

美国可燃冰研究及开采技术发展现状

黄 河

(中国科学技术部, 北京 100862)

摘 要: 本文通过对美国可燃冰研究和开采技术的历程进行系统梳理和分析, 探讨分析了其在可燃冰研究开发中遇到的主要问题, 总结出美国政府在推动可燃冰研究及开采中, 在项目规划、资金投入、法律法规等方面的做法和经验, 并对国内下一步开展可燃冰研究提出加强顶层设计和基础研究、加强与美科研交流合作等政策建议。

关键词: 美国; 可燃冰; 天然气水合物; 开采技术

中图分类号: TK01 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3772/j.issn.1009-8623.2017.09.011

可燃冰(又称天然气水合物或甲烷水合物)与煤炭、石油和天然气等传统能源相比, 燃烧值更高, 污染更小, 更加清洁环保, 并且资源储量丰富。可燃冰在自然界广泛分布在大陆永久冻土、岛屿的斜坡地带、活动和被动大陆边缘的隆起处、极地大陆架以及海洋和一些内陆湖的深水环境。可燃冰储量丰富, 全球储量足够人类使用 1 000 年^[1]。自 20 世纪 80 年代以来, 世界范围内陆续开展大量海底可燃冰基础研究、勘探、试验等, 其中美国、日本、俄罗斯等国家处于可燃冰研究开发的前列^[2], 美国政府和企业持续投入大量经费用于可燃冰的勘探和研究, 值得我相关部门和单位跟踪关注和学习借鉴。

1 美国开展可燃冰研究开发情况

美国是开展可燃冰研究开发最早的国家之一, 其在墨西哥湾、大西洋海域、东部近海和阿拉斯加北坡地区都蕴藏有数量巨大的可燃冰聚集体^[1]。作为可燃冰资源极其丰富的大国, 美国非常重视可燃冰的研究开发, 从 20 世纪 60 年代开始, 先后出台联邦法案和系列研发计划, 投入大量科研经费开展可燃冰基础研究, 积极开展勘探开发, 在墨西哥湾、

大西洋海域、东部近海和阿拉斯加北坡地区布局开展钻井开采和评估^[3]。

1.1 美国开展可燃冰研究情况

美国是开展对可燃冰开发研究最早的国家, 由美国首创并确立的可燃冰的地震识别标志——似海底反射层 (Bottom Simulating Reflectors, BSR) 被业界广泛应用^[4]。美国把支持可燃冰基础研究作为国家发展战略, 列入联邦研究计划并进行立法, 并给予大量经费支持。

(1) 设置研究计划, 开展可燃冰调查。1969 年美国开始开展可燃冰调查。1981 年美国能源部制定了“可燃冰十年研究计划”, 共投入 800 多万美元, 对可燃冰储藏分布和物理化学性质进行研究, 并逐渐向短期勘探和生产研发领域扩展。为探明布莱克海台可燃冰资源情况, 1998 年 5 月美联邦政府通过了一项经费 2 亿美元的“海底可燃冰研究计划”, 将海底可燃冰作为战略能源列入长期研发计划^[3], 通过十年多的研究开发, 获取海底可燃冰商业化生产所需的知识和技术, 并应对随之而来的环境和安全问题。在上述研发计划的基础之上, 1999 年美国能源部发布了“国家可燃冰长期研发计划”, 支持从资源表征、生产、全球碳循环和安全, 以及

作者简介: 黄河 (1976—), 男, 正处级调研员, 主要研究方向为科技政策与管理。

收稿日期: 2017-08-27

海底稳定性四个技术领域出发,开展可燃冰研发,以期建立可燃冰矿床气体资源评价体系,定量评价与全球气候变化的相关性,解决可燃冰工程技术和海底稳定性问题,发展商业开采技术。

(2) 出台联邦法案。2000年5月美联邦政府通过《可燃冰研究和开发法案》,对参与可燃冰研究开发的各机构职责、研发目标和任务、研发经费预算等进行了规定^[5,6]。法案要求美国能源部联合国家科学基金会、商务部、国防部和内政部共同制定国家级研发计划。依据该法案,美国成立了可燃冰顾问委员会,委员包括美国能源部指定得州农工大学、得州大学奥斯汀分校、埃克森美孚石油公司、壳牌石油公司、海洋地质研究所和州政府等机构的15名代表组成,委员会负责为能源部可燃冰相关项目提出咨询意见,向国会提交可燃冰研发计划执行报告^[7-9]。2005年8月,美联邦政府通过《能源政策法》,对可燃冰的研究开发进行了调整,将2005至2010年的总拨款增加到1.55亿美元,并增加美国土地管理局作为参与单位。

(3) 设立“可燃冰研究与开发”系列计划。2000年5月美国依据《可燃冰研究和开发法案》授权制定了“可燃冰研究与开发”计划。该计划由美国能源部和国家能源技术实验室牵头管理,广泛支持美国各大学、国家实验室、工程现场项目,目标是查明可燃冰的物化性质、矿床定量表征和勘查方法、钻探作业稳定性、生产甲烷的技术要求、甲烷排入环境的潜在影响等。2001至2005年该计划的年均拨款稳定在950万美元左右。

2001年,英国石油公司与美国能源部合作启动了阿拉斯加北坡可燃冰储层表征项目,美国雪佛龙石油公司与美国能源部合作启动了墨西哥湾联合工业项目。这两个项目聚焦于改进定量勘探方法和评估可燃冰的开采风险,具体研究内容包括验证可燃冰的聚集模型,试验生产井设计、钻探、录井、取岩芯和连续监测。2005年“可燃冰研究与开发”计划获得重新授权^[10],并开展了6个可燃冰资源特征和遥感研究项目,集中在地震和声波探测技术、受控源电磁成像两个重点领域,其中探测和估算地下可燃冰聚集体的研究项目取得重要进展^[10]。

2006—2009年期间,“可燃冰研究与开发”计划资助了约40个新项目和延续项目。自2009年以

后,美国能源部的可燃冰开发项目主要用于支持工业和学术界合作进行的可燃冰基础研究工作。在勘探开采方面的前沿性工作包括伯克利劳伦斯国家实验室的减压法、西北太平洋国家实验室的二氧化碳置换法的理论基础研究工作^[3]。该计划还资助了20个实验室和野外项目,重点是美国可燃冰物理性质测试、储层数据库开发和开采工艺计算机模拟^[3]。

根据《可燃冰研究和开发法案》《能源政策法》和“可燃冰研究与开发”计划,美国能源部于2006年7月发布了“跨机构可燃冰研发路线图”,于2007年6月发布了“跨机构可燃冰研发五年计划”。2008年末,美国地质调查局与美国土地管理局联合发布了全球技术可采资源量。2013年5月,美国能源部发布了新的“跨机构可燃冰研发计划(2015—2030年)”和“甲烷水解研究与开发路线图:2015—2030”^[11]。

2013年11月,在美国能源部的资助下,美国海洋发展领导联盟可燃冰项目科学小组发布了“海洋可燃冰现场研究计划”,目标是为大洋科学钻探提供指南,以确定在数据和信息收集方面具有最大潜力的钻探靶区和航次。

(4) 近期研究方向和重点。2016年9月,美国能源部宣布投入403万美元用于新的可燃冰研究项目,加强研究可燃冰系统受到自然环境影响和生产相关变化诱导的变化规律,从而有助于确定可燃冰大量开采的可行性和评估可燃冰在全球气候循环中的作用。新项目由美国能源部的国家能源技术实验室负责管理,6个项目分别是^[12]:纽约州罗彻斯特大学负责研究甲烷泄漏对环境的影响,主要包括可燃冰可能对海洋大气系统的影响,增强对甲烷排放量的分布和数量的了解(887 836美元);得州大学奥斯汀分校负责对可燃冰在宏观和微观尺度的动态岩石物理属性进行实验室评估,加深对可燃冰系统行为的理解,改善模拟可燃冰生产的能力(1 199 991美元);路易斯安那州立大学负责研究可燃冰产气过程中细颗粒迁移的实验室评估,特别关注天然气生产中沉积物的独特因素,研究将指导能源部资助的建模工作(322 290美元);得州农工大学工程实验站负责研究可燃冰在水柱中形成甲烷气泡的过程,有助于分析和改进可燃冰开采模型(361 533美元);加利福尼亚州大学圣地亚

哥斯克里普斯海洋学研究所负责评估用于定位矿床的源电磁（CSEM）技术（533 406 美元）；得州农工大学工程实验站负责开发先进的系统集成模型，有助于增加对深海和北极矿床的了解，评估和预测可燃冰矿床的生产相关绩效（731 414 美元）。

1.2 美国的可燃冰勘探开发情况

20 世纪 70 年代，美国在深海钻探作业中首次发现海底可燃冰，之后主导和参与了一系列国际钻探计划，并参与了墨西哥湾深海钻探、阿拉斯加北部斜坡区可燃冰开采试验。

（1）国际深海钻探系列计划

1981 年，国际深海钻探计划利用“格罗玛·挑战者号”钻探船从海底取得可燃冰岩芯。1992 年，大洋钻探计划在美国俄勒冈州西部卡斯卡迪亚海台取得了可燃冰岩芯。1995 年，大洋钻探计划在美国东部海域布莱克海台实施系列深海钻探，取得了大量可燃冰岩芯，并首次证明该矿藏具有商业开发价值。

1997 年，大洋钻探计划考察队利用潜水艇在美国布莱克海台首次完成了可燃冰的直接测量和海底观察。同年，大洋钻探计划在加拿大西海岸胡安·德夫卡洋中脊陆坡区实施了深海钻探，取得了可燃冰岩芯。至此，以美国为首的国际深海钻探计划、大洋钻探计划先后在美国东南大西洋海域、美洲西部太平洋海域、阿拉斯加近海和墨西哥湾海域等深海地区发现了大规模可燃冰聚集区。

1996 年到 1999 年期间，美国科学家通过深潜观察和抓斗取样，在美国俄勒冈州卡斯卡迪亚海台的海底沉积物中取到可燃冰块状样品，样品可以被点燃，并发出熊熊的火焰^[3]。

从 2000 年开始，可燃冰的研究与勘探进入高峰期，世界上有 30 多个国家和地区参与其中。为开发可燃冰，国际上成立了由 19 个国家参与的地层深处海洋地质取样研究联合机构，50 多位科研人员驾驶可燃冰勘探专用轮船从美国东海岸出发进行海底可燃冰勘探，这是当时世界上唯一能从深海岩石中取样的轮船，船上装备有能用于研究沉积层、古人种、地球化学、地球物理等的各种试验设备。该船由得州农工大学主管，英、德、法、日、澳、美的科学基金会及欧洲联合科学基金会为其提供经济援助^[3]。

2013 年 11 月，在俄克拉荷马州的卡图萨实验室完成了对保压取芯系统（PCS）的陆基钻探和取芯测试。技术评估组根据现场测试结果深入研究和评估了保压取芯系统的性能和作业过程中存在的问题，并为改进保压取芯系统性能提出了建议。

（2）墨西哥湾实施深海钻探系列试验

1979 年，国际深海钻探计划第 66 和 67 航次在墨西哥湾实施深海钻探，从海底获得 91.24 米的可燃冰岩芯，首次验证了海底可燃冰矿藏的存在。2005 年美国在墨西哥湾海域实施了规模性的钻探、勘察工作，发现并证明了砂层可燃冰具备开采潜力。之后，美国不断钻探研究从海底收集到的可燃冰的样本。2009 年，国际产业联盟在墨西哥湾区进行钻探取样考察，发现墨西哥湾蕴藏着大量可燃冰。2017 年 5 月美国国家能源技术实验室和得州大学奥斯汀分校联合，在墨西哥湾开展钻探取样考察，进一步评估墨西哥湾深海可燃冰的性质和现状^[13]。

（3）阿拉斯加北部斜坡区可燃冰开采系列试验

1972 年阿科石油公司和埃克森石油公司在阿拉斯加北部斜坡地带普拉德霍湾油田钻探常规油气井时采出了可燃冰岩芯，其后进行了大量可燃冰研究。该项目由美国 Anadarko 石油公司、Noble 公司、Mau2rer 技术公司以及美国能源部可燃冰研究与开发计划处联合发起，目标是钻探可燃冰研究与试采井——热冰 1 井。这是阿拉斯加北部斜坡区专为可燃冰研究和试采而钻的第一口探井^[3]。

2007 年 2 月，美国能源部、美国地质调查局和 BP 勘探（阿拉斯加）公司联合在阿拉斯加北坡的 Milne Point 区域实施了科学钻探和数据收集计划，收集了约 12.18 立方米的可燃冰岩芯样本^[2]。

2012 年美国能源部、美国康菲石油公司与日本石油天然气金属矿物资源机构（JOG-MEC）合作，采用二氧化碳置换法在阿拉斯加北部的普拉德霍湾地区的实验井中开采了可燃冰，研究发现注入 5 950 立方米混合气体（二氧化碳含量为 23%）后，可以回收释放的甲烷量高达 2.8 万立方米^[3]。2012 年 5 月 2 日，时任美国能源部部长朱棣文宣布，由美国能源部、美国康菲石油公司、日本石油天然气金属矿物资源机构共同在美国阿拉斯加北坡普拉德霍湾区开展的 Ignik Sikumi 现场试验成功完成，采

气 30 天收取甲烷气近 3 万立方米^[4,14]。

2013 年美国能源部与阿拉斯加州政府签署关于可燃冰科学研究的谅解备忘录之后,美国国家能源技术实验室和日本石油天然气金属矿物资源机构也于 2014 年签署了在阿拉斯加进行长期可燃冰开采的合作谅解备忘录^[3]。

2 美国在可燃冰研究开发中遇到的主要问题

美国国家科学院研究理事会认为,今后一段时间将是可燃冰研究开发的关键时期^[6]。美国的可燃冰资源得天独厚,其相关研究也位居国际前列,但仍然也面临两个最现实的问题。

一是安全环保的可燃冰开采有待进一步研究。海底可燃冰的安全开采一直是亟待解决的问题之一,因此在 2012 年,美国能源部投入 650 万美元专门用于海洋可燃冰安全开采技术及方法研究^[2]。全球海底可燃冰中的甲烷总量约为地球大气中甲烷总量的 3 000 倍,并且甲烷的温室效应是二氧化碳的 20 倍,若海底可燃冰中的甲烷逃逸到大气中将产生无法想象的后果。同时若甲烷从可燃冰中释出,还会改变海底沉积物的物理性质,极大地降低海底沉积物的工程力学特性,使海底软化,出现大规模的海底滑坡,毁坏海底输电电缆、通信电缆、海洋石油钻井平台等海底工程设施,对海底或陆地表面生物群落产生巨大影响^[15]。近年来,美国等国家通过相关的研究计划,在理解可燃冰资源的性状和产出范围,以及提取甲烷的钻探和生产试验方面,已经取得了实质性进展,这些研究成果为今后实现可持续的、经济和环境上可行的可燃冰开发提供了依据^[6]。

二是可燃冰的开采成本较高,关键技术仍未取得突破,商业化过程举步维艰。不少科学家认为,一旦安全开采技术获得突破性进展,那么可燃冰立刻会成为 21 世纪的主要能源。在目前油气价格较低的背景下,美国大部分油气公司都采取削减和放弃虽然回报高,但回报周期长、风险高的可燃冰研发项目的策略。根据相关石油天然气金属矿物资源机构的估算,从海底可燃冰中提取 1 立方米天然气的费用远高于美国天然气的开发成本,这是各国一再推迟商业开采时间表的重要原因^[4]。为此,美国华人石油协会原会长、壳牌石油勘探开发公司地球物理

工程师埃迪·李(Eddy Lee)博士和雪佛龙石油公司的高级工程师金虹博士表示,目前全球探明的可燃冰深海海底储量约占 95%,浅海及大陆架储量约占 4%,陆地储量约占 1%,大部分可燃冰与油气田共生。在目前油气价格较低的背景下,出于开采成本的考虑,加之开采可燃冰对自然环境的潜在风险和开采技术要求高,所以埃克森美孚、雪佛龙、壳牌等美国大型石油公司对可燃冰研发和商业化方面投入的动力不足,基本上都是美国政府资助的大学和科研机构在进行相关研究。

3 对我国可燃冰研究开发的建议

近年来我国在 863 计划、国家自然科学基金委支持的项目中开展了可燃冰采集技术、遥感技术、物理模拟和数值模拟技术、地震识别技术等一系列研究并取得阶段性进展,特别是我国在南海神狐海域进行可燃冰试采,创造了产气时长和总量的世界纪录,取得了重大突破,但对于可燃冰的勘察手段、形成机理依然处于探索阶段,与国际先进水平仍存在一定差距。我国应看清自身的短板,不断进行政策支持、技术攻关。建议如下:

(1) 加强顶层设计,攻关开发关键技术,早日实现可燃冰商业化开采。可燃冰研发需要发挥政府部门统筹调度研发资源的优势,明确可燃冰的研发战略,制定适合我国可燃冰商业化开采规划和技术路线,统一协调大学、科研院所、公司等机构的研发工作,构建由企业、高校和科研院所联动的研发体系,统一制定研发进度路线。

(2) 加快基础科研和技术研发,突破关键理论和技术难题。我国可燃冰开采技术目前处于世界领先地位,但在基础研究和理论研究方面仍与世界领先水平存在差距。应当加大政策和资金支持力度,加快基础科学研究和技术研发,在可燃冰的基本物理化学性质及其测试技术和方法、勘探方法、取样技术、开采方法等方面设立专项研发计划,给予专项资金支持,争取早日取得关键理论和技术的突破。

(3) 加强与美国科研机构的交流合作。作为最早建立国家级可燃冰研发计划的国家之一,美国在可燃冰研发规划、资金保障、组织实施等方面的举措值得我国借鉴。我国需要加强与美国科研机构、大型石油公司和技术服务公司的交流合作,积极跟

踪参与可燃冰领域的研发计划项目，尽快在基础研究和理论研究方面补齐短板。■

参考文献：

- [1] 人民日报. 我国首次海域可燃冰试采成功 [EB/OL]. [2017-05-18]. http://paper.people.com.cn/rmrb/html/2017-05/19/nw.D110000renmrb_20170519_3-01.htm.
- [2] 赵羿羽, 曾晓光, 郎舒妍. 海底可燃冰开采技术动向 [J]. 中国船检, 2017 (2) : 89-91.
- [3] 宗新轩, 张抒意, 冷岳阳, 等. 可燃冰的研究进展与思考 [J]. 化学与黏合, 2017, 39 (1) : 51-55, 64.
- [4] 张寒松. 清洁能源可燃冰研究现状与前景 [J]. 应用能源技术, 2014, 200 (8) : 54-57.
- [5] Public Law 106-193. Methane Hydrate Research and Development Act of 2000[Z]. 2000-05-02.
- [6] 石宏仁, 唐金荣. 美国天然气水合物开发计划透视 [EB/OL]. (2010-05-31)[2017-07-25]. http://www.mlr.gov.cn/xwdt/jrxw/201005/t20100531_150587.htm.
- [7] US Department of Energy. Methane hydrate advisory committee[EB/OL]. [2017-07-25]. <https://energy.gov/fe/services/advisory-committees/methane-hydrate-advisory-committee>.
- [8] Secretary of Energy Advisory Board. Report of Task Force Report on Methane Hydrate[R]. US: Department of Energy, 2016.
- [9] US Department of Energy. Quadrennial Technology Review 2015 Gas Hydrates Research and Development[R]. US: Department of Energy, 2016.
- [10] Public Law 109-58. Methane hydrate research of the energy policy act of 2005[Z]. 2005-08-08.
- [11] Ray Boswell. An Interagency Roadmap for Methane Hydrate Research and Development: 2015—2030[R]. US: Department of Energy, 2013.
- [12] US Department of Energy. DOE announces \$3.8 million investment in new methane gas hydrate research[EB/OL]. [2017-07-15]. <https://energy.gov/fe/articles/doe-announces-38-million-investment-new-methane-gas-hydrate-research>.
- [13] US Department of Energy. 2017 gulf of Mexico drilling and coring expedition[EB/OL]. [2017-07-23]. <https://www.netl.doe.gov/research/oil-and-gas/methane-hydrates/2017-gulf-of-mexico-drilling-and-coring-expedition>.
- [14] 胡杨, 郑剑, 王晓宁. 国内外可燃冰研究发展现状及前景展望 [J]. 环境科学, 2016 (6) : 190.
- [15] 王浩, 王继平. 天然气水合物开发可能导致的风险 [J]. 当代化工, 2017, 46 (3) : 485-488.

Flaming Ice Research and Mining Technology Development Status in the United States

HUANG He

(Ministry of Science and Technology of China, Beijing 100862)

Abstract: By combing and analyzing the development of flaming ice research and mining technology in the United States, this paper discusses the main problems and concludes the practices and experience of the U.S. government in promoting research and exploitation of flaming ice, capital investment, laws and regulations, and then puts forward suggestions for China, such as enhancing top-level design and basic research, strengthening scientific exchanges and cooperation with the United States.

Key words: U.S.; flaming ice; natural gas hydrate; mining technology