbi Boonstra)的组织能力。会议的资金支持由墨西哥海湾天然气水合物联合工业项目、斯伦贝谢公司以及美国能源部提供。AAPG 能源矿产分会也是本次会议的资助方之一,它长期支持天然气水合物研究和开发等问题。加拿大石油地质学家协会和加拿大地质调查局也对本次会议组织作出了贡献。

我们还要感谢 AAPG 出版委员会,它接受了我们关于天然气水合物专题报告的提议。我们也非常感激贝弗莉·莫利纽克斯(Beverly Molyneux)以及 AAPG 技术出版集团对我们的支持和指导。特别感谢 AAPG 产品部总经理弗朗西斯·怀特赫斯特(Frances Whitehurst)所做的努力。这一专题报告的出版还按照 AAPG 能源矿产分部的安排,得到了美国能源部的财政支持和 AAPG 基金会的奖金。

作为本书的编辑,我们想对 150 多名作者表示极大的感谢,他们对本专题贡献了自己的研究成果,正是他们的智力成果和支持使专题的汇编工作受到启发。我们还要向同事表示感谢,他们为本专题论文的 authors 们提供了超过 100 位的独立技术审读人员,万分感谢他们的支持、建议和建设性批评意见。

站在个人角度,我们还要感谢支持我们汇编工作的雇主和公司的支持,包括美国地质调查局能源资源项目、国际水合物能源、南卡罗来纳大学和美国能源部国家能源技术实验室。

前言

2004年9月,美国石油地质学家协会(以下简称AAPG)在加拿大哥伦比亚省温哥华市召开了名为“天然气水合物:能源资源潜力及相关地质风险”的海德伯格学术研讨会(Hedberg Research Conference)。这次会议的主要目标旨在批判地审视控制天然气水合物分布及其稳定性的地质参数;评估储存于天然气水合物的天然气体积量;评估确定商业性的天然气水合物远景资源量的勘探方法;确定从天然气水合物中经济地生产天然气所需的技术;评估由于天然气水合物的分布导致海洋斜坡稳定的、可能的地质灾害;并分析天然气水合物对钻井安全的影响。本次会议有超过13个国家共120名受邀人员前来参加,反映了多个国家对天然气水合物的兴趣。75名美国的参会者中包括了29名政府机构人员、26名学术界成员以及工业界的20名成员。47名美国以外的参会者也有类似的不同背景。会议有43个口头报告,46块展板展示,3个正式的讨论会场,和一场由马兰·唐尼(Marlan Downey)主讲的名为“通向天然气水合物美好远景之路的障碍与问题”的演讲组成。会议以一场天然气水合物地质和能源资源潜力的专题讨论会作为结束。

在讨论和专家讨论会上,不同参会者有一个同感,即在一些关键问题上的发言,诸如自然界天然气水合物的形成、分布和稳定性等,取得了重要进展。作为与常规含油气系统的类比,天然气水合物含油气系统的概念得到了认可。事实上,目前应用复杂的数值模拟可以使天然气水合物含油气系统各要素(如烃源岩、运移、圈闭和形成时间)得以评估和量化。然而,有一个日渐形成的认识那就是一些导致海洋中形成天然气水合物的地质过程可能与多年冻土环境下的过程有所不同。对于海洋天然气水合物勘探,一些机构表达了对更有效的地球物理方法日益增长的需求。这些方法将允许直接探测和评估天然气水合物气藏。最后,得出的结论是,仅靠地震似海底反射(BSRs)的制图方法来评估海洋天然气水合物的时代正接近尾声。

正如会议上讨论的,从21世纪初期的几项研究预测,圈闭于全球范围的天然气水合物气藏中的气体体积量要明显小于一些广泛引用的早期预测值。但综合所有的预测值来看,天然气水合物中圈闭的天然气体积量可能超过了现有可采气藏所圈闭的总量。突出的一点是,现有的预测没有一个预测出到底有多少天然气能从全球天然气水合物气藏中开采出来;而且结论是,除了预测现有的原地天然气水合物地质资源量以外,还有很多工作要做。行业代表也表示,在 $1 \times 10^{12} \sim 5 \times 10^{12} \text{ft}^3$ (大约 $0.03 \times 10^{12} \sim 0.04 \times 10^{12} \text{m}^3$)的范围内,确定相对小型、但是定义清晰的天然气水合物气藏是重要的,它们是可以被钻探、测试,甚至是可开采的。马兰·唐尼(Marlan Downey)鼓励听众“大胆思考”,让听众把天然气水合物的开采看作是一种全球意义的、潜在的思考模式转换。

许多参会者对Mallik 2002天然气水合物生产研究探井项目的结果作了汇报。Mallik 2002天然气水合物研究项目的测试和建模工作是第一次对天然气水合物气藏生产情况的反应做理性评估。参会者认为,行业努力的一个重要目标应该落实到文件,阐明从水合物中生产商业性气量是可能的。值得注意的是,两项对阿拉斯加北部大陆坡和加拿大北极圈的天然气水合物产气运输能力的研究,表明了类似的经济价值,而且天然气运输成本是4~5美元/1000ft³ (约28m³) (2004)。一些参会者指出,像美国之前煤层气生产的早期阶段一样,天然气水合物生产

可能需要政府的刺激措施。但从温哥华会议的讨论中,得出更重要的结论是需要一个强有力的声明,我们需要更多专用和延长的现场生产测试,来评估天然气水合物的最终资源潜力。

会议中,讨论最活跃的问题集中在与天然气水合物相关的潜在地质危害,尤其是大陆坡稳定性问题(包括自然和人为诱发的)。在这些讨论中,其中一个主要结论是,整理归档实际由天然气水合物诱发的钻井和完井问题的案例历史,需要人们做更多的工作。

想获取更多海德伯格学术研讨会上有关天然气水合物的信息,请查看 AAPG 网站 <http://www.aapg.org> 的“教育”版块,在会议论文集中刊登的所有扩展摘要发布在 AAPG 网站上。

随着海德伯格学术研讨会在温哥华的延续,会议组织者、这次撰写专题报告的编辑们与 150 多名作者及共同作者一同工作,准备天然气水合物专题报告的汇编工作。本出版物遵从海德伯格会议目标;然而,其内容上扩展包括了自然界中天然气水合物的各个方面。这个调查报告包括了 39 项独立的研究成果,范围从长篇的专题总结到短篇的焦点研究性论文。专题报告分两部分出版:所有完整的研究论文的电子版放在了一张 DVD 中;本刊印刷部分包括摘要和每一篇文章的一些关键数据图表,随附一份天然气水合物的技术审读的完整副本。

本专题报告的数字部分已经被编排成一系列的专题栏目,其第一篇(第 1 章)是天然气水合物的技术回顾,在这一篇中,本专题报告的作者全面回顾了天然气水合物含油气系统组成的各要素,分析了尚在进行的和最近完成的、在海底和北极永久冻土层两种环境中的、全球天然气水合物的地质和资源研究,并且回顾了天然气水合物生产研究和模拟工作。

本专题报告数字版第二部分包含 2 篇附加的回顾性文章,描述了美国和日本国家级天然气水合物研究项目的成果(第 2—3 章)。海洋天然气水合物部分包含 17 篇稿件(第 4—20 章),引人注目的一篇是日本国家天然气水合物项目研究成果的总结。这一部分还包括一些研究墨西哥湾、白令海及沿北美东西部大陆边缘的天然气水合物分布的地质和地球物理性质的稿件。其他稿件则讨论了挪威西海岸外海及新西兰和台湾近海的天然气水合物。北极陆地天然气水合物方面的稿件包括 9 篇,都是讨论阿拉斯加北坡或者加拿大马更些河三角洲的天然气水合物分布。5 篇与北极有关的稿件(第 25—29 章)总结了 2003—2004 年由阿纳达科领导在阿拉斯加北部天然气水合物钻探工作的成果。

本专题报告最后两部分讨论天然气水合物的实验室和模拟研究。8 篇实验室稿件(第 30—37 章)集中分析从自然界中获取的或者在实验室中制造的天然气水合物样本。实验室稿件中对测量的讨论涉及范围很广泛,从描述沉积物中的天然气水合物性质,到大量物理性能测试包括热性能、气—水—水合物系统的渗透性、声学 and 机械力学性质,以及热力学和动力学控制天然气水合物的稳定性和分离的特征描述。2 篇水合物模拟的研究(第 38—39 章)也分析了水合物相变的动力学和海洋沉积物中水合物的形成。

本专题报告的审读和编辑过程遵行 AAPG 制定的指导方针,按照要求对每一篇稿件进行至少两次技术审读和额外的编辑审读。每一篇论文还经过 AAPG 的审查以求语法正确、格式规范。应该承认,海德伯格天然气水合物研究会议是在四年前举办的。并且,这份出版物的首批手稿已于三年多前准备好并提交。这两个事实让人质疑这份出版物的时效性。对此,编者和作者通力合作,确认过时的材料,并按需更新每一份手稿。我们相信,我们所采取的编辑标准以及作者们在更新其手稿时所作的工作已经解决了这份出版物的时效性问题。我们也承认,从平均长度来说,这份出版物中的手稿在某些情况下要长于大多数 AAPG 报告。然而,我

们难得一次的机会将一些重要的、不会轻易在别的地方发表的天然气水合物研究项目的全面回顾性文章纳入本专题报告中。

考虑到世界范围内对天然气水合物兴趣的剧增,我们相信这份对天然气水合物地质全面论述的专著会受到天然气水合物研究团体和正在北极和深海环境中工作的勘探与开发地质学家的欢迎。正如已经强调过的,这份出版物主要沿袭 2004 年海德伯格天然气水合物研究会议的资源评价主题,并增加了与天然气水合物有关的地质灾害的重要内容,这也是活跃在深海和北极环境中的能源工业兴趣所在。

致 读 者

本刊物是美国石油地质学家协会(AAPG)一贯努力,为其会员提供数字版和印刷版结合的最佳范例。专题报告 89,《天然气水合物——能源资源潜力及相关地质风险》由两部分组成。

这 39 篇论文的扩展摘要印刷出版。在本书封底内页附有本书的只读性光盘(CD-ROM),囊括了整个 39 篇论文的全文。扩展摘要和论文全文都是全彩色的。

数字版和印刷版两种格式使得作者有更大的篇幅和色彩范围,并提供给读者更多样化的使用内容。例如,数据图表可以直接用于制作幻灯片或是微软 PPT 展示。每一篇论文可以很容易地被打印出来为日后阅读,而且支持关键词搜索。

最后,本刊这种格式使得 AAPG 可以灵活地出版某一篇,以吸引特殊兴趣的、更广泛的读者。

译者的话

近年来,随着我国国民经济的持续快速发展,能源供不应求与之矛盾日益突出。目前我国石油进口量已超过总消费量的 50%,因此,拓展未来油气勘探新领域迫在眉睫。天然气水合物被认为是 21 世纪化石燃料的重要替代资源,勘探潜力大,开发前景广阔,已日益引起世界各国研究者及各海洋国家的高度重视。天然气水合物是天然气的一种载体,属非常规天然气,广泛分布于全球海洋和极地的广大地区,其所包含的天然气储量为全球常规天然气储量的几十倍,约是当前所有煤、石油、天然气总含碳量的 2 倍。在标准状态下,每一体积甲烷天然气水合物可产生约 164 倍体积的甲烷气。

天然气水合物目前还处于资源调查和技术攻关阶段,尚未实现工业化开发。世界各地已有 120 多处发现天然气水合物,主要分布于大陆边缘陆坡区海底和永久冻土带。天然气水合物资源量约为 $0.1 \times 10^{16} \sim 2.1 \times 10^{16} \text{ m}^3$,相当于常规天然气资源量的 2.1 ~ 44.6 倍。目前,天然气水合物资源量估算差异很大,普遍认可的是 $3000 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

中国海域蕴藏有丰富的天然气水合物资源,具有天然气水合物形成所需温压条件的主要是南海(南海陆坡面积大于 $120 \times 10^4 \text{ km}^2$)和东海(东海陆坡即冲绳海槽西坡面积约为 $6 \times 10^4 \text{ km}^2$)。2009 年,国土资源部在我国青海省祁连山南缘永久冻土带成功钻获天然气水合物实物样品,第一次在中低纬度冻土区发现天然气水合物。金庆焕等(2006)预测南海海域的天然气水合物资源量为 $69.31 \times 10^{12} \text{ m}^3$,预测东海海域的天然气水合物资源量约为 $3530 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。极地—冻土带、陆缘外围和海域,包括中国的东海和南海都是未来天然气水合物勘探的重要领域。

适宜的高压低温条件下,天然气和水两种常见物质就组合成像冰一样的可燃物质。海洋和极地的广大地区都满足天然气水合物生成的条件,大量的现场研究业已表明,天然气水合物广泛分布于永久冻土带和陆缘外围的海底沉积物中。通常认为,全球 98% 的天然气水合物资源分布在海底沉积物中,只有 2% 的分布在陆地冻土层中。

全球极地—永久冻土带地区(北极、南极和青藏高原)的陆地面积为 $0.11 \times 10^8 \text{ km}^2$,天然气水合物资源量在 $1.4 \times 10^{13} \sim 3.4 \times 10^{16} \text{ m}^3$ 之间(Trofimuk 等,1977;Meyer,1981;MacDonald,1990)。青藏高原多年冻土带面积广阔,占高原总面积的 61%,世界多年冻土面积的 7%,达 $1.588 \times 10^6 \text{ km}^2$,陆相盆地和海相盆地都具有良好的生油气条件,具有天然气水合物形成的条件,有可能形成具有一定规模的天然气水合物聚集,其中羌塘盆地、可可西里陆相盆地区、祁连山多年冻土区等都是较好的勘探靶区(黄朋等,2002;陈多福等,2005;祝有海等,2006)。

陆缘外围包括被动与活动大陆边缘,全球海洋天然气水合物的资源量在 $0.2 \times 10^{15} \sim 7.6 \times 10^{18} \text{ m}^3$ 之间(Trofimuk 等,1977;Meyer,1981;Milkov 等,2003;MacDonald,1990),主要分布在:① 分隔的大洋外部包括主动大陆边缘或被动大陆边缘地区;② 深水湖泊之中;③ 大洋板块的内部地区。例如西太平洋海域的白令海、鄂霍茨克海、千岛海沟、日本海、日本四国海槽、日本南海海槽、冲绳海槽、台湾西南部海域、台湾东部海域、环南海的东沙海槽、西沙海槽、南沙海槽与南沙海域、苏拉威西海、澳大利亚西北海域及新西兰北岛外海、北极的巴伦支海和波弗特海、南极的罗斯海和威德尔海、内陆的黑海和里海等等。

天然气水合物的能量密度高、杂质少、储量规模大,是一种洁净型能源资源。勘探开发天

然气水合物,增加天然气产量,可以逐步改变中国能源结构现状,同时也可以减少大量燃煤造成的环境污染,具有广阔的勘探前景。

本书内容共 39 章,包括天然气水合物勘探开发概览、成因机理、实验研究、地球物理预测技术等等,其中,部分有代表性、重要的篇章翻译了全文,其余翻译的均为扩展摘要。本书的翻译工作,是在各位翻译、校译人员的共同努力下完成的。本书封面、版权页、致谢、前言等由邹才能、胡素云、陶士振翻译,范建玮女士对全书进行了系统的校订工作。

天然气水合物是中国继致密油气、煤层气、页岩气之后的后备领域。为推动天然气水合物工业发展,普及和推广相关理论、技术和方法,特将该书译为中文,供科研院所、高校、油公司等相关研究人员参考。由于水平有限,译文中错误和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

目 录

第一章	天然气水合物:回顾	(1)
第二章	美国能源部天然气水合物研究项目概况(2000—2005)	(75)
第三章	日本南海(Nankai)海槽东部甲烷水合物产状及分布;日本东海至熊野滩 (Tokai-oki—Kumano-nada)甲烷水合物钻探项目的调查结果	(83)
第四章	运用多分量地震技术评价流体—气体驱排系统地质特征与天然气水合物系统: 墨西哥湾	(103)
第五章	墨西哥湾北部似海底反射层(BSR)的地震与热力特征	(122)
第六章	利用海洋声学和地球物理技术监测墨西哥湾北部因天然气水合物引起的海底 不稳定性问题	(127)
第七章	松软沉积物中的裂缝可以储存大量天然气水合物吗?	(130)
第八章	为什么在白令海盆地常见水合物相关的速度—振幅异常构造:一个假设?	(134)
第九章	白令海速度—振幅异常:探索天然气的分布与天然气水合物的指示物	(136)
第十章	无证据显示布莱克岭(Blake Ridge)坳陷内有增强的甲烷流	(141)
第十一章	评估卡斯卡底古陆(Cascadia)边缘天然气水合物饱和度和非均质性:基于大洋 钻探项目 204 航次随钻测井测量值	(143)
第十二章	基于岩心样品确认的甲烷水合物分布及饱和度	(163)
第十三章	海相与陆相砂质沉积物中天然气水合物的甲烷气藏和高浓度区	(178)
第十四章	日本南海海槽甲烷水合物沉积层的温度监测结果	(189)
第十五章	北卡斯卡底(Cascadia)边缘温哥华岛近海天然气水合物	(192)
第十六章	斯托瑞加滑坡体(Storegga Slide)天然气水合物系统的多分量地震研究	(196)
第十七章	新西兰峡湾(Fjordland)天然气水合物区的地震特征	(199)
第十八章	新西兰希库朗伊边缘(Hikurangi)一个高流量甲烷区内似海底反射强度的变化	(202)
第十九章	基于密集地震反射调查研究台湾西南近海似海底反射层形成的构造控制因素	(206)
第二十章	与未固结海洋沉积物相关的天然气水合物系统的岩石物理模型	(210)
第二十一章	加拿大马更些河(Mackenzie)三角洲 Mallik 2L-38 天然气水合物研究井 的垂直地震、表面地震和测井数据集成	(213)
第二十二章	阿拉斯加州北坡天然气水合物和游离天然气有利区带的地震属性分析	(216)
第二十三章	阿拉斯加州北部 Milne Point 地区天然气水合物地震勘察及相关游离态 天然气有利区带	(230)
第二十四章	阿拉斯加北坡烃类气体组成及天然气水合物的成因	(258)
第二十五章	阿拉斯加北部斜坡萨加万纳克托克组(Sagavanirktok)、王子溪组(Prince Creek)和斯奈德悬崖组(Schrader Bluff)含水合物潜力储层沉积物岩心	

	的特征:第一部分 项目总结和岩心地质描述	(273)
第二十六章	阿拉斯加北部斜坡萨加万纳克托克组(Sagavanirktok)、王子溪组(Prince Creek)和斯奈德悬崖组(Schrader Bluff)含水合物潜力储层沉积物岩心的特征:第二部分 孔隙度、渗透率、颗粒密度和体积模量岩心研究	(282)
第二十七章	阿拉斯加北部斜坡萨加万纳克托克组(Sagavanirktok)、王子溪组(Prince Creek)和斯奈德悬崖组(Schrader Bluff)含水合物潜力储层沉积物岩心的特征:第三部分 岩心电阻率研究	(327)
第二十八章	阿拉斯加北部斜坡萨加万纳克托克组(Sagavanirktok)、王子溪组(Prince Creek)和斯奈德悬崖组(Schrader Bluff)含水合物潜力储层沉积物岩心的特征:第四部分 岩心核磁共振研究	(330)
第二十九章	阿拉斯加北部斜坡萨加万纳克托克组(Sagavanirktok)、王子溪组(Prince Creek)和斯奈德悬崖组(Schrader Bluff)含水合物潜力储层沉积物岩心的特征:第五部分 岩心声波速度研究	(334)
第三十章	高压取样技术以及对深海沉积物、伴生天然气水合物和深层生物圈作用的分析	(337)
第三十一章	加拿大多孔介质中天然气水合物地质调查的实验室研究进展	(348)
第三十二章	基于岩心级沉积物和水合物样品实验室测定值预测油层动态	(352)
第三十三章	甲烷水合物对沉积物物理性质的影响	(362)
第三十四章	气—水—水合物系统的相对渗透率测定	(366)
第三十五章	受控于甲烷水合物增长过程的含甲烷水合物多孔介质的水渗透性	(380)
第三十六章	天然气水合物实验与模型研究:架起沟通的桥梁	(386)
第三十七章	使用瞬时平面源技术测量甲烷水合物的热学性质	(392)
第三十八章	利用相场论进行水合物相变的动力学模拟	(395)
第三十九章	模拟海相沉积物中甲烷水合物的形成	(408)

第一章 天然气水合物:回顾

Timothy S. Collett

美国地质调查局能源资源项目,美国科罗拉多州丹佛市
(Energy Resources Program, U. S. Geological Survey, Denver, Colorado, U. S. A.)

Arthur H. Johnson

水合物能源国际,美国路易斯安那州肯纳市
(Hydrate Energy International, Kenner, Louisiana, U. S. A.)

Camelia C. Knapp

南卡罗来纳大学地质科学部,美国南卡罗来纳州哥伦比亚市
(Department of Geological Sciences, University of South Carolina, Columbia, South Carolina, U. S. A.)

Ray Boswell

美国能源部国家能源技术实验室,美国西弗吉尼亚州摩根敦市
(U. S. Department of Energy, National Energy Technology Laboratory, Morgantown, West Virginia, U. S. A.)

摘要:全世界人们追求高质量的生活促使所有能源的消费强劲增长。或许很快有一天,地球上易于获取的油气资源将不再能满足日益增长的经济和人口需求。到那时,一种不熟悉的、但是同源的、称之为天然气水合物的油气资源也许将会成为一种重要的能源资源。

大约 35 年前,俄罗斯科学家做出一个大胆的论断,天然气水合物(物理化学家一直很好奇的一种水和天然气的结晶固体)应该大量存在于自然界。从那时起,科学发现就建立了这样的认识,即天然气水合物是全球现象,大范围存在于北极的永久冻土区和世界上多数大陆边缘的深水区。存在于天然气水合物聚集集中的天然气数量是极其巨大的,但是这类资源的评价却存在很大的不确定性。

研究者长期推测认为天然气水合物最终可以成为商业可开采的能源资源,但是历史上技术和经济障碍只能使天然气水合物的开发成为一种远景目标而不是近期可能。这种观点在近些年开始发生变化,人们认识到利用现有的常规油气生产技术是有可能开发这类非常规资源的。过去几年间天然气水合物资源评价项目的运行大大加快,然而很多关键的天然气水合物勘探开发问题仍然存在。

天然气水合物资源的开采和开发潜力是一个复杂的技术问题。而且,在过去人们成功地解决了这种复杂的问题以满足能源需求;技术创新已成为我们不断成功的关键。

1 前言

天然气水合物在自然条件下是天然气和水的冰状组合物,从世界海洋和极地可以提供大量的天然气资源。天然气水合物广泛存在于永久冻土区和大陆边缘外围的海底沉积物中(图 1)。一般认为存在于天然气水合物聚集集中的天然气资源大大超过了已知的天然气储量(Collett, 2002)。不断增加的证据表明,用常规油气开采技术从天然气水合物中生产天然气是可能的(Moridis 等, 2005a, 2008; Anderson 等, 2008; Dallimore 等, 2008a, b; Yamamoto 和 Dallimore, 2008)。

除了作为一种未来的能源资源,天然气水合物还代表着巨大的钻探和生产风险。俄罗斯、

加拿大和美国的研究者已经描述了与北极的天然气水合物分布相关的大量问题,包括井控困难和套管失效(Collett 和 Dallimore,2002)。其他的研究也表明,天然欠稳定的天然气水合物可能导致大气中温室气体甲烷含量增加(Kvenvolden,1988; Dickens 等,1997; Kennett 等,2000)。

本章是一对天然气水合物的介绍性回顾,旨在提供一个对天然气水合物分布地质控制因素的最新分析,并且着重于理解天然气水合物的能源资源潜力。这篇回顾文章首先讨论了天然气水合物是什么,并且描述了它们重要的物理性质。文章介绍和描述了天然气水合物含油气系统的概念;讨论了较重要的国际天然气水合物研究项目的结果;展示了几个典型的天然气水合物分布与聚集的实例。本章以一个已完成的天然气水合物生产研究和模拟工作的回顾为结尾。

2 天然气水合物技术回顾

2.1 天然气水合物结构和物理性质

天然气水合物是两种常见物质水和天然气的结合体。在合适的高压低温条件下,水和天然气会结合形成冰状固体物质。全球海洋和极地的广大地区都具有天然气水合物形成的有利条件。实际上,大量的现场研究都表明天然气水合物广泛存在于永久冻土带和陆缘外围的海底沉积物中(图1)。

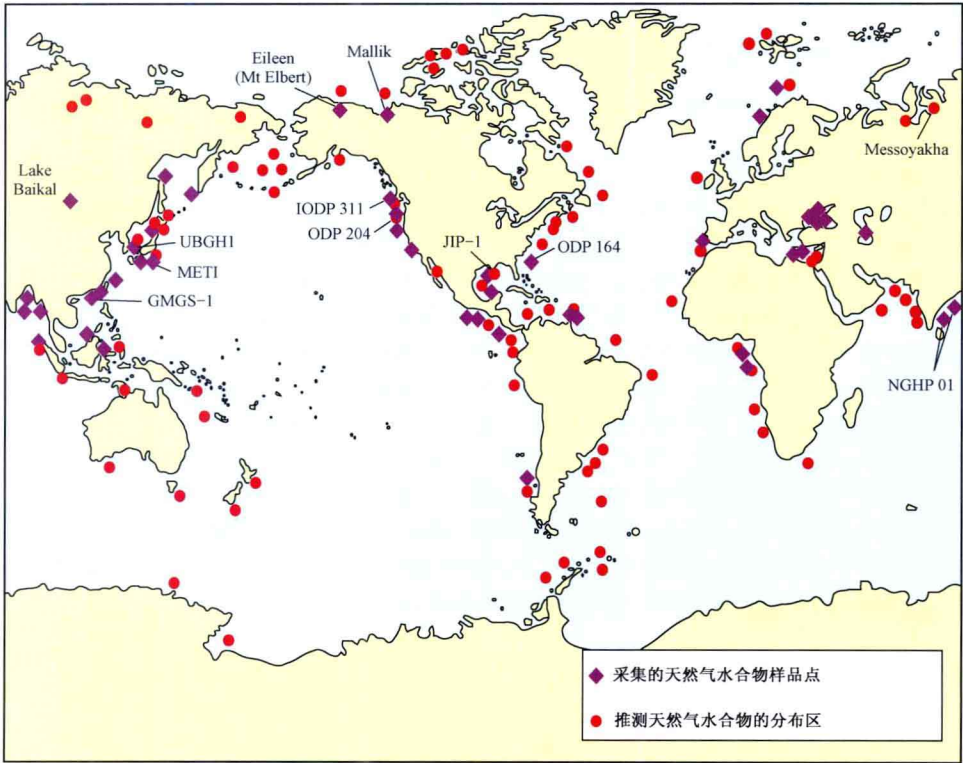


图1 陆缘外围海洋沉积物和永久冻土带中采集的和推测的天然气水合物位置图(Kvenvolden,1993,修改)

大多数采集的天然气水合物样品是通过海洋钻探项目和浅海床钻探操作获得的。大多数推测的天然气水合物位于地震剖面上的地震反射模拟海底(BSR)出现的位置。本章提及的天然气水合物分布也标注在此图上。IODP:综合海洋钻探项目;UBGH1:Ulleung 盆地天然气水合物探险1;ODP:海洋钻探项目;JIP:联合工业项目;METI:经济、贸易和工业部;GMGS:广州海洋地质调查局;NGHP:印度国家天然气水合物项目

天然气水合物是由氢键水笼立体叠置形成的晶体化合物(图 2)。天然气水合物是笼状物,意味着客体气体分子被锁在主体水分子形成的笼形架构中。空的笼形架构是不稳定的,需要捕获气体分子以保持笼形晶体的稳定性(图 3)。水合物结构的紧凑性可使天然气高效叠置。标准温压条件下(1kPa,20℃),一体积的天然气水合物若释放为气体,可膨胀 150 ~ 180 倍。

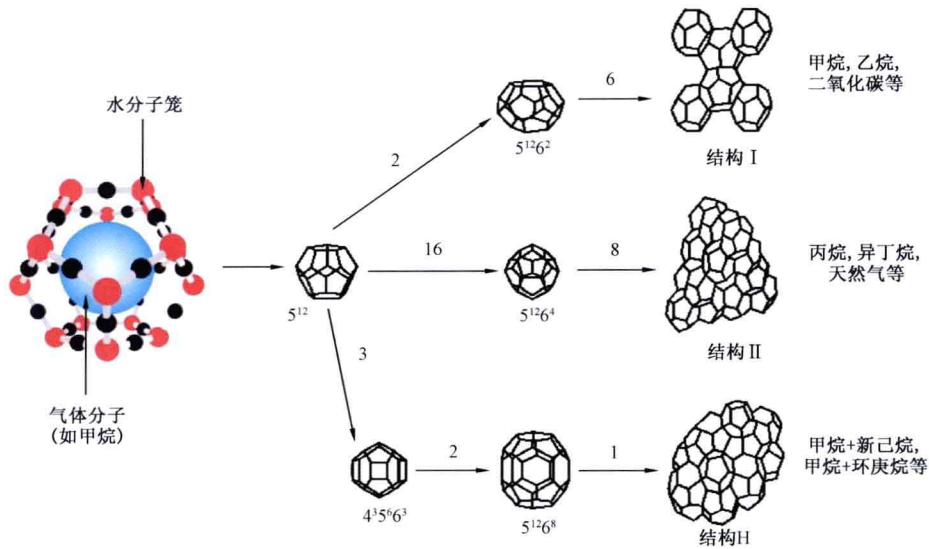


图 2 天然气水合物晶体结构 (Heriot - Watt University, 2008)

5 种类型的水分子笼构成了天然气水合物的晶体结构,包括五角十二面体、四型十二面体、六四面体、不规则十二面体和二十面体。目前已经观察到 3 种结构类型:结构 I、II 和 H,并且列出了每种水合物结构中表示的客体气体分子

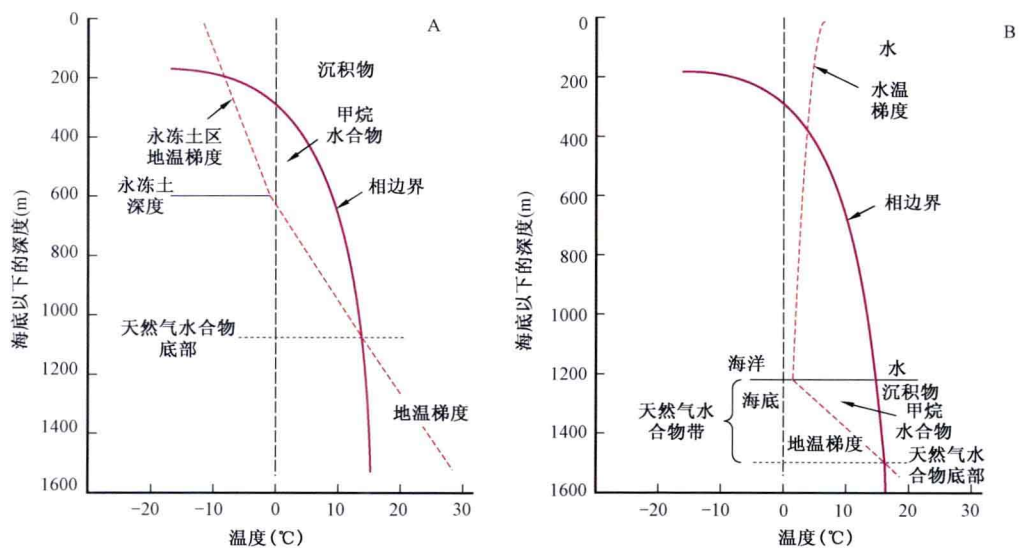


图 3 不同深度—温度区天然气水合物稳定存在的实例 (Kvenvolden, 1988)

A—永久冻土区;B—陆缘海外围环境

笼状水合物可形成大小介于 0.48~0.90nm 之间的天然气分子赋存空间。存在 3 种不同的结构类型,一般地,结构的形成取决于最大客体分子的大小。虽然给出了有关结构大小关系相当多的组成,但是甲烷和乙烷可单独形成结构 I 型(s I)水合物,一些特定的组合也可形成结构 II 型(s II)(图 2)。丙烷和异丁烷形成 s II 型水合物,可单独或与乙烷和甲烷结合存在。仅当甲烷存在的情况下,正丁烷和新戊烷可形成 s II 型水合物;也可与较大的烃分子(C_5-C_9)形成结构 H 型(sH)水合物,也需甲烷存在(图 2)。

实际上常见的天然气水合物结构可反映天然气组分,因为每种结构类型的丰度取决于每种结构决定的烃类分子的相对含量。沉积物中仅产生生物甲烷,于是产生结构 s I。这是海洋环境中发现的最重要的水合物类型。热成因甲烷是由深埋有机质裂解形成的,除了甲烷,通常还包含更多的其他烃类。如上所述,大量的丙烷和丁烷可形成 s II 水合物。s II 和 sH 的温压稳定性比 s I 水合物的范围更大。对于所有的水合物结构,温压稳定性条件也受其他非烃气体分子的影响,如氮气、硫化氢和二氧化碳。

在微观尺度,由于水合物包含 85% 的水(摩尔度量),天然气水合物的许多力学性质像冰。但也有例外,如热导率在水合物中相对较低,可以认为是客体分子和主体水构架相互作用导致的性质,这种相互作用在普通的冰中并不存在。

有关天然气水合物结构和物理性质的完整描述,见 Sloan 和 Koh(2008)的总结。

2.2 自然界中的天然气水合物和资源评价

化学家发现天然气水合物差不多有 200 年了,但是 130 年前,他们仅是出于实验的好奇心。当天然气水合物的形成被认为是管道堵塞的原因时,石油工业于 20 世纪 30 年代开始关注水合物(Hammerschmidt, 1934)。俄罗斯科学家首先发现岩石圈存在天然气水合物(Makogon 等, 1972; Trofimuk 等, 1977)。在 70 年代早期,西方推测水合物存在于永久冻土和海洋沉积物中(Stoll 等, 1971; Bily 和 Dick, 1974)。这一推测在 80 年代早期获得证实,科学家们在深海钻探取心中发现了陆缘海外围的沉积物中含有天然气水合物(Kvenvolden, 1988, 1993)。

诸多研究表明,天然气水合物中的天然气来源于海底厌氧细菌分解有机质,产生了甲烷和其他气体,包括二氧化碳、硫化氢、乙烷和丙烷。如上所述,所有的这些气体都可以作为天然气水合物的客体分子,但是甲烷是最主要的。特定环境下,水合物中的天然气也来源于地壳深部的热成因气。

储存于全球天然气水合物聚集体中的天然气资源是巨大的(表 1),但是评价是推测性的、跨 3 个数量级,天然气从 2.8×10^{15} 到 $8 \times 10^{18} \text{ m}^3$ 。一个引用很广的全球天然气水合物中的天然气储量数据来自 Kvenvolden(1988),为 $2 \times 10^{16} \text{ m}^3$ 。通过对比,常规天然气藏(储量和全球资源中未发现的技术可采储量)大约为 $4.4 \times 10^{14} \text{ m}^3$ (Ahlbrandt, 2002)。尽管报道的天然气水合物的资源体积量跨度很大,即使是报道的最低量评价也表明天然气水合物中的天然气量规模巨大,可与现有的常规天然气藏相媲美。但是,需要指出的是,已公开的天然气水合物资源评价并没有预测有多少天然气可从天然气水合物中开采出来。更多的工作需要在限定实际的原地天然气水合物资源量评价上展开,也需要在这些资源量中有多少可开采出来上展开。