

doi: 10.12029/gc20170303

王力峰, 付少英, 梁金强, 尚久靖, 王静丽. 2017. 全球主要国家水合物探采计划与研究进展[J]. 中国地质, 44(3): 439-448.

Wang Lifeng, Fu Shaoying, Liang Jinqiang, Shang Jiuqing, Wang Jingli. 2017. A review on gas hydrate developments propped by worldwide national projects[J]. Geology in China, 44(3): 439-448(in Chinese with English abstract).

全球主要国家水合物探采计划与研究进展

王力峰 付少英 梁金强 尚久靖 王静丽

(中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广东广州 510075)

摘要:随着世界上石油和常规天然气资源的消耗和减少,各国的研究人员正在致力于寻找新的替代能源,天然气水合物的发现、勘探、开发和利用为未来能源带来新的希望。由于天然气水合物具有重要的战略意义和巨大的经济价值,世界上许多发达国家和发展中国家都将其列入国家重点研发计划,美国、日本、印度、韩国、德国、挪威以及中国等均相继投入巨资进行海域天然气水合物调查甚至于开采试验。文章介绍了国际上主要国家天然气水合物勘探开发计划的历史和现状,重点阐述了国家层面的天然气水合物勘探开采计划、实施情况、资金投入以及战略研究,同时从整体角度,对天然气水合物现阶段关注的重点问题进行了阐述。按照各个国家的发展趋势和研究目标总结为3种类别:(1)美国,早期在研究机构和ODP航次支持下,积累了大量的地质实物资料,但由于受到页岩气工业革命等商业模式冲击,近期天然气水合物开采领域投资放缓,但仍然关注于理论和技术实践,并保持综合科学研究工作为主,待时机成熟后将再次注入国家预算资金;(2)中国、日本、印度、韩国,由于受到国内能源结构和储备的限制,对天然气水合物勘探开采持有非常积极的态度,国家资金投入丰厚,全部开展了多期次的近海的天然气水合物钻探工作,并且中国和日本近年在海域试开采领域突飞猛进,分别取得了重要性的阶段成果,极可能是未来世界上首批商业性开采的国家;(3)德国、挪威,作为传统的欧洲工业国家,利用雄厚的工业技术基础,在天然气水合物能源开采技术研究以及环境评估等方面另辟蹊径,着重关注于全球环境保护和二氧化碳置换甲烷技术,是天然气水合物研究领域的绿色保护者代表,可为后能源时代提供天然气水合物新的机遇。

关键词:天然气水合物;替代能源;国家研发计划;进展综述

中图分类号:P744;P618.13 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2017)03-0439-10

A review on gas hydrate developments propped by worldwide national projects

WANG Lifeng, FU Shaoying, LIANG Jinqiang, SHANG Jiuqing, WANG Jingli

(Guangzhou Marine Geological Survey, CGS, Guangzhou 510075, Guangdong, China)

Abstract: With the consumption and decreasing of the worldwide resources of petroleum and natural gas, the exports from various countries are working hard to find a new kind of substitute energy. Undoubtedly, a new hope in the future is probably attributed to the resource of gas hydrate following its discovery, exploration, development and utilization. For the significant strategies and economic benefits of gas hydrate, many developed countries and developing countries, such as United States, Japan, India, South

收稿日期:2017-06-03;改回日期:2017-06-24

基金项目:中国地质调查局地质调查项目(DD20160214,121201002000150007)资助。

作者简介:王力峰,男,1978年生,博士,教授级高级工程师,主要从事天然气水合物温压场研究;E-mail: charles_wlf@163.com。

Korea, Germany, Norway and China, have arranged it under the key national projects and invested enormous capital on the marine surveys and exploitation tests. In this review, the authors concisely describe the histories and current situations of gas hydrate in the main countries, with the emphasis placed on the national projects with the exploration extents, development situations, national investments and strategic deployments for gas hydrate. The authors also discuss the current progresses with which experts are most concerned. The authors divide those countries into 3 types: (1) United States. It has accumulated huge geological data and material supported by research institutions and ODP explorations in the early stage, but recently it somewhat reduces the investments on surveys and exploitation tests mainly because of the commercial success of shale gas revolution. In spite of such a situation, it still has great interest in theories and techniques of gas hydrate mainly focusing on the comprehensive subjects, and waits the opportunity to venture again once the market opportunity is ready. (2) China, Japan, India, South Korea. Due to the limits of domestic energy structures and preserve capacities, they hold an extremely active position on the development of gas hydrate with huge national investments on marine drilling expeditions. In particular, China and Japan have gained a great momentum in the marine exploitation tests, quite possibly being the first nations with full commercial operations. (3) Germany, Norway. As the traditional European industrial countries, they focus on improving gas hydrate exploitation techniques, for instance, the technology of CO₂-CH₄ replacement, paying much attention on environmental assessment supported by their solid industrial technical groundwork. They are the representatives of Greenpeace in the subject of gas hydrate and maybe provide a new opportunity in the later energy times for gas hydrate development.

Key words: gas hydrate, substitute energy, national projects, review on developments

About the first author: WANG Lifeng, male, born in 1978, doctor, professor, engages in the thermobaric study of gas hydrate; E-mail: charles_wlf@163.com.

Fund support: Supported by China Geological Survey Project (No. DD20160214, 121201002000150007).

1 引 言

天然气水合物是由水分子组成的笼状构架将小型气体分子吸附其中而形成的似冰状固体,填充笼子的小型气体分子可能是甲烷、乙烷、二氧化碳、硫化物甚至氮气等(Sloan et al., 2008),但在自然界中分布最广泛最容易发现的是甲烷水合物(Collett., 2002)。由于天然气水合物的物理化学性质,其通常在低温、高压的环境下赋存(Yuan et al., 2000),沉积体系中适宜其形成的层段成为天然气水合物稳定带,受到海底温度和深度、海底地层热流、孔隙度以及盐度等因素的影响(Lee et al., 2008)。依据现今发现的情况,天然气水合物稳定带底界位置变化较大,通常稳定带下部常有游离气的聚集,游离气的界面在 seismic 剖面上往往表现为似海底反射层(BSR, Bottom Simulating Reflector),因此 BSR 的出现常作为天然气水合物存在的证据(Hyndman et al., 1992; Xu et al., 2004)。天然气水合物可作为潜在的新型能源具有较大的资源潜力,公认为赋存于其中的潜在有机气体量估计约为 $2.1 \times 10^{16} \text{ m}^3$ (MacDonald, 1990),以目前能源消耗水平,若仅将这部分天然气水合物储量的 15%投入商业生

产,亦可为世界提供能量超过 200 年。同时,天然气水合物也有可能在外界环境因素触发下造成灾害(Wilson et al., 2007),诸如海底滑塌、温室效应和生物种群大规模迁移等难以预料的事件(Waseda et al., 1998; Ruppe et al., 2005)。

根据资料表明,世界上已调查发现直接或间接存在天然气水合物的地区多达 230 处,但分布不均匀,受到特定地质构造控制明显,97%分布在各大洋陆缘地区,仅有少部分分布在陆地冻土区(Giavarini et al., 2011)。目前研究及关注程度较高的海域主要包括西太平洋海域的白令海、鄂霍茨克海、千岛海沟、冲绳海槽、日本海、四国海槽、日本南海海槽、中国南海北部海域、苏拉威西海、新西兰希库兰吉海域;东太平洋海域的中美海槽、北加利福尼亚及俄勒冈外海、秘鲁海槽、智利群岛外海;大西洋海域的布莱克海台、墨西哥湾、加勒比海、南美东海岸陆缘、非洲西海岸陆缘;印度洋的阿曼海湾;北冰洋的巴伦支海域、波弗特海域;南极的南设德兰群岛海域、罗斯海、威德尔海;以及内陆环绕下的黑海、里海、贝加尔湖等(Eckert et al., 2000)。值得强调的是,全球范围内相继已有 5 个天然气水合物区域开展了试开采工作,在学术界和工业界取得了重

要的成果和深远影响,其分别是俄罗斯梅索亚哈冻土区(Messoyakha)、加拿大马里克冻土区(Mallik)、美国埃尔伯特山冻土区(Mt Elbert)、日本海槽海域(METI)以及中国南海神狐海域(SHSC)(图1,表1)。

随着各国学术界的研究程度提高和呼吁以及政府资金投入和扶持,天然气水合物研究领域正日渐成为前沿关注焦点(He et al., 2007)。尤其需要关注的是进入21世纪以来,除了发达国家诸如美国、日本、韩国、德国、挪威等继续开展天然气水合物研发,一些发展中国家诸如中国、印度等对天然气水

合物研发也迅猛发展(Davie et al., 2004)。上述这些国家在天然气水合物的物化性质、产出条件、分布规律、勘查技术、储量评估、实验模拟、开发工艺、环境效益、经济评价与环境关系等方面(Novosel et al., 2005),进行了不同程度的科学考察与研究,取得了丰硕的研究成果,并推动了天然气水合物研究的第二次热潮。本文通过收集并整理公开文献资料的研究成果,着重分析总结包括中国在内的几个主要国家的天然气水合物发展情况,对全球天然气水合物的研究内容和未来发展方向感兴趣的学者有所裨益。

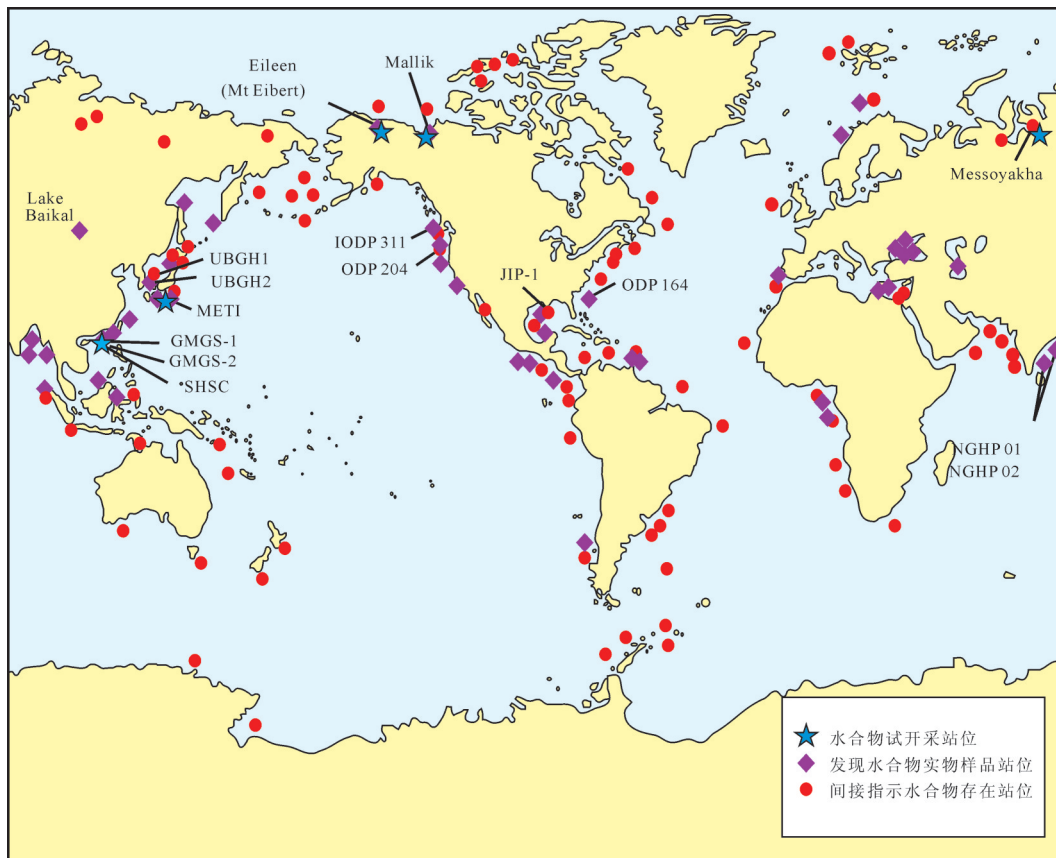


图1 全球海域及陆域天然气水合物试开采站位、发现水合物实物样品站位以及间接指示水合物存在站位
(修改自 Kvenvolden, 1993)

SHSC—神狐试采计划; IODP—综合海洋钻探计划; UBGH—郁陵水合物勘探计划; ODP—海洋钻探计划; JIP—联合工业计划;
METI—日本经济贸易及工业省; GMGS—广州海洋地质调查局; NGHP—印度国家水合物计划

Fig.1 Location of test exploitation, sampled and inferred gas hydrate occurrences in oceanic sediments of outer continental margins and permafrost regions (modified after Kvenvolden, 1993)

SHSC—Shenhu Test Exploitation; IODP—Integrated Ocean Drilling Program; UBGH—Ulleung Basin Gas Hydrate Expedition;
ODP—Ocean Drilling Program; JIP—Joint Industry Project; METI—Ministry of Economy, Trade, and Industry; GMGS—Guangzhou Marine Geological Survey; NGHP—India National Gas Hydrate Program

表1 全球主要国家水合物探查及试采列表
Table1 Global national projects for gas hydrate surveys and test exploitations

GMGS-1	中国	中国南海	神狐海域	勘探	发现分散状水合物
GMGS-2	中国	中国南海	珠江口 以东海域	勘探	发现层状、分散状、块状、结核状、脉状水合物
SHSC	中国	中国南海	神狐海域	试采	完成了连续试采 60 d, 累计 30.9 万 m ³ 天然气
UBGH-1	韩国	日本海 (韩国称为东海)	郁陵盆地	勘探	发现层状、分散状、脉状水合物
UBGH-2	韩国	日本海 (韩国称为东海)	郁陵盆地	勘探	数据显示地层含有高质量的水合物砂质储层
METI	日本	日本南海海槽	渥美海丘	勘探、 试采	6 d 累计 12 万 m ³ 天然气
NGHP01	印度	印度洋	KG 盆地以及安达	勘探	水合物大多数以裂缝充填型赋存于细

2 主要国家天然气水合物计划

2.1 美国

美国是世界上能源需求大国,也是全球的科学技术强国,其天然气水合物的调查研究一直走在世界的前缘,也是世界上天然气水合物调查研究最活跃的国家(Milkov et al., 2003)。美国能源部(DOE)自1982年开始资助天然气水合物的研究,2000年开始美国议会授权美国能源部建立专门针对天然气水合物开发的基础和应用的研究性国家级项目,即“甲烷水合物调查研究和开发行动法案”(The Methane Hydrate Research and Development Act),它还派生出许多新的天然气水合物调查研究项目(Yun et al., 2006),由政府6个机构,包括美国能源部(DOE)、美国地质调查局(USGS)、海洋能源管理局(BOEM)、土地管理局(BLM)、国家海洋和大气

管理局(NOAA)、海军研究实验室(NRL),以及一些大学及工业企业一起合作执行,调查研究项目超过40余个。主要目标为建立全球天然气水合物数据库、解决开采技术难题、实现商业化开采、评估其对国家能源安全的贡献值、评估其对全球能源市场的贡献以及评估开采天然气水合物对常规油气生产的影响,经费每年投资额达5000美元。

迄今,由美国作为主导的ODP是世界上完成海洋天然气水合物钻探取样调查评价次数最多国际机构,曾先后完成了Leg124、Leg139、Leg141、Leg146、Leg164、Leg196、Leg204及IODP的Leg311等航次的天然气水合物钻探取样的调查评价工作。另外,美国,也在相关海域进行了天然气水合物钻探取样调查评价工作。阿拉斯加北部陆坡地层探井,美国能源部联合英国石油公司(BP Corp.)和美国地质调查局于2007年推出了“埃尔伯特山”

探测计划,在选定的 MilnePoint 区块天然气水合物探井中采集数字测井资料(Winters et al., 2011),包括伽玛测井、中子测井、密度测井、三维高分辨率电阻率测井、声波测井以及核磁测井等,圈定区域范围内十多个不相连的天然气水合物的分布状况,量化评价了资源远景,检验了地球物理探测技术。2009年5月,美国国家天然气水合物研发计划下属墨西哥湾天然气水合物联合工业项目(JIP)历时21 d完成了第二航次,首次在天然气水合物钻探中应用了三维图像技术并在 Walker Ridge313 区块完成了天然气水合物创纪录钻孔深度3500英尺,在钻探的3个站位中,发现了2个站位中发现了具有高饱和度的天然气水合物砂层,证实了墨西哥湾储存性能良好的砂层中具有天然气水合物。2009年9月,美国海军研究实验室与美国能源部下属美国国家能源技术实验室(NETL)、荷兰皇家海洋研究所等机构,共计32位科学家组成的团队共同协作,完成了为期12 d的北极波弗特海天然气水合物考察,研究内容包括地球物理、地球化学、沉积物和水体微生物等多个专业领域,评估了天然气水合物扩散的空间变化以及控制因素,对由于天然气水合物失稳导致的分解对大气环境的影响进行了数值模拟,同时对释放有机气体总量的控制机制进行了分析。2015年在“甲烷水合物调查研究和开发行动法案”结束之际,组织能源部长咨询委员会(SEAB)评估法案的效果以及对未来天然气水合物远期规划。专家组认为天然气水合物研究项目推动了该领域的技术和经济可采性的基础性、长期性问题,但由于美国国内成功的页岩气工业革命冲击和缺乏可预见的商业化开采作业,天然气水合物代替石化燃料在美国短期内不具经济或环境竞争力,但同时专家组也认识到天然气水合物具有巨大的资源潜力,是一种重要的长期能源资源,尤其对缺少可靠替代能源的国家。

2.2 日本

日本不仅在天然气水合物勘探领域处于世界前列,而且稳步实施和推进中长期天然气水合物开发计划,在天然气水合物开发系统规划、开发设备研制、开发过程控制及测试等方面已经取得突破性进展,并掌握了大部分核心技术,拥有了大量自主研发的技术储备。

日本是天然气水合物调查研究最积极的国家

之一(Matsumoto et al., 2004; Tsuji et al., 2004),从1995年开始,日本经济贸易及工业省启动了日本第一个大型的天然气水合物研究计划,受到日本能源企业的资助,每年投入达60亿日元经费,其中日本石油公团占75%,其他10家石油公司占25%,该计划集中了20多个机构、200多位科学家参与天然气水合物的调查研究。1999年日本利用美国 Transocean Inc.公司旗下的“决心号”深水钻井船首次在其南海海槽(Nankai Trough)实施海洋天然气水合物取样钻探施工,取得了一定的进展。2001年4月启动了新一轮的“甲烷水合物开发计划”,完全由日本政府投资,项目预期18年,分3个阶段实施,研究内容基本涵盖了与天然气水合物开发相关的所有方面,预计每年经费超过1亿美元。2004年1月至5月,日本在其南海槽再次租用“决心号”深水钻井船,在水深2033~772 m进行了大规模的海洋天然气水合物取样钻探施工,完成了32个天然气水合物钻探取样孔,对该海域水合物资源进行了全面调查评价,并进行了开采试验研究(Trehu, 2004)。多年的钻探成果证实,天然气水合物赋存砂岩和火山沉积物中,其孔隙度为35%,天然气水合物填充率达85%,目前日本已经基本完成了周边海域的天然气水合物资源调查和评价,并圈定了12块天然气水合物富集区,估算甲烷水合物资源量为 $6 \times 10^{12} \text{ m}^3$,其中所含的天然气相当于20世纪末日本国内天然气消费量的100倍。2010年评估天然气水合物的产能测试,2016年集成实施商业开采的技术准备。日本在2012年和2017年在南海海槽进行天然气水合物试采试验,计划于2018年将在日本海进行天然气水合物商业开采。值得注意的是,日本企业不但在其领海实施天然气水合物计划,还直接参与并领导了加拿大马立克天然气水合物研究计划,显示其全球战略的雄心。事实上,日本在天然气水合物研究、勘探及开发领域已经成为世界的领先者。

2.3 印度

印度国家天然气水合物计划(NGHP)是由印度石油和天然气部(MoP&NG)于1997年发起实施。2000年在印度能源管理局(DGH)的全面协调下,MoP&NG对NGHP进行了全面重组且受到高层重视,NGHP由MoP&NG部长出任该计划主席团指导委员会的总监。NGHP的最终目标是引导天然气水

合物作为一种可行性的能源资源,加强开发利用的知识和技术,对开发企业而言具有成本效益和安全开采方式。除了NGHP指导委员会成员阵容庞大,均来自印度主要政府部门、大型商企以及著名研究机构,主要包括了MoP&NG、DGH、印度石油和天然气有限公司(ONGC)、印度石油公司(OIL)、印度石油有限公司(IOC)、印度燃气有限公司、印度国家海洋研究所(NIO)、印度国家地球物理研究所(NGRI)以及印度国家海洋技术研究所(NIOT)的代表组成的技术委员会。

NGHP工作的重要成绩是其分别于2006年实施的NGHP第一航次(NGHP-01)以及于2015年实施的NGHP第二航次(NGHP-02)。期间2009年NGHP曾部署具体课题,关注并做了详细的位于深海水域的陆坡麓原环境评估,为后期天然气水合物钻探航次提供背景资料。印度天然气水合物工区集中在印度东海岸各个近海盆地,其中研究程度较高且确定为钻探区的分别是克里希纳—戈达瓦里盆地(KG盆地,Krishna-Godavari)以及安达曼群岛(Andaman Islands)附近海域。中新世以来克里希纳—戈达瓦里盆地表现为较厚的沉积物堆积(Shankar et al., 2011),同时伴有断层不断发育的特点,克里希纳河和戈达瓦里河输入了大量富含有机质的沉积物,使得位于印度东部被动大陆边缘盆地成为天然气水合物存在的适宜区域,克里希纳—戈达瓦里盆地海岸一侧长度约为500 km,从海岸延伸入深海部分超过200 km;安达曼盆地位于环绕安达曼—尼科巴群岛链的孟加拉湾东南部,面积为47000 km²,该盆地从白垩纪至今连续沉积了至少7.5 km的海洋沉积物,安达曼群岛的形态和结构表明它们是晚白垩世以来印度板块向东南亚板块之下俯冲作用而形成的一个岛弧,该环境更有助于发现被认为更适合于未来能源生产的富砂质天然气水合物远景区。

2006年印度执行了国家天然气水合物计划(NGHP)并在其东部陆架海域完成了第一航次任务,主要实施天然气水合物大洋钻探、取心、测井及分析研究工作,并对印度大陆边缘的区域地质背景以及天然气水合物的存在特征进行评估。航次共调查了21个站位,其中12个钻孔进行了随钻测井,此外还对13个钻孔进行了电缆测井。2015年印度

雇用日本大型钻探科考船“地球号”继续在印度东部海岸进行了NGHP第二航次任务,主要实施目的是为远期天然气水合物试采选定砂质储层中的高饱和度天然气水合物。该航次的前两个月主要进行了随钻测井作业,共钻了25个钻孔并实施了测井;后3个月则对最具资源远景的10个站位进行取心作业。经过共5个月的连续现场作业,该航次被认为是印度实施国家计划以来最全面的一次天然气水合物调查。印度近海盆地发现的天然气水合物大多数以裂隙充填形式赋存于陆架和陆坡环境中的细粒沉积物中,这显示在印度东部大陆边缘天然气水合物存在于非常复杂的地质条件下。

2.4 韩国

韩国天然气水合物研究区主要集中在郁陵盆地(Ulleung Basin),其是一个大陆弧后盆地,位于欧亚板块东部边缘。地壳变薄和海底扩张导致韩国东海(日本海)在渐新世处于拉伸状体,促使郁陵盆地以及大和盆地(Yamato Basin)的形成。活动扩张持续至中新世中期(32~10 Ma),在晚中新世当板块沿日本岛弧开始俯冲时构造区变成汇聚,板块运动方向发生改变,目前处于挤压形变的早期。郁陵盆地发育大量块体运移沉积,天然气水合物主要存在砂质浊流层,夹在半深海泥质沉积中或者以脉状和裂隙填充形成烟囱构造。2007年和2010年两个钻探航次都在块体运移沉积单元进行取心和测井,表明块体运移沉积复合体中的粗粒单元是天然气水合物的适宜聚集区(Yun et al., 2011)。

1996年,韩国第一个天然气水合物项目启动,由韩国地球科学和矿产资源研究所(KIGAM)组织实施,当年开展了初步的研究工作。1997—1999年,开始对韩国东海(日本海)郁陵盆地西南部开展了基础地质调查和研究工作,并于1998年首次在郁陵盆地发现BSR。2000年至2004年,为了确定韩国东海天然气水合物的潜力及分布,以及掌握天然气水合物开发的基本技术,开展了区域地球物理调查及地质和试验研究。利用“TAMHEAII”号科考船采集了现场数据,包括38个活塞取心样品(水深在790~2450 m),12366 km的多道地震数据,46300 km²的多波束测深数据。研究经费的一半来自韩国知识经济部(现韩国产业通商资源部),另外一半来自韩国天然气公司(KOGAS)。2005年7月,

韩国启动了为期12年的国家天然气水合物计划,其总体目标是“找到最佳生产技术,实现天然气水合物商业化生产”,由天然气水合物研发机构(GHDO)负责管理,受韩国产业通商资源部资助,主要研发工作由KIGAM负责实施,地震和钻探数据的采集工作由韩国国家石油公司(KNOC)负责实施。2007年9月20日至11月17日,开展了针对郁陵盆地的第一次天然气水合物钻探航次(UBGH-1),确定了该盆地天然气水合物的赋存,该航次由GHDO和KIGAM主导,通过实验室工作和数值模拟开展了天然气水合物的开发和生产研究,测量了含天然气水合物沉积物的特性,研究了天然气水合物的动力学和热力学特征,尝试了不同的生产方法,估算了采收率等。2010年7月7日至9月30日,开展了针对郁陵盆地的第二次天然气水合物钻探航次(UBGH-2),一方面是在郁陵盆地中选择试采钻位,另一方面是评估该盆地的资源潜力。开展了随钻测井和取心工作并进行了多项分析工作,包括沉积学分析、地球化学分析、物理特性测量、保压岩心分析以及微生物分析等。值得关注的是韩国曾计划2015年开展试采工作,目前已经推迟,具体时间尚未公布,钻探和试采计划指明生产方式采用降压发,整个作业时间周期为70余天,其中包括14 d的钻杆试验(DST)。

2.5 德国

德国对天然气水合物的研究非常感兴趣,尤其重视天然气水合物的全球环境意义,长期致力于天然气水合物稳定性的热动力研究。1998年,德国利用“太阳号”调查船与俄罗斯合作,开展鄂霍茨海天然气水合物调查。同年,德国基尔大学Geomar研究所对美国俄勒冈州西部大陆边缘卡斯凯迪亚(Cascadia)消减带的天然气水合物海台倍感兴趣,通过德—美合作项目,争取到资金2000万马克,不仅在该海域做了大量地震调查工作和海底取样工作,而且还研究了天然气水合物形成和失稳的动力学机制,不但发现了天然气水合物复存,还发现了天然气水合物气窗释放大甲烷气体。2000年德国学术界还正式推出了长达15年的“地球工程—地球系统”计划,旨在研究涵盖地球演化过程认识至地球环境综合管理等大型研究计划内容。2004—2007年进一步细化设立了“地质生物系统甲

烷研究”项目(Talukder et al., 2007),下设有黑海和墨西哥湾海底甲烷喷溢研究、天然气水合物特征研究、天然气水合物中微生物的循环和代谢作用、海洋含天然气水合物沉积物甲烷通量的控制因素及其气候效应等课题,投入经费超过3000万欧元,主要研究天然气水合物分解引发的工程地质灾害和环境影响以及监测与评价技术。

2.6 挪威

挪威同样地重视天然气水合物的环境研究,尤其在海底灾害预防和深海二氧化碳封存研究方面取得了重要的研究成果(Biastoch et al., 2011)。2006—2011年,挪威地质调查局与挪威深水计划—海底III(Norwegian Deep Water Programme/Seabed III)、多家研究所和大学密切合作,开展了“挪威巴伦支海—斯瓦尔巴特群岛边缘的天然气水合物”项目(GANS),项目研究内容包括天然气水合物在海底稳定性评价以及气候和生态的关联重要性,其主要目的是从以下两个方面定量描述天然气水合物气藏,建立挪威巴伦支海—斯瓦尔巴特群岛边缘沉积物和生物响应,为油气安全开采提供至关重要的环境保护依据。另外,挪威在深海二氧化碳封存技术研究方面处于世界领先地位,近年来注重利用二氧化碳置换天然气水合物中的甲烷气体试验研究,研究表明二氧化碳替代甲烷封存海底地层具有经济效益和环境保护的双重优势,为开采天然气水合物和保护环境起到标准的示范作用。随着挪威OMLANG深水大型气田的开发,挪威在北海滑坡区域部署了海底天然气水合物原位监测装置,有关海底天然气水合物分解前后应力变化以及海底滑坡、工程设施等影响的相关研究正在进行中。

2.7 中国

中国虽然起步较晚,但在科研实力的不断提升中取得了突飞猛进的发展,天然气水合物研究在国土资源部等部门推动下已纳入到国家研究开发计划,并在最近取得了世界性的突破进展。中国自1999年开始,陆续在南海北部陆坡开展天然气水合物调查,研究区主要分布在西沙海槽盆地、琼东南盆地、珠江口盆地和台西南盆地的深水区,均发现了天然气水合物存在的地质、地球物理及地球化学证据(Zhang et al., 2015)。

南海北部陆坡分布有大量的盆地,大部分属于

被动大陆边缘的陆缘过渡壳带,具有旋转张扭构造形态,来自大陆流域的沉积物在陆缘处快速沉降和充填,可发育陆相和海相两套巨厚的泥源层,一些构造单元加之地幔隆升、岩石圈拉张以及发生过多期的热活动,使得该陆缘广泛发育众多的断层和底辟构造,为天然气运移提供了极好的条件。研究表明,南海北部陆坡天然气水合物的烃源运移存在3种模式,分别为断层运移、底辟运移、底辟和断层复合运移。

2002年国土资源部中国地质调查局首次在南海发现冷泉碳酸盐岩及相关微生物群落,测试表明其地化指标与墨西哥湾冷泉碳酸盐岩地化特征相同。2004年5月,中国地质调查局与德国基尔大学合作,在中国南海发现世界上规模最大的天然气水合物碳酸盐岩区,碳酸盐岩区分布面积为430 km²,至今仍在释放甲烷气体,这一发现被认为是中国南海存在天然气水合物的重要间接证据。2007年5月,在南海北部神狐海域首次成功钻获天然气水合物实物样品,这标志着中国成为继美国、日本、印度之后的第4个国家主导系统开展天然气水合物资源调查并获取实物样品的国家。在南海神狐海域约1200 m水深的3个钻孔获取了天然气水合物样品,其发育在海底之下约200 m的泥质沉积层中,呈浸染状产出。这是中国水合物勘探史上一次重要的事件,标志着中国水合物勘探上的突破,为南海北部陆坡天然气水合物资源远景评价及成藏机理和分布规律研究提供了可靠的科学依据。2013年6月在紧邻珠江口盆地东部的台西南盆地中部隆起附近地区水深664~1420 m范围内钻探13个钻孔,10个钻孔进行了随钻测井,3个钻孔进行了有缆测井,其中8个站位的先导测井曲线显示出水合物存在的异常,5个站位取心获取了大量的层状、块状、结核状、脉状及分散状等多种类型的水合物实物样品,甲烷气体含量超过99%。这是中国海域天然气水合物勘探的里程碑,标志着可视的多种赋存形式水合物实物样品的首次被获取。2017年3月在位于南海北部海域进行了中国第一口天然气水合物试开采钻井,此次试开采作业区位于珠江口东南320 km神狐海域。2017年3月28日试采井正式开钻,5月10日成功点火,至5月18日累计产气超过了1.2×10⁵ m³,平均日产气量1.6×10⁴ m³以上,最高产量达

3.5×10⁴ m³/d,甲烷含量最高达99.5%的天然气,实现了试采计划预定目标。这次天然气水合物试开采不但是中国首次,也是世界首次成功实现对资源量占全球90%以上、开发难度最大的泥质粉砂型天然气水合物的安全可控开采,标志着中国实现了天然气水合物勘查开发理论、技术、工程、装备的自主创新的历史突破,对推动能源生产和消费革命具有重要而深远的影响。

3 天然气水合物研究进展

3.1 分布规律

从目前获取的调查资料初步分析表明,占比较大的海域天然气水合物的分布具有一定的规律。天然气水合物主要分布在大洋边缘的陆坡和陆隆区域,并且它的分布规律与特定的海洋地质特征之间存在着极其密切的关系。主要可分为主动大陆边缘、被动大陆边缘以及海底泥火山等特殊地质构造区域。主动大陆边缘通常具有厚沉积盖层的盆地、新生代沉积高速区、俯冲带和增生楔等构造单元,区内有机质丰富,可为天然气水合物提供充足的气源,同时由于巨厚的沉积物也为天然气水合物的形成提供了所需的温压条件,成为天然气水合物生成和储存的最佳场所。被动大陆边缘天然气水合物的分布地点相对较少,主要在大西洋两侧陆坡区域,其中对天然气水合物的分布特征研究较深入的是以布莱克海台和墨西哥湾为较突出的代表。泥火山分布区域是天然气水合物生成和储存的重要地区,天然气水合物与海底泥火山之间存在一定的关系,沉积物中天然气水合物含量在体积上从1%~35%不等,并且在不同区域泥火山的不同深度,天然气水合物的含量不同,通常受到泥火山上升的热流控制,天然气水合物分布具有同心带状结构。

3.2 开采技术

目前公认的天然气水合物的开采方法有以下3种,即热激法、降压法和化学试剂法。热激法就是利用传热、电磁、微波等手段提高局部地层的天然气水合物温度,使其分解从而释放出天然气的方法,其中注热法具有一定的应用前景,即采用钻井技术在天然气水合物稳定层中布井,通过注入井注入热流体对含有天然气水合物的地层进行加热,提

高局部储层温度,破坏天然气水合物的相平衡条件,使天然气水合物分解,并用采气井收集、采出分解出的天然气,但是该方法热效率较低,如果能够抽取天然气水合物稳定带以下地层中温度较高的地层水至天然气水合物稳定层,利用地热资源加热天然气水合物层,使天然气水合物分解,则该种方式将具有非常好的应用前景。降压法是通过降低天然气水合物沉积层压力促使天然气水合物分解从而采出天然气的一种开采方法。通过控制井口压力、使井底压力低于地层温度下天然气水合物的平衡压力,造成天然气水合物分解,分解出的有机气体由井筒采出,与热激法相比,降压法开采天然气水合物无需热量消耗,其特点是简单易行,经济性价比高,是天然气水合物开采的首选方法,但是由于天然气水合物分解是吸热反应,天然气水合物快速分解容易使地层局部温度降低至冰点以下,分解出的水凝结成冰堵塞地层孔隙,阻碍内层天然气水合物的分解,因此需要采取有效的抑制水凝结的方法。化学试剂法即通过注入抑制剂从而改变天然气水合物的平衡条件,达到采出天然气水合物的目的,实验表明天然气水合物的分解速率与化学试剂种类、注入量、浓度、注入压力和温度有关。相对而言,甲醇的释放效果好于乙二醇,但是甲醇的毒性使其使用受到限制。

3.3 气候环境

据估算天然气水合物中甲烷总含量约为大气中甲烷量的3000倍,天然气水合物作为一个重要的潜在能源,在关注其具有巨大资源潜力的同时,往往忽视了天然气水合物带来的负面环境效应和灾害性影响。作为大气中甲烷的一种重要来源,天然气水合物在控制全球长期气候变化方面起着重要的作用。科学界认为在地质历史时期,极地表面温度的升高,海底底层水温的升高或者海平面下降引起的压力变化以及快速沉积作用等都可以改变海洋沉积物的温度和压力,导致海底天然气水合物的失稳分解释放出甲烷,从而造成全球气候变化。另一方面,全球气候变化反过来又将影响甲烷海底逸出速率,加剧气候变化的波动性。但目前其具体影响程度还不是很清楚,缺少定量的研究证实。另外,前人的研究都认识到天然气水合物的分解会释放大量的甲烷气体,但是大多都忽略了逸出的甲烷会

大部分被氧化以及甲烷在海水中的溶解都会显著降低实际释放到大气中的甲烷气量。因此,有些学者对天然气水合物分解造成的全球气候变化的评价可能有些夸大,尤其海底天然气水合物对全球变化的影响的合理评价还待于大量的观测与研究。

4 结论

综上所述,本文介绍了国际上主要国家天然气水合物勘探开发计划的历史和现状,重点阐述了美国、日本、印度、韩国、德国、挪威以及中国的国家层面的天然气水合物勘探开采计划、实施情况、资金投入以及战略研究。同时从整体角度,对天然气水合物现阶段关注的重点问题进行了阐述。按照各个国家的发展趋势和研究目标可分为3种类别:

(1)美国:早期在研究机构和ODP航次支持下,积累了大量的地质实物资料,但由于受到页岩气工业革命等商业模式冲击,近期天然气水合物开采领域投资放缓,但仍然关注于理论和技术实践,并保持综合科学研究工作为主,待时机成熟后将再次注入国家预算资金。

(2)中国、日本、印度、韩国:由于受到国内能源结构和储备的限制,对天然气水合物勘探开采持有非常积极的态度,国家资金投入丰厚,全部开展了多期次的近海的天然气水合物钻探工作,并且中国和日本近年在海域试开采领域突飞猛进,分别取得了重要性的阶段成果,极可能是未来世界上首批商业性开采的国家。

(3)德国、挪威:作为传统的欧洲工业国家,利用雄厚的工业技术基础,在天然气水合物能源开采技术研究以及环境评估等方面另辟蹊径,着重关注于全球环境保护和二氧化碳置换甲烷技术,是天然气水合物研究领域的“绿色保护者”代表,可为后能源时代提供天然气水合物新的机遇。

致谢:本工作得到了广州海洋地质调查局天然气水合物中心部分同仁帮助以及责任编辑老师的修改指导,谨此一并表示诚挚的感谢!

References

- Andreassen K, Berteussen K A, Sognnes H, Henneberg K, Langhammer J, Mienert J. 2003. Multicomponent ocean bottom cable data in gas hydrate investigation offshore of Norway[J]. *Journal of Geophysical Research*, 108(8): 2399-2405.

- Biaostoch A, Treude T, Rupke L H. 2011. Rising Arctic Ocean temperatures cause gas hydrate destabilization and ocean acidification[J]. *Geophysical Research Letters*, 38: 25–36.
- Collett T S. 2002. Energy resource potential of natural gas hydrates[J]. *AAPG Bulletin*, 86(11): 1971–1992.
- Davie M K, Zatsepina O Y, Buffett B A. 2004. Methane solubility in marine hydrate environments[J]. *Marine Geology*, 203: 177–184.
- Eckert C, Jack D, Nur A M. 2000. Estimating of gas hydrate and free gas from marine seismic data[J]. *Geophysics*, 65(2): 565–573.
- Giavarini C, Hester K. 2011. Gas hydrate: Immense Energy Potential and Environmental Challenges[M]. London: Springer Press, 30–56.
- He T, Spence G D, Riedel M, Hyndman R D, Chapman N R. 2007. Fluid flow and origin of a carbonate mound offshore Vancouver Island: Seismic and heat flow constraints[J]. *Marine Geology*, 239: 83–98.
- Hyndman R D, Spence G D. 1992. A seismic study of methane gas hydrate marine bottom simulating reflectors[J]. *Journal Geophysical Research*, 97(5): 6683–6698.
- Kvenvolden K A. 1993. A primer in gas hydrates[C]//Howell D G(ed.). *The future of energy gases*. Washington: U.S. Geological Survey Professional Paper 1570, 279–292.
- Lee M W, Collett T S. 2008. Integrated analysis of well logs and seismic data at the Keathley Canyon, Gulf of Mexico, for estimation of gas hydrate concentrations[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 25:924–931.
- MacDonald G T. 1990. The future of methane as an energy resource[J]. *Annual Review of Energy*, 15: 53–83.
- Matsumoto R, Tomaru H, Lu H. 2004. Detection and evaluation of gas hydrates in the eastern Nankai Trough by geochemical and geophysical methods[J]. *Resource Geology*, 54(1): 53–67.
- Milkov A V, Sassen R. 2003. Preliminary assessment of resources and economic potential of individual gas hydrate accumulations in the Gulf of Mexico continental slope[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 20: 111–128.
- Novosel I, Spence G D, Hyndman R D. 2005. Reduced magnetization produced by increased methane flux at a gas hydrate vent[J]. *Marine Geology*, 216: 265–274.
- Ruppel C, Dickens G R, Castellini D G, Gilhooly W, Lizarralde D. 2005. Heat and salt inhibition of gas hydrate formation in the northern Gulf of Mexico[J]. *Geophysical Research Letters*, 32: 1–4.
- Shankar U, Riedel M. 2011. Gas hydrate saturation in the Krishna – Godavari basin from P– wave velocity and electrical resistivity logs[J]. *Marine Petroleum Geology*, 28(10): 1768–1778.
- Sloan E D, Koh C A. 2008. *Clathrate Hydrates of Natural Gases*(third edition)[M]. New York: CRC Press, Taylor and Francis Group, 15–42.
- Talukder A R, Bialas J, Klaeschen D. 2007. High– resolution, deep tow, multichannel seismic and sidescan sonar survey of the submarine mounds and associated BSR off Nicaragua pacific margin[J]. *Marine Geology*, 241: 33–43.
- Trehu A M. 2004. Three– dimensional distribution of gas hydrate beneath southern Hydrate Ridge: Constraints from ODP Leg 204[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 222: 845–862.
- Tsuji Y, Ishida H, Nakamizu M, Matsumoto R, Shimizu S. 2004. Overview of the METI Nankai Trough wells: A milestone in the evaluation of methane hydrate resources[J]. *Resource Geology*, 54(1): 3–10.
- Waseda A. 1998. Organic carbon content, bacterial methanogenesis, and accumulation processes of gas hydrates in marine sediments[J]. *Geochemical Journal*, 32: 143–157.
- Wilson A, Ruppel C. 2007. Salt tectonics and shallow subsea floor fluid convection: Models of coupled fluid– heat– salt transport[J]. *Geofluids*, 7(4): 377–386.
- Winters W, Walker M, Hunter R. 2011. Physical properties of sediment from the Mount Elbert Gas Hydrate Stratigraphic Test Well, Alaska North Slope[J]. *Marine Petroleum Geology*, 28(10): 361 – 380.
- Xu H, Dai J, Snyder F, Dutta N. 2004. Seismic detection and quantification of gas hydrates using rock physics and inversion[C]// C E Taylor and J T Kwan (ed.). *Advances in the study of gas hydrates*. New York: Kluwer, 117–139.
- Yuan J, Edwards R N. 2000. Towed sea floor electromagnetics and assessment of gas hydrate deposits[J]. *Geophysical Research Letters*, 27: 2397–2400.
- Yun T S, Lee J S, Bahk J J, Santamarina J C. 2011. Geotechnical characterization of marine sediments in the Ulleung Basin, East Sea[J]. *Eng. Geol.*, 117(2): 151 – 158.
- Yun T S, Narsilio G A, Santamarina J C. 2006. Physical characterization of core samples recovered from Gulf of Mexico[J]. *Marine Petroleum Geology*, 23(2): 893 – 900.
- Zhang G X, Liang J Q, Lu J A. Geological features, controlling factors and potential prospects of the gas hydrate occurrence in the northeastern part of South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 67: 356–367.