

开发天然气水合物

Richard Birchwood

Jianchun Dai

Dianna Shelander

美国得克萨斯州休斯敦

Ray Boswell

美国能源部

美国国家能源技术实验室

美国西弗吉尼亚州摩根城

Timothy Collett

美国地质调查局

美国科罗拉多州丹佛

Ann Cook

Lamont-Doherty地球天文台

哥伦比亚大学地球研究所

美国纽约州Palisades

Scott Dallimore

加拿大地质调查局

加拿大不列颠哥伦比亚省Sidney

Kasumi Fujii

Yutaka Imasato

日本神奈川县相模原

Masafumi Fukuhara

俄罗斯莫斯科

Koji Kusaka

日本东京

Doug Murray

中国北京

Tatsuo Saeki

日本国家石油天然气及金属公司

日本千叶

《油田新技术》2010年春季刊：22卷，第1期。

©2010 斯伦贝谢版权所有。

在编写本文过程中得到以下人员的帮助，谨表谢意：美国康涅狄格州Brookfield的Barbara Anderson，休斯敦的George Bunge，休斯敦雪佛龙公司的Emrys Jones，俄罗斯萨哈林Yuzhno-Sakhalinsk的Tebis Llobet，得克萨斯州学院站得克萨斯农工大学的Yuri Makogon，以及日本相模原的Osamu Osawa。

CHFR, DMR, EcoScope, geoVISION, MDT, PeriScope, RAB, sonicVISION和TeleScope等是斯伦贝谢公司的商标。

天然气水合物是一种含有甲烷的冰状化合物。如果能够找到开采方法，天然气水合物就有可能成为一种重要的资源。目前正在采用常规油气资源评价技术对天然气水合物进行评估和表征，并绘制其分布图。

天然气水合物沉积中含有大量的烃。天然气水合物的估算量在几个数量级范围内变化，但天然气水合物聚集体中含有的天然气量估计比目前已知的全球天然气总储量还要高。

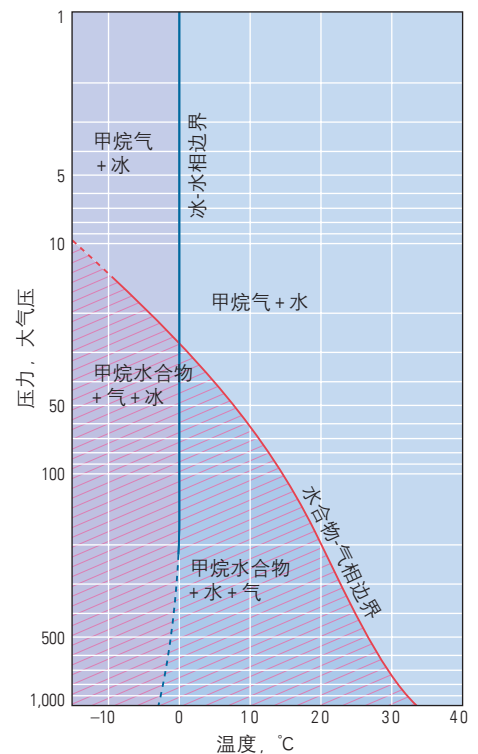
这些聚集体通常出现在世界上常规资源缺乏的地方，可能能够帮助那些依赖油气进口的国家实现能源的自给自足。有几家政府和工业集团，正是从这种未开发能源中看到了希望，已开始针对天然气水合物开发进行详细调查。

作为一种潜在的资源，天然气水合物开发存在钻井风险和流动保障难题、影响海底稳定性，还储存或释放温室气体。尽管上述几点都是非常重要的问题，但本文将重点讨论天然气水合物作为满足未来能源需求的天然气供应来源的益处。

本文就部分天然气水合物早期研究成果进行了探讨，并展示了国际上采用先进技术对天然气水合物特性及分布进行描述的最新发现。通过墨西哥湾、日本和印度的实例研究，阐释了如何利用油田技术帮助识别评价天然气水合物资源。加拿大和美国的实例说明了如何从这些储层中开采天然气。

天然气水合物概述

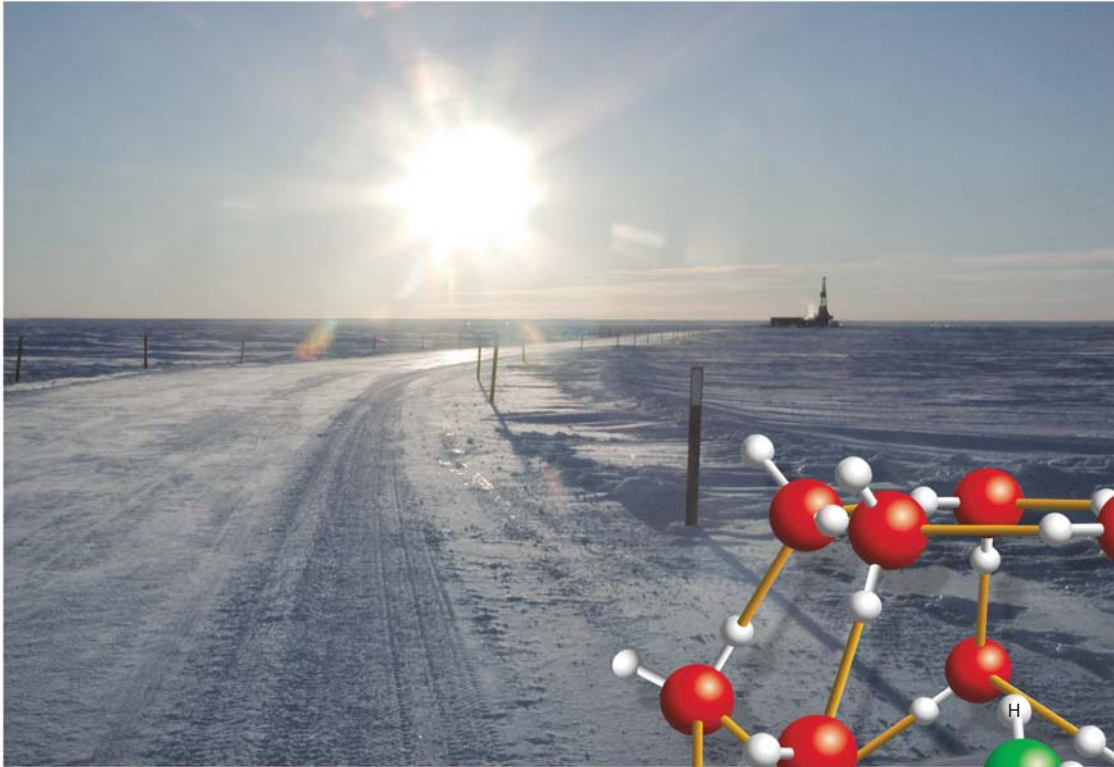
天然气水合物是象冰一样的晶体固体。结构上属于笼形化合物，或复



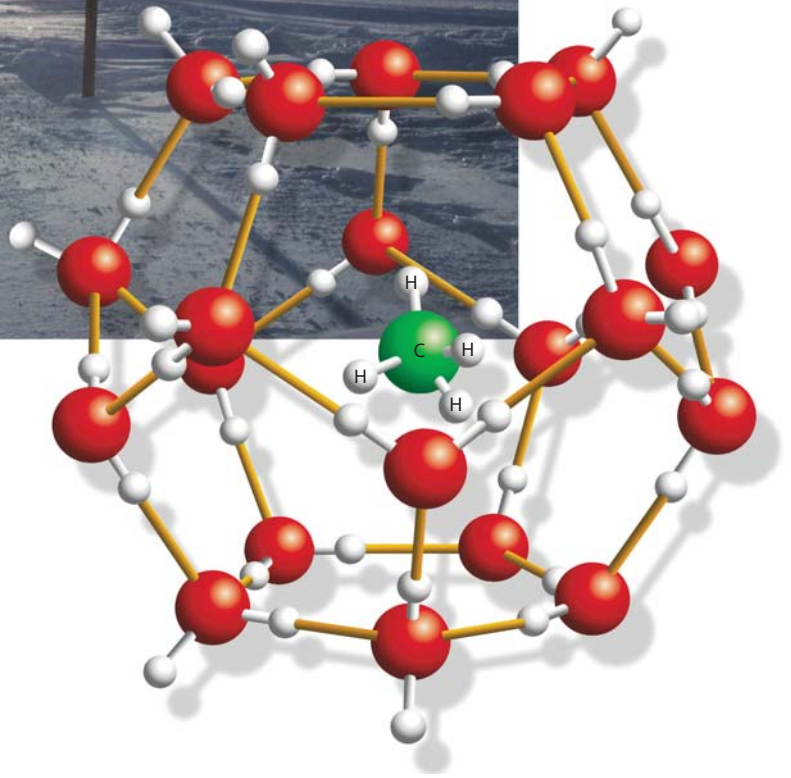
▲ 甲烷水合物稳定性相图。甲烷和水的结合物在低温高压条件下呈固体状态（阴影部分）。在高温低压条件下，固体水合物分解成气体和水。

合物，基本结构包括一个冰笼状的水分子晶体，其内部又包含一个天然气分子（称为客体）（[下一页图](#)）。能源行业最感兴趣的是甲烷水合物，这也是自然界中最丰富的一类水合物。

足量的水和天然气在适当的温度和压力条件下就可以形成天然气水合



▲ 天然气水合物晶体结构。甲烷(CH₄) (绿色和白色) 是水分子(H₂O) (红色和白色) 形成的水笼中的客体分子。图中所示结构是包含客体气体分子的五种水笼结构中的一种。天然气水合物已从北极一些地区开采出来, 如图中所示的美国阿拉斯加地区。(图中照片由Mount Elbert天然气水合物地层测试井项目提供)。



物(前一页图)。在这一水合物稳定带的外围, 水合物分解成水和气体。严密的水合物结构非常有效地将甲烷包裹起来。一个体积的水合物所含有的气体在标准温度和压力下会膨胀150–180倍。

化学家对天然气水合物的认识已经有200多年的历史。如同许多科学发现一样, 有关水合物的历史也存在广泛争议。但最早在实验室形成的水合物似乎是在1778年由Joseph Priestley实现的, 当时他无意中获得了二氧化硫水合物^[1]。首次有文献记载的烃水合物是1888年由Paul Villard发现的, 当时他合成了甲烷和其他气态烃的水合物。

整个19世纪水合物都是在实验室配制合成的, 仅仅停留在满足试验探索的阶段, 而没有任何实际应用。直到上世纪20年代, 开始采用管线从气田向外输送甲烷, 对水合物的实际应用才有了更深入的了解。在寒冷季节, 固体堵塞物有时会阻碍气体在管线中的流动。这种固体堵塞物一开始被解释成冻水, 直到上世纪30年代, 气体堵塞问题的原因才被纠正过来, 确定是甲烷水合物引起的^[2]。这次发现使水合物研究进入了新时代, 调查人员制定出了预测水合物形成的原则, 并研究出了抑制和控制水合物的

方法^[3]。

1946年, 俄罗斯科学家提出在自然界(在永久冻土覆盖区域)存在水合物产生和稳定存在的条件与资源^[4]。这种预测被随后发现的天然形成的水合物所证实。1968年, 在南极洲西部Byrd站进行科学钻探取出的冰心中含有空气水合物^[5]。

到了上世纪70年代, 科学家们在深海钻井勘探中发现在大陆边缘外围深水沉积层中蕴含着丰富的天然形成的天然气水合物。最近已在洋底观察到

1. Makogon YF: *Hydrates of Hydrocarbons*. 塔尔萨: PennWell出版公司, 1997年。



▲ 海洋和陆上天然气水合物的分布位置。大约98%的天然气水合物资源都聚集在洋底沉积物中，其他2%存在于永久冻土下面。对于图中标出的已获取天然气水合物（蓝色），绝大部分都已通过实施科学钻井计划得以发现，推测出的天然气水合物聚集体（橘色）已通过地震成像识别出来。（资料来自Lorenson TD和Kvenvolden KA: A Global Inventory of Natural Gas Hydrate Occurrence, USGS, <http://walrus.wr.usgs.gov/globalhydrate/index.html> (2010年3月24日浏览))。

水合物块，有一次还用渔网把它们拖到了地面上^[6]。沉积物中的水合物在近地表聚集常伴有气苗产生，这种气苗也称为冷气，墨西哥湾、加拿大和美国的太平洋沿岸就发现有这种气苗^[7]。

科学家们现在已经知道天然气水合物自然存在于世界许多地方（左图）。水合物保持稳定性的深度范围通常在海底以下100–500米（330–1600英尺）。科学家们认为约98%的水合物资源都积聚在洋底沉积物中，另外2%在极地大陆以下。目前已确定在美国阿拉斯加北坡、加拿大西北地区、墨西哥湾、日本、印度、韩国及中国的近海地区有丰富的水合物聚集体存在。

只有一小部分有关水合物聚集体的证据是来自直接取样，而大多数是根据其他资料来源推测的，如地震反射、测井记录、钻井资料和岩心孔隙水矿化度测定结果。根据井眼和岩心资料，水合物在沉积层中的分布随其形成条件而变化。有些岩心中只有零星水合物，分布在富含粘土的沉积物中，而另一些岩心中存在多层聚合度很高的天然气水合物，主要分布在砂岩沉积物中，科学家们还发现纯度非常高的固态天然气水合物以裂缝填充物的形式存在于富含粘土的地层中。

根据水合物分布的不同方式，采用外插法将分布区域外推到水合物可能出现的所有区域，发现潜在资源估算量变化范围很大—全球大约有 $2.8 \times 10^{15} - 8 \times 10^{18} \text{米}^3$ ($9.9 \times 10^{16} - 2.8 \times 10^{20}$ 英尺³)的甲烷^[8]。为了缩小变化范围需要在以下领域做进一步努力：更为明确深入地了解水合物的成因和沉积过程，更好地了解水合物对井眼和地球物理测量结果的影响，对于具备天然气水合物稳定存在条件的区域进行更为全面的勘探。

地震资料是用来证明近海存在水合物聚集体的最常见的证据。含有天然气水合物的沉积层和邻近含有自由气或水的沉积层间声阻抗差异可能很明显，会产生强振幅反射波。

反射深度与有利于水合物保持稳

- Ziegenhain WT: "Every Precaution Taken to Eliminate Clogging of New Chicago Gas Line", *Oil & Gas Journal*, 30卷, 第19期 (1931年): 34.
Hammerschmidt EG: "Formation of Gas Hydrates in Natural Gas Transmission Lines", *Industrial & Engineering Chemistry*, 26卷, 第8期 (1934年): 851-855.
- Carroll J: *Natural Gas Hydrates: A Guide for Engineers*. 美国马萨诸塞州波士顿: Elsevier, 2003年, http://www.knovel.com/web/portal/browse/display?_EXT_KNOVEL_DISPLAY_bookid=1275 (2010年2月27日浏览)。
- Makogon, 参考文献1。
- Miller SL: "Clathrate Hydrates of Air in Antarctic Ice", 《科学》, 165卷, 第3892期 (1969年8月): 489-490.
- Riedel M, Hyndman RD, Spence GD, Chapman NR, Novosel I和Edwards N: "Hydrate on the Cascadia Accretionary Margin of North America", 发表在AAPG Hedberg研究大会上, 2004年9月12-16日, 加拿大不列颠哥伦比亚省温哥华, http://www.searchanddiscovery.net/documents/abstracts/2004hedberg_vancouver/extended/reidel/reidel.htm (2010年2月17日浏览)。
- Brooks JM, Cox HB, Bryant WR, Kennicutt MC II, Mann RG和McDonald TJ: "Association of Gas Hydrates and Oil Seepage in the Gulf of Mexico", *Organic Geochemistry*, 10卷, 第1–3期 (1986年): 221-234.
Reidel M, Collett TS, Malone MJ和Expedition 311 Scientists: "Cascadia Margin Gas Hydrates: Expedition 311 of the Riserless Drilling Platform: Balboa, Panama, to Victoria, British Columbia (Canada)", 综合大洋钻探计划文集, 311卷, <http://publications.iodp.org/proceedings/311/311title.htm> (2010年3月24日浏览)。
- Collett TS, Johnson AH, Knapp CC和Boswell R: "Natural Gas Hydrates: A Review", Collett TS, Johnson AH, Knapp CC和Boswell R (编辑): *Natural Gas Hydrates—Energy Resource Potential and Associated Geologic Hazards*. 塔尔萨: 美国石油地质学家协会, AAPG Memoir, 89卷 (2010年): 146-219.
- Frye M: "Preliminary Evaluation of In-Place Gas Hydrate Resources; Gulf of Mexico Outer Continental Shelf", OCS Report MMS 2008-004; 美国内政部, 矿产资源管理和服务局, 2008年2月1日。
- "Gulf of Mexico Gas Hydrates Joint Industry Project (JIP) Characterizing Natural Gas Hydrates in the Deep Water Gulf of Mexico—Applications for Safe Exploration", 美国甲烷水合物研究及开发项目, 美国能源部, <http://www.netl.doe.gov/technologies/oil-gas/futuresupply/methanehydrates/projects/DOEProjects/CharHydGOM-41330.html> (2010年2月17日浏览)。
- 2005年的勘探结果以专题集的形式出版 (西方奇科捐赠了地震资料和采集成果): Ruppel C, Boswell R和Jones E (编辑): *Marine and Petroleum Geology*, 25卷, 第9期 (2008年11月): 819-988.
- "DOE-Sponsored Expedition Confirms Resource-Quality Gas Hydrates in the Gulf of Mexico", 美国甲烷水合物研究及开发项目, 美国能源部, <http://www.netl.doe.gov/technologies/oil-gas/FutureSupply/MethaneHydrates/2009GOMJIP/index.html> (2010年2月10日浏览)。
Shedd B, Godfriaux P, Frye M, Boswell R和Hutchinson D: "Occurrence and Variety in Seismic Expression of the Base of Gas Hydrates Stability in Gulf of Mexico, USA", *Fire in the Ice* (2009年冬): 11–14, <http://www.netl.doe.gov/technologies/oil-gas/publications/Hydrates/Newsletter/MHNewswinter09.pdf#page=11> (2010年3月23日浏览)。
- Boswell R, Collett T, Frye M, McConnell D, Shedd W, Dufrene R, Godfriaux P, Mrozewski S, Guerin G和Cook A: "Gulf of Mexico Gas Hydrate Joint Industry Project Leg II: Technical Summary", <http://www.netl.doe.gov/technologies/oil-gas/publications/Hydrates/2009Reports/TechSum.pdf> (2010年3月9日浏览)。

定的温度和压力条件有关，通常与海底平行。这样的反射界面被称为拟海底反射层（BSR），从这个反射层反射的地震波总是穿过构造反射层和地层反射层。但如果没有拟海底反射层并不能排除水合物的存在。

在全球许多地方都发现了拟海底反射层，因此政府机构、能源公司和其他研究机构开始合作，对特殊水合物聚集体进行评价。目前一个此类联合行业项目（JIP）正在对墨西哥湾水合物资源进行调查。

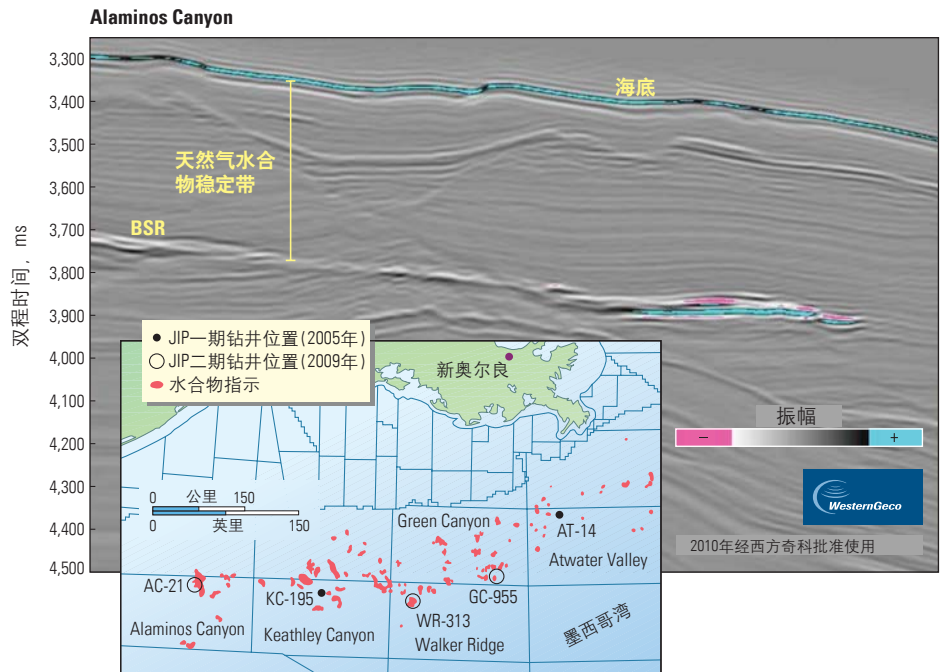
墨西哥湾水合物评价

美国内政部矿物管理服务局（MMS）利用地震资料，结合井筒资料、地质信息、地化信息和古生物信息，对墨西哥湾进行了大面积评价，评价范围约17.4万英里²（45万平方公里²），发现这里的压力和温度条件都适合水合物保持稳定^[9]。MMS研究结果估计生物成因的原始天然气水合物体积为11112—34423万亿英尺³（315—975亿立方米³）。

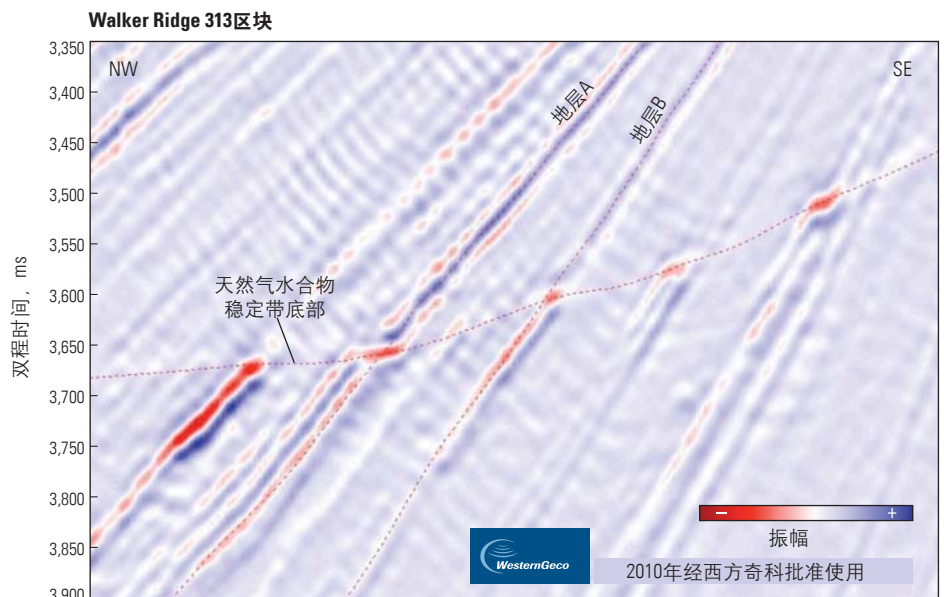
2000年，雪佛龙公司和美国能源部启动了一项联合行业项目，开发技术并采集资料，以帮助对墨西哥湾深水天然形成的天然气水合物进行分析^[10]。除了评价水合物对钻井安全和海底稳定性的影响外，该项目还力求了解水合物作为天然气供应来源的长期潜力。

在项目的早期阶段，联合行业项目小组成员在几个地点对地震资料进行了采集分析，选定了井位，并进行了为期35天的钻井、取心和测井作业^[11]。2009年，联合行业项目进行了第二次远征勘探，这次活动覆盖了Walker Ridge和Green Canyon地区的几个地点^[12]。通过对砂岩层内高饱和度天然气水合物的存在迹象进行综合地质物探分析，联合行业项目选定了钻井位置（右上图）。墨西哥湾的联合行业项目为天然气水合物的勘探和钻井风险评价提供了大量的信息。

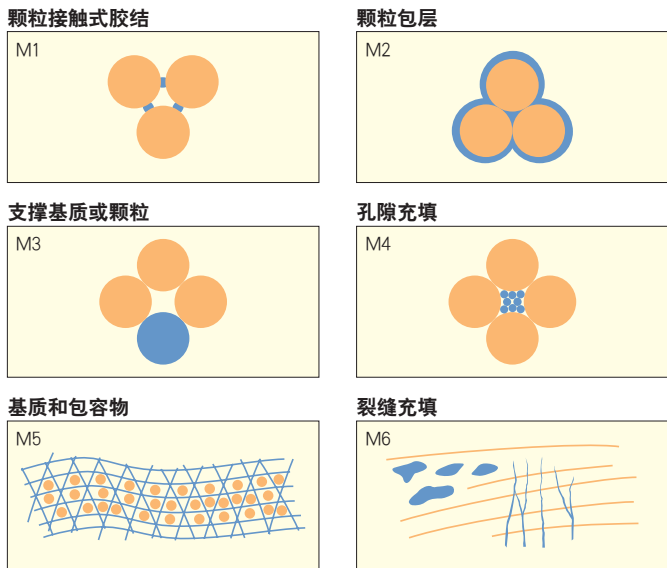
天然气水合物勘探—Walker Ridge



▲ 墨西哥湾地区显示拟海底反射层（BSR）的地震剖面。拟海底反射层是由含水合物的沉积层和不含水合物的沉积层间的声阻抗差造成的。拟海底反射层穿过成层构造和断层，表现为水合物稳定带的基底。该反射界面把上面的坚硬物质和下面的不太坚硬的物质分开，产生与海底反射波极性相反的地震反射波。剖面右侧的高振幅信号可能表示在水合物下面圈闭着自由气。2005年墨西哥湾联合行业项目考察组调查了Atwater Valley和Keathley Canyon区域内的几处地点。2009年联合行业项目科学家在Alaminos Canyon、Walker Ridge和Green Canyon进行了钻井及测井作业。水合物稳定带基底的地球物理指标在插图上用红色表示。（地图根据Shedd等人的资料修改，参考文献12；地震剖面由西方奇科提供）。



▲ 墨西哥湾Walker Ridge 313区块地震资料。地震剖面中出现一系列孤立的高振幅点（蓝色和红色），表示水合物稳定带的基底。从图中来看高振幅反射波是不连续的，原因是各层岩性不同，且倾角较陡。自由气和天然气水合物集中在富含砂岩的地层中。由于富含页岩的地层中只含有少量或根本不含有水合物，所以没有表现出明显的振幅特征。地层A和地层B将在后面的图中进行说明。（西方奇科提供）。



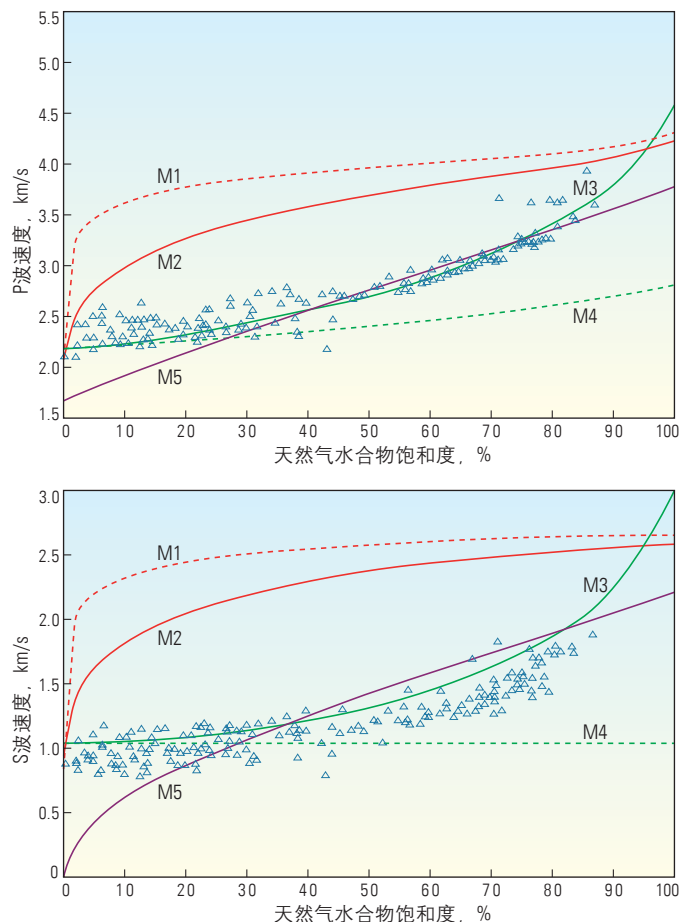
▲ 含水合物的沉积层微结构模型。前五种模型（共6种）采用一级近似，天然气水合物（蓝色）均匀分布在沉积颗粒中（黄褐色）。水合物可能是岩石颗粒间的胶结物（左上），可能是颗粒上的包层（右上），可能是颗粒基质的一种组分（中左），也可能是孔隙填充物（中右）。第五种模型把沉积颗粒看成是水合物基质中的包合物（左下）。第六种模型（右下）把水合物描述为细颗粒低渗透率沉积物中的结核或裂缝填充物。上述模型用来模拟含水合物的沉积物在测井和地震测量方面的响应。（根据Dai等人的资料修改，参考文献14）。

地区显示存在水合物迹象的一个例子是出现断续高振幅反射波，这些反射波对应的是砂岩层内自由气的上倾末端（前一页，下图）。高振幅沿水合物稳定带的底部出现^[13]。

根据地震资料预测Walker Ridge和Green Canyon区域天然气水合物饱和度需要建立岩石物理模型，基于模型建立控制声波能量穿过沉积层速度的弹性属性和天然气水合物饱和度之间的关系；在全球其他环境中，水合物含量总是随着声速的提高而提高^[14]。专家们提出了几种模型来解释这种效应，所有模型都表明这些属性与水合物在沉积层中的位置高度相关（左上图）。理论上，水合物可能以岩石颗粒间胶结物或岩石颗粒包层的形式出现在沉积岩中。也可能是颗粒基质的一种成分或孔隙填充物。几种微结构模型都认为水合物均匀分布在沉积物中，并推导出水合物含量与岩石弹性属性关系式。因为在岩心中也发现了水合物表现为结核和裂缝填充物，建立模型时也必须考虑这些欠均质分布形式，但对这种分布还没有定量处理

办法。

将基于模型计算出的地震速度和在含水合物岩石中测得的地震速度进行对比，表明水合物作为颗粒基质一种组分的模型与采集的数据集拟合最好（右上图）。在该模型中，水合



▲ 含水合物沉积层实际测得的地震速度与模拟地震速度对比。图中绘出了纵波（P波）速度（上）与根据左图模型计算出的速度，其中P波速度是在加拿大一口富含水合物的地层中测量的（蓝色三角）。实际测得的速度和基于第三种模型M3（把水合物看成是颗粒基质的一种组分）计算出的速度拟合程度最高。横波（S波）速度（下）与基于M3模型的计算速度也很匹配。（根据Dai等人的资料修改，参考文献14）。

物既不是颗粒包层也不是沉积颗粒胶结物。输入参数包括岩石孔隙度和水合物饱和度。如果孔隙度和地震速度已知，就能够估算水合物饱和度。另外，还可以将孔隙度和地震速度联系起来，这样只根据地震速度就能够计

14. Shelander D, Dai J和Bunge G: "Predicting Saturation of Gas Hydrates Using Pre-Stack Seismic Data, Gulf of Mexico", *Marine Geophysical Researches*, 2010年。
Dai J, Xu H, Snyder F和Dutta N: "Detection and Estimation of Gas Hydrates Using Rock Physics and Seismic Inversion: Examples from the Northern Deepwater Gulf of Mexico", *The Leading Edge*, 23卷, 第1期 (2004年1月): 60-66。
Kleinberg RL, Flaum C, Griffin DD, Brewer PG, Malby GE, Peltzer ET和Yesinowski JP: "Deep Sea NMR: Methane Hydrate Growth Habit in Porous Media and Its Relationship to Hydraulic Permeability, Deposit Accumulation, and Submarine Slope Stability", *Journal of Geophysical Research*, 108卷, 第B10期 (2003

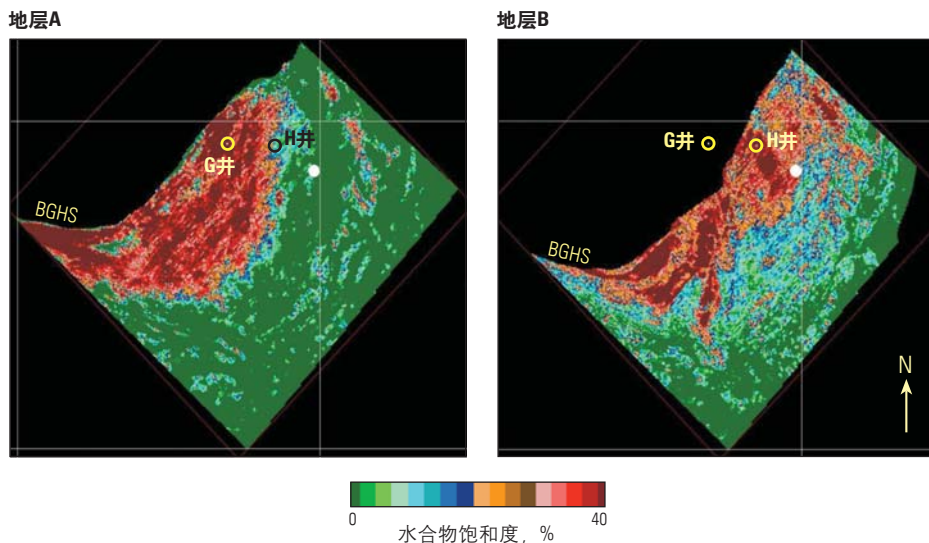
年): 2508-2525。

15. 关于所采用的反演类型，请参见：Mallick S, Huang X, Lauve J和Ahmad R: "Hybrid Seismic Inversion: A Reconnaissance Tool for Deepwater Exploration", *The Leading Edge*, 19卷, 第11期 (2000年11月): 1230-1237。
关于地震反演更多的信息，请参见：Barclay F, Bruun A, Rasmussen KB, Camara Alfaro J, Cooke A, Cooke D, Salter D, Godfrey R, Lowden D, McHugo S, Ozdemir H, Pickering S, Gonzalez Pineda F, Herwanger J, Volterrani S, Murineddu A, Rasmussen A和Roberts R: "地震反演技术及其应用", 《油田新技术》, 20卷, 第1期 (2008年春季刊): 42-63。
16. Boswell等人, 参考文献13。

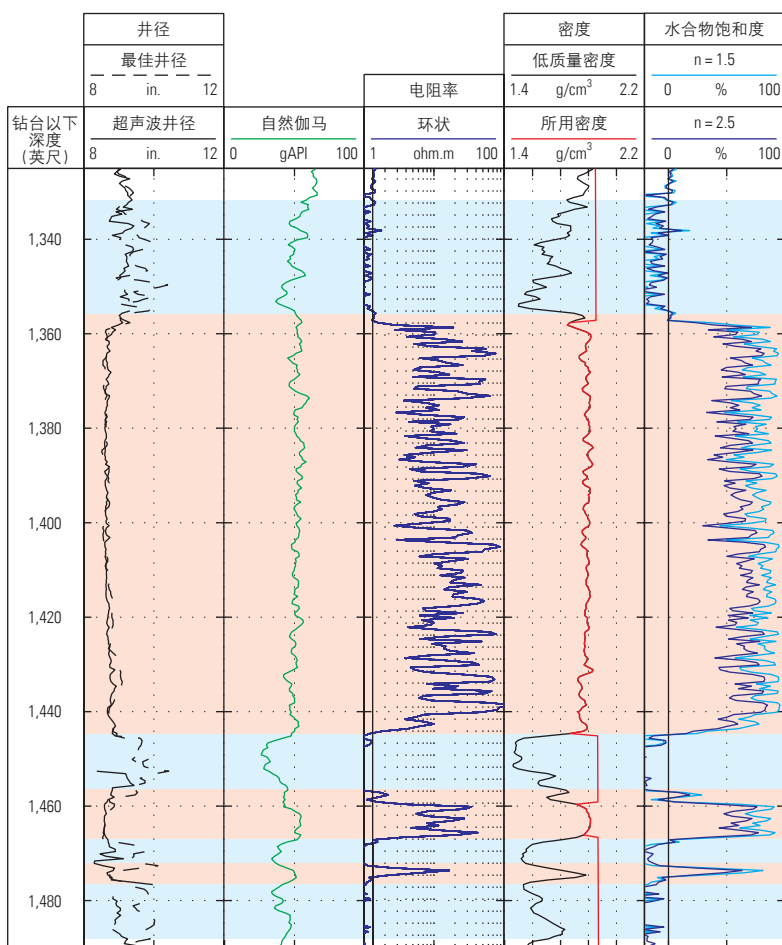
算出水合物饱和度。

通常针对声阻抗进行地震资料反演得到地震速度，声阻抗是密度和速度的乘积。但是，在天然气水合物中，密度随饱和度变化不大，因此一级近似时可以忽略密度的影响。这样就可以只根据声阻抗估算饱和度。

为支持联合行业项目的工作，西方奇科的地球物理师进行了高分辨率、全波形叠前反演，并结合常规线性叠前反演结果，在根据地震勘探数据建立的三维数据体中估算出P波和S波阻抗^[15]。这些阻抗值反过来又被转换成饱和度数据体（右图）。通过钻前天然气水合物饱和度估算，在Walker Ridge和Green Canyon内清晰显示了那些估计厚度最厚、含有水合



▲ 根据地震反演结果估算的Walker Ridge天然气水合物饱和度。饱和度变化范围是0-40%（从绿色到红色）。地层A（左）在地层层序上位于地层B（右）上面。H井在天然气水合物稳定带内钻穿这两个地层，而G井在水合物稳定带内仅钻穿地层A，在更深点处与地层B相交。图中白色圆点是一口油气工业井，与天然气水合物研究无关。天然气水合物稳定带的底部标注为BGHS。（根据Shelander等人的资料修改，参考文献14）。



▲ Green Canyon一口天然气水合物井的测井记录（左）。高电阻率（第3道）清楚显示出在这一段100英尺厚的砂岩中含有天然气水合物（粉色阴影）。埋藏更深、较薄的砂岩中也含有水合物。井径记录（第1道）表明在不含水合物的地层（蓝色阴影）存在冲刷情况。冲刷可能导致密度测量结果差（第4道）。估计天然气水合物饱和度（第5道）范围在50%至85%以上，具体与阿尔奇定律所采用的饱和度指数n有关。阿尔奇定律建立了电阻率与孔隙度和饱和度之间的关系。作业人员在Q4000浮式钻井设备上正在准备随钻测井（LWD）仪器（右）。（照片由联合行业项目二期科学组提供）。

物饱和度最高的储层。

2009年4月，联合行业项目在Walker Ridge和Green Canyon区域钻了5口井，并进行了测井。其中4口井钻遇砂岩储层，天然气水合物饱和

度超过50%，甚至可能高达85%^[16]。在Green Canyon区域，有一口井钻遇近100英尺（30米）厚的含天然气水合物砂岩（前一页，下图）。

科学家证实在Walker Ridge区块天

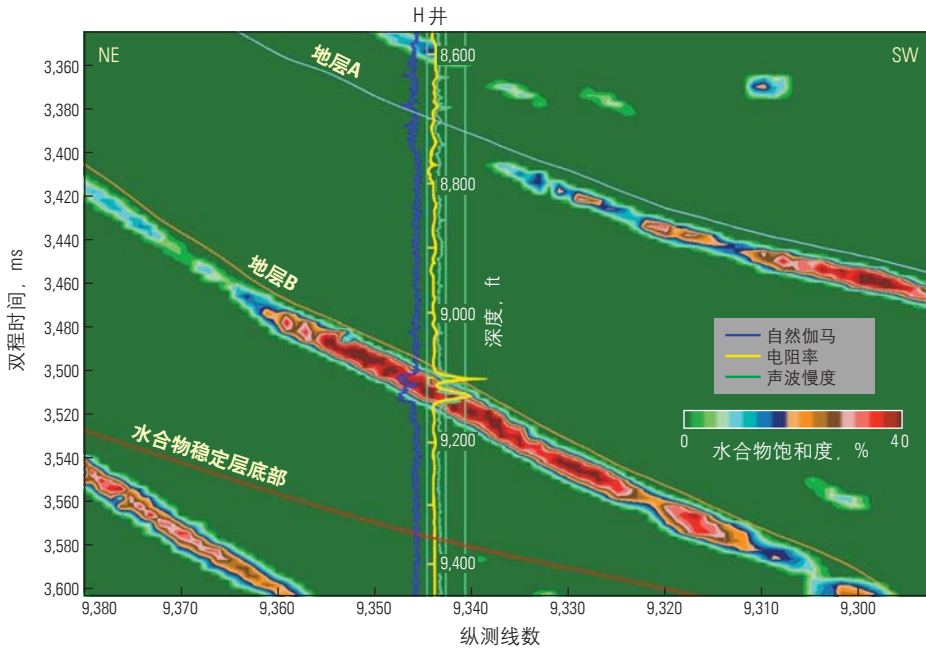
然气水合物出现在多层储层砂岩中，且在地质分布范围内全部为饱和状态。

第一、二期墨西哥湾联合行业项目是首批钻井项目，已在钻前对天然气水合物饱和度进行了估计，随后通过钻井进行测试。钻井结果良好，使得联合行业项目团队对相关地质、物探概念以及所应用的技术增强了信心（左图）^[17]。

评价天然气水合物钻井风险—在天然气水合物聚集层钻井要求考虑井眼稳定性方面的几个问题。钻井过程中必须避免因应力产生的机械故障，以及水合物分解和浅层水或自由气流动引起的冲蚀和流体流入井眼的问题。

为支持联合行业项目2009年度的探险活动，斯伦贝谢地质力学专家对建议的钻井位置进行了评价，并在孔隙压力过高可能带来钻井风险的位置做了标记。他们还制定了预测钻遇含天然气水合物沉积层的井眼稳定性和相稳定性的方法。这些方法涉及到建立起含水合物沉积层的力学属性与测井和地震资料之间的相关性并进行校正的问题^[18]。联合行业项目组采用数值模拟程序模拟了随钻井眼温度，并估算了钻井液喷出钻头喷嘴对地层造成的冲击能量。

根据分析结果，联合行业项目小组对井眼发生机械故障、天然气水合物分解和沉积物遭水力冲蚀的潜在可能性进行了评价。制定了钻头选择和



▲ 天然气水合物带估算的饱和度和测井记录。通过地震反演预测出在H井处所钻遇的地层B内天然气水合物饱和度较高（红色）。根据高电阻率值（黄色曲线）和声波慢度（绿色曲线）可推断出天然气水合物含量较高。而自然伽马读数（蓝色曲线）减小表明地层岩性为砂岩。（根据Shelander等人的资料修改，参考文献14）。

| | | 钻头水眼总流量面积，英寸 ² | | | | | | |
|----------|------|---------------------------|------|------|------|------|------|------|
| | | 0.52 | 0.56 | 0.60 | 0.65 | 0.69 | 0.74 | 0.79 |
| 泵速，加仑/分钟 | 420 | 3.65 | 3.13 | 2.72 | 2.36 | 2.06 | 1.80 | 1.59 |
| | 410 | 3.40 | 2.92 | 2.53 | 2.19 | 1.92 | 1.68 | 1.48 |
| | 400 | 3.16 | 2.71 | 2.35 | 2.04 | 1.78 | 1.56 | 1.38 |
| | 390 | 2.93 | 2.51 | 2.18 | 1.89 | 1.65 | 1.44 | 1.28 |
| | 380 | 2.71 | 2.32 | 2.01 | 1.74 | 1.53 | 1.34 | 1.18 |
| | 370 | 2.50 | 2.14 | 1.86 | 1.61 | 1.41 | 1.23 | 1.09 |
| | 360 | 2.30 | 1.97 | 1.71 | 1.48 | 1.30 | 1.14 | 1.00 |
| | 350 | 2.12 | 1.81 | 1.57 | 1.36 | 1.19 | 1.04 | 0.92 |
| | 340 | 1.94 | 1.66 | 1.44 | 1.25 | 1.09 | 0.96 | 0.84 |
| | 330 | 1.77 | 1.52 | 1.32 | 1.14 | 1.00 | 0.88 | 0.77 |
| | 320 | 1.62 | 1.39 | 1.20 | 1.04 | 0.91 | 0.80 | 0.70 |
| | 310 | 1.47 | 1.26 | 1.09 | 0.95 | 0.83 | 0.73 | 0.64 |
| | 300 | 1.33 | 1.14 | 0.99 | 0.86 | 0.75 | 0.66 | 0.58 |
| | 290 | 1.20 | 1.03 | 0.89 | 0.78 | 0.68 | 0.59 | 0.52 |
| | 280 | 1.08 | 0.93 | 0.81 | 0.70 | 0.61 | 0.53 | 0.47 |
| 270 | 0.97 | 0.83 | 0.72 | 0.63 | 0.55 | 0.48 | 0.42 | |

▲ 为Green Canyon地区优化泥浆循环速度和钻头设计。该表给出了每平方英寸的钻头水马力（HSI），它是有关钻头水眼总流量面积和泥浆循环速度（泵速）的函数。表中浅黄底色部分的数据表示为使井眼冲蚀程度减小到最小并优化钻头机械性能，将钻头水马力HSI保持在1—1.5的情况下相应的循环速度和钻头尺寸范围。有关循环速度的其他设计标准是为了确保在钻井过程中不发生天然气水合物分解。

17. Jones E: “Characterizing Natural Gas Hydrates in the Deep Water Gulf of Mexico; Applications for Safe Exploration and Production Activities, Semi-Annual Progress Report #41330417”, 为美国能源部准备的报告，2009年10月，http://www.netl.doe.gov/technologies/oil-gas/publications/Hydrates/2009Reports/NT41330_SemiAnnSep2009.PDF (2010年2月10日浏览)。

18. Birchwood R, Singh R和Mese A: “Estimating the In Situ Mechanical Properties of Sediments Containing Gas Hydrates”, 第六届天然气水合物国际会议文集，加拿大不列颠哥伦比亚省温哥华，2008年7月6-10日。

19. 斯伦贝谢提供了几项随钻测井服务，包括sonicVISION声波测井，EcoScope多功能测井，TeleScope高速遥测，geoVISION成像和PeriScope地层边界绘图。

泥浆循环措施优化的设计标准（前一页，下表）。

在2009年的开发活动期间，在联合行业项目井中使用了几种LWD仪器，包括使用实验性多极声波仪器估算富含水合物的未固结沉积层的横波速度^[19]。通过实时传送LWD数据使船上和陆上的专家能够及时更新钻前模型，诊断钻井情况。这样可以在整个活动过程中优化钻井措施。

井眼稳定性模型和井下温度模型预测的结果和观测数据一致，增强了对模拟及对比方法的信心（下图）。

> Green Canyon 955区块H井的弹性井眼稳定性模型。高电阻率（第1道，橘色）表明存在天然气水合物。第2道显示的是摩擦角（绿色）和膨胀角（紫色）。从双岩性模型可预测出砂岩的摩擦角比粘土的摩擦角高得多，特别是井壁围压较低的浅层井段。用相关关系预测砂岩的膨胀角；假设粘土层的膨胀角为零。第3道显示的是静态杨氏模量（红色）和无侧限抗压强度（蓝色）。两种指标都显示了一种趋势，即在主要目的层8077-8186英尺层段内存在天然气水合物时，两种指标均升高，但相对不受粘土层中存在的天然气水合物影响。4道包含了井眼稳定性模型的输出结果：孔隙压力（蓝色）、剪切破坏包线（绿色）、水平应力（洋红色）和上覆应力（红色）。棕色表示该井所用钻井泥浆比重。根据模型的预测结果，除了橄榄色阴影标示的层段外，井眼整体比较稳定，橄榄色阴影标示层段的剪切破坏包线超过了泥浆比重。这样的层段容易出现因为剪切破坏造成的井眼扩大。第5道显示的是钻头尺寸（黑色）和密度并径仪测井结果（紫色）之间的差异（蓝色阴影）。一般情况下井眼是比较规则的，但在8000-8328英尺的砂岩层段可看到井眼扩大，在这个层段天然气水合物很少或者几乎没有。根据井眼稳定性模型预测出这样的层段太脆弱不足以支撑井眼。该模型还可以对规则井眼砂岩层段天然气水合物的增强效应作出正确解释。

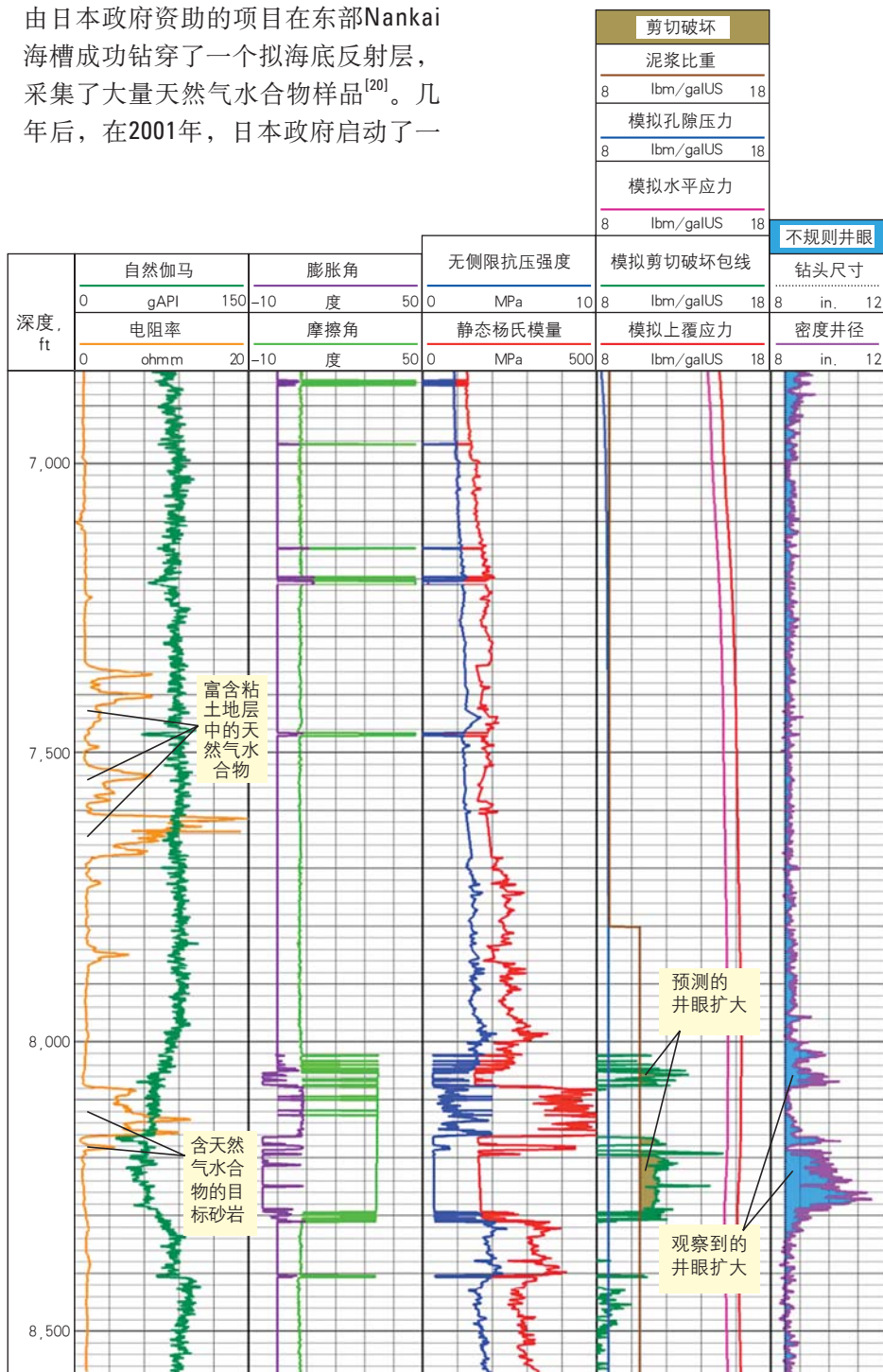
钻井作业的成功证实，通过正确的规划和周密的工程设计，可以安全地对天然气水合物地层进行钻井。

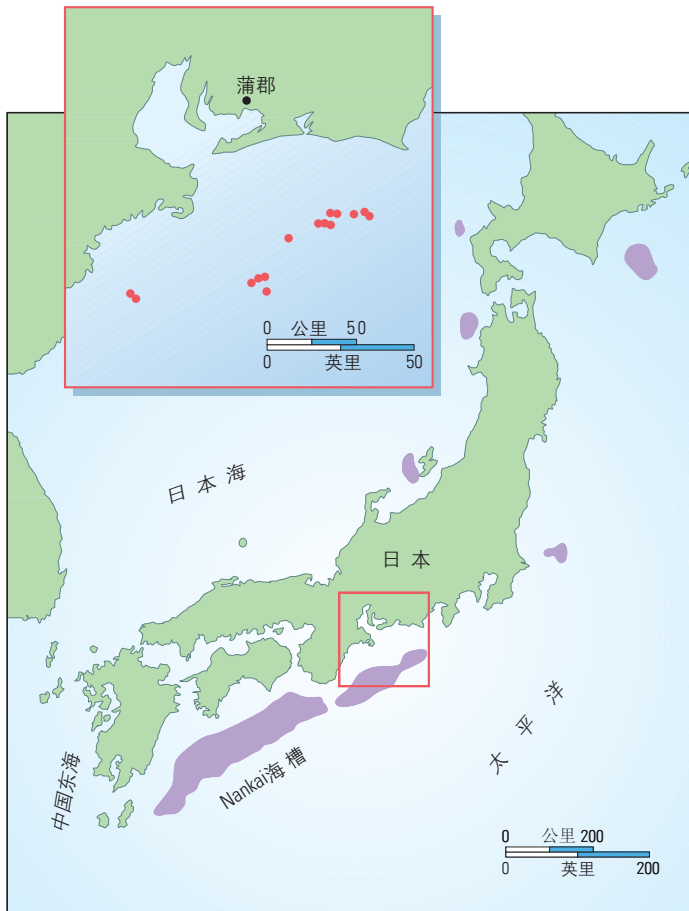
东部Nankai海槽中的水合物

水合物勘探的另一个区域是日本近海东部Nankai海槽地区。地震资料显示这里存在广泛的拟海底反射层（BSR）（下一页，上图）。1999年，由日本政府资助的项目在东部Nankai海槽成功钻穿了一个拟海底反射层，采集了大量天然气水合物样品^[20]。几年后，在2001年，日本政府启动了一

项将历时18年的勘探项目，旨在评价天然气水合物的分布、估算储量、开发甲烷水合物气田^[21]。

作为该项目的一部分，进行了二维和三维地震勘探，并穿过拟海底反射层在水深722-2033米（2370-6670英尺）的海域钻了32口井。水合物稳定带的底部在海底以下177-345米





▲ 日本近海的Nankai海槽地区。图中红色圆点表示东部Nankai海槽地区内的井位（插图）。从地震资料拟海底反射层（紫色）可知大片海域存在水合物。

（581－1132英尺）深处。在所有已钻井中，16口井进行了随钻测井，12口井进行了取心，两口井进行了电缆测井，1口井安装了长期温度传感器^[22]。从各种水合物沉积层采集了岩心（下图）。

众多研究项目中的一项是集中对测井记录进行分析，目的是确定天然气水合物的饱和度^[23]。作为孔隙空间中的固体物质，用核磁共振仪器无法识别天然气水合物。虽然水和甲烷中都含有氢原子，但它们都被锁在水合物晶格状结构中，核磁共振仪器无法对其实现控制。由于无法进行核磁共振测量，得出的孔隙度值一般比其他仪器得到的测定值低。可用两种测量结果的差值来估算水合物体积。这种方法类似于密度磁共振（DMR）方法，后者是针对确定气藏含气饱和度而开发的方法^[24]。

采用这一方法帮助测井分析员根据东部Nankai海槽一口井的电缆测井资料对饱和度进行了评估^[25]。从自然伽马、井径、电阻率、中子、密度、磁共振和声波测井测井数据来看，含水合物层与不含水合物层交替出现（下一页图）。根据磁共振仪器观测到的孔隙度和根据密度测井仪器数据计算出的差值对应于沉积层中水合物的近似体积。除了冲刷影响密度和磁共振读数之外，根据电阻率和磁共振响应计算出的饱和度基本相符。冲刷



▲ 取自东部Nankai海槽地区的天然气水合物。在一处位置，天然气水合物（白色）占据着砂泥带中的一层（左）。在另一处位置，水合物分散在砂岩层的孔隙空间中（右）。图中标尺单位是厘米。

主要发生在不含水合物层。

利用现有的全部岩心、测井和地震数据，专家们估算出东部Nankai海槽地区已勘探区域内甲烷气总量为40万亿英尺³（1.1万亿米³）^[26]。

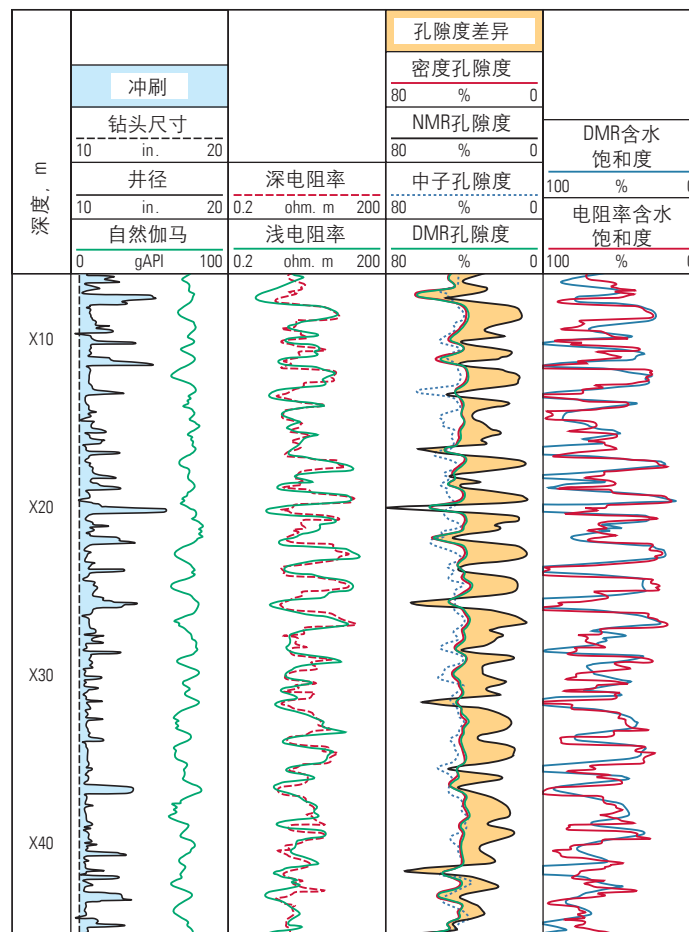
最近日本天然气水合物开发项目宣布将继续准备在Nankai海槽几个地方进行天然气水合物产能现场测试^[27]。

印度勘探天然气水合物实例

对于印度而言，天然气水合物也是一种潜在资源，印度目前的油气产量不足以满足其经济发展的需求。根据地震资料识别出的拟海底反射层推断出在印度大陆边缘存在天然气水合物。印度的天然气水合物总储量估计在1894万亿米³（66880万亿英尺³）^[28]。

1997年，印度政府制定了国家天然气水合物计划（NGHP），勘探开发本国的天然气水合物资源。2006年首批国家天然气水合物计划科考活动在印度洋四个地区进行了勘探（下一页图）。国家天然气水合物计划一号科考队的主要目标是进行科学海洋钻井、取心、测井和分析活动，评价沿印度大陆边缘天然气水合物沉积的地质情况，区域背景和特征^[29]。

科考组由100多位科学家和专业人员组成，分别来自30多所大学、国家机构和公司。在113天的科考活动过程中，科学海洋钻井船JOIDES Resolution在水深907–2674米（2975–8774英



▲ 水合物带地层评价。第1道是自然伽马（绿色）和井径记录（黑色实线），蓝色填充区表示冲刷段。第2道包括浅电阻率和深电阻率资料。高电阻率对应富含水合物的地层，低电阻率代表不含水合物的地层，即在钻井过程中易于发生冲刷的地层。第3道是中子孔隙度（蓝色虚线）、密度孔隙度（红色）、核磁共振孔隙度（黑色）和通过密度和核磁共振测量方法组合测定出的密度核磁共振孔隙度（绿色）。金色阴影代表天然气水合物的体积。第4道显示根据电阻率计算出的含水饱和度（红色）和根据密度-核磁共振差异计算出的含水饱和度（蓝色）。第3道和第4道上的几个峰值与井眼冲刷有关。

20. Matsumoto R, Takedomi Y和Wasada H: “Exploration of Marine Gas Hydrates in Nankai Trough, Offshore Central Japan”, 发表在AAPG年会上, 丹佛, 2001年6月3-6日。

21. Fukuhara M, Sugiyama H, Igarashi J, Fujii K, Shun'etsu O, Tertychnyi V, Shandrygin A, Pimenov V, Shako V, Matsubayashi O和Ochiai K: “Model-Based Temperature Measurement System Development for Marine Methane Hydrate-Bearing Sediments”, 第五届天然气水合物国际会议文集, 挪威特隆赫姆, 2005年6月13-16日。

22. Takahashi H和Tsuji Y: “Multi-Well Exploration Program in 2004 for Natural Hydrate in the Nankai-Trough Offshore Japan”, 论文OTC 17162, 发表在海洋技术大会上, 休斯敦, 2005年5月2-5日。

23. Murray D, Kleinberg R, Sinha B, Fukuhara M,

Osawa O, Endo T和Namikawa T: “Formation Evaluation of Gas Hydrate Reservoirs”, SPWLA第46届测井年会论文集, 新奥尔良, 2005年6月26-29, 论文SSS。

24. Freeman R, Cao Minh C, Gubelin G, Freeman JJ, McGinness T, Terry B和Rawlence D: “Combining NMR and Density Logs for Petrophysical Analysis in Gas-Bearing Formations”, SPWLA第39届测井年会论文集, 美国科罗拉多州Keystone, 1998年5月26-29日, 论文II。

25. Murray DR, Kleinberg RL, Sinha BK, Fukuhara M, Osawa O, Endo T和Namikawa T: “Saturation, Acoustic Properties, Growth Habit, and State of Stress of a Gas Hydrate Reservoir from Well Logs”, *Petrophysics*, 47卷, 第2期(2006年4月): 129-137。

26. Fujii, Saeki T, Kobayashi T, Inamori T, Hayashi

M, Takano O, Takayama T, Kawasaki T, Nagakubo S, Nakamizu M和Yokoi K: “Resource Assessment of Methane Hydrate in the Eastern Nankai Trough, Japan”, 论文OTC 19310, 发表在海洋技术大会上, 休斯敦, 2008年5月5-8日。

27. Masuda Y, Yamamoto K, Tadaaki S, Ebinuma T和Nagakubo S: “Japan's Methane Hydrate R&D Program Progresses to Phase 2”, *Fire in the Ice* (2009年秋): 1–6, <http://www.netl.doe.gov/technologies/oil-gas/publications/Hydrates/Newsletter/MHNewsFall09.pdf#Page=1> (2010年3月9日浏览)。

28. 印度政府油气总局: “Gas Hydrate: R&D Advances in India”, <http://www.dghindia.org/NonConventionalEnergy.aspx?tab=2#3> (2010年2月17日浏览)。



▲ 印度国家天然气水合物项目 (NGHP) 2006年度考察活动勘探现场 (红色圆圈)。JOIDES Resolution 钻探船上的科考队对从四个地区39口井中采集的资料进行了评价分析。从Krishna-Godavari地区采集的样品 (插图) 中发现有明显的水合物聚集。(根据Collett等人的资料修改, 参考文献29)。

尺) 范围内共钻了39口井。科学家采收了2850米 (9350英尺) 的岩心, 对12口井进行了随钻测井, 另外13口井进行了电缆测井, 进行了6次井眼地震测量。

岩心分析显示水合物出现在多种环境中。如在世界其他地区一样, 在印度洋水合物出现在粗粒沉积物中。更令人惊奇的是在细粒沉积物中也发现了大量水合物, 此类水合物成层状、透镜状、束状近似垂直纹理, 大部分沿一种走向分布, 少量与主走向交叉分布。

在孔隙空间中有水合物聚集的层段中, 可用阿尔奇公式确定水合物饱和度。但在其他地层, 例如水合物聚集在裂缝中的低渗透沉积层, 阿尔奇公式不再适用, 但仍可采用电阻率测井和成像资料识别水合物填充的裂缝。

在Krishna-Godavari地区的几口井中, 钻头处电阻率 (RAB) 随钻测井仪器记录的成像资料清楚地显示出了高阻水合物填充裂缝和低阻裂缝的情

况^[30]。大部分井中的裂缝倾角都较很陡, 在70-80° (下一页图)。根据倾角数据计算出的应力方向表明最大水平应力方向垂直于印度大陆架斜坡的边沿 (这一发现与有文件记载的井深比NGHP计划所研究的井更深的其他被动大陆边缘所得结果不一致)。这种矛盾说明裂缝的出现可能与局部沉降和滑动有关, 说明起作用的是浅层应力, 而不是深层构造应力^[31]。

在NGHP-01-10现场发现的以泥岩为主的水合物填充裂缝层段是目前发现的最丰富的海上天然气水合物聚集集体之一^[32]。这次科考活动的一个亮点就是发现了迄今已知的埋藏最深的天然气水合物聚集集体之一: 在位于安达曼岛近海的NGHP-01-017现场, 海底以下600米 (1970英尺) 深处发现了富含天然气水合物的火山灰层。未来计划将在部分地点启动试验项目, 进行甲烷气开采。

其他勘探项目

日本和印度在海上天然气水合物

勘探方面取得的成功也鼓舞了其他国家积极制定类似的勘探计划。例如, 中国已经在有利于水合物保持稳定的区域开始了调查项目。

中国首次天然气水合物钻井勘探活动GMGS-1是在2007年由广州海洋地质调查局 (GMGS)、中国地质调查局 (CGS) 和中华人民共和国国土资源部共同组织实施的。Bavenit号钻探船在中国南海神狐海域的8个现场进行了勘探。在这次勘探活动中, 项目组不仅划定了一个新的天然气水合物分布区域, 还确定了水合物在沉积物中新的分布模式^[33]。

在每个勘探现场都钻了一口测试井, 然后采用一套高分辨率小井眼电缆测井仪器进行了测井。根据测井记录决定是立即在附近钻取心井还是移到下个勘探现场。

在已取心的五个勘探现场中的三个, 在水合物稳定带基底之上富含粘土和粉砂的沉积物中发现了天然气水合物。富含水合物的地层厚度从10米到25米不等 (33-82英尺)。水合物均匀分布在细粒沉积物中, 占到孔隙体积的20-40%。尽管水合物分散在粗粒沉积物中和以粘土为主的沉积物中的水合物填充裂缝这两类情况很常见, 但在极细颗粒的地层中这么高饱和度的水合物却很少见。

勘探活动中采集的岩心样品和资料将由广州海洋地质调查局和分布在全国各地的实验室进行进一步分析。目前正在讨论未来对神狐海域和南海边缘其他海域进行勘探的可能性。

从水合物中开采甲烷

虽然很多国家和组织都发现天然气水合物储量丰富, 且分布广泛, 但如何安全、高效、经济地从水合物中开采甲烷却仍然存在问题。要解决这一问题, 首先要了解不同储集环境下水合物的分离机制。

安全也是一个重要问题。孔隙空间中的水合物加强了岩石颗粒基质, 但当固体水合物转化成天然气和水

时，孔隙填充物的体积会大大增加，沉积物被液化，削弱了沉积层的强度和硬度。这可能导致产层中的沉积物被压实、覆压过大，断层不稳定，出砂，以及其他可能破坏基础生产设施的问题。因此，水合物开采技术要想取得成功必须能够防止沉积物不稳定情况的发生。

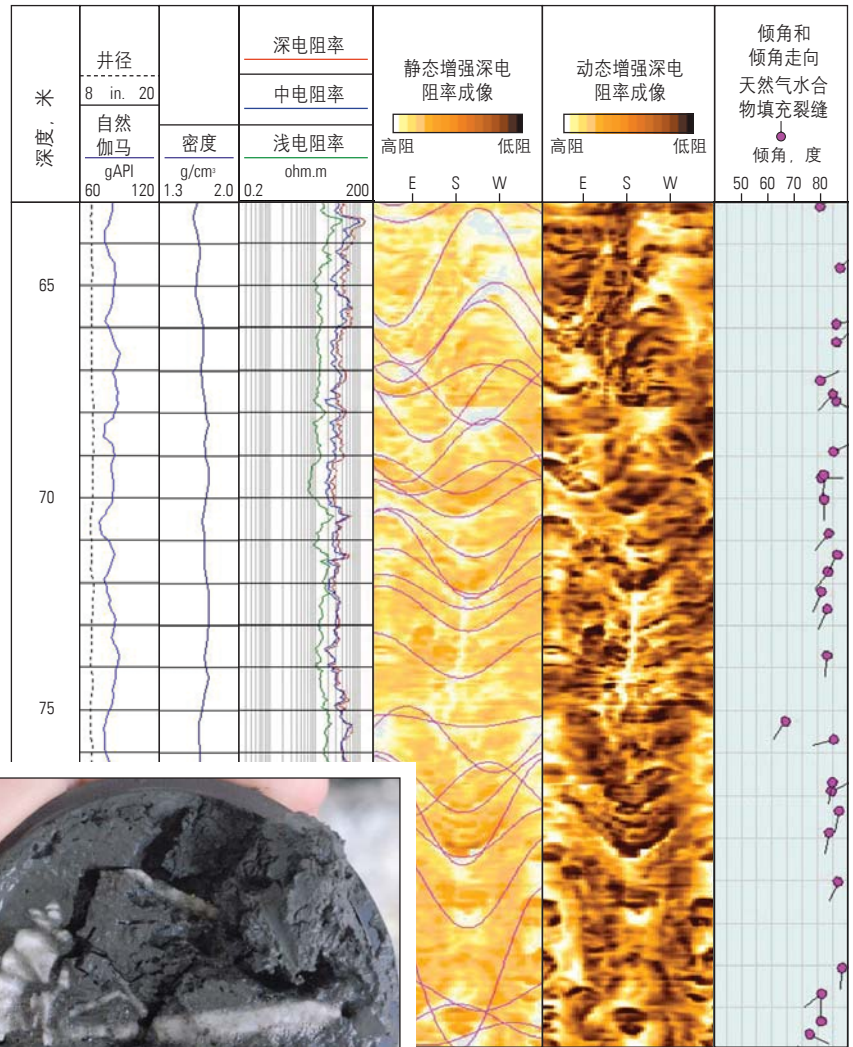
为了从水合物中开采甲烷，专家们一致认为，从砂岩沉积物中开采水合物成功的可能性最大，同时新技术方面需要的投资也最低。

目前已对两种主要的水合物开采甲烷技术进行了现场测试，这两项技术分别是加热和降压。考虑到进入便利，专家们选择在冻土区的陆上水合物聚集体进行了测试。在加拿大西北地区的Mallik 天然气水合物气田和阿拉斯加的Mount Elbert远景区进行了综合测试。

Mallik气田天然气水合物开采

波弗特海马更些三角洲的Mallik气田在天然气水合物调查方面已有很长的历史（[下一页，上图](#)）^[34]。1972年帝国石油有限公司在勘探钻井过程中发现了水合物。上世纪90年代初，加拿大地质调查局（GSC）对麦肯希三角洲地区的天然气水合物进行了区域评价。后来在1998年，日本国家石油公司（JNOC）和GSC与其他几所科研单位合作，完成了Mallik 2L-38 天然气水合物研究井计划。

根据这些研究结果，确立了Mallik气田是世界上天然气水合物聚集体最集中的地区之一^[35]。富含水合物的



▲ 从Krishna-Godavari地区取得的井眼成像和岩心资料。从NGHP-01-10A井采集的测井记录中，在井眼成像记录（第4和第5道）上可以看出大倾角裂缝（第6道）中含有高电阻率天然气水合物（浅色）。裂缝倾角基本上呈70°-80°。（测井记录由Lamont-Doherty地球观测站的Ann Cook提供）。从岩心样品（插图）可以看出天然气水合物（白色）充填在黑色细粒沉积物的裂缝中。（岩心图片由NGHP一号科考队提供。）

29. 美国地质调查局，“Results of the Indian National Gas Hydrate Program (NGHP) Expedition 01”，<http://energy.usgs.gov/other/gashydrates/india.html>（2010年2月17日浏览）。
Collett TS, Riedel M, Cochran J, Boswell R, Kumar P, Sathe A和NGHP Expedition 01 Scientific Party: “Geologic Controls on the Occurrence of Gas Hydrates in the India Continental Margin: Results of the Indian National Gas Hydrate Program (NGHP) Expedition 01”，根据AAPG年会上

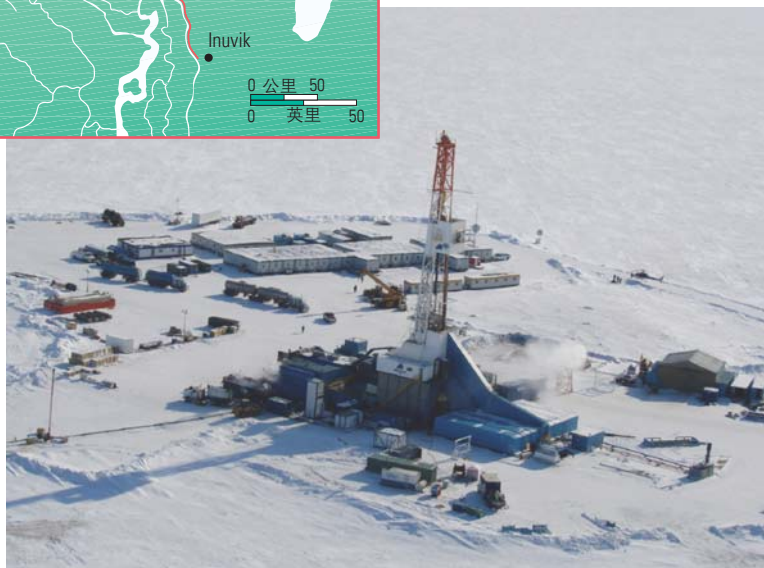
的报告修改，得克萨斯州San Antonio, 2008年4月20-23日，http://www.searchanddiscovery.net/documents/2008/08135collett/ndx_collett01.pdf（2010年2月17日浏览）。

30. Cook A和Goldberg D: “Stress and Gas Hydrate-Filled Fracture Distribution, Krishna-Godavari Basin, India”，第六届天然气水合物国际会议文集，加拿大不列颠哥伦比亚省温哥华，2008年7月6-10日。

31. Cook 和Goldberg: 参考文献30。

32. Collett等人，参考文献29。

33. Zhang H, Yang S, Wu N, Su X, Holland M, Schultheiss P, Rose K, Butler H, Humphrey G 和GMGS-1 Science Team: “Successful and Surprising Results for China’s First Gas Hydrate Drilling Expedition”，*Fire in the Ice* (2007年秋): 6-9, <http://www.netl.doe.gov/technologies/oil-gas/publications/Hydrates/Newsletter/HMNewsFall07.pdf>（2010年2月17日浏览）。



▲ 位于加拿大西北地区的Mallik气田。自1972年以来，Mallik气田已成为天然气水合物的发现和研究地区。该地区只在冬季通过一条冰路可以进入。（图片由加拿大地质调查局的Scott Dallimore提供）。



▲ 2002年采集的Mallik气田天然气水合物岩样。白色的天然气水合物存在于中砾岩孔隙空间中。（图片由加拿大地质调查局的Scott Dallimore提供）。

砂岩夹层出现在890–1106米（2920–3629英尺）深处，某些地层的厚度超过30米（100英尺）^[36]。在某些地区，水合物饱和度超过80%（左下图）。Mallik气田地下资料丰富、陆上进出道路方便、与很多海洋水合物沉积层具有相似性，这些优点使得该气田成为有吸引力的研究区。

2002年启动了一项新计划，在Mallik气田进行水合物生产测试^[37]。该生产研究计划包括加拿大地质调查局和日本国家石油公司，同时建立了与国际大陆科学钻探计划以及来自美国、德国和印度的研究机构之间的正式合作关系。钻了一口1166米（3825英尺）深的生产井，完成了取心、测井和下套管，另外还钻进了两口1188米（3898英尺）深的观察井，并下了套管。用安装在每口井中的分布式光纤温度传感器监测了地层对热力增产措施和降压措施的反应情况，在生产井中重复进行了套管井测井，并在监测井中进行了井间地震勘探。

选择用于热采测试的13米（43英尺）厚的层段为页岩包夹的相对纯净的砂岩，位于冻土下面，水合物饱和度范围在70–85%^[38]。将盐水加热后通过射孔进行循环。流体和产出气通过循环管柱和套管间的环空返回到地面。在5天的测试过程中，累计产气量为516米³（1.82万英尺³）^[39]。

用测试前裸眼井电阻率测井记录和测试后套管井电阻率测井记录之间的差值确定测试层段上的水合物分解半径（下一页图）^[40]。分析结果表明水合物分解半径并不统一，分解最大半径位于循环管柱的出口附近，在此处分布式光纤温度传感器记录到最高的温度值。除了沿整个地层温度发生变化外，孔隙度、渗透率以及水侵的变化也可能影响与地层之间的热交换。

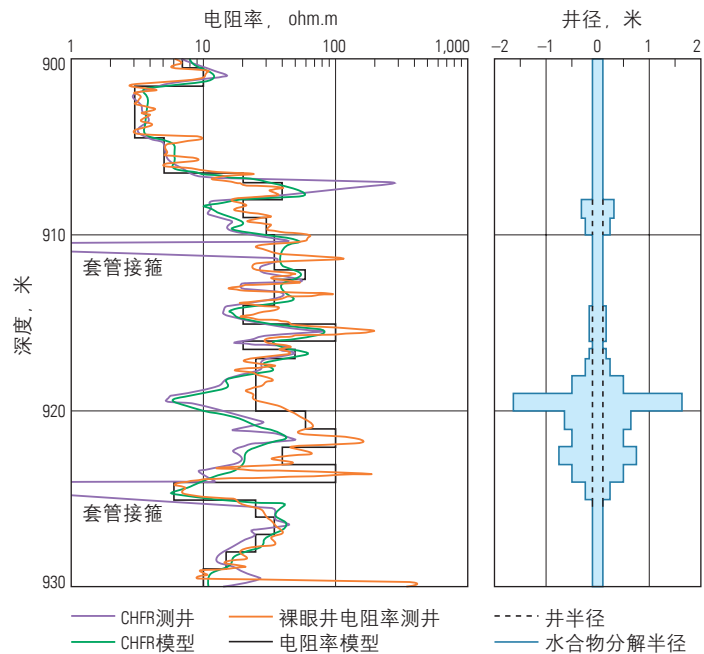
在测试井的深层，采用模块式地层动态测试器（MDT）对6个富含水合物的地层进行了小范围压降测试^[41]。采集了气样和水样，并记录了压力和

流量的变化。通过分析上述资料和其他资料，同时结合大规模数值模拟，研究组得出了结论：降压方法比热力增产措施能更有效地促进水合物分解。

Mallik气田生产测试研究的下一阶段在2007和2008年冬季进行。对于这个项目，日本方代表为日本国家石油天然气及金属公司（JOGMEC），加拿大方代表为加拿大自然资源部。加拿大西北地区Inuvik的Aurora研究院担任作业者。该计划旨在利用降压技术推进长期生产测试。另外也高度重视天然气水合物开采过程中各种地球物理监测技术的设计与测试以及井下完井技术评价。

2007年冬季当通往Inuvik 200公里的冰路结冻后才进入现场进行施工，施工内容包括安装Mallik 2L-38井（1998年研究项目的一部分）的基础生产设施，进行短期生产测试。测试层段12米（39英尺）厚，靠近富含水合物层的底部。在射孔位置以下安装了一台电潜泵，通过降低井中液面降低地层压力。在第一年测试过程中由于许可限制，作业计划要求在同一井眼中进行产出水处理。为实现这一目标，在井眼中进行了气水分离；气体采出到地面，采出水被重新回注到水合物测试段下面的水层^[42]。

2007年4月，在没有采取防砂措



▲ 确定水合物分解体积。2002年在Mallik气田进行热力增产生产测试前后分别采集了测井记录（左）。通过对比测试前采集的裸眼井电阻率记录（橘色）和测试后采集的CHFR套管井地层电阻率测井记录（紫色），确定测试层段上水合物分解半径。两种电阻率记录的差异对应的即为随深度变化的水合物分解半径模型（右）。（根据Anderson等人的资料修改，参考文献38）。

施的情况下进行生产测试，监测并记录了地层对压降的直接反应^[43]。和预期的一样，出砂量很大，以至于60小时后不得不中断测试。但在最成功的12.5小时的抽汲过程中，产出了830米³（2.93万英尺³）的气，比2002年的5天热力增产测试中产出的气还要多^[44]。出砂情况也比预期严重得多，这个问题在将来施工过程中必须克服。研究

小组计划在来年结冰条件允许时，再继续施工。

通过回顾总结第一个冬季的施工经验，研究小组简化了研究计划，于2008年冬季又回到了Mallik气田现场。这一次产出水先采回到地面，然后再回注到水处理井中。

另外，测试前安装了特制的防砂筛管，以控制出砂（[下一页](#)，[上图](#)）。

34. Dallimore SR, Collett S, Uchida T, Weber M, Chandra A, Mroz TH, Caddell EM, Inoue T, Takahashi H, Taylor AE和Mallik天然气水合物研究小组：“The Mallik Gas Hydrate Field: Lessons Learned from 30 Years of Gas Hydrate Investigation”，*AAPG Bulletin*，88卷，第13期（增刊），2004年。

35. Dallimore等人，参考文献34。

36. Dallimore SR, Uchida T和Collett TS（编辑）：Scientific Results from JAPEX/JNOC/GSC Mallik 2L-38 Gas Hydrate Research Well, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada; *Geological Survey of Canada Bulletin 544*, 1999年。

37. Dallimore SR和Collett TS（编辑）：Scientific Results from the Mallik 2002 Gas Hydrate Research Well Program, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada; *Geological Survey of Canada Bulletin 585*, 2005年，参见<http://geoscan.ess.nrcan.gc.ca/cgi-bin/starfinder/0?path=geoscan.fl&id=fastlink&pass=&search=R%3D220702&format=FLFULL>（2010年4月1日浏览）。

“The Mallik 2002 Consortium: Drilling and Testing a Gas Hydrate Well”，美国能源部国家甲烷水合物研究开发项目，<http://www.netl.doe.gov/technologies/oil-gas/FutureSupply/MethaneHydrates/projects/DOEProjects/Mallik-41007.html>（2010年2月11日浏览）。

38. Anderson BI, Collett TS, Lewis RE和Dubourg I：“Using Open Hole and Cased-Hole Resistivity Logs to Monitor Gas Hydrate Dissociation During a Thermal Test in the Mallik 5L-38 Research Well, Mackenzie Delta, Canada”，*Petrophysics*，49卷，第3期（2008年6月）：285-294。

39. Dallimore 和Collett，参考文献37。

40. Anderson等人，参考文献38。

41. Hancock SH, Dallimore SR, Collett TS, Carle D, Weatherill B, Satoh T和Inoue T：“Overview of Pressure-Drawdown Production-Test Results for the JAPEX/JNOC/GSC et al. Mallik 5L-38 Gas Hydrate Production Research Well”，Dallimore SR和Collett TS（编辑）：Scientific Results from the Mallik 2002 Gas Hydrate Research

Well Program, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada; *Geological Survey of Canada Bulletin 585*, 2005年，参见<http://geoscan.ess.nrcan.gc.ca/cgi-bin/starfinder/0?path=geoscan.fl&id=fastlink&pass=&search=R%3D220702&format=FLFULL>（2010年4月1日浏览）。

42. Yamamoto K和Dallimore S：“Aurora-JOGMEC-NRCan Mallik 2006-2008 Gas Hydrate Research Project Progress”，*Fire in the Ice*（2008年夏）：1-5，<http://www.netl.doe.gov/technologies/oil-gas/publications/Hydrates/Newsletter/HMNewsSummer08.pdf#Page=1>（2010年2月17日浏览）。

43. “Energy from Gas Hydrates: Assessing the Opportunities & Challenges for Canada”，*Report in Focus*（2008年7月），http://www.scienceadvice.ca/documents/2008_07_07_GH_Report_in_Focus.pdf（2010年1月27日浏览）。

44. Hancock等人，参考文献41。

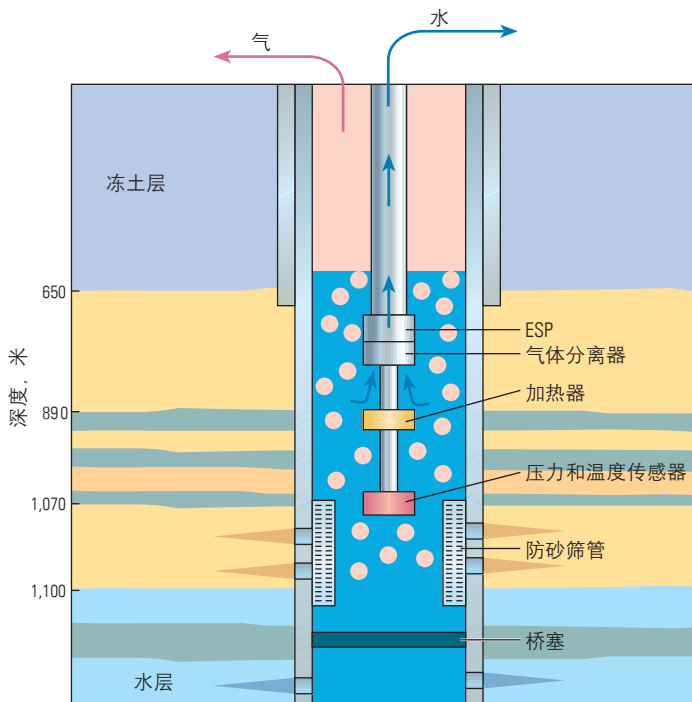
测试进行了6天，非常成功，产气量保持在2000—4000米³/日（7—14万英尺³）^[45]。按照三个压降压力目标连续进行了测试，作业都很顺利。Mallik气田

测试成功证明了如下概念，即通过采用适合极地条件的常规油田技术进行降压便可从水合物中开采天然气。

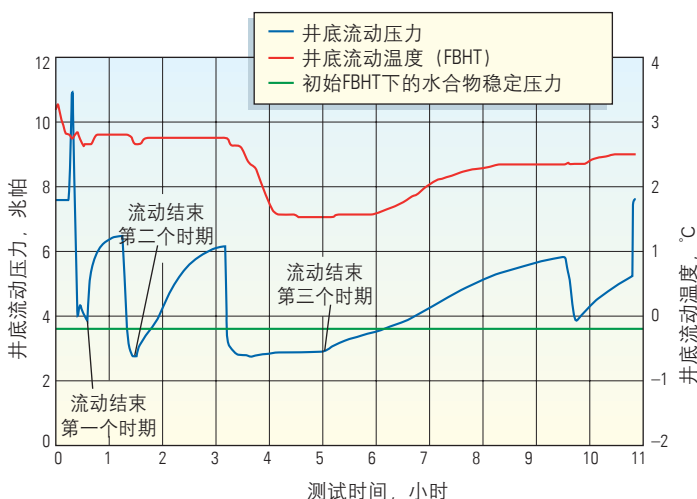
阿拉斯加的天然水合物开采

美国地质调查局研究了阿拉斯加州北坡地区的天然气水合物聚集特征，目前估计该地区现有技术可采储量为25.2—157.8万亿英尺³（7140—44680亿米³）的未发现天然气^[46]。其中很多天然气存在于现有油气生产设施附近的水合物沉积体中（[下一页图](#)）^[47]。

该地区早期的水合物研究可回溯到1972年，当时阿科和埃克森石油公司在Northwest Eileen State-2井进行



▲ 2008年Mallik气田降压生产测试采用的完井方式。在射孔上部位置安装了一台电潜泵（ESP），通过降低井中液面水平来降低地层压力。安装了防砂筛管以阻止砂从疏松地层流入井眼。水合物分解产生气体和水。气水分离后，气体排出到地面，产出水取样之后重新回注到单独的水处理井中。（根据Yamamoto和Dallimore的资料修改，参考文献42）。



▲ 天然气水合物生产测试。采用模块式地层测试器通过从高饱和度天然气水合物储层中抽汲水的方法来降低井的压力。在液体抽汲或流动期间，关闭泵，监测压力恢复情况，并采集气样和水样。第一次流动期间，井底压力（蓝色）保持在水合物稳定压力（绿色）以上，因此没有甲烷产出。第二次和第三次流动期间，井底压力降低到水合物稳定压力以下，水合物发生分解，有气体产出。（根据Anderson等人的资料修改，参考文献51）。

45. Report in Focus, 参考文献43。
46. “Assessment of Gas Hydrate Resource on the North Slope, Alaska, 2008”, 美国地质调查局, Fact Sheet 2008-3073 (2008年10月), http://pubs.usgs.gov/fs/2008/3073/pdf/FS08-3073_508.pdf (2010年1月18日浏览)。
47. “Alaska North Slope Gas Hydrate Reservoir Characterization”, 美国能源部国家甲烷水合物研究开发计划, <http://www.netl.doe.gov/technologies/oil-gas/futuresupply/methanehydrates/projects/DOEProjects/Alaska-41332.html> (2010年1月18日浏览)。
48. Collett TS: “Natural Gas Hydrates of the Prudhoe Bay and Kuparuk River Area, North Slope, Alaska”, *AAPG Bulletin*, 77卷, 第5期 (1993年5月): 793-812。
49. “BP Drills Alaska North Slope Gas Hydrate Test Well to Assess Potential Energy Resource”, BP新闻稿 (2007年2月), <http://www.bg.com/genericarticle.do?categoryId=2012968&contentId=7028944> (2010年1月18日浏览)。
50. Boswell R, Hunter R, Collett T, Digert S, Hancock S, Weeks M和Mount Elbert科学小组: “Investigation of Gas Hydrate-Bearing Sandstone Reservoirs at the “Mount Elbert” Stratigraphic Test Well, Milne Point, Alaska”, *第六届天然气水合物国际会议文集, 加拿大不列颠哥伦比亚省温哥华, 2008年7月6-10日*。
51. Anderson BJ, Wilder JW, Kurihara M, White MD, Moridis GJ, Wilson SJ, Pooladi-Darvish M, Masuda Y, Collett TS, Hunter RB, Narita H, Rose K和Boswell R: “Analysis of Modular Dynamic Formation Test Results from the Mount Elbert-01 Stratigraphic Test Well, Milne Point Unit, North Slope of Alaska”, *第六届天然气水合物国际会议文集, 加拿大不列颠哥伦比亚省温哥华, 2008年7月6-10日*。
52. Collett T和Boswell R: “The Identification of Sites for Extended-Term Gas Hydrate Reservoir Testing on the Alaska North Slope”, *Fire in the Ice* (2009年夏): 12-16, <http://www.netl.doe.gov/technologies/oil-gas/publications/Hydrates/Newsletter/MHNewsSummer09.pdf> (2010年1月27日浏览)。
53. 美国能源部, 参考文献47。
54. Report in Focus, 参考文献43。

了钻井、取心并对甲烷水合物进行了测试^[48]。但测试结果表明达不到经济产量；因此阿拉斯加的天然气水合物储层没有被视为潜在天然气储层，而被视为开发更深层目标层时的钻井风险。

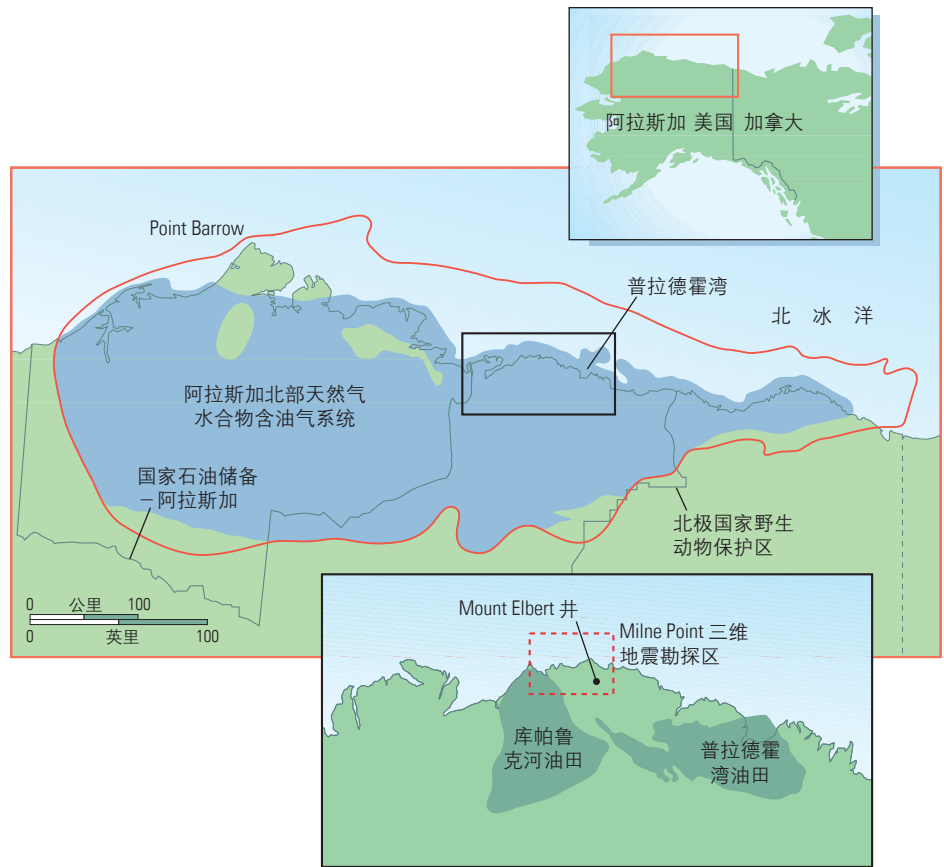
最近对阿拉斯加天然气水合物资源的评价始于2001年，由BP阿拉斯加勘探公司、美国能源部和美国地质调查局合作完成。BP在其Milne Point生产区进行了三维地震勘探。通过分析三维地震资料，并借助测井和储层模型研究方面的公共信息，美国地质调查局的科学家们识别出了几处潜在的水合物聚集区，并选出最具前景的探区进行测井和岩心资料采集。

2007年，项目组钻了Mount Elbert天然气水合物研究井，并采集了井资料^[49]。在地下1800–2500英尺（550–760米）深处钻遇了含水合物地层。为了防止出现水合物分解和井眼不稳定问题，将油基钻井液冷冻到32°F（0°C）以下。完钻后井径保持规则，采集到了高品质的资料。

采集到的资料包括随钻测井记录和大量的裸眼井电缆测井记录，连续取心长度超过500多英尺（152米），并采用模块式地层测试器进行了压力测试。通过测井分析，证实存在100英尺厚的水合物饱和砂岩，其孔隙度高达40%，固有渗透率有几个达西，水合物饱和度范围在45–75%^[50]。

核磁共振测井记录显示即使是在水合物饱和度最高的层段依然存在可动水。作为降压的第一步应先从地层中抽汲出可动水，这是从不接触自由气或水的水合物中开采甲烷的前提条件。

模块式地层测试器测试显示出不同压降下的一系列结果^[51]。第一次流动期间，有意使测试层段压力保持在水合物平衡压力以上，因此没有发生水合物分解，也没有气体产出（[前一页](#)，[下图](#)）。第二次和第三次流动期间，地层压力降到了水合物稳定压力之下，有气体产出。采用储层模拟器成功模拟了压力响应情况。



▲ 阿拉斯加的天然气水合物。图中蓝灰色阴影区表示阿拉斯加北部地区的天然气水合物含油气系统。红色表示天然气水合物稳定带的边界。红色虚线方形区为三维地震勘探区。（根据美国地质调查局Fact Sheet 2008-3073修改，参考文献46）。

通过模拟研究得到的一项主要观察结论是短期生产测试并不一定能够显示出天然气水合物储层在完全开发条件下的生产动态。随着水合物的分解，可供流体流动的孔隙空间也会随之发生变化。例如，在Mount Elbert案例中，当井压高于水合物稳定压力时，原地有效渗透率范围在0.12–0.17毫达西。将井压降低到水合物稳定压力以下，就会导致孔隙空间中的水合物发生分解，有效渗透率增加。

为在阿拉斯加北坡进行长期生产测试，科学家们需要全年能够进入具备基础设施的井场。目前已对普拉德霍湾、库帕鲁克河和Milne Point油田中的七个潜在地面位置进行了评价^[52]。确认普拉德霍湾的一个地点为最佳测试点，因为这里具备地质风险低、作业风险低、施工灵活性最强、获得有价值储层响应希望大等综合优势。目

前BP和其他几家公司正在讨论在那里进行长期生产测试的方案^[53]。

未来的发展

目前我们对从水合物中开采天然气的认识类似于30年前对煤层气和稠油砂岩的认识^[54]。虽然煤层气地层和油砂经过了几十年才实现商业化开采，但目前要确定天然气水合物资源的开发前景还为时尚早。

从资源供给和获取条件来看，有几个国家对于利用天然气水合物满足未来能源需求持乐观态度。日本、印度、中国和韩国，所有这些需要进口石油和天然气的国家，都已启动水合物开发计划，探寻将甲烷从水合物冰笼中开采出来的可能性。和其他非常规资源一样，水合物开发无疑将从原本为常规油气勘探生产而设计的技术中获益。

– LS