

海域天然气水合物勘探的地球物理方法

栾锡武¹, 赵克斌², 孙冬胜³, 岳保静^{1,4},
鲁银涛^{1,4}, 张亮^{1,4}, 王静^{1,4}

(1. 中国科学院海洋研究所, 青岛 266071; 2. 中国石油化工股份有限公司, 石油勘探开发研究院,
无锡石油地质研究所, 无锡 214151; 3. 中国石油化工股份有限公司, 石油勘探开发
研究院, 北京 100083; 4. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 到目前为止, 已经探明的天然气水合物储量要远小于预测的水合物储量. 这种现状不同程度地反映出我们对天然气水合物赋存规律认识不足, 和对天然气水合物勘探方法认识不足. 本文根据作者多次参加水合物地球物理调查国际航次的认识及文献资料, 综述了海域天然气水合物勘探方面一些有效的地球物理技术方法, 以利于我国海域天然气水合物的勘探工作以及勘探方法的创新. 本文指出, 地震勘探是目前进行天然气水合物勘探最常用、也是最重要的方法. 地震方法主要包括传统的单道、多道地震方法、高分辨地震方法、深拖多道地震探测方法、海底地震仪方法、多道-多分量海底地震电缆方法、海底地震检波器方法等. 此外, 根据水合物发育区特有的海底地形地貌特征和水体异常特征, 根据水合物发育所需要的温度-压力场特征、电磁特征和含水合物地层的剪切模量特征发展的多波束方法、旁扫声纳方法、海底热流探测方法、海底电磁方法以及海底重力测量方法等都在海域天然气水合物勘探中有着很好的效果.

关键词 海域天然气水合物, 地球物理, 勘探, 方法

中图分类号 P631

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2008)01-0210-10

Geophysical methods for marine gas hydrates exploration

LUAN Xi-wu¹, ZHAO Ke-bin², SUN Dong-sheng³, YUE Bao-jing^{1,4},
LU Yin-tao^{1,4}, ZHANG Liang^{1,4}, WANG Jing^{1,4}

(1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China;

2. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi 214151, China;

3. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, SINOPEC, Beijing 100083, China;

4. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract Up to now, there are big different between the amount of gas hydrates explored and the amount of gas hydrates estimated. This situation clearly shows our short of understanding of formation mechanism of natural gas hydrates and also our short of understanding of gas hydrates exploration methods. Based on the experiences from international gas hydrates exploration cruises, and for short the different stated above, this paper review the geophysical methods used for gas hydrates exploration. The paper shows that seismic method including single channel, multi-channel, high frequency, deep tow multi-channel, OBS, OBC, OBH method, is the most popular and most important method used for gas hydrates exploration. Multi-beam, side scan sonar, heat flow probe, electronic and magnetic observer, and sea bottom gravity meter also successfully used in the gas hydrates exploration.

Key words marine gas hydrates, geophysical, exploration, methods

0 引言

天然气水合物实质上是一种水包气的笼形物,

主要形成于低温高压的环境中, 外形似冰. 石油工业最初关注这类物质是因为它有害于天然气的管道运输. 目前, 气体水合物倍受关注则是因为其广泛的分

收稿日期 2007-05-01; **修回日期** 2007-10-08.

基金项目 中国科学院创新工程重要方向项目(KZCX2-211-01)、“863”项目(2006AA09Z234)和国家自然科学基金项目(40776032)联合资助.

作者简介 栾锡武, 男, 1966年生, 博士, 研究员, 从事海洋地质地球物理研究. (E-mail: xluan@ms.qdio.ac.cn)

布和丰富的甲烷储量。自从 60 年代前苏联科学家在西伯利亚梅索亚哈气田发现了天然状态存在的气体水合物以后,世界各国已陆续在海域活动大陆边缘和被动大陆边缘的深水陆坡区获得了天然气水合物样品。但到目前为止,已经探明的天然气水合物储量要远小于预测的天然气水合物储量^[1,2]。这种现状反映出两个问题,一是我们对天然气水合物的赋存规律认识不足,另一个是我们对天然气水合物勘探方法、储量估算方法认识不足。在过去的几十年中,科学家们除了努力探寻天然气水合物分布规律^[3~6]的同时,也在尝试用多种不同方法进行海域天然气水合物开采,其中一些方法经过钻探检验具有较好的效果。本文根据作者参加 2004 年加拿大水合物综合地球物理调查航次^[7]和 2006 年俄罗斯水合物调查航次所获得认识的基础上,综合其它文献,综述了海域天然气水合物勘探方面一些有效的地球物理技术方法,以利于我国海域天然气水合物的勘探工作以及勘探方法的创新。

1 地震勘探方法

地震勘探是目前进行天然气水合物勘探最常用、也是最重要的方法^[8,9]。其中,传统的单道、多道地震探测^[10,11]在水合物探测过程中一直发挥着重要的作用。但由于其分辨率较低,对于一些“薄层”脉状的气体水合物难以有清楚的空间分布状态显示。为有效地采集来自水合物层的地震反射数据,或者为适合某些特殊的地震数据处理方法,在地震资料采集方法上,除传统的地震方法外,人们发展了高分辨地震方法^[12~14]、深拖多道地震探测(DTAGS)方法^[15,16]、海底地震仪(Ocean Bottom Seismometer)方法^[17]、3C、4C 海底地震电缆(Ocean Bottom Cable)^[18~19]方法、海底地震检波器(Ocean Bottom Hydrophone)方法^[20]等(图 1)。

1.1 传统地震勘探方法

传统地震方法以调查船为作业平台,使用气枪作为震源,使用拖曳电缆来接收地震信号。工作时,气枪和电缆被拖放在调查船的后方,并都位于近海面的位置,采用走航式作业方式。

作为传统地震方法,其气枪震源的能量比较大(如常用的波特枪从单枪到多枪组合,气枪容积从几百可到上千立方英寸),主频比较低(一般在 20~120 Hz 之间),从而有较大的穿透深度,在较大水深情况下,对深部地层同样能有很好的反映。

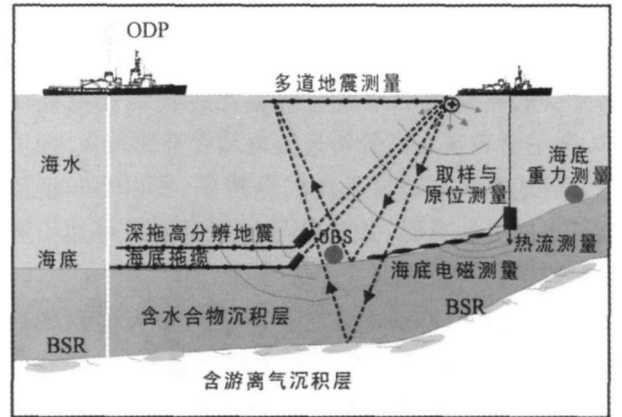


图 1 水合物地球物理勘探方法示意图

Fig. 1 Schematic summary of geophysical methods for gas hydrates exploration

海域天然气水合物发育的区域一般水深都大于 500 m,更常见的情况是水深在 1000 m 以上(如鄂霍次克海 1000 m,卡斯卡迪亚盆地 2000 m,日本南海海槽 3000 m 等),此时天然气水合物稳定域的底界也比较深。大容量的气枪震源有利于穿透厚层的海水层,揭示整个水合物稳定带。

从已有的数据来看,传统地震方法到目前依然是最有效的海域水合物地震勘探方法。其它一些方法往往只是传统地震勘探方法的补充。在卡斯卡迪亚水合物区的一些地震实验结果证实,传统地震方法所揭示的 BSR 是最清楚的。传统地震方法除气枪能量大小的差别外,使用的地震电缆也有不同,比如单道地震电缆和多道地震电缆。同样是卡斯卡迪亚水合物区的地震实验结果显示单道地震方法更容易清楚地显示 BSR 的位置。

1.2 高分辨率地震勘探方法

使用较低频率的震源能够获得较大的穿透深度,从而能够反映更深层的地层结构,但其垂向的分辨率显然受到约束。除探明水合物底界面(BSR)以外,人们开始注意水合物层的细部结构。为达到这个目的,就需要使用高分辨率的地震勘探。

高分辨地震勘探和传统地震勘探在作业方式上没有很大区别,都是使用考察船作为作业平台,将震源和电缆拖在船后近水面的地方。但高分辨率的地震勘探也并不是简单地提高震源的主频和提高采样率。一般地,高分辨地震勘探使用和传统地震勘探不同的设备。高分辨地震勘探设备没有传统地震勘探设备那么复杂,水枪能够提供比波特枪更高频率的震源,如 200 Hz,从而在高分辨地震勘探中广泛使

用.如加拿大地质调查局在温哥华岛外的天然气水合物地震勘探中使用 175 ~ 200 Hz 的震源,取得了很好的效果,处理后的地震剖面上 BSR 非常清楚.高分辨地震使用的地震电缆也比传统地震电缆简单,这主要表现在高分辨地震电缆普遍比较短.因为高分辨地震注重地层垂向的分辨率,所以小角度的反射数据更加重要,并且要尽量避免多道叠加引起的对地层的人为修饰.

2004 年,“Tully”号考察船在加拿大温哥华岛外水合物区进行了高分辨单道地震调查,目的是研究俯冲带增生楔沉积特征、局部构造、水合物的运移通道和气体溢出特征.调查系统使用了单气枪震源,气枪容积为 40 立方英寸,数据采样率为 1 ms,频率为 50 ~ 200 Hz,主频为 180 Hz,波长 8.3 m.在该采集系统所得到的地震剖面上,BSR 非常清楚(图 2).

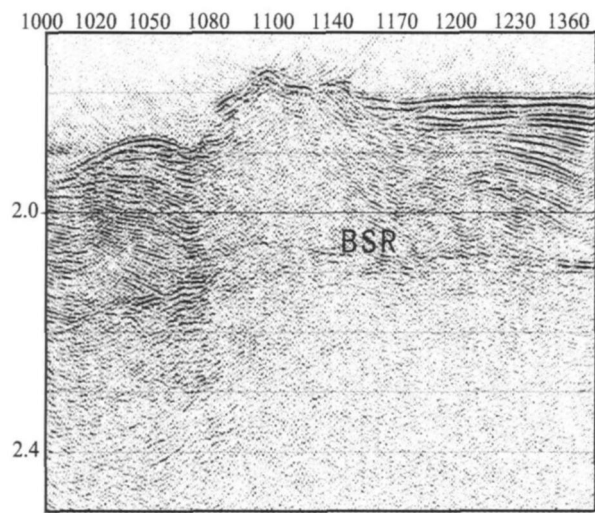


图 2 2004 年加拿大水合物综合地球物理航次获得的单道地震剖面
Fig. 2 Single channel seismic profile from 2004 gas hydrate cruise of Canada

1.3 深拖地震勘探方法

深拖高分辨地震勘探方法将震源和数据接收电缆都置于近海底的位置,这在作业方式上和前面提到的方法有根本的不同,美国首先使用这种作业方式在美国和加拿大近岸开展了天然气水合物勘探.该系统(简称为 DTAGS)(图 3)由震源、拖缆、定深系统、水下定位系统组成.震源系统提供 220 ~ 1000 Hz 的地震信号,拖缆大约有 500 m 长,48 个工作道,定深系统将该系统确定在海底以上 300 m 的深度,水下定位系统则能够对震源位置和电缆位置实施精确定位.

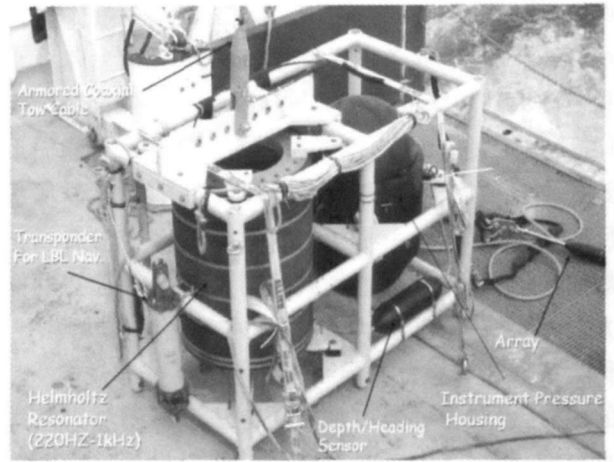


图 3 DTAGS 系统
Fig. 3 Deep towed acoustic geophysical system

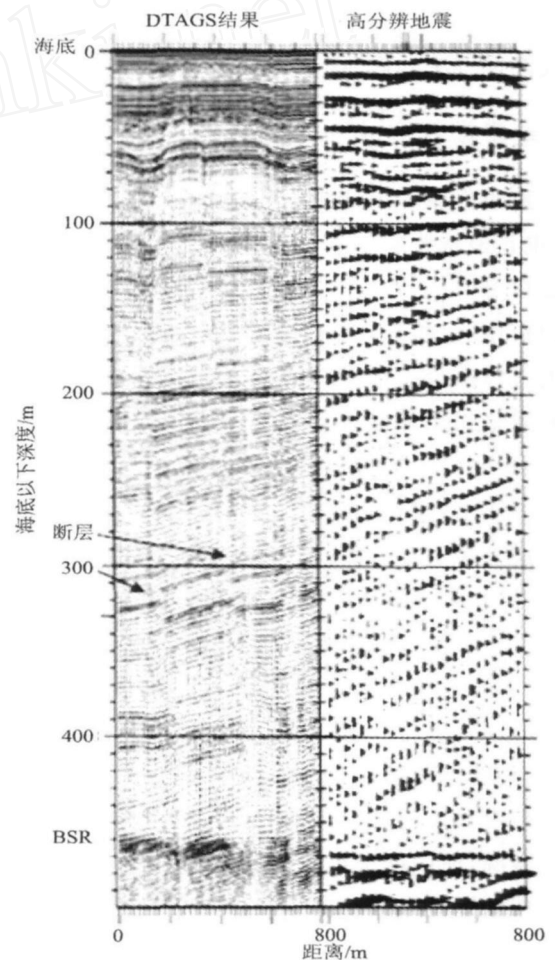


图 4 同一个地区 DTAGS 结果和高分辨地震结果比较
Fig. 4 Comparison profiles of DTAGS and high resolution result from the same area

DTAGS 结果显示,这套系统能够分辨出水合物层详细的地层结构,分辨率在 10 m 以内.分辨率在横向上和纵向上都比高分辨地震要高很多.从同一个地区的 DTGAS 结果和高分辨地震结果对比可以看出(图 4),DTGAS 剖面清楚地显示出断层的存在,这些断层有利于地层中流体或者气体的向上迁移.DTGAS 数据另一个结果是给出了该水合物研究区更加准确可靠的层速度结构.但从图 4 还可以看出,和高分辨地震剖面相比,DTAGS 剖面上的 BSR 反射要弱很多倍.

1.4 海底地震仪

海底地震仪是上世纪 50~60 年代美-苏冷战双方为窃取对方核爆炸信息在深海底设计的“黑盒子”技术.60 年代末到 70 年代初,海洋地球科学家将这种技术转移于研究海洋地壳结构中,开发出了目前海洋地球科学研究中广泛使用的海底地震仪(图 5).和前面提到的反射地震方法不同,海底地震仪可以置于海底进行定点、长期观测.特别是可以记录到天然地震引发的地震波.这对于深部地壳,甚至地幔结构的研究非常有用.比如,由于海底地震仪的使用,科学家开始认识到大洋中脊和海沟俯冲带地壳结构的不同,同时也发现快速扩张的洋中脊和慢速扩张的洋中脊地壳结构的不同.此外,使用海底地震仪对大洋的断裂带、地震带、微地震带等都有很好的观测.

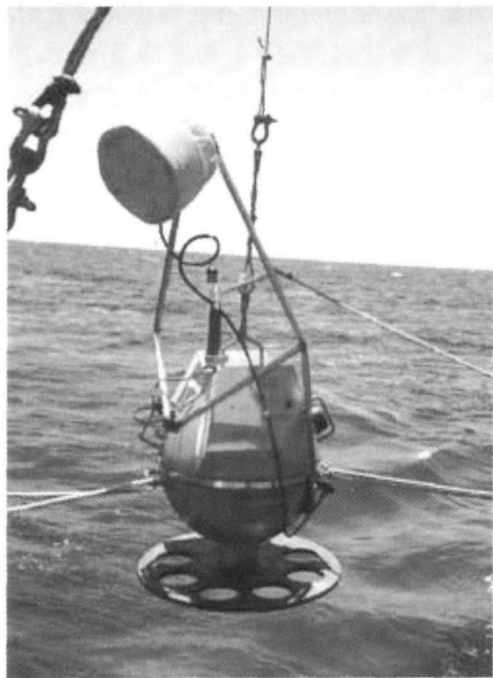


图 5 美国伍兹霍尔研究所的 OBS 外观

Fig.5 OBS of Woods Hole Oceanography
Institute of America

现代海底地震仪一般都包括一个三分量(一个垂直分量、二个水平分量)地震检波器和一个水听器.由于海底地震仪主要用于深部地壳结构的研究,所以其基频一般在 1.5~2 Hz 之间.由于海底地震仪可以记录到广角的折射波,并能够对地质体的速度有很好的约束,所以科学家开始将海底地震仪用于天然气水合物的研究.美国科学家在墨西哥湾的海底地震仪实验显示,海底地震仪数据可以和反射地震数据互相配合,很好地给出水合物区的沉积地层速度结构模型.他们使用的海底地震仪地震检波器基频为 4.5 Hz,所采集数据的主频为 80 Hz,炮检距最大达到 4.5 km.图 6 为美国伍兹霍尔研究所实施水合物计划项目在布莱克海台进行 OBS 实验的结果.

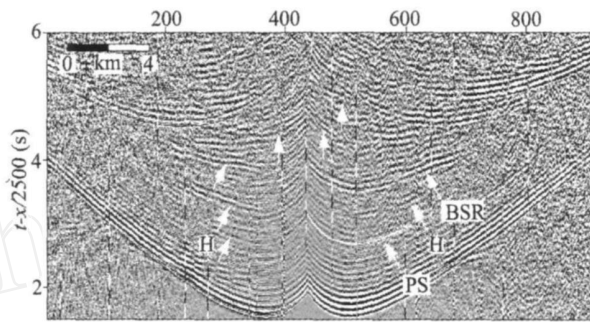


图 6 OBS 记录上显示的 BSR(横轴为炮号)

Fig.6 BSR showing on the OBS recorder
(shot number were marked on the x axis)

1.5 海底地震电缆方法

海底地震电缆方法是指将地震电缆铺设在海底进行地震数据接收的方法.起初将电缆铺设在海底进行数据接收主要是因为有一些浅滩地区,地震调查船因为水深太浅而无法进入.实践证明这种地震勘探方法有其独特的优点.虽然海底电缆方法的勘探费用要比常规海面拖缆方法贵许多倍,但它还是没有像开始那样仅局限在浅滩地区,而是向更大的海洋范围发展.

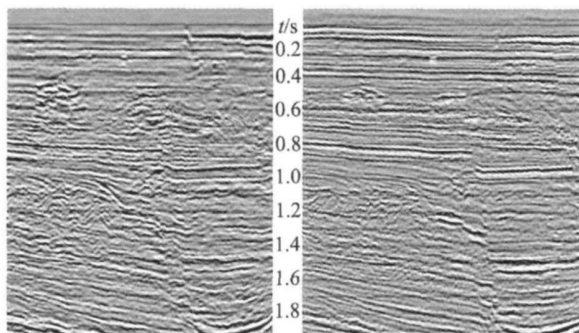


图 7 海面拖缆数据(左图)和海底电缆数据(右图)比较

Fig.7 Comparison profiles of surface cable (left)
and ocean bottom cable (right)

海面波浪和海流引起的噪声以及海面拖缆内的噪声都将和有效地震信号一起被记录到水听器中. 为了降低噪声,海面拖缆中每个工作道一般有多个水听器构成的水听器阵来进行地震数据记录,这不可避免地要损失部分高频信号. 另外,海面拖缆的移动同样会损失高频信号. 由于海底电缆铺设在海底,大大降低了噪声水平(图 7),同时它可以实现全波(S波、广角数据)数据接受和 4D 重复观测. 特别应该提到,由于 S 波不能通过液体传播,这样海面拖缆无法记录到 S 波信号,但海底电缆则可以得到 S 波信号. 这对天然气水合物研究,以及 BSR 之下的气区成像特别有用(图 8).

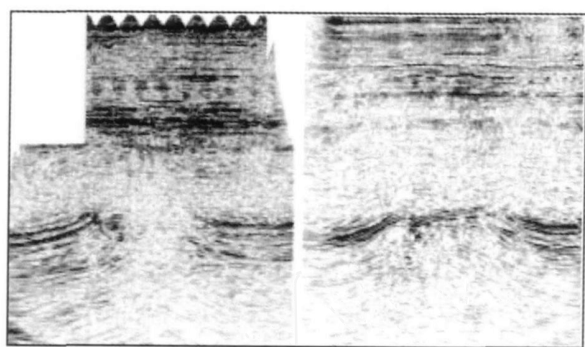


图 8 在存在气体的区域 P 波成像(左图)和 S 波成像(右图)比较^[21]

Fig. 8 Comparison profiles of P wave (left) and S wave (right) when gas contained within the seismic section^[21]

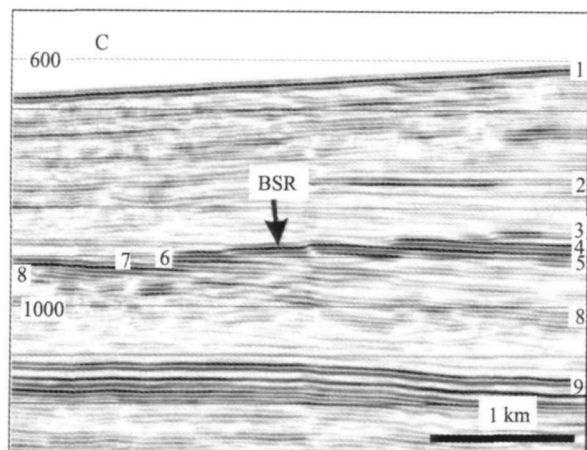


图 9 挪威外海水合物区海底电缆数据显示的 BSR

Fig. 9 BSR showing on the ocean bottom cable seismic profile of Norwegian Sea

1998 年挪威科学家和美国科学家合作进行了以水合物探测为目的的海底电缆测量. 海上测量工

作使用了两条船,一条船用于声波激发,一条船用于铺设和回收海底电缆. 海底电缆的总长度为 3975m,共分 5 段,每段有 128 道,每 32 道用于记录 4 分量中一个分量的地震数据. 4 个分量分别是水听器和三个相互垂直的地震检波器分量. 炮间距 25m,道间距 25m,采样率 2ms,震源深度水下 6m,频率范围 3 ~ 200 Hz. 测量结果给出的 BSR 非常清楚(图 9).

1.6 浅地层剖面方法

浅层剖面系统是为探测海底浅表层沉积物结构而设计的一种可变多频高分辨率声学剖面系统,属高分辨地震勘探的方法. 该方法的海上施工测量和前面提到的传统地震勘探和高分辨地震勘探基本相同,都是以测量船为工作平台,在近海面人工提供震源,由电缆在近海面进行信号采集. 美国 DATA-SONICS 公司生产的 SBP\ 5000 型和 EG&G 公司生产的 UNFBOOM 浅层剖面系统,以及俄罗斯生产的 SONIC 等浅地层剖面系统都可以精确地揭示海底地形和海底以下 200m 以内的地层结构、断裂、滑塌和浅层气等,分辨率高达 0.2 m. 实际上,在野外工作中,低能高分辨率的浅层剖面系统和中能中分辨率的单道电火花系统可同时使用,因此可得到 200 m 以浅的地层结构的图像.

2 天然气水合物的微地貌探测

天然气水合物分布与海底地貌关系密切. 麻坑地形^[23]、碳酸盐岩结壳^[24]、海底冷泉^[25,26]、冷泉生物群落^[27]、泥火山^[28]和断层系统^[29]等特殊构造可视为海域天然气水合物找矿的地貌标志. 图 10 给出了水合物形成以及水合物与海底泥底辟、流体溢出地貌的关系示意图,图中说明了气体水合物的形成以及由于气体的运移、溢出而在海底形成麻坑、丘状体等地形地貌的模式,概括了天然气水合物和海底地形地貌的关系.

目前国际上精密条幅海底地形测量技术正处在开发之中,他们主要使用多波束条幅测深技术和精密声相干技术结合来进行有水合物标志的海底微地貌探测^[22,29]. 调查发现,多波束测深图上出现的“痘瘤”状海底微结构大多和水合物相关(图 11). 除多波束系统外,旁侧声纳技术也广泛用于海底水合物的微地貌探测^[30]. 例如,在布莱克海岭,科学家利用旁侧声纳技术发现了甲烷和 H_2S 等气体沿切穿 BSR 的断层向上运移的现象. 在甲烷和 H_2S 渗流之处存在大量的生物群落,它们可能就是依靠甲烷和 H_2S 的持续供给而存活.

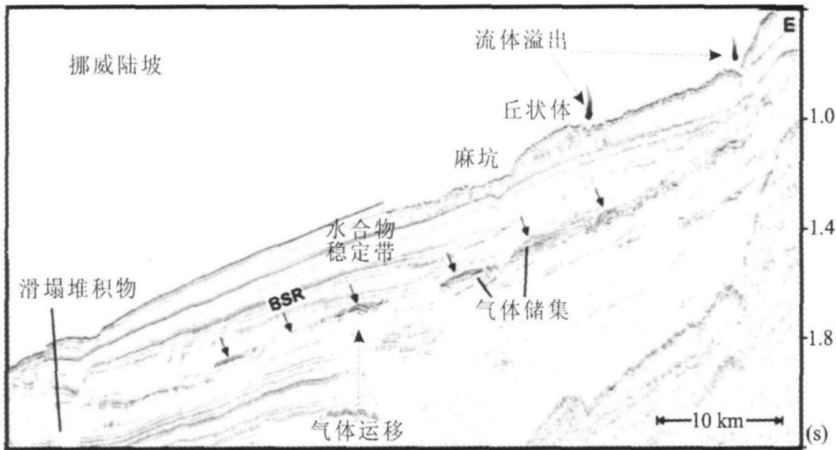


图 10 天然气水合物的形成及其与海底地形地貌的成因关系示意图
Fig. 10 Relation between gas hydrate formation and sea floor morphology

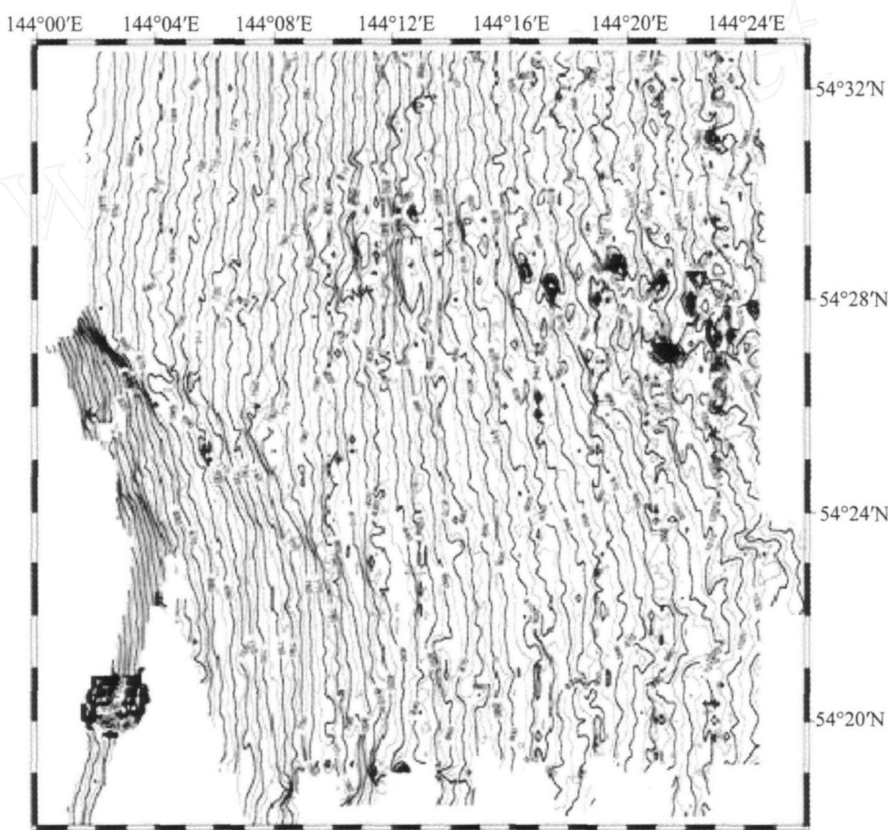


图 11 “太阳”号科学考察船在鄂霍次克海利用多波束进行水合物测量获得的“痘瘤”状海底微结构
Fig. 11 Gas hydrate related sea floor micro structures showing by multibeam data obtain by R/V Sonne from gas hydrate area in Okhotsck Sea

3 水体甲烷火焰探测

在天然气水合物富集区,由于海底断层系统或

底辟系统的存在,分解的甲烷气体沿断层或底辟通道上升到海底进入近海底的水体中.这部分甲烷气体刚进入底层水体是以小气泡的方式存在.回声探

测仪器能够检测到水体中甲烷气体异常. 在回声仪形成的图像上进入底层水体的甲烷形似火焰(图 12), 所以这套水合物探测技术称为水体甲烷火焰探测技术. 该技术可方便、快速、有效地探测海底甲烷渗漏系统, 从而为海底天然气水合物勘探提供帮助.



图 12 2006 年俄罗斯水合物调查
航次获得的甲烷火焰图象

Fig. 12 Methane flare obtain by 2006 Okhotsck
Sea gas hydrate cruise

4 海底热流探测

温度、压力是控制天然气水合物形成与分解的重要因素. 因此海底热流方法也成为研究天然气水合物的重要手段^[31,32].

利用 BSR 资料估算地温梯度、进而求出热流值、并与实测热流值对比分析是天然气水合物地热研究的主要方向^[33].

利用海底热流探针(图 13)直接测量海底热流和海底温度, 利用测得的海底热流数据和海底温度数据估算天然气水合物稳定带的底界也可以从宏观上确定大陆边缘天然气水合物可能存在的分布范围. 一些研究资料表明, BSR 导出的热流值与实测

热流值、热流估算的天然气水合物稳定带底界与 BSR 深度是有差异的, 引起差异的原因还不清楚, 正处于研究之中. 就天然气水合物的地热研究而言, 天然气水合物, 含天然气水合物沉积物的热导率测定及其应用, 天然气水合物形成与分解过程中的热流状态也是重要的研究内容^[31,34,35].



图 13 加拿大的海底热流探针正用于水合物勘探

Fig. 13 Heat flow probe of Canada

5 海底电磁探测

天然气水合物的下边界在地震剖面上有明显反映, 但是, 它的上边界则不易确定. 由于天然气水合物在电性上是一个绝缘体, 开发海底可控源电磁法 (CSCM) (频率域) 和海底瞬变电磁法 (TEM) (时间域), 通过人工源海底电磁探测, 辅助地震勘查, 可了解天然气水合物厚度、孔隙度, 从而利用电法资料辅助评价和计算天然气水合物的资源量^[37,36].

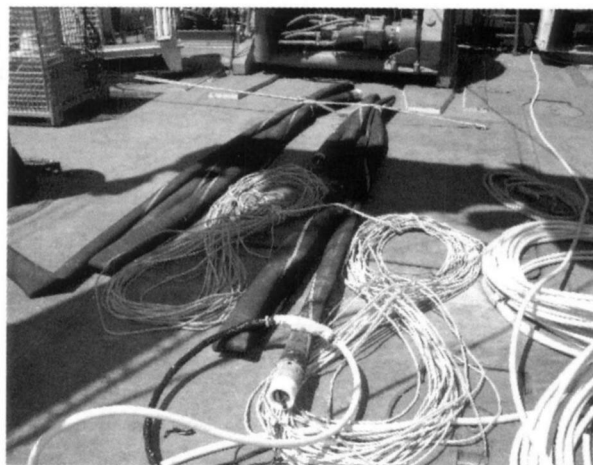


图 14 2004 年加拿大水合物综合地球物理
航次使用的电磁探测系统

Fig. 14 Controlled source electromagnetic
system used for gas hydrate exploration on
the 2004 gas hydrate cruise of Canada

利用电磁法正、反演计算,研究游离气带模型、水合物楔模型、不同饱和度的天然气水合物沉积在电磁场上的特征,可以确定合理的电磁法探测技术. Edwards 曾用海底人工瞬变电偶极系统采集有关电法数据,辅助地震对天然气水合物作出资源评价.因此,发展海洋电磁法技术,进而开展电磁成像,电磁地震联合反演及综合解释技术研究,有助于天然气水合物的评价^[36].此方法在温哥华岛外,智利等地的水合物勘探中都取得较好效果(图 14).

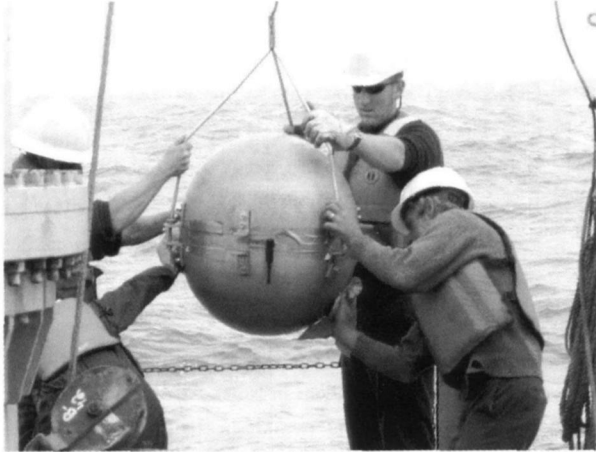


图 15 2004 年加拿大水合物综合地球物理航次使用的海底重力仪

Fig. 15 Compliance system used for gas hydrate exploration on the 2004 gas hydrate cruise of Canada

6 海底重力探测

海洋最上层的沉积地层由于赋存天然气水合物,其物理特性因此不用于不含天然气水合物的沉积地层.通过检测海底随海洋波动的垂直起伏可以计算近海底沉积地层的剪切模量,通过剪切模量异常从而估算沉积地层中天然气水合物的含量^[38].Willoughby 等将重力仪(图 15)投放到海底一段时间,通过重力记录来计算海底在海洋波动的作用下的垂向起伏.2004 年加拿大水合物航次将海底重力仪放在已知有水合物的海区进行实验,取得了很好的效果.

7 结 论

到目前为止,已经探明的天然气水合物储量要远小于预测的水合物储量.这种现状不同程度地反映出我们对天然气水合物赋存规律认识不足,和对天然气水合物勘探方法认识不足.现有的一些成功的方法应该推广到水合物勘探实践中去,同时还应

该根据水合物的特征不断尝试新的勘探方法.

本文对现有水合物地球物理勘探方法的总结将有利于我国海域天然气水合物的勘探工作,也将有利于水合物地球物理勘探方法的创新.

地震勘探是目前进行天然气水合物勘探最常用、也是最重要的方法.地震方法主要包括传统的单道、多道地震方法、高分辨地震方法、深拖多道地震探测方法、海底地震仪方法、多道-多分量海底地震电缆方法、海底地震检波器方法等.一般来说,传统单道地震所显示的 BSR 最清楚,但其它方法则能很大程度地提高 BSR 以上和 BSR 以下地层的分辨率.

根据水合物发育区特有的海底地形地貌特征和水体异常特征,根据水合物发育所需要的温度-压力场特征、电磁特征和含水合物地层的剪切模量特征发展的多波束方法、旁扫声纳方法、海底热流探测方法、海底电磁方法以及海底重力测量方法等都在海域天然气水合物勘探中有着很好的效果.

参 考 文 献 (References):

- [1] Kvenvolden K A. Gas hydrates: geological perspective and global change[J]. Reviews of Geophysics, 1993, 31: 173 ~ 187.
- [2] 王淑红,宋海斌,颜文. 全球与区域天然气水合物中天然气资源量估算[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(4): 1145 ~ 1154.
Wang S H, Song H B, Yan W. The global and regional estimation of gas resource quantity in gas hydrates[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2005, 20(4): 1145 ~ 1154.
- [3] 陈祖安,白武明,徐文跃. 多组分天然气水合物在海底沉积层中稳定区及存在区的预测[J]. 地球物理学报, 2005, 48(4): 870 ~ 875.
Chen Z A, Bai W M, Xu W Y. Predication of stability zones and occurrence zones gas hydrate of multiple composition natural in seafloor sediments[J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2005, 48(4): 870 ~ 875.
- [4] 牛滨华,文鹏飞,温宁,符溪,孙春岩,李佳,孙晟. 基于 BSR 的 AVO 正演估算水合物含量方法的研究[J]. 地球物理学报, 2006, 49(1): 143 ~ 152.
Niu B H, Wen P F, Wen N, Fu X, Sun C Y, Li J, Sun S. Estimation of hydrate concentration based on AVO modeling of BSR[J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2006, 49(1): 143 ~ 152.
- [5] 阮爱国,李家彪,初凤友,李湘云. 海底天然气水合物层界面反射 AVO 数值模拟[J]. 地球物理学报, 2006, 49(6): 1826 ~ 1835.
Ruan A G, Li J B, Chu F Y, Li X Y. AVO numerical simulation of gas hydrates reflectors beneath seafloor[J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2006, 49(6): 1826 ~ 1835.
- [6] 沙志彬,张光学,杨木壮,等. 波形曲线特征在天然气水合物资

- 源量研究中的地质意义[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(3): 944 ~ 948.
- Sha Z B, Zhang G X, Yan M Z, *et al.* The geological meaning of wiggled trace character in study of gas hydrates resource [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2006, 21(3): 944 ~ 948.
- [7] 栾锡武, 赵克斌, 孙冬胜, 岳保静. 天然气水合物的开采——以马利克钻井为例[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(4): 1295 ~ 1304.
- Luan X W, Zhao K B, Sun D S, *et al.* Gas hydrates production—in case of mallik test well [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2007, 22(4): 1295 ~ 1304.
- [8] 张光学, 黄永祥, 陈邦彦. 海域天然气水合物地震学[M]. 北京: 海洋出版社, 2003.
- [9] 吴志强, 文丽, 童思友, 闫桂京. 海域天然气水合物的地震研究进展[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(1): 218 ~ 227.
- Wu Z Q, Wen L, Tong S Y, Yan G J. Advances in seismic researches on natural gas hydrate in ocean[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2007, 22(1): 218 ~ 227.
- [10] Shipley T H, Houston M H, Buffler R T, Shaub F J, McMillen K J, Ladd J W, Worzel J L. Seismic evidence for widespread possible gas hydrate horizons on continental slopes and rises[J]. AAPG Bull., 1979, 63: 2204 ~ 2213.
- [11] Paull C K, Dillon W P. Appearance and distribution of the gas hydrate reflector in the Blake Ridge region, offshore southeastern United States. USGS Misc[J]. Field Studies Map, 1981, 1252.
- [12] Vanneste M, Batist M D, Golmshtok A, Kremlev A, Versteeg W. Multi-frequency seismic study of gas hydrate-bearing sediments in Lake Baikal, Siberia[J]. Marine Geology, 2001, 172: 1 ~ 21.
- [13] Berndt C, Mienert J, Vanneste M, Bünz S, Bryn P. Submarine slope-failure offshore Norway triggers rapid gas hydrate decomposition, in: 4th int. conf. on gas hydrates proc[J]. Yokohama, Japan, 2002. 71 ~ 74.
- [14] Nouzé H, Henry P, Noble M, Martin V, Pascal G. Large gas hydrate accumulations on the eastern Nankai Trough inferred from new high-resolution 2-D seismic data[J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31, doi:10.1029/2004GL019848.
- [15] Wood W T, Gettrust J F, Chapman N R, Spence G D, Hyndman R D. Decreased stability of methane hydrates in marine sediments owing to phase-boundary roughness [J]. NATURE, 2002, 420: 656 ~ 660.
- [16] Chapman N R, Gettrust J F, Walia R, David Hannay, Spence G D, Wood W T, Hyndman R D. High-resolution, deep-towed, multichannel seismic survey of deep-sea gas hydrates off western Canada [J]. Geophysics, 2002, 67(4): 1038 ~ 1047.
- [17] Jaiswal, Priyank, Zelt, Colin A, Pecher, Ingo A. Seismic characterization of a gas hydrate system in the Gulf of Mexico using wide-aperture data[J]. Geophysical Journal International, 2006, 165(1): 108 ~ 120.
- [18] Paul E. Murray, Michael V D, Bob A. Hardage, Milo M B, Robert J G, Sergey F. Interpreting multicomponent seismic data in the Gulf of Mexico for shallow sedimentary properties: methodology and case history[J]. Offshore Technology Conference, 2003, 15118.
- [19] DeAngelo M V, Remington, Randy, Murray P E, Hardage B A, Graebner R, Fouad K. Multicomponent seismic technology for imaging deep gas prospects[J]. The Leading Edge, December, 2004, 1270 ~ 1281.
- [20] Posewang J, Mienert J. High-resolution seismic studies of gas hydrates west of Svalbard[J]. Geo-Marine Letters, 1999, 19: 150 ~ 156.
- [21] Kommedal A, Per G F. Processing the Hod multicomponent OBS survey, comparing parallel and orthogonal geometries [J]. The Leading Edge, 2002, 21: 795.
- [22] Milkov A V, Claypool G E, Lee Y J, Xu W, Dickens G R, Borowski W S. ODP Leg 204 Scientific Party. In situ methane concentrations at Hydrate Ridge, offshore Oregon: New constraints on the global gas hydrate inventory from an active margin[J]. Geology, 2003, 31(10): 833 ~ 836.
- [23] Mienert J, Posewang J. Evidence of shallow- and deep-water gas hydrate destabilizations in North Atlantic polar continental margin sediments[J]. Geo-Marine Letters, 1999, 19: 143 ~ 149.
- [24] Johnson J E, Goldfinger C, Suess E. Geophysical constraints on the surface distribution of authigenic carbonates across the Hydrate Ridge region[J]. Cascadia Margin. Marine Geology, 2003, 202(1): 79 ~ 120.
- [25] 栾锡武, 秦蕴珊. 冲绳海槽宫古段西部槽底海底气泉的发现[J]. 科学通报, 2005, 50(8): 802 ~ 810.
- Luan X W, Qin Y S. Gas seepage on the sea floor of Okinawa Trough Miyako Section[J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(13): 1358 ~ 1365.
- [26] 陈多福, 黄永祥, 冯东, 苏正, 陈光谦. 南海北部冷泉碳酸盐岩和石化微生物细菌及地质意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2005, 24(3): 185 ~ 189.
- Chen D F, Huang Y Y, Feng D, Su Z, Chen G Q. Seep carbonate and preserved bacteria fossils in the northern of the South China Sea and their geological implications[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2005, 24(3): 185 ~ 189.
- [27] Mills H J, Hodges C, Wilson K, MacDonald I R, Sobecky P A. Microbial diversity in sediments associated with surface-breaching gas hydrate mounds in the Gulf of Mexico[J]. Microbiology Ecology, 2003, 46(1): 39 ~ 52.
- [28] Ginsburg G D, Milkov A V, Soloviev V A, Egorov A V, Cherkashev G A, Vogt P R, Crane K, Lorenson T D, Khutorskoy M D. Gas hydrate accumulation at the Håkon Mosby Mud Volcano[J]. Geo-Marine Letters, 1999, 19(1): 57 ~ 67.
- [29] Clague D, Maher N, Paull C K. High-resolution multibeam survey of Hydrate Ridge, offshore Oregon, in: Paull C K, Dillon W P (Eds.), Natural Gas Hydrates: Occurrence, Distribu-

- bution and Detection, Am [J]. Geophys. Union Geophys. Monogr. 2001, 124: 297 ~ 306.
- [30] Greinert J, Bollwerk S M, Derkachev A, Bohrmann G, Suess E. Massive barite deposits and carbonate mineralization in the Derugin Basin, Sea of Okhotsk: precipitation processes at cold seep sites [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2002, 203: 165 ~ 180.
- [31] Grevenmeyer I, Villinger H. Gas hydrate stability and the assessment of heat flow through continental margins [J]. Geophysical Journal International, 2001, 145(3): 647 ~ 660.
- [32] 李官保, 裴彦良, 刘保华. 海底热流探测技术综述 [J]. 地球物理学进展, 2005, 20(3): 611 ~ 619.
Li G B, Pei Y L, Liu B H. Review of measurement techniques of seafloor heat flow [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2005, 20(3): 611 ~ 619.
- [33] L ü lmann T, Wong H, Konerding P, Zillmer M, Petersen J and Flü h E. Heat flow and quantity of methane deduced from a gas hydrate field in the vicinity of the Dnieper Canyon, north-western Black Sea [J]. Geo-Marine Letters, 2004, 24(3): 182 ~ 193.
- [34] Hyndman R D, Spence G D, Chapman R. Geophysical studies of marine gas hydrate northern cascadia. Natural gas hydrates: Occurrence, Distribution, and Detection [J]. Geophysical Monograph, 2001, 124: 273 ~ 295.
- [35] Vanneste M, Guidard S, Mienert J. Bottom-simulating reflections and geothermal gradients across the western Svalbard margin [J]. Terra Nova, 2005, 17(6): 510 ~ 516.
- [36] Edwards R N. On the resource evaluation of marine gas hydrate deposits using sea floor transient electric dipole-dipole methods [J]. Geophysics, 1997, 62(1): 63 ~ 74.
- [37] Edwards R N. Marine controlled source electromagnetics: principles, methodologies, future commercial application [J]. Surveys in Geophysics, 2005, 26(6): 675 ~ 700.
- [38] Latychev K, Edwards R N. On the compliance method and the assessment of three-dimensional seafloor gas hydrate deposits [J]. Geophysical Journal International, 2003, 155(3): 923 ~ 952.

www.cnki.net